SCIENCE

MALADIES MENTALES : une prise en charge insuffisante

POUR LA SCIENCE

Octobre 2011 - n° 408

www.pourlascience.fr

Edition française de Scientific American

L'héritage de Galois

Des équations et des courbes pour la cryptographie

L'arsenic, polluant naturel
Comment l'éliminer de l'eau ?

Vie extraterrestre
L'homme serait bien seul !

Les moustiques
Experts en odeur humaine

M 02687 - 408 - F: 6,20 €

Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € -Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 EUR - 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.

Votre vocation
fait votre fierté,
la nôtre est de vous assurer.



OFFRE SPÉCIALE POUR LES MOINS DE 30 ANS

100 € OFFERTS*
sur vos assurances
AUTO et SANTÉ
Idéal pour bien débuter !

Pour découvrir les avantages qui vous sont réservés :

- Appelez le **0 970 809 809** (numéro non surtaxé)
- Connectez-vous sur **www.gmf.fr**

GMF
Assurément Humain

* Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la première année à la souscription d'un contrat d'assurance auto et/ou d'un contrat de complémentaire santé. Offre non cumulable avec le tarif avant'âge 30 et valable jusqu'au 31/12/2011. Conditions et détails des prestations dans votre agence GMF ou sur www.gmf.fr.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde, GMF Vie, Assistance Juridique et Fidélia Assistance - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.
ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Chartres 323 562 678 - Siège social : 7, avenue Marcel Proust 28932 Chartres Cedex 9 - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.
Les contrats complémentaires santé sont souscrits par l'A.D.A.C.C.S. auprès de GMF Assurances et la Sauvegarde.

POUR LA SCIENCE
www.pourlascience.fr

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06
Standard : Tel. 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, Bénédicte Salthun-Lassalle, Cécile Fourrage
Dossiers Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Rédacteur : Guillaume Jacquemont
Cerveau & Psycho
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju
Marketing : Élise Abib
Direction financière : Anne Gusdorf
Direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne
Presse et communication : Susan Mackie
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Maxime Boulet-Audet, Jacques Boutet de Monvel, Christian Boyer, Didier Despois, John Eades, Tristan Ferroir, Sophie Gallé-Soas, Marie-Lise Gougeon, Masaki Hori, Évelyne Host-Platret, André Lassoudière, Hervé Le Guyader, Jacqueline Levilliers, Pascale Lherminier, Marie-Christine Maurel, Patrick Michel, Christophe Pichon, Bernard Pouligny, Jean Schneider, Michel Zelvelder.

PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS
Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04
Espace abonnements :
http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience
Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr
Adresse postale :
Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06
Commande de livres ou de magazines :
0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE
Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec, H3N 1W3 Canada.
Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis
Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-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 2010

Pas banal !

Selon Norbert Verdier, maître de conférences en mathématiques appliquées à l'IUT de Cachan et à l'Université Paris-Sud, « À 15 ans, [Évariste Galois] rejette les traités élémentaires d'algèbre, qui l'ennuient, et apprend l'algèbre dans Lagrange. À 16 ans, il commence à inventer ». À 17 ans, il envoie son premier mémoire à l'Académie. À 18 ans, il passe son baccalauréat. À 19 ans, il devient un républicain actif dans une France révolutionnaire. À 20 ans, il adresse son mémoire *Sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux* à l'Académie, et il est arrêté et condamné à six mois de prison. Le 30 mai 1832, alors qu'il vient tout juste d'être libéré, il est provoqué en duel près de l'étang de la Glacière, à Gentilly. Ayant reçu une balle dans l'abdomen et laissé pour mort, il décède le 31 mai, à l'âge de 20 ans et 7 mois. « Je prie les patriotes mes amis, de ne pas me reprocher de mourir autrement que pour le pays. Je meurs victime d'une infâme coquette, et de deux dupes de cette coquette », écrivit-il dans l'une de ses dernières lettres. Les découvertes de cette comète mathématique, aussi éphémère que lumineuse, n'en finissent pas de nourrir les mathématiques contemporaines *(voir De Galois aux corps finis, page 24)*.

Comète mathématique...

Ce jeune mathématicien était tout sauf acratopège. Dans son *Blocnotes (voir page 4)*, Didier Nordon évoque au détour d'une chronique météorologique un temps acratopège, c'est-à-dire quelconque, ni beau ni mauvais. Or ce qualificatif s'applique aussi aux nombres qui n'ont aucune propriété particulière et que recherchent certains mathématiciens. Pourtant, s'il a la propriété de ne pas avoir de propriété particulière, un nombre acratopège a au moins celle-là... Dès lors, les nombres acratopèges existent-ils vraiment ?

Les conditions de la vie sur la Terre ne sont pas quelconques non plus. Elles semblent même si particulières que les astronomes qui recherchent des signes de l'éventuelle présence d'une vie intelligente dans l'Univers parviennent à la conclusion que ces contraintes ne sont remplies sur aucune des planètes extrasolaires situées dans notre région galactique *(voir Seuls dans l'Univers ?, page 54)*.

Et sans doute rien n'est-il quelconque ou anodin en sciences. Pas même les sujets qui peuvent le paraître à première vue, telle l'attirance des moustiques pour le sang humain. Ainsi, non seulement l'anophèle, le moustique vecteur du paludisme, détecte spécifiquement l'odeur humaine, mais il le fait avec une précision surprenante, puisqu'il repère ses proies à plusieurs dizaines de mètres de distance *(voir Le moustique, expert en odeur humaine, page 48)*. La science nous livre sans cesse des informations peu banales.

SOMMAIRE

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

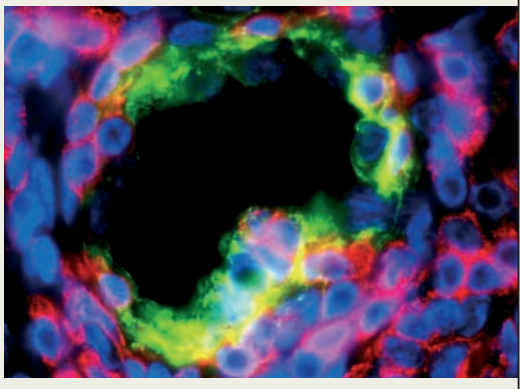
Actualités

6 La physique des auréoles de café

9 Prédire les taches solaires

11 Morpion solitaire : record en 178 coups

12 Des vaisseaux sanguins contre les tumeurs



... et bien d'autres sujets.

15 ON EN REPARLE

Opinions

16 POINT DE VUE
Maladies mentales : les oubliées de la médecine et des pouvoirs publics !
Michel Hamon

17 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Recycler le béton
Amaury Cudeville

21 COURRIER DES LECTEURS

22 VRAI OU FAUX
Tombe-t-on malade quand on prend froid ?
Luc de Saint-Martin Pernot

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage, p. 25 et 80.
En couverture : © Bruno Bourgeois

À LA UNE



24 MATHÉMATIQUES
De Galois aux corps finis
Antoine Chambert-Loir

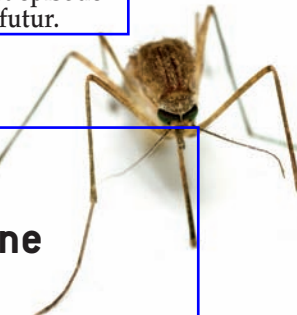
Le 25 octobre 2011 marque le bicentenaire de la naissance d'Évariste Galois. Les découvertes du fougueux jeune homme, notamment sur les structures algébriques nommées corps finis, ont profondément marqué les mathématiques.

32 ÉVOLUTION
L'évolution de l'œil
Trevor Lamb

Nos lointains ancêtres auraient été dotés d'un proto-œil qui captait la lumière, mais ne permettait pas de voir. Ensuite, l'œil a acquis des caractéristiques qui lui ont conféré la vision. Cette évolution aurait été très rapide : à peine 100 millions d'années.

40 CLIMATOLOGIE
Le dernier grand réchauffement
Lee Kump

De nouveaux indices suggèrent que le plus brutal des réchauffements climatiques préhistoriques s'est fait à un rythme modéré comparé à celui que nous connaissons aujourd'hui. Cet épisode est riche d'enseignements pour notre futur.



48 BIOLOGIE ANIMALE
Le moustique, expert en odeur humaine
John Carlson et Allison Carey

Le décryptage du mécanisme par lequel les moustiques flairent les humains pourrait conduire à des pièges et des produits antimoustiques plus efficaces pour lutter contre le paludisme.

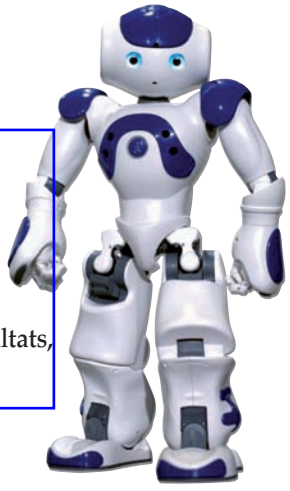
© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

54 ASTRONOMIE
Seuls dans l'Univers ?
Howard Smith
Malgré la découverte de nombreuses planètes extrasolaires, l'existence d'une civilisation extraterrestre dans notre région de la Galaxie serait peu probable.



62 IMMUNOLOGIE
Concevoir plus rapidement des vaccins
Alan Aderem
L'analyse simultanée de toutes les composantes du système immunitaire après une vaccination accélérerait la mise au point de vaccins efficaces, et porterait un coup fatal au virus du sida.

68 ROBOTIQUE
Les robots font de la science
Ross King
Des machines peuvent-elles émettre des hypothèses, réaliser des expériences et évaluer les résultats, sans l'intervention de l'homme ? Des prototypes montrent que oui.



76 ENVIRONNEMENT
Un fléau mondial : la contamination de l'eau par l'arsenic
R. Millot, L. Charlet et D. Polya
Dans plusieurs régions du monde, l'eau contient de l'arsenic. Cet élément y est naturellement présent, mais l'utilisation de puits profonds a fait augmenter sa concentration. Des solutions de dépollution sont à l'étude.

Regards

84 HISTOIRE DES SCIENCES
L'art de la navigation dans le Pacifique
Emmanuel Desclèves
Sans cartes ni instruments d'aucune sorte, les peuples océaniens ont conquis le Pacifique bien avant les Européens, grâce à une connaissance exceptionnelle des mers et de la navigation qui n'a rien à envier aux pratiques occidentales.

88 LOGIQUE & CALCUL
La maîtrise des nombres premiers
Jean-Paul Delahaye
Comme l'eau et le feu, les polynômes et les nombres premiers se rencontrent et donnent naissance à un violent bouillonnement... mathématique.

94 ART & SCIENCE
Donner à voir les mathématiques
Loïc Mangin

96 IDÉES DE PHYSIQUE
Juste une mise au point
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

101 SCIENCE & GASTRONOMIE
Mijotons
Hervé This

102 À LIRE

Rendez-vous sur POUR LA SCIENCE.fr

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

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

www.pourlascience.fr

UN TEMPS QUELCONQUE OU ACRATOPÈGE ?

« Temps pluvieux au Nord, plus jeune au Sud ». À part ce jeu de mots, je ne vois d'autre moyen, pour atténuer l'ennui des conversations obligées sur la pluie et le beau temps, que de renouveler le vocabulaire.

Ne dites pas que la sécheresse vous inquiète. Dites que le stress hydrique aggravé risque d'avoir des conséquences négatives à court et/ou moyen terme.

Laissez les enfants s'écrier, tout excités : « Il neige ! » Quant à vous, soyez posé : « Nous affrontons actuellement un épisode neigeux exceptionnel. »

Les jours où le vulgaire s'exclame : « Quel temps de chien ! », plaignez-vous de la canicule. Personne ne comprendra, ce qui apportera une plaisante touche d'imprévu dans un type de dialogue voué à ne rien dire. Pourtant, vous aurez parlé juste, puisque le mot canicule dérive du latin *canis*, chien. (À Rome, la constellation du Grand Chien était bien visible en été.)

Si le temps est trop froid, faites observer que les températures sont en dessous des normales saisonnières. Même chose, *mutatis mutandis*, si le temps est trop chaud. En ce cas, ajouter une dissertation alarmiste sur le réchauffement climatique sera apprécié.

Enfin, si le temps n'est ni chaud ni froid, ni sec ni humide, ni agréable ni désagréable, ne vous découragez pas. Il y a quand même moyen d'en parler. À cas rare, mot rare. Un adjectif existe, qui sert à qualifier les objets dépourvus de propriété particulière, objets sans autre caractéristique que de ne pas en avoir. Déclarez : « Quel temps acratopège, aujourd'hui ! »



PROFONDEURS AMBIGUËS

L'expression « une idée profonde » a beau être fréquente dans la bouche des chercheurs, ceux-ci précisent rarement ce qu'ils entendent par « profond ». Sachons gré à William Byers de l'avoir fait. Sa conclusion surprendra : ce mathématicien soutient, non sans arguments, que la profondeur d'une idée réside dans son ambiguïté.

Il est en effet dans la nature du monde d'être ambigu. L'équation $\mathcal{E}=mc^2$ montre que la réalité physique peut être pensée comme matière ou comme énergie ; l'électron est, irréductiblement, onde et particule. De même, le hasard est trop ambigu pour qu'on puisse le définir. Chaque définition du hasard produit sa propre réalité, qui doit ensuite être comprise. Le nombre, ambigu lui aussi, relève du discontinu (les entiers) et du continu (les réels). Quant aux mathématiques, elles sont « l'art de donner le même nom à des choses différentes » (Poincaré) : un même objet prend donc l'aspect de choses différentes selon le regard qu'on porte sur lui. Ambiguïté toujours !

Formaliser une situation ouvre une porte permettant une exploration, mais on perd quelque chose : la situation initiale est multiple, et on la réduit à des concepts univoques. Plus fidèles à la nature que les idées précises, les idées ambiguës en embrassent une part plus grande. Dynamiques, elles s'appliquent à différents contextes. En cela, elles sont profondes (William Byers, *The Blind Spot. Science and the Crisis of Uncertainty*, Princeton University Press, 2011).



JUGEMENTS À LA HACHE

Lancé dans cette jungle qu'est l'humanité, chacun est constamment amené à pressentir qui va pouvoir être son ami, qui risque d'être son ennemi. Face à une nouvelle rencontre, les formules « Il a une bonne tête » ou « Quelle sale gueule ! » viennent facilement à l'esprit. Ces jugements sont d'ailleurs assez fiables, parce qu'ils ont quelque chose d'une prophétie autoréalisatrice : si je trouve quelqu'un antipathique, mon attitude envers lui s'en ressentira, et son attitude envers moi s'en ressentira à son tour.

Les théories qui, jadis, ont prétendu établir des relations entre l'apparence physique et le caractère passent aujourd'hui pour ridicules (la physiognomonie, la phrénologie), ou ont engendré des horreurs (l'opposition entre brachycéphales et dolichocéphales). La morphopsychologie, comme on dit désormais, court les mêmes risques. L'homme est un animal dangereux. Lui mettre entre les mains une théorie censée révéler la vérité des gens d'après leur mine est imprudent. Il est des domaines qu'il vaut mieux laisser à la subjectivité plutôt qu'essayer de les rendre objectifs.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

PAS DE PYTHIES

On en fait souvent le compliment – après coup – aux romanciers : mieux que d'autres, ils anticipent l'évolution d'une société. Kafka, par exemple, a pressenti le rôle des bureaucraties. Les essayistes passent pour moins perspicaces. Les scénarios qui se réalisent ne sont jamais ceux qu'ils avaient envisagés.

C'est que les romanciers disposent d'un avantage décisif : on n'attend pas de démonstration de leur part. Pourvu qu'ils aient une intuition et sachent la mettre en scène, le lecteur est satisfait. Les essayistes, eux, sont astreints à la rigueur déductive. Ils ne doivent pas laisser libre cours à leur imagination, mais étayer leurs prévisions par l'analyse d'indices. C'est justement cela qui augmente leurs risques d'erreurs ! Il y a en effet plus d'indices trompeurs que d'indices fiables. Tel phénomène objectivement négligeable jusqu'à maintenant peut, du jour au lendemain, prendre une importance majeure. Tel autre phénomène dont « tout » laisse prévoir qu'il va occuper de plus en plus de place peut, sans crier gare, se dégonfler et disparaître. Il y a trop d'irrationnel dans le comportement d'une société, trop de créativité, trop d'interactions imprévisibles, pour qu'elle suive des règles permettant de dire où elle va. Un romancier est plus à l'aise qu'un essayiste pour accorder du crédit à une sensation fugitive qu'il est à peu près seul à éprouver.

Pour ce qui est de deviner l'avenir, la démonstration est plus hasardeuse que l'intuition. ■



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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



La paléopathologie
Olivier Dutour
ISBN 978-2-7355-0750-4
176 p., ill. couleur, 15,5 x 20 cm
23 €

Ce petit volume n'est ni un manuel ni un traité. Son propos est d'aborder la paléopathologie, née dans le berceau de la préhistoire et de la paléontologie, de la rencontre des sciences médicales et archéologiques, sous la forme de réponses à dix questions simples.
Il est destiné aux étudiants de master de différentes filières en sciences humaines, biologiques, médicales ou de l'environnement, désireux d'approfondir leurs connaissances dans le cadre de leur cursus ou simplement curieux de découvrir cette discipline particulière, et plus largement à tous ceux qui s'intéressent aux sciences du passé et de la santé.



Deux siècles de géographie française
Une anthologie
sous la direction de
Marie-Claire Robic, Jean-Louis Tissier et Philippe Pinchemel
ISBN 978-2-7355-0735-1
560 p., 21,5 x 26 cm
45 €

Cette anthologie rassemble près de cent textes attestant de la manière de faire des géographes français et des multiples questions qu'ils posent sur le monde. Géographes-voyageurs, encyclopédistes, universitaires, fondateurs ou rénovateurs, théoriciens ou praticiens de l'espace : on a cherché ici à rendre compte de la curiosité qui, toujours, les anime. Comment ce monde est-il habité, transformé, vécu, imaginé, mais aussi construit par la réflexion, par le discours et par l'image ? Partie prenante des sciences sociales, la géographie développe ses méthodes et ses styles pour interroger les rapports des individus et des sociétés à la nature, à l'espace et aux Autres. Dans une visée pédagogique, les textes proposés à l'analyse sont accompagnés de notices qui contextualisent à la fois l'auteur et l'œuvre de référence.

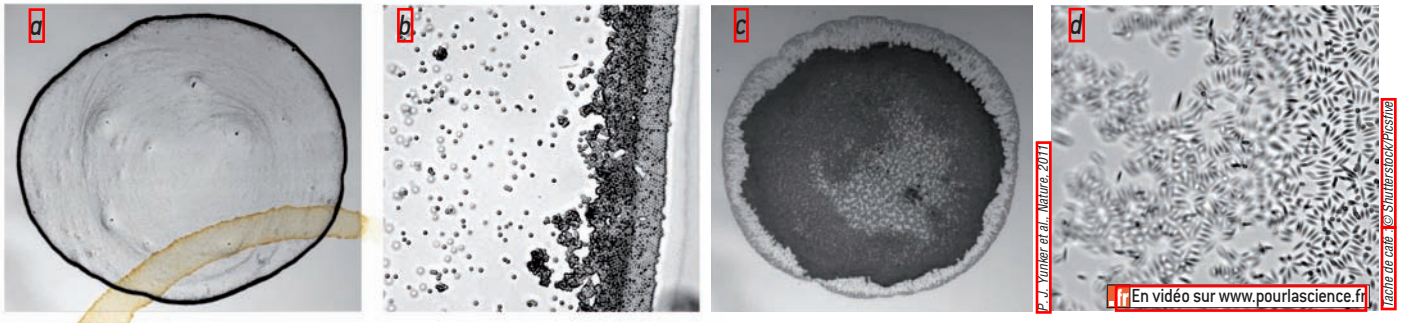
* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS *

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Physique

La physique des auréoles de café

Lorsqu'on renverse du café, les taches formées quand le liquide a séché sont plus sombres sur leur pourtour. Si les grains de la mouture étaient oblongs, les taches seraient dépourvues d'auréoles.



Lorsqu'une goutte de microsphères en suspension dans de l'eau sèche, les particules migrent vers la périphérie *(a)*, où elles s'agrègent le long de la ligne de contact de la goutte avec le support *(b, zoom de l'image a)* : c'est l'effet « rond de café ». Lorsque les particules sont ellipsoïdales, en revanche, elles se déposent de façon relativement uniforme *(c)*. Les ellipsoïdes sont adsorbés à la surface, où ils forment des agrégats peu denses qui les empêchent de rejoindre la ligne de contact de la goutte avec le support *(d, zoom de l'image c)* : il n'y a pas d'effet rond de café.

Prendre son petit déjeuner peut conduire à des découvertes scientifiques inattendues. Des physiciens de l'Université de Pennsylvanie, aux États-Unis, ont montré comment supprimer un effet que les amateurs de café connaissent bien, l'effet « rond de café » : lorsqu'une goutte de café sèche sur une surface, la couleur du café – ses particules pigmentées – se concentre sur la bordure de la goutte, formant un anneau sombre.

Cet effet est l'une des bêtes noires des fabricants d'encres et de peintures, qui utilisent des solvants parfois inflammables ou toxiques, ou des techniques coûteuses, pour que les pigments soient répartis de façon homogène après séchage.

En étudiant le séchage d'une goutte de microbilles en suspension dans de l'eau, Peter Yunker et ses collègues ont montré qu'il suffit de changer la forme des particules pour annuler l'effet rond de café. Les mécanismes physiques à l'œuvre résultent tous de la tension superficielle de l'eau : fruit de la force de cohésion des molécules d'eau, cette propriété qui concerne les interfaces est le moteur à la fois de l'effet rond de café et de son antidote.

Lorsque la goutte sèche sur une table ou toute surface non lisse, ses bords « s'agrippent » au support et son diamètre ne rétrécit pas. À mesure que le liquide s'évapore sur les bords de la goutte, la tension superficielle a pour effet de repousser le liquide du centre vers la périphérie, et la goutte s'aplatit peu à peu. Entraînées par ce mouvement, les particules en suspension dans le liquide s'accumulent à la périphérie de la goutte, formant un anneau coloré.

Les physiciens américains ont montré que cet effet se produit lorsque les particules sont sphériques, mais disparaît lorsqu'elles ont une forme ellipsoïdale. Au lieu de se laisser porter vers la périphérie de la goutte, les particules ellipsoïdales forment de grands agrégats à l'interface eau-air. Ces assemblages variés freinent les écoulements dans la goutte, créant une sorte de membrane résistante et visqueuse.

Pourquoi les ellipsoïdes s'agrègent-ils ? À cause de forces de capillarité, qui apparaissent entre les particules proches flottant le long de l'interface eau-air. Contrairement à une microsphère, une particule ellipsoïdale a un contour de courbure variable, ce qui distord fortement l'interface eau-air : sur les flancs de l'ellipsoïde, le liquide est tiré vers le haut, tandis qu'il est poussé vers le bas près de ses deux extrémités. Ces déformations engendrent des forces qui poussent les ellipsoïdes les uns vers les autres. Ce comportement, lié à la tension superficielle de l'eau, disparaît si l'on diminue cette dernière en ajoutant un surfactant au liquide.

Les chercheurs se sont aussi aperçus qu'il suffisait de la présence de quelques particules ellipsoïdales parmi les particules sphériques pour éviter l'effet rond de café. Une piste qui pourrait simplifier la fabrication des encres et des peintures.

Ironie de l'histoire : le comportement des ellipsoïdes dans la goutte s'apparente à celui de... céréales *Cheerios* dans un bol de lait. En forme d'anneaux, ces céréales ont aussi tendance à s'agréger au centre du bol : sous le poids des céréales flottant en surface, l'interface air-lait se déforme et, pour minimiser cette déformation, la tension de surface pousse les particules les unes vers les autres. Cet effet est connu sous le nom d'effet *Cheerios*… Bon appétit !

➜ Marie-Neige Cordonnier

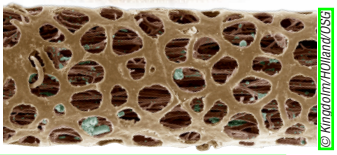
P. J. Yunker et al., Nature, vol. 476, pp. 308-311, 2011 ; J. Vermant, ibid., pp. 286-287

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Biologie animale

Un rat empoisonneur





© Kingdon/Holland/OSG

Le rat à crête africain *(en haut)* et la structure microscopique des poils latéraux de sa fourrure, percés de vacuoles et remplis de fibres *(en bas)*.

Les chasseurs d'éléphants est-africains empoisonnaient leurs flèches avec une substance toxique extraite de l'arbre ouabaïo et nommée ouabaïne. Un rongeur, le rat à crête africain *Lophiomys imhausi*, utilise lui aussi ce poison : Jonathan Kingdon et ses collègues, de l'Université d'Oxford, ont montré qu'il applique la toxine végétale sur son pelage pour repousser ses prédateurs.

En fournissant du bois de l'arbre ouabaïo à un rat à crête en captivité, les biologistes ont observé l'animal mastiquer l'écorce, puis enduire les flancs de sa fourrure avec sa salive imbibée de toxine. L'étude de la structure microscopique des poils latéraux a ensuite montré qu'ils sont formés d'un cylindre perforé par des vacuoles et renfermant des fibres. Ainsi, la salive empoisonnée est absorbée par capillarité à l'intérieur du cylindre et retenue par les fibres ; puis elle est délivrée au premier contact avec le prédateur.

Une question reste en suspens : comment l'animal n'est-il pas lui même empoisonné par l'ouabaïne des écorces qu'il mastique et ingère ?

→ Cécile Fourrage

J. Kingdon et al., Proc. R. Soc. B, en ligne, 3 août 2011

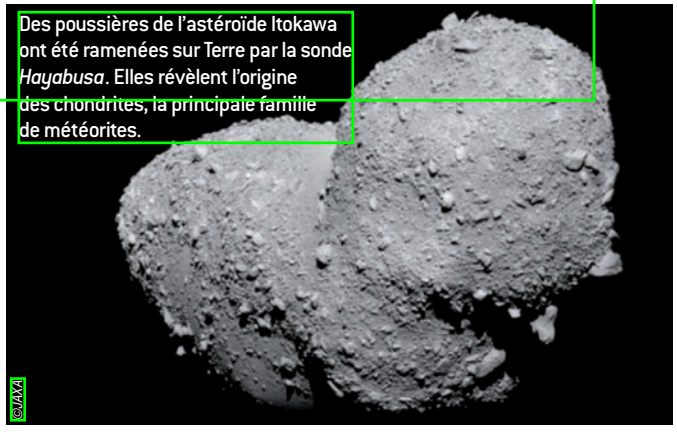
Astronomie

Des astéroïdes à l'origine des météorites

Environ 30 000 météorites tombent sur Terre chaque année. Quatre-vingt pour cent sont des chondrites, les météorites qui seraient à l'origine de la formation de la Terre, il y a 4,6 milliards d'années. D'où proviennent-elles ? Tomoki Nakamura et ses collègues, de l'Université Tohoku, au Japon, ont prouvé que les chondrites dites ordinaires sont issues des astéroïdes de type S.

Les météorites proviennent d'un corps parent, tel qu'un astéroïde ou une planète, dont elles ont été arrachées par un choc puissant. Il en existe plusieurs familles, caractérisées par leur composition minéralogique et leur structure. Les chondrites dites ordinaires sont constituées d'olivines, de pyroxènes, de feldspaths, de métal et de chondres (petites sphères leur donnant leur nom).

Les astéroïdes sont aussi classés suivant leur brillance et leur minéralogie, déterminée par spectroscopie. Ceux du type S représentent 17 pour cent des astéroïdes et sont situés pour la plupart dans la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. En comparant les spectres, les astronomes ont mis en évidence une filiation entre types d'astéroïdes et familles de météorites. Ainsi, le spectre des astéroïdes de type S ressemble à celui des chondrites ordinaires.



©JAXA

Des poussières de l'astéroïde Itokawa ont été ramenées sur Terre par la sonde *Hayabusa*. Elles révèlent l'origine des chondrites, la principale famille de météorites.

Pour confirmer ce lien, l'équipe de T. Nakamura a analysé des poussières de l'astéroïde de type S Itokawa, prélevées par la sonde japonaise *Hayabusa*. Elle a identifié 1 534 particules rocheuses, de 3 à 40 micromètres de diamètre, dont la plupart ont une composition et une structure voisines de celles des chondrites.

Les échantillons d'Itokawa sont les premiers issus d'un astéroïde qu'une mission spatiale rapporte sur Terre. En les comparant avec ceux de comètes, des collections de météorites et des matériaux prélevés sur la Lune, les astronomes espèrent mieux comprendre la formation du Système solaire et de la Terre.

→ C. F.

Science, vol. 333, pp. 113-116, 2011

En bref

L'ESTOMAC D'ÖTZI

Le contenu de l'estomac d'Ötzi, cet homme tué d'une flèche il y a 4 500 ans et découvert il y a 20 ans dans un glacier, a été identifié par les chercheurs de l'Institut pour les momies et l'homme des glaces à Bolzano, en Italie. L'estomac était plein et contenait surtout de la viande de bouquetin. L'homme des glaces avait ainsi pris son dernier repas moins d'une heure avant de mourir, ce qui suggère qu'il n'était pas en fuite au moment où il reçut la flèche fatale. D'après ses dents cariées, Ötzi ne devait pas manger souvent de la viande, mais se nourrir surtout de céréales.

UN MARQUEUR CANCÉREUX

L'équipe de Rosette Lidereau, à l'Institut Curie, a montré que le niveau d'expression d'un gène nommé *Kindlin-1* permet de prévoir le risque que des métastases pulmonaires se développent chez une femme atteinte d'un cancer du sein. De plus, en inhibant le gène dans des modèles animaux, les biologistes ont bloqué la croissance des tumeurs et le développement de métastases pulmonaires. Au-delà de son rôle diagnostique, ce gène pourrait ainsi devenir une cible thérapeutique.

RHINOCÉROS TIBÉTAIN

Le rhinocéros laineux est, avec le mammouth, un des représentants de la mégafaune répandue au Pléistocène, époque des dernières glaciations. Selon une équipe sino-américaine, l'animal serait originaire de l'Himalaya : elle y a en effet découvert un crâne complet de rhinocéros laineux datant de 3,6 millions d'années. L'espèce se serait ainsi adaptée au froid himalayen avant de se disperser lorsque le climat a commencé à se refroidir il y a 2,8 millions d'années.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

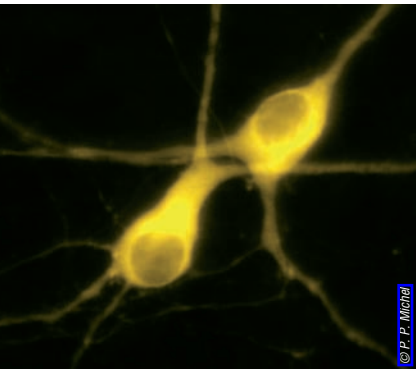
En bref

UNE PLANÈTE EN DIAMANT

L'équipe de Matthew Bailes, de l'Université de Melbourne, pense avoir découvert une « planète » en diamant. Distante de 4 000 années-lumière, elle gravite à 600 000 kilomètres d'un pulsar et boucle une orbite en à peine plus de deux heures. Sa masse est proche de celle de Jupiter, pour un diamètre cinq fois supérieur à celui de la Terre. Ce serait le reliquat, composé de carbone et d'oxygène, d'une étoile compagnon dépouillée de son enveloppe par le pulsar. Et compte tenu de la densité, le carbone y serait sous forme de diamant.

UN TSUNAMI À OLYMPIE

Olympie, antique ville grecque située aujourd'hui à 22 kilomètres à l'intérieur des terres et à 33 mètres au-dessus du niveau de la mer, aurait été ensevelie il y a 2 500 ans sous des tsunamis. C'est ce que pense Andreas Vött, de l'Université de Mayence, qui a observé des coquillages marins dans la couche de sédiments déposés sur la ville. L'épaisseur de cette strate, qui atteint huit mètres, et son désordre suggèrent que des raz-de-marée ont remonté la rivière en balayant la ville, amplifiés par le lit très étroit à cet endroit.



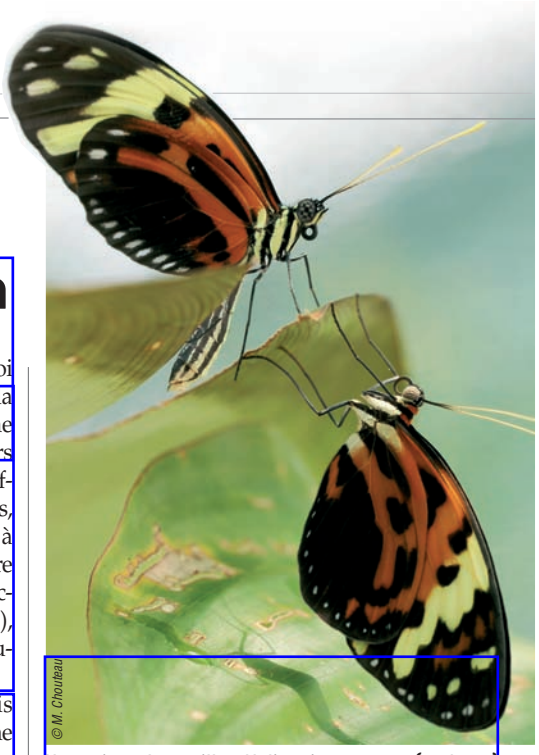
Deux neurones dopaminergiques en culture dans le modèle de la maladie de Parkinson utilisé par les neurobiologistes.

Biologie animale

Supergène de papillon

Le mimétisme dit mullérien explique pourquoi deux espèces toxiques distinctes adoptent la même livrée signalant le danger : une même apparence accentue la répulsion qu'éprouvent leurs prédateurs (ils apprennent plus vite) et améliore l'efficacité de la défense. Ainsi, à travers plusieurs variants, le papillon amazonien *Heliconius numata* ressemble à quelque sept espèces différentes de papillons du genre *Melinaea*. Mathieu Joron, du Laboratoire Origine, structure et évolution de la biodiversité (CNRS/MNHN), avec des collègues de divers instituts européens, a élucidé les bases génétiques de ce mimétisme.

Les entomologistes se sont intéressés à trois variants de *Heliconius numata*, et en particulier à une région du chromosome 15 qui régit la formation des motifs sur les ailes. Ils ont découvert un bloc d'environ 30 gènes dont l'un, par exemple, code la formation d'une bande jaune, un autre la formation de petits points noirs sur l'aile postérieure, etc. L'ordre de ces gènes diffère d'un variant à l'autre. Qui plus est, le sens n'est pas le même, des régions d'ADN se retrouvant en position inversée d'un individu à l'autre. À chaque combinaison chromosomique correspond un variant de *Heliconius numata* ressemblant à une espèce donnée de *Melinaea*. Ainsi, au cours de l'évolution, des inversions ont eu lieu sur ce chromosome, mettant en jeu des segments d'ADN portant quelques gènes. Or ces changements empêchent la recombinaison chromosomique (échange de segments chromosomiques entre deux régions homologues héritées de chaque parent) au moment de la formation des cellules sexuelles. De la sorte, le bloc de 30 gènes est pérennisé selon une combinaison propre à chaque variant et est hérité sans remaniement : ce bloc est nommé supergène. Sans ces inversions, les gènes du bloc seraient indépendants et soumis à la recombinaison. Il en résulterait un grand nombre de combinaisons et donc de variants aux motifs et couleurs distincts.



Un variant du papillon *Heliconius numata (en haut)* et l'espèce mimétique correspondante *Melinaea mneme (en bas)*.

→ Loïc Mangin

M. Joron et al., Nature, en ligne, 14 août 2011

Neurobiologie

Nicotine contre Parkinson

On savait déjà que la nicotine diminue la dégénérescence des neurones dopaminergiques (un type de neurones dont le neurotransmetteur est la dopamine) dans des modèles animaux de la maladie de Parkinson. Damien Toulorge, du Centre de recherche de l'Institut du cerveau et de la moelle épinière à Paris, et ses collègues viennent de montrer par quels mécanismes.

Les scientifiques ont utilisé des neurones dopaminergiques de rat ou de souris mis dans des conditions de culture qui favorisent leur dégénérescence. Ils ont travaillé avec des neurones dits normaux, mais aussi avec ceux de souris génétiquement modifiées qui n'expriment plus l'un des récepteurs nicotiniques (le sous-type alpha-7). L'ajout de faibles concentrations de nicotine (de 0,1 à 30 micromoles par litre) aux cultures protège les neurones dopaminergiques normaux, mais pas ceux dépourvus du récepteur alpha-7. Cela prouve que la nicotine empêche la mort des neurones dopaminergiques en stimulant ce récepteur.

Les neurobiologistes ont montré que l'activation de ce récepteur stimule les neurones dopaminergiques et déclenche l'entrée d'ions calcium dans leur cytoplasme. Cela active une voie de survie, un processus intracellulaire favorisant la survie des cellules, mettant en jeu notamment la calmoduline, molécule qui régule le calcium intracellulaire. Ces observations corroborent des travaux antérieurs qui suggéraient qu'une perte d'activité électrique associée à un déficit en calcium pouvait être à l'origine de la dégénérescence de ces neurones.

Les scientifiques espèrent développer un traitement neuroprotecteur grâce à la nicotine. Cela ne signifie pas pour autant qu'il faille fumer pour éviter la maladie de Parkinson !

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

The FASEB Journal, vol. 25, pp. 2563-2573, 2011

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Biologie végétale

L'ADN dopé par le broutage

Dans les pâturages, certaines plantes déclinent après avoir été broutées, mais d'autres « rebondissent » et produisent trois fois plus de graines ! Ken Paige et Daniel Scholes, de l'Université de l'Illinois, aux États-Unis, ont découvert qu'un mécanisme d'amplification de l'ADN chromosomique, nommé endoréduplication, en est la cause. Ils ont observé que, dans certaines variétés de la plante modèle *Arabidopsis thaliana*, le contenu en ADN chromosomique augmente considérablement après que l'extrémité de la plante a été sectionnée. L'auxine (une hormone induisant les divisions cellulaires normales) n'est plus présente, de sorte que le phénomène d'endoréduplication peut avoir lieu. L'ADN supplémentaire permettrait d'accroître la fabrication des protéines nécessaires à la production de fleurs, fruits et graines, favorisant la croissance et la reproduction de la plante.

On connaissait le rôle de l'endoréduplication dans la croissance de fruits, tels les poivrons, les melons et les tomates. Cette étude montre que ce mécanisme intervient également dans les stratégies de survie de certaines espèces végétales consommées par les herbivores.

➜ C. F.

D. Scholes et K. Paige, Ecology, vol. 92(8), pp. 1691-1698, 2011



Le broutage a pour conséquence d'augmenter chez certaines plantes les quantités d'ADN chromosomique.

© Shutterstock/Smareka

Astrobiologie

Nucléotides sur météorites

La Terre ne présente pas les mêmes cicatrices que les autres planètes telluriques du Système solaire ou la Lune, mais les scientifiques s'intéressent à son bombardement par des objets cosmiques pour deux raisons principales. D'abord, parce que ces chocs ont modelé la Terre et sa géologie – et pourraient encore avoir lieu. Ensuite, parce que les météorites auraient pu apporter des composants essentiels à l'apparition de la vie sur Terre. Une nouvelle étude, menée à l'Institut Carnegie de Washington, renforce cette idée. Les scientifiques ont analysé par spectroscopie 11 chondrites carbonées et une uréilite, météorite rare dont la composition chimique diffère de celle des chondrites. Ils y ont trouvé des traces d'adénine et de guanine, des bases constitutives de l'ADN, ainsi que trois analogues de bases peu présents sur Terre. Cela suggère que ces météorites n'auraient pas été contaminées par du matériel génétique terrien. D'autant que ni le sol ni la glace où ces météorites ont été trouvées ne contiennent ces différentes bases. La Terre aurait reçu de l'espace des éléments essentiels à la vie telle qu'on la connaît…

➜ B. S.-L.

M. P. Callahan et al., PNAS, en ligne, 11 août 2011.

Astrophysique

Prédire les taches solaires

Les taches solaires sont des régions de la surface du Soleil où de puissants champs magnétiques émergent. Elles produisent quelques jours après leur apparition des éruptions, qui éjectent des particules chargées dans l'espace. Ces dernières peuvent être dangereuses pour les astronautes, mais aussi pour les infrastructures électriques sur Terre. Pouvoir les anticiper permettrait ainsi de prendre des mesures pour s'en protéger.

Stathis Ilonidis, de l'Université Stanford, et son équipe ont réussi à prévoir l'émergence des taches solaires deux jours avant qu'elles n'apparaissent. La méthode de ces astronomes repose sur l'écoute des ondes acoustiques de notre étoile. Les phénomènes de convection qui se déroulent près de la surface engendrent des ondes qui se propagent vers l'intérieur, puis sont réfractées vers sa surface.

De même que sur Terre, la mesure des ondes sismiques nous permet de déduire la structure interne de notre planète, la mesure des temps de propagation des ondes acoustiques entre des endroits éloignés à la surface du Soleil permet de savoir ce qui se passe à l'intérieur de l'astre.

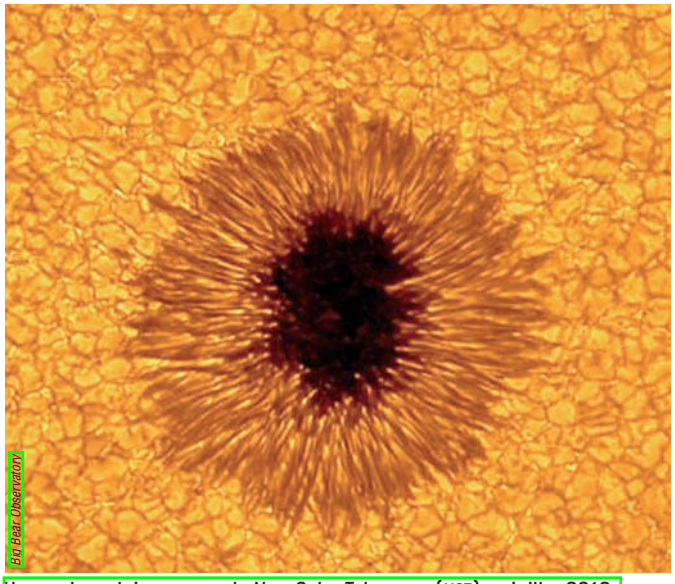
Grâce aux innombrables données fournies par les satellites SOHO et SDO qui scrutent tous deux notre étoile, les chercheurs sont parvenus à réduire le bruit de fond de ces observations. Cela leur a permis de mettre en évidence, dans le signal des ondes acoustiques, les taches solaires en formation jusqu'à 65 000 kilomètres de profondeur, soit deux jours avant qu'elles n'atteignent la surface et deviennent visibles.

Les astronomes ont constaté que les taches qui deviennent les plus grosses et qui sont responsables des éruptions les plus violentes atteignent la surface plus rapidement (leur vitesse de remontée peut atteindre 2 000 kilomètres par heure) que celles qui restent discrètes (et dont la vitesse minimale est de l'ordre de 1 000 kilomètres par heure).

Les météorologues du Soleil visent *in fine* la détection des taches trois jours à l'avance, ce qui laisserait une marge de manœuvre suffisante pour réagir.

➜ Stéphane Fay

Science, vol. 333, pp. 993-996, 2011



Big Bear Observatory

Une tache solaire vue par le *New Solar Telescope* (NST) en juillet 2010. La zone noire centrale a une taille comparable à celle de la Terre.

Éthologie

Trop de stress sans la mère

Selon certaines études, séparer un enfant de sa mère dès la naissance a un impact négatif : l'enfant est stressé, peut le rester en grandissant et risque de développer des troubles psychiatriques ou du comportement. D'autres études de laboratoire ont prouvé l'existence d'effets négatifs de la séparation chez le rat, et à présent chez le singe. Xiaoli Feng et ses collègues, à Beijing, ont montré que le comportement de jeunes macaques rhésus, séparés de leur mère à la naissance, change durablement : les jeunes singes sont plus stressés et le restent même s'ils évoluent dans un environnement social normal. Les biologistes ont mesuré les concentrations de cortisol, l'hormone libérée lors d'un stress, chez des macaques rhésus âgés de deux ans ou trois ans et demi. Les macaques ayant été séparés de leur mère à la naissance et élevés par un congénère présentent des concentrations 1,5 fois plus faibles que celles des macaques élevés par leur mère, et ils réagissent moins bien au stress. En outre, ils se déplacent moins, s'assoient moins souvent avec d'autres macaques du groupe et présentent des signes d'anxiété tels que sucer leurs doigts de main ou de pied. Les macaques seraient ainsi un bon modèle expérimental pour étudier les effets de traumatismes sur le devenir des enfants.



Un bébé macaque séparé de sa mère est stressé et le reste en grandissant.

➔ B. S.-L.

X. Feng et al., PNAS, en ligne, 15 août 2011

Biologie animale

Pas folles, les poules...

Dans un poulailler, la guerre des sexes fait rage. Les poules sont sollicitées par les coqs et les accouplements sont fréquents, parfois même « un peu forcés ». Cependant, les femelles disposent d'un moyen de contrôle sur la fécondation : elles peuvent expulser le sperme reçu grâce aux muscles de leur cloaque, l'organe (commun aux oiseaux, aux reptiles et aux amphibiens) où débouchent l'intestin, les uretères de l'appareil urinaire et l'oviducte de l'appareil reproducteur. Rebecca Dean, de l'Université d'Oxford, et ses collègues ont étudié, chez un groupe de poulets sauvages, les circonstances de cette riposte à la coercition. Ils se sont intéressés au risque (la probabilité qu'un éjaculat soit éliminé) et à l'intensité (la proportion de semence éliminée) de l'éjection. D'abord, l'éjection du sperme évacue en moyenne 80 pour cent des spermatozoïdes contenus. Ensuite, plus le volume de sperme est important, plus il risque d'être refoulé. Enfin, l'intensité de l'éviction est d'autant plus élevée que le rang social du mâle est bas. Ainsi, les poules exercent une pression de sélection active sur les gènes de mâles... mais après l'accouplement.

➔ L. M.

R. Dean et al., American Naturalist, vol. 178(3), pp. 343-354, 2011

Physiologie

Audition et cellules ciliées

La perte d'audition est souvent causée par des lésions des cellules sensorielles ciliées de l'oreille interne, cellules coiffées de minuscules cils – les stéréocils. L'étude des gènes mutés dans les maladies héréditaires provoquant la surdité permet de mieux comprendre le fonctionnement de ces cellules. Récemment, l'équipe de Christine Petit (Institut Pasteur-INSERM-UPMC-Collège de France) a mis en évidence le rôle du dernier des cinq gènes impliqués dans l'une de ces maladies, le syndrome de Usher de type I.

Les individus atteints de cette maladie présentent une mutation dans l'un de ces cinq gènes. On savait que quatre des cinq protéines codées par ces gènes sont associées à une petite structure moléculaire formant un filament qui couple les stéréocils, le « lien de bout de cil ». Les biologistes ont montré que la cinquième protéine, dénommée « sans », est aussi liée à cette structure et participe à son maintien.

Organisés en trois rangées (grands, moyens et petits cils), les stéréocils jouent un rôle crucial : leurs oscillations en réponse aux variations de pression dues à la propagation d'un son dans l'oreille provoquent l'ouverture de canaux ioniques, qui laissent passer un courant d'ions au sommet des stéréocils. Cela déclenche un influx nerveux dans les neurones auditifs et l'information arrive au cerveau.

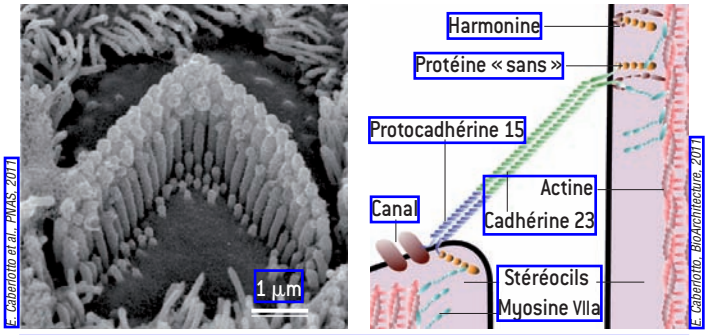
L'ouverture des canaux s'effectue à l'aide des liens de bout de cil. Ces structures lient le sommet de chaque petit stéréocil au flanc d'un stéréocil moyen, et associent de même les stéréocils moyens et grands. Lors des oscillations, les liens de bout de cil se tendent et tirent sur les sommets des cils, ce qui provoque l'ouverture des canaux ioniques.

Chacune des cinq protéines semble jouer un rôle précis dans ce processus. La protocadhérine 15 et la cadhérine 23, très longues, forment le lien de bout de cil ; l'harmonine participe à l'ancrage du lien au flanc du stéréocil supérieur et se lie à la quatrième protéine, la myosine VIIa. Liée aussi au « squelette » des stéréocils – de longs filaments d'actine –, la myosine VIIa assurerait une transmission efficace des oscillations aux liens de bout de cil en maintenant une tension au repos. La protéine « sans » renforcerait l'ancrage des liens à chaque extrémité *(voir le schéma)*.

Les biologistes ont en outre observé que le lien de bout de cil influe sur la taille adulte des stéréocils. Participe-t-il à la polymérisation des filaments d'actine des stéréocils, dont dépend cette taille ? Cette polymérisation est-elle régulée par l'ouverture des canaux ioniques ? Les chercheurs étudient à présent ces questions.

➔ M.-N. C.

BioArchitecture, vol. 1(4), en ligne, 22 août 2011 ; PNAS, vol. 108, pp. 5825-5830, 2011



Touffe ciliaire d'une cellule ciliée de la cochlée d'une souris *(à gauche)*. Cinq protéines sont en jeu dans le lien de bout de cil entre deux stéréocils *(à droite)*.

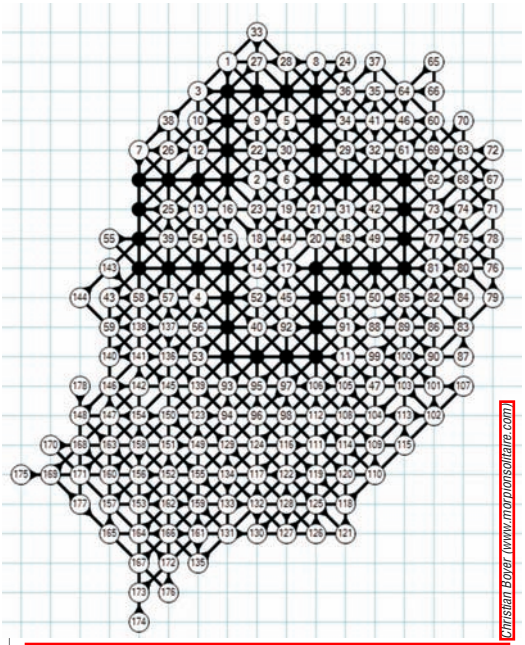
© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Informatique

Morpion solitaire : record en 178 coups

Connaissez-vous le morpion solitaire, qui a fait fureur dans les années 1970 et 1980 ? Ce jeu, qui se pratique seul avec juste un stylo et une feuille de papier quadrillé, consiste à ajouter tour à tour des points à une configuration initiale en forme de croix suisse de façon à former des segments de cinq points alignés verticalement, horizontalement ou en diagonale. Christopher Rosin, informaticien chez *Parity Computing* à San Diego, en Californie, a réussi à faire une grille à 178 coups *(voir la figure)*. Il bat ainsi son précédent record (177 coups), qui datait... de trois mois seulement.

Ch. Rosin travaille sur des algorithmes de recherche arborescente, qui explorent des chemins sur un arbre représentant le déroulement des possibilités dans des jeux, des problèmes de planification ou des problèmes d'optimisation. Il a développé un algorithme amélioré où le choix de la branche à chaque ramification est fait au hasard, mais selon une loi qui est adaptée dynamiquement, c'est-à-dire qui est modifiée à mesure que l'on progresse vers les « feuilles » de l'arbre. Ch. Rosin a mis à l'épreuve son algorithme sur deux problèmes : la construction de grilles de mots croisés, et le morpion solitaire. Dans les deux cas, l'informaticien américain trouve que son algorithme a des performances meilleures que les autres. Et, ce faisant, il améliore ainsi le record du nombre de coups au morpion solitaire. Il l'avait battu une première fois en 2010 avec 172 coups, soit deux coups de plus que le record de 1976. Cette année-là, l'étudiant Charles-Henri Bruneau, aujourd'hui professeur de mathématiques à l'Université de Bordeaux, avait réalisé une étonnante prouesse en atteignant 170 coups, sans aucune aide informatique. Aujourd'hui, le record est de 178 coups. Qui dit mieux ?



La grille à 178 coups obtenue par Christopher Rosin. Chaque coup (ou point ajouté) est numéroté dans l'ordre chronologique. Les points noirs forment le motif initial.

➔ Maurice Mashaal

C. D. Rosin, Proc. of the 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence, Barcelone, 16-22 juillet 2011 ; www.morpionsolitaire.com

Astronomie

Pluton, la planète aux anneaux ?

Pluton aurait un anneau de poussière, indiquent les simulations numériques d'une équipe d'astronomes de l'Université d'État UNESP-São Paulo, au Brésil.

Pryscilla Maria Pires dos Santos et ses collègues ont modélisé le devenir des poussières éjectées par deux des satellites de Pluton, Nix et Hydra, lorsqu'ils sont frappés par des micrométéorites provenant de la ceinture de Kuiper (population de petits corps située au-delà de l'orbite de Neptune). Ils ont supposé que le flux de ces impacteurs est le même que celui qui frappe Neptune (10^{-16} kilogramme par mètre carré et par seconde). Normalement, la poussière devrait se dissiper totalement sous l'effet de la pression de radiation exercée par la lumière du Soleil. Les simulations numériques, qui tiennent compte de cet effet ainsi que des effets gravitationnels de Nix, Hydra et Charon (le principal et plus proche satellite de la planète naine), ont cependant montré que la quantité de poussière produite par les impacteurs compense celle dissipée. Un anneau peut ainsi subsister autour de Pluton et de ses satellites.

Les astronomes ont calculé que, pour un anneau de 57 000 kilomètres de rayon moyen et de 16 000 kilomètres de largeur situé entre les orbites de Nix et Hydra, 50 pour cent des poussières de un micromètre disparaîtraient en une année. Il resterait alors un anneau stable, mais si ténu qu'il serait inobservable depuis la Terre.

Dans le cas où l'anneau existe bel et bien, le seul espoir de pouvoir l'étudier viendra de la sonde *New Horizon*, en route pour Pluton, qui emporte à son bord un compteur de poussière capable de détecter des particules de masse aussi faible que 10^{-12} gramme. Elle devrait arriver autour de Pluton en juillet 2015.

➔ S. F.

http://arxiv.org/abs/1108.0712, Astronomy & Astrophysics, à paraître



Des simulations numériques indiquent que Pluton, la planète naine, a peut-être un anneau de poussière extrêmement ténu et donc inobservable de la Terre.

En bref

TROP LÉGÈRE ÉTOILE

L'équipe d'Elisabetta Caffau, de l'Université de Heidelberg, a découvert une étoile si pauvre en éléments lourds qu'elle ne devrait pas exister. La petite étoile, nommée SDSS 102915+172927, n'est composée quasiment que d'hélium et d'hydrogène. Les éléments plus lourds y sont 20 000 fois moins abondants que dans le Soleil. Or ils sont nécessaires pour qu'un nuage moléculaire engendre une étoile. Et s'il s'agit d'une étoile née juste après le Big Bang, où est passé le lithium, troisième élément qui existait alors ?

LE BIFACE GAGNE 300 000 ANS

Une équipe franco-américaine, dont fait partie Pierre-Jean Texier, du CNRS, vient de dater à environ 1,76 million d'années des sédiments où l'on a trouvé des bifaces, près du lac Turkana, au Kenya. Cette datation repousse de 300 000 ans l'apparition de l'outil caractéristique des humains charognards – les premiers, probablement, à consommer assez de viande pour développer et entretenir un cerveau volumineux. Du même coup, l'ancienneté de notre cerveau est aussi à revoir.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Océanographie

Un courant nord-atlantique

Des océanographes de l'Institut océanographique de Woods Hole, aux États-Unis, de l'Université de Bergen, en Norvège, de l'Institut de recherche marine de Reykjavik et de l'Université de Akureyri, en Islande, ont prouvé l'existence d'un courant profond entre le Groenland et l'Islande : le jet nord-islandais (NIJ, pour *North Icelandic Jet*). Les mesures de la force et de la vitesse des courants dans le détroit du Danemark, réalisées au cours de deux campagnes océanographiques, ont montré que ce courant est une source importante d'eau froide. Il s'ajoute au courant est-groenlandais, déjà connu. Ces deux courants alimentent en eau froide la circulation thermohaline dans l'Atlantique, qui transporte les eaux de surface chaudes et salées de l'Atlantique tropical vers l'Arctique. Ces eaux se refroidissent dans le courant d'Irminger du Nord de l'Islande et dans la mer d'Islande, puis plongent à des profondeurs comprises entre 1 000 et 3 000 mètres et redescendent vers le Sud. Le jet nord-islandais sera à surveiller dans l'évolution de la circulation océanique, liée à celle du climat.

➜ C. F.

K. Våge et al., Nature Geoscience, en ligne, 21 août 2011

Physique

Boucle de contrôle quantique

L'ingénierie quantique poursuit ses avancées. Une équipe française réunie autour de Serge Haroche, physicien à l'École normale supérieure, à Paris, a réalisé pour la première fois une boucle de rétroaction quantique : elle permet de créer un état à n photons, où n est un entier choisi à volonté, et de le maintenir autant de temps que souhaité. La difficulté d'un contrôle quantique provient du fait que l'on doit mesurer l'état du système pour déterminer s'il s'écarte de l'état souhaité et, dans ce cas, appliquer une correction. Or toute mesure d'un système quantique perturbe son état, même faiblement. Le dispositif de S. Haroche et ses collègues comporte une cavité où les photons évoluent entre deux miroirs ultraréfléchissants. L'état photonique est sondé par un jet d'atomes très excités, donc très sensibles. En fonction de l'information fournie par ces atomes, le champ électromagnétique dans la cavité est ajusté, ce qui corrige le nombre de photons et stabilise l'état photonique.

➜ M. M.

C. Sayrin et al., Nature, vol. 477, pp. 73-77, 2011

Médecine

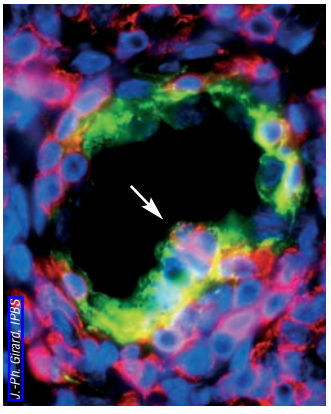
Des vaisseaux sanguins contre les tumeurs

Lorsqu'elle croît, une tumeur favorise la mise en place de vaisseaux sanguins qui servent à l'alimenter – on parle d'angiogenèse. Cependant, Jean-Philippe Girard, de l'Université Paul Sabatier, à Toulouse, et ses collègues ont découvert des vaisseaux qui, à l'inverse, favorisent l'accès aux tumeurs des lymphocytes *T* tueurs, chargés d'éliminer les cellules cancéreuses. C'est le premier mécanisme connu de recrutement actif des lymphocytes dans les tumeurs.

Pour remplir leurs fonctions, ces lymphocytes doivent traverser la paroi des vaisseaux, mais les tumeurs interdisent ce passage : elles produisent par exemple des molécules qui empêchent l'adhérence des lymphocytes aux parois des vaisseaux angiogéniques, un préalable à leur traversée.

L'étude de plusieurs tumeurs a révélé un type de vaisseaux que l'on ne pensait pas trouver dans les tumeurs. Ces vaisseaux, nommés HEV (pour *High Endothelial Veinule*), sont connus dans les tissus lymphoïdes où les lymphocytes doivent souvent sortir du sang. Les parois de ces vaisseaux sont constituées de cellules dont la forme favorise le passage des lymphocytes et qui produisent des molécules entraînant l'adhérence des lymphocytes.

Comment les vaisseaux HEV résistent-ils aux mécanismes de défense que les tumeurs mettent en place lors de l'angiogenèse classique ? On l'ignore, mais les vaisseaux angiogéniques sont surtout de petits capillaires, tandis que les vaisseaux HEV sont des veinules postcapillaires : ce sont donc deux types de vaisseaux différents. Les veinules sont peut-être insensibles aux stratégies tumorales. Une étude rétrospective a montré que plus la densité de vaisseaux HEV est importante, plus le risque de métastases diminue et plus l'espérance de vie augmente.



Sur cette coupe de tumeur du sein, on distingue un vaisseau sanguin HEV *(en vert)* entouré de lymphocytes *(en rouge ; leur noyau est en bleu)*. La flèche blanche indique un lymphocyte en train de se faufiler à travers la paroi du vaisseau.

➜ L. M.

Cancer Research, en ligne, 16 août 2011

DERNIÈRE minute ...

UN AUSTRALOPITHÈQUE ANCÊTRE DE *HOMO* ?
La redatation des sédiments qui contenaient *Australopithecus sediba*, un australopithèque étonnamment humain découvert en 2008, indique qu'il précède de 80 000 ans l'apparition du genre *Homo*, vers 1,9 million d'années. Or *A. sediba* partage avec les premiers humains *Homo rudolfensis* et *H. habilis* les caractéristiques qui signalent l'évolution vers *H. erectus*, notre ancêtre probable. Les australopithèques graciles dont nous descendons lui ressemblaient-ils ?

DU GRAPHÈNE POUR LES ONDES TÉRAHERTZ
D'après Long Ju, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues, de petits rubans de graphène larges d'environ un micromètre seraient très utiles à la technologie des ondes térahertz. L'équipe de L. Ju a établi que, dans de tels rubans, les plasmons (oscillations collectives d'électrons) présentent, à température ambiante, de fortes résonances aux fréquences térahertz – que l'on peut, de plus, ajuster en jouant sur la largeur des rubans.

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

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

fatigue design 2011

23 et 24 novembre 2011 Senlis

4e édition du Congrès international sur la conception vis-à-vis de la fatigue



www.fatiguedesign.org

utc Université de Technologie Compiègne

SF2M

ECCS CECM EKS

cetim

1106-007

pariscience

FESTIVAL INTERNATIONAL DU FILM SCIENTIFIQUE

DU 6 AU 11 OCTOBRE 2011

CAGDAS KAHRIMAN

Jardin des Plantes / Muséum national d'Histoire naturelle

Entrée gratuite - Réservation conseillée sur

www.pariscience.fr

Muséum National d'Histoire Naturelle

SCIENCES SUR SEINE 2011

MAIRIE DE PARIS

Inserm

îledeFrance

arte

cnes

cnrs

universcience

CHIMIE 2011

PROCIREP

ceai

Nature & Découvertes

Le Monde

SCIENCE

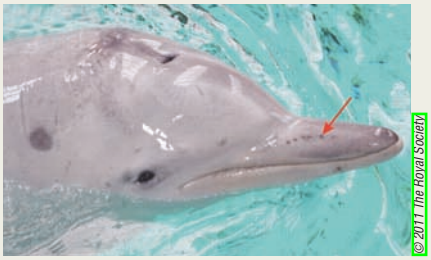
SCIENCES AVENIR

Wanari

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

LE NOUVEAU SENS DU DAUPHIN

Les requins et plusieurs espèces de poissons, tels les raies et les esturgeons, ont dans leur museau des électrorécepteurs en forme d'ampoules. Ces récepteurs leur permettent de capter des champs électriques très faibles créés par d'autres animaux dans la mer ; ils aident ainsi les poissons à se diriger sur leur proie (voir *Le sixième sens du requin*, *Pour la Science*, septembre 2007, www.pourlascience.fr/u.php?s=oer359). Outre les poissons, certains amphibiens et mammifères monotrèmes, tel l'ornithorynque, ont de tels électrorécepteurs. Nicole Czech-Damal, de l'Université de Hambourg en Allemagne, et ses collègues découvrent pour la première fois ces récepteurs chez un mammifère placentaire, le dauphin de Guyane (*Sotalia guianensis*). Ils ont étudié deux dauphins captifs dont l'un est mort naturellement (*Proceedings of the Royal Society B*, juillet 2011). Sur ce dernier, ils ont disséqué les trous présents sur son rostre, nommés cryptes vibrissales, d'où poussent les moustaches chez d'autres mammifères. Aucun poil ne pousse dans les cryptes des dauphins ; mais à l'intérieur se trouve une structure en forme d'ampoule pleine d'une substance gélatineuse, semblable au gel présent dans les électrorécepteurs du requin ou au mucus de ceux de l'ornithorynque. Les biologistes ont ensuite testé la capacité du dauphin vivant à détecter des champs électriques faibles, tels ceux produits par ses proies, des poissons petits et moyens. Ils ont montré que le dauphin réagit à toute une gamme de champs électriques, même très faibles. Le dauphin détecte des champs supérieurs à 4,6 microvolts par centimètre d'eau, soit une sensibilité similaire à celle de l'ornithorynque. En outre, quand les biologistes couvraient son rostre avec une coque en plastique, le dauphin ne réagissait plus aux stimulus électriques. Preuve que les cryptes sont bien des électrorécepteurs.



© 2011 The Royal Society

Une « crypte vibrissale » *(flèche rouge)* sur le nez du dauphin est un électrorécepteur.

D'OÙ VIENT LA BANANE ?

La production de bananes dans le monde est évaluée en 2009 à 117 millions de tonnes. Le bananier aurait été cultivé pour la première fois en Papouasie-Nouvelle-Guinée il y a environ 10 000 ans (voir *Le bananier, un enjeu mondial*, *Pour la Science*, février 2011, www.pourlascience.fr/u.php?s=oer400). Un consortium international de chercheurs précise les mécanismes de la domestication de la banane en couplant des analyses génétiques, archéologiques et linguistiques (*PNAS*, juillet 2011). Ainsi, en Asie du Sud-Est, les bananiers sauvages, aux fruits petits et ayant moins de graines, ont donné deux sous-espèces qui n'ont pu apparaître qu'avec l'aide de l'homme. Par hybridation naturelle – les gamètes mâles d'un bananier ont fécondé les fleurs femelles d'un bananier d'une autre variété –, sont nés des plants produisant des fruits sans graines, idéaux pour la culture. Les paysans ont alors sélectionné et cultivé ces hybrides. Les scientifiques ont prouvé l'apparition de ces « cultivars », variétés sélectionnées pour les cultiver, en étudiant des phytolithes – des fragments de silice contenus dans les feuilles et ne se dégradant pas – retrouvés dans des sites archéologiques en Nouvelle-Guinée et au Cameroun. Puis, en couplant ces données aux récits historiques, ils ont retracé la route de ces cultivars : d'Asie du Sud-Est, ils auraient migré vers la péninsule Indienne, l'Afrique de l'Est et les îles du Pacifique. C'est lors de ce périple que le bananier a perdu ses graines et s'est rempli de pulpe. Ces recherches ont permis de comprendre les liens entre les différents types de bananier et devraient aider à créer d'autres hybrides qui résistent à de nouveaux parasites.

LA MASSE DE L'ANTIPROTON

L'antiproton a la même masse que le proton ($1{,}67262158 \times 10^{-27}$ kilogramme), mais une charge électrique opposée ; il s'annihile avec le premier proton rencontré, la masse totale se transformant en une énergie qui se matérialise aussitôt en de nombreuses autres particules plus légères… De fait, il est impossible de conserver les antiprotons dans un récipient ordinaire ou dans l'air. Une méthode bien connue pour éviter ces contraintes est de confiner les antiprotons avec des champs électriques et magnétiques (voir *Des antiprotons ultrafroids*, *Pour la Science*, février 1993). Des scientifiques japonais et européens du CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, à Genève, ont adopté une autre approche. Ils ont remplacé un des deux électrons des atomes d'hélium par un antiproton, et ont irradié les antiprotons ainsi piégés avec un faisceau laser (*Nature*, juillet 2011). En ajustant le laser à la fréquence qui provoque un saut quantique des antiprotons entre deux états d'énergie de l'atome, les scientifiques ont calculé la masse de l'antiproton. Mais les atomes qui s'approchent du faisceau « voient » des fréquences laser légèrement différentes par rapport à ceux qui s'en éloignent, d'où une imprécision importante dans le calcul de la masse. Les scientifiques ont donc utilisé deux faisceaux laser de sens inverse, ce qui a amélioré la précision de la mesure d'un facteur quatre. La masse de l'antiproton est désormais connue avec une précision proche du milliardième. Les scientifiques espèrent arriver à une précision supérieure à celle du proton (qui est encore deux fois plus importante que celle de l'antiproton), car toute différence entre les masses de ces deux particules prouverait que les lois de la nature sont différentes pour la matière et l'antimatière.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

POINT DE VUE

Maladies mentales : les oubliées de la médecine et des pouvoirs publics !

Plus de 30 pour cent de la population européenne souffrent d'une maladie touchant le cerveau. Il est temps de faire de la recherche sur le cerveau une priorité.

Michel HAMON

Quel est l'état de la santé mentale de la population de l'Europe ? Pour le savoir, le Collège européen de neuropsychopharmacologie, ECNP, a soutenu un vaste projet pour évaluer « l'étendue, la gravité et le coût des maladies du cerveau ». Les résultats de cette étude ont été récemment communiqués et les conclusions sont préoccupantes : plus de 30 pour cent des Européens souffrent d'une pathologie touchant le cerveau, et la prise en charge est notablement insuffisante. La société, les personnels de santé, les pouvoirs publics et les décideurs politiques doivent l'admettre : les maladies du cerveau représenteront le principal enjeu de santé publique du XXIe siècle.

Les résultats de la dernière grande étude dans ce domaine ont été publiés en 2005, mais plusieurs biais avaient été mis en évidence. Il convenait donc de refaire un état des lieux plus précis sur cette question. En 2009, la nouvelle étude a été lancée. Elle avait pour objectifs de suivre pendant 12 mois la prévalence des maladies mentales et neurologiques dans la population de l'Europe des 27 ; d'évaluer les maladies touchant les plus jeunes (de 2 à 17 ans), les adultes (de 18 à 65 ans) et les plus âgés (plus de 65 ans) ; d'identifier les différentes pathologies et la proportion de la population touchée par chacune d'elles ; d'évaluer l'efficacité de la prise en charge, notamment des traitements prescrits. Notons que la liste des maladies répertoriées est longue. Il s'agit aussi bien de maladies mentales telles que la schizophrénie, la dépression, les troubles liés à l'anxiété, les phobies, entre autres, que de maladies neurologiques telles que l'épilepsie, la maladie de Parkinson, et les autres maladies neurodégénératives notamment la maladie d'Azheimer, ou encore la migraine, les insomnies, les conséquences des accidents vasculaires cérébraux, les dépendances à l'alcool et aux drogues et, chez les plus jeunes, les retards mentaux et les troubles de l'attention avec ou sans hyperactivité.

LES TROUBLES LIÉS À L'ANXIÉTÉ
sont les plus fréquents, puis viennent les insomnies, la dépression et la dépendance à l'alcool et aux drogues.

Les résultats de cette vaste analyse, tant bibliographique que directe auprès des centres de soins, ont montré qu'au moins 118 millions d'Européens souffrent d'une maladie touchant le cerveau. Ce chiffre était de 82,7 millions en 2005, mais compte tenu de l'augmentation des populations des pays concernés, d'une part, et de l'augmentation de l'espérance de vie, d'autre part, la proportion n'a pas évolué entre 2005 et 2011 : 27,4 pour cent en 2005 et 27,1 pour cent en 2011 pour les personnes âgées de 18 à 65 ans. Quand on inclut les plus jeunes et les plus âgés, la proportion atteint 38,2 pour cent.

Quelles sont les principales pathologies identifiées ? Les troubles liés à l'anxiété (et avec elle les différents types de phobie) sont les plus fréquents (14 pour cent), puis viennent les insomnies qui touchent 7 pour cent de la population, la dépression grave (6,9 pour cent), les troubles psychosomatiques (6,3 pour cent), la dépendance à l'alcool et aux drogues (4 pour cent), les troubles de l'attention avec hyperactivité (5 pour cent de la classe d'âge la plus jeune) et les démences (1 pour cent des 60-65 ans et 30 pour cent des plus de 85 ans).

Pour étudier l'impact de ces maladies en termes de santé publique, les médecins utilisent un indice qui reflète le nombre d'années perdues en raison d'une mortalité précoce ou d'une incapacité due à ces pathologies. Cet indice recouvre l'effet direct de la maladie sur les patients en raison de leurs symptômes, mais aussi l'effet indirect lié au regard des autres. Il prend aussi en compte le poids que représente chaque malade pour ses proches et l'impact financier, pour la société, de la prise en charge.

Or l'enquête confirme un résultat préoccupant de l'étude de 2005 : un tiers seulement des malades, toutes pathologies confondues, sont traités. Malgré l'existence de traitements pharmacologiques et psychothérapeutiques efficaces, la prise en charge est notablement insuffisante. On

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

constate qu'un tiers des personnes concernées consultent un médecin, que moins de 20 pour cent consultent un médecin spécialisé dans les maladies du cerveau et que moins de 10 pour cent reçoivent un traitement adapté. Les maladies neurologiques sont les mieux traitées de toutes celles qui ont été répertoriées.

On constate aussi – et il serait pourtant aisé de modifier cet état de fait – qu'il se passe souvent plusieurs années (jusqu'à 20 ans) avant que le patient ne consulte un médecin pour la première fois. Or, généralement, une prise en charge précoce améliore le pronostic, c'est-à-dire la probabilité que la maladie soit, si ce n'est guérie, du moins jugulée et suffisamment contrôlée pour que l'insertion du malade dans la société soit facilitée. Comment améliorer la situation, sachant que la prévalence de certaines des maladies évoquées, notamment les démences dues à la maladie d'Alzheimer, va augmenter ?

Aujourd'hui, les difficultés auxquelles sont confrontés les groupes pharmaceutiques qui recherchent des médicaments pour lutter contre les maladies mentales sont multiples : les investissements nécessaires pour la découverte et le développement d'un nouveau médicament sont gigantesques ; il faut souvent attendre les derniers stades des essais cliniques pour constater qu'une molécule a des effets indésirables ; les marchés exercent une pression forte pour que les retours sur investissements soient courts ; on ne connaît pas encore suffisamment les dysfonctionnements biologiques en cause dans les maladies mentales, de sorte qu'il est difficile d'identifier une cible précise sur laquelle un médicament pourrait agir ; les remboursements des traitements ne sont pas aussi systématiques que dans le cas des autres maladies.

Tous ces éléments, notamment le fait que la majorité des malades ne sont pas traités et, quand ils le sont, c'est souvent très longtemps après l'apparition des premiers symptômes, plaident en faveur d'une prise de conscience par la société et les pouvoirs publics que les recherches sur le cerveau, son fonctionnement normal et ses anomalies, doivent devenir une des priorités, si ce n'est la priorité. Alors seulement, les traitements et la prévention des maladies du cerveau pourront être améliorés.

Michel HAMON est professeur de neuropharmacologie à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Recycler le béton

Les quantités de béton rejetées par les chantiers de démolition sont énormes. Seule la moitié environ de la masse de ces déchets est recyclée.

Amaury CUDEVILLE

Le béton est, juste après l'eau, le matériau le plus consommé au monde. Chaque habitant de la planète en consomme en moyenne un mètre cube par an. Il est donc légitime de se poser la question du devenir de ce matériau arrivé en fin de vie. En France, les déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics représentent près de 300 millions de tonnes par an, dont 36 pour cent sont des produits à base de béton, pour lesquels on estime que seule la moitié est recyclée.

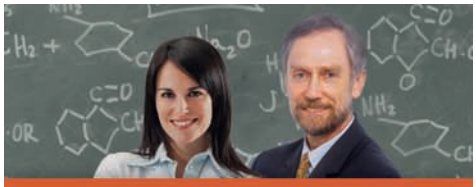
Les premiers essais sur le recyclage des bétons ont débuté aux États-Unis et au Japon à la fin des années 1970. En France, ce n'est qu'à la fin des années 1980 qu'est née, en région parisienne, l'idée de transformer les blocs de béton en matériaux valorisables dans les travaux publics. Elle consiste à broyer le béton, comme on le ferait avec une roche, afin d'en extraire une grave (mélange de sables et de gravillons). Le matériau ressemble à celui utilisé dans une carrière de roche massive classique, à ce détail près qu'il faut prendre en compte le ferraillage des bétons armés. Pour cela, les blocs de béton sont d'abord découpés à l'aide d'une cisaille qui permet de fendre les blocs et réduire la taille des fers à béton. Ces blocs préparés peuvent ensuite être envoyés dans l'installation de broyage où un système d'aimants extrait le ferraillage du béton concassé.

Intialement, l'essor de cette technique en Île-de-France a été rendu possible grâce ou à cause de la pénurie de matériaux naturels disponibles dans la région, pour répondre à la demande grandissante en matériaux de construction.

L'essentiel des bétons concassés ainsi produits est utilisé pour la confection de remblais ou dans le corps de chaussée des routes. La construction d'une route nécessite l'empilement de couches successives de matériaux suffisamment résistants pour supporter le trafic routier. La dernière couche, la couche de roulement, est celle qui est constituée de bitume. Le béton concassé peut donc être utilisé au sein de ce corps de chaussée, en remplacement de graves de calcaire concassées provenant de carrières de matériaux naturels.

D'un point de vue environnemental, on comprend tout de suite l'intérêt du recyclage

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



Nouveau service d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec naturejobs



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

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

POUR LA SCIENCE.fr
Le site de référence de l'actualité scientifique

des bétons de démolition : il permet de préserver des ressources naturelles en limitant les distances de transport et la quantité de déchets enfouis.

Si l'on se penche sur le bilan du carbone, toujours dans un contexte francilien, on a calculé que la fabrication du béton concassé, par rapport à celle d'un produit naturel, émet 30 pour cent en moins de gaz à effet de serre. Et si l'on s'intéresse au cycle de vie du béton concassé, on se rend compte que l'économie en minerai de fer réalisée grâce au recyclage des fers à béton compense presque entièrement les émissions de gaz à effet de serre dues au recyclage du béton. L'intérêt environnemental de ce procédé n'est donc plus à démontrer.

L'EMPLOI DE BÉTONS RECYCLÉS se répand, mais reste confronté à des difficultés.

Cependant, le recyclage se heurte encore à plusieurs obstacles. Le béton de démolition, issu de déchets de chantiers, est bien sûr hétérogène. Certains produits retrouvés dans les bétons concassés rendent ces derniers plus difficiles à accepter. C'est le cas du plâtre et du fibrociment. Au plâtre sont associées d'importantes concentrations de sulfates, qui peuvent créer des gonflements dans les chaussées. Quant au fibrociment, qui contient de l'amiante, il présente des risques en termes d'hygiène et de sécurité sur les plateformes de valorisation comme sur les chantiers, risques que les recycleurs et les démolisseurs s'efforcent de réduire.

Finalement, sur les 35 millions de tonnes de matériaux consommées annuellement en Île-de-France, 14,4 sont des matériaux recyclés, essentiellement issus du recyclage de béton de démolition. Le béton recyclé est donc largement entré dans les mœurs.

En fait, le schéma économique du recyclage des bétons de démolition est surtout valable dans les grandes agglomérations. Les carrières y sont éloignées des centres d'activité, et la production de déchets de chantier est suffisamment importante et pérenne pour amortir une installation de recyclage.

Il existe toutefois des installations de concassage mobiles, installables sur les chantiers, ce qui évite le transport des blocs. On peut ainsi réutiliser directement les produits de concassage sur le chantier. Ainsi, le recyclage hors des grandes agglomérations s'en trouve facilité, toujours à condition que des entrepreneurs et décideurs locaux acceptent son utilisation. Aussi, le béton concassé fait depuis plusieurs années l'objet de nombreuses études, tant au niveau national que régional, afin de généraliser son utilisation. Dans ce contexte, de nombreux guides ont été réalisés pour le faire connaître aux maîtres d'ouvrage et leur expliquer son emploi.

En dehors des travaux publics, le béton concassé intéresse désormais le secteur du bâtiment. Il est aujourd'hui possible pour les bétonniers d'inclure cinq pour cent de matériaux recyclés dans la composition de leur béton. Sur ce point, la France est bien plus frileuse que tous ses voisins européens, qui autorisent l'incorporation de gravillons de béton concassé, cette incorporation pouvant atteindre 100 pour cent (cas du Danemark et de la Hollande). L'incorporation des sables de béton concassé reste plus problématique.

En France, des groupes de travail se penchent sur la possibilité d'élaborer des bétons constitués à 100 pour cent de granulats de béton concassé. Les bétons élaborés à base de granulats de béton concassé sont notamment moins résistants (de 10 à 30 pour cent). On les cantonnerait donc à des applications où les contraintes exercées sont moins importantes.

Ces études devraient faciliter le recyclage des bétons de démolition en diversifiant la gamme d'utilisations des bétons recyclés. Rappelons que chaque Français consomme en moyenne sept tonnes de granulats par an et que la pression foncière rend de plus en plus difficile l'ouverture de nouvelles carrières... ■

Amaury CUDEVILLE est responsable du développement et de l'environnement de la Société CLAMENS (voir l'animation «Le recyclage, c'est béton», www.groupeclamens.org).

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

1ER CENTRE MONDIAL DE RESSOURCES EN PARFUMERIE COSMETIQUE



- 550 Entreprises
- 6 Universités
- 8 170 Chercheurs

COSMETIC VALLEY
FRANCE

- **Une concentration unique au monde de savoir-faire en parfumerie cosmétique**
- **Des synergies entreprises-laboratoires publics au service de la recherche et de l'innovation**
- **Plus de 50 projets de recherche collaboratifs en cours**

1 place de la Cathédrale
28000 CHARTRES - France
Tél : +33 (0)2 37 211 211

www.cosmetic-valley.com

contact : cosmetic-valley@cosmetic-valley.com

Première bonne résolution de la rentrée :

s'abonner à POUR LA SCIENCE !



1 an • 12 nos

56 €



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

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* seul** (12 nos et leur version numérique) • **1 an** • **56 €** au lieu de ~~74,70~~ € soit 25% de réduction !
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et France d'Outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 12 € - autres pays 25 €.

❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* version web** (12 nos) • **1 an** • **48 €** au lieu de ~~62,40~~ € soit 23% de réduction !

❑ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science*** (12 nos et leur version numérique) + **les *Dossiers*** (4 nos et leur version numérique) **1 an** • **76 €** au lieu de ~~102,50~~ € soit 26% de réduction !
Tarif valable uniquement en France métropolitaine et France d'Outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 16 € - autres pays 35 €.



J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

_____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

Je choisis mon mode de règlement :

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

❑ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____ Signature obligatoire

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

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

_____@_____

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

PLS408 © Pour la Science - tous droits réservés aux nouveaux abonnés (vente jusqu'au 30.11.2011)

COURRIER DES LECTEURS

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

✔ OMEGA 3 OU ALPHA 3 ?

Merci pour l'article *Les acides gras et la santé* (*Pour la Science* n° 406, août 2011, http://bit.ly/pls406_acidesgras). Mais comment se fait-il qu'alors que le carbone oméga est classiquement le dernier d'une plus ou moins longue chaîne d'acide gras (oméga étant la dernière lettre de l'alphabet grec), on appelle acide oméga 3 celui dont la première double liaison est sur le troisième atome de carbone, et oméga 6 celui dont la première double liaison est sur le sixième atome de carbone ?

Maurice Cahmi

➜ RÉPONSE DE SYLVIE VANCASSEL

Cela est dû à la différence entre la nomenclature utilisée par les physiologistes (qui comptent à partir du groupe méthyle, ce qui permet de désigner explicitement les familles d'acides gras) et celle utilisée par les chimistes (qui comptent à partir du COOH terminal). Selon cette nomenclature internationale normalisée, après avoir déterminé le nombre d'atomes de carbone de la molécule, le carbone du groupe carboxyle COOH est toujours noté 1. Les autres atomes de carbone portent leur numéro d'ordre. Une méthode d'identification alternative consiste à attribuer aux atomes de carbone adjacents au carbone 1 les lettres de l'alphabet grec. Le carbone 2 est ainsi noté alpha, le carbone 3, bêta, etc. La lettre oméga désigne toujours le dernier carbone de la chaîne aliphatique, soit le carbone du groupe méthyle terminal CH_3.

La commission sur la nomenclature biochimique a néanmoins estimé qu'il était parfois intéressant de numéroter la chaîne carbonée à partir du groupe méthyle terminal. Il existe donc une nomenclature parallèle, utilisée notamment par les nutritionnistes, et souvent qualifiée de « nomenclature oméga », malgré l'avis défavorable de la commission. Le carbone du groupe méthyle terminal est noté 1.

Le consensus est donc d'utiliser la nomenclature Cx : y*n* – m, où x est le nombre d'atomes de carbone de la chaîne aliphatique, y le nombre de doubles liaisons, n définissant la place de la double liaison la plus éloignée du COOH et m la place de la double liaison décomptée à partir du groupe méthyle terminal.

✔ BLOCAGE LINGUISTIQUE

Selon l'article *La langue façonne la pensée* (*Pour la Science* n°407, septembre 2011, http://bit.ly/pls407_langue), la langue pourrait faciliter ou entraver l'apprentissage de concepts nouveaux. En France, le concept juridique de prémajorité n'existe pas : entre les mineurs et les majeurs, il n'y a pas d'intermédiaires. Dans les pays germaniques et scandinaves, cette rupture n'existe pas. La langue française pourrait-elle être responsable de ce blocage ? En Wallonie, les mêmes travers existent, et en Suisse, seuls les cantons germanophones ont vu naître des mouvements sur les droits des adolescents.

Rodolphe Dumouch

➜ RÉPONSE DE PIERRE PICA

Je ne partage pas l'idée implicite dans ce commentaire, à savoir que les variations des systèmes de pensée découlent des langues. Ce qui constitue l'ossature de la langue est universel et partagé par tous.

Dans l'encadré accompagnant l'article de Lera Boroditsky, j'ai évoqué parmi les domaines particuliers où l'on observe des variations liées à l'apprentissage, outre le nombre et l'espace, les relations à autrui. Ce dernier domaine forme une connaissance noyau particulière qui fait l'objet de recherches précises. Une de ses propriétés est de nous permettre de marquer notre identité, et cela dès notre plus jeune âge.

Ceci peut nous donner par la suite l'illusion que telle ou telle langue est propre ou non à exprimer un système juridique donné, ou une pensée donnée au sens large. De la même façon, on peut avoir le sentiment que telle langue est plus belle qu'une autre.

Mais, à proprement parler, ces différences n'existent pas. Ce sont des « sentiments », de nature différente des variations liées à l'apprentissage. Celles-ci sont restreintes à des domaines spécifiques ; elles ne touchent pas à tous les domaines de la pensée au sens strict.

Il n'y a ainsi pas de relation causale entre telle ou telle langue et tel système de pensée, tel système social, juridique, éducatif, etc.

✔ ET *GOOGLE TRENDS* ?

Dans l'article *La culturomique* (*Pour la Science* n° 406, août 2011, http://bit.ly/pls406_culturomique), pourquoi ne pas citer *Google Trends* ? Cet outil en ligne permet de faire exactement les mêmes analyses que sur le corpus de livres, mais sur l'ensemble du corpus Internet ! On ne sait cependant pas plus relier l'analyse de la production de mots du corpus à ce que signifie cette production dans la population elle-même. Pour que la démarche soit scientifique, il faudrait pouvoir faire des hypothèses réfutables. Mais comment ?

Fabrice Neyret

➜ RÉPONSE DE JEAN-PAUL DELAHAYE

J'avais bien sûr prévu d'évoquer *Google Trends*, mais ce n'est pas resté dans la version finale de l'article. Je trouve en effet l'outil moins fin que le grand corpus de livres de *Google*, car il ne s'appuie que sur les requêtes faites au moteur de recherche. Il ne permet pas la comparaison de mots ou de suites de mots sur une longue période. En revanche, il permet de visualiser des variations saisonnières (par exemple celle de l'intérêt porté aux mathématiques) qui sont assez amusantes.

Il est vrai que le plus difficile dans l'utilisation des résultats de ces logiciels est l'interprétation de ce qu'on obtient, qui n'est jamais sans risque. Concernant le biais de positivité évoqué dans l'article, une expérience avec réfutation possible est envisageable, et c'est d'ailleurs en opérant de tels essais de réfutation que j'ai trouvé des exceptions à ce biais de positivité.

Nous sommes au début d'une ère nouvelle de l'information, où des données d'une remarquable précision sur le monde psychologique, linguistique et social deviennent accessibles : une nouvelle science ?

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

VRAI OU FAUX

Tombe-t-on malade quand on prend froid ?

Pas forcément. Le froid n'est pas « infectant », il faut nécessairement contracter un micro-organisme pathogène. Mais par temps froid, les microbes sont davantage présents, et notre organisme est moins capable d'y faire face.

Luc de SAINT-MARTIN PERNOT

Nous avons tous entendu un jour : « Tu vas prendre froid. » Sous-entendu : « et tomber malade. » Cette réflexion est fréquente, mais repose-t-elle sur une quelconque réalité scientifique ? La saison hivernale et le froid qui l'accompagne changent notre façon de vivre et notre immunité, de sorte que nous avons plus de risques de développer une maladie infectieuse des voies respiratoires, du simple rhume jusqu'aux infections graves des poumons, ou pneumonie. Mais insistons encore, sans agents infectieux, nous ne tombons pas malades. Alors que se passe-t-il en hiver : sommes-nous plus vulnérables, ou les agents pathogènes sont-ils plus nombreux ?

On sait que, dans les pays développés de l'hémisphère Nord, la température extérieure influe sur la mortalité, celle-ci étant minimale vers 22 °C en Europe. C'est vrai tant pour les températures élevées, lors des épisodes de canicule, que durant les périodes de grand froid. Cet effet dépend entre autres de la région – la mortalité est minimale pour 16 °C en Finlande et 24 °C en Grèce –, des années (la mortalité diminue depuis les années 1970) et de l'état sanitaire des populations. Quelles sont les causes de la surmortalité hivernale ?

En hiver, on observe une augmentation du nombre de pathologies cardio-vasculaires ; en France, durant la vague de froid de 1985, on a comptabilisé 17 pour cent d'infarctus et 54 pour cent d'accidents vasculaires cérébraux en plus par rapport à une période équivalente où la température avait été plus clémente. En effet, par temps froid, les vaisseaux sanguins de la peau se contractent ; cette vasoconstriction crée un gradient de température entre la peau et les organes internes, qui permet de limiter les pertes de chaleur de l'organisme. Si cet aspect est positif, il est partiellement gommé par le fait que ces modifications vasculaires entraînent un stress physiologique : le sang devient plus visqueux, de sorte que le système cardiaque doit fournir un effort supplémentaire. Une part de la surmortalité par temps froid viendrait de cette contrainte physiologique.

Le risque de contracter une maladie respiratoire d'origine infectieuse augmente quand la température extérieure baisse.

Toutefois, la mortalité hivernale est surtout liée aux maladies infectieuses : en 1985, les cas de pneumonie ont plus que doublé par rapport à la moyenne des années antérieures. L'Institut national de veille sanitaire estime qu'au moins un quart de la surmortalité hivernale est dû à une pathologie infectieuse des voies respiratoires – pneumonie, grippe, bronchite, sinusite, laryngite, etc. –, ce qui expliquerait le délai de 15 jours entre la vague de froid et celle de surmortalité. D'autant qu'une telle infection augmente le travail cardio-vasculaire, comme l'ont montré en 2003 Enrique Gurfinkel, Branco Mautner et leurs collègues, à Buenos Aires ; cette étude a confirmé que les personnes souffrant d'une maladie cardiaque, mais vaccinées contre la grippe, ont moins de risques de mourir en hiver que les personnes non vaccinées.

Plusieurs travaux ont montré que le risque de contracter une maladie respiratoire d'origine infectieuse augmente quand la température extérieure baisse, en particulier chez les personnes âgées de plus de 60 ans. Par exemple, en 2006, Benjamin Lysaniuk, de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, a montré que la transmission de la grippe en France dépend de la température extérieure. Et en 2007, ce résultat est confirmé chez le cobaye : la température et l'humidité influent sur sa contagiosité en condition de forte promiscuité. Mais pour quelles raisons ?

Quand il fait froid, on adopte des comportements qui favorisent la transmission des virus. On reste confiné à l'intérieur, ce qui augmente la promiscuité, et les agents infectieux, même les moins résistants, se transmettent plus facilement.

Viennent ensuite les conséquences de l'adaptation physiologique au froid. La

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

vasoconstriction créant le gradient de température entre la peau et les organes s'exerce aussi dans les bronches. Cela provoque une diminution des défenses immunitaires et mécaniques de l'organisme : d'une part, les cellules immunitaires du sang éliminent moins bien les bactéries et, d'autre part, les cils bronchiques qui nettoient en permanence les bronches ne sont plus aussi efficaces. En outre, la diminution de l'ensoleillement et de la température modifie plusieurs paramètres physiologiques ; par exemple, la concentration en vitamine D, qui participe aux défenses immunitaires et est produite par la peau sous l'effet des rayonnements ultraviolets, diminue en hiver.

D'autres facteurs environnementaux favorisent les infections hivernales. La sécheresse accompagnant le froid et les polluants atmosphériques, dont les concentrations augmentent, car les habitations sont insuffisamment ventilées, provoquent une irritation des voies nasales et bronchiques. On constate alors à la surface des cellules nasales une augmentation du nombre de protéines ICAM1, « serrures » par lesquelles les rhinovirus, responsables du rhume, entrent dans les cellules et les infectent.

Ainsi, les organismes humains sont fragilisés par le froid, qui, au contraire, permet à certains virus de persister plus longtemps dans l'air. Par exemple, le virus de la grippe se multiplie dans les cellules de la personne infectée. Les particules virales sont recouvertes d'une coque, composée d'éléments lipidiques des membranes cellulaires de l'individu infecté ; cette coque doit être assez résistante pour protéger le virus quand il est dans l'air, mais pas trop pour qu'elle puisse libérer son contenu au contact de la muqueuse nasale d'une future victime. Or la durée de vie de cette coque dans l'air et, par conséquent, celle du virus augmentent quand la température extérieure diminue : son pouvoir contagieux en est renforcé.

En outre, lors d'une épidémie, la majorité de la population est en contact à un moment ou à un autre avec l'agent infectieux, et développe une réaction immunitaire qui permet de lutter contre l'infection. Pendant quelque temps, une nouvelle épidémie avec le même agent est donc peu probable ; puis, après un délai qui dépend du type de micro-organisme, la population redevient sensible, soit par disparition de l'immunité si l'agent était peu « immunogène », soit parce que cet agent a muté, si bien qu'il n'est plus reconnu par le système immunitaire des individus exposés au premier virus. En hiver, plusieurs épidémies de virus proches peuvent apparaître par vagues. Par ailleurs, une infection détourne une grande partie des ressources immunitaires contre l'agent en cause, si bien que l'individu risque de se retrouver désarmé face à d'autres pathogènes. C'est ce qui explique qu'une personne infectée par la grippe contracte parfois une pneumonie à pneumocoques.

Enfin, l'état sanitaire général de la population est également un point important. Se défendre contre une infection mobilise des ressources physiologiques qu'il faut être capable de fournir. Certaines personnes risquent plus que d'autres de contracter une infection : les nourrissons, les femmes enceintes, les personnes âgées ou celles souffrant déjà d'une autre pathologie. Cet état sanitaire dépend bien sûr du statut socio-économique de la population et de facteurs tels que la malnutrition, voire la dénutrition.

Malgré l'accumulation de données épidémiologiques et une meilleure compréhension des mécanismes physiopathologiques, notre capacité à modéliser la surmortalité par temps froid reste limitée. À la fin des années 1960, Ronald Douglas, de l'Université du Texas, et ses collègues n'ont pas réussi à relier l'infection par le rhinovirus à une simple exposition à de l'air froid, car le nombre de facteurs pouvant jouer un rôle est trop important. À l'inverse, d'autres facteurs ont été reliés au risque d'attraper un rhume, alors qu'il n'y a pas de relation de causalité directe : par exemple, un temps de sommeil inférieur à sept heures multiplie par trois ce risque (mais on ignore si le manque de sommeil diminue les défenses immunitaires ou s'il s'agit d'un biais statistique).

De surcroît, le refroidissement de l'organisme au-dessous de 37 °C, par exemple, dépend non seulement de la température extérieure, mais aussi de phénomènes d'évaporation, liés à l'humidité et à la présence de vent fort. Ainsi, une température de –10 °C avec un vent soufflant à 30 kilomètres par heure correspond à –18 °C sans vent. De même, certains déterminants, telles la pollution ou la promiscuité, sont difficiles à quantifier. Sans compter le rôle des déplacements, notamment en avion, ou de la mode vestimentaire ou encore des événements naturels, tels qu'une inondation.

Peut-on réduire les risques de contamination ?

En résumé, on « attrape froid » et on tombe malade en hiver quand les défenses de l'organisme sont affaiblies et les virus plus nombreux qu'en été. Ce sont ces paramètres, conséquences du froid, qui sont responsables de la recrudescence des maladies infectieuses en hiver.

Peut-on l'éviter ? L'écharpe ou le grog permettent-ils de se protéger par temps froid ? Probablement pas, car ils n'empêchent pas d'être en contact avec les agents infectieux, et ne suffisent pas à réchauffer l'organisme, ni l'air inspiré. En revanche, placer l'écharpe sur le nez réchauffe l'air avant son entrée dans les poumons, et évite la vasoconstriction des bronches dont nous avons évoqué les conséquences néfastes.

Enfin, n'oublions pas que la plupart des pathogènes sont transmis par les mains et que le lavage régulier est l'une des meilleures protections possibles contre les infections. Et rappelons qu'en ce début d'automne, la vaccination contre la grippe, l'utilisation de mouchoirs jetables, et le port d'un masque restent les meilleurs moyens de se protéger et de protéger les autres, en particulier les plus fragiles, contre les maladies respiratoires infectieuses. ■

Luc de SAINT-MARTIN PERNOT est médecin interniste au Centre hospitalier régional universitaire de Brest.

© Shutterstock/Lightspring

De Galois aux corps finis

Le 25 octobre 2011 marque le bicentenaire de la naissance d'Évariste Galois. Les découvertes du fougueux jeune homme, notamment sur les structures algébriques nommées corps finis, ont profondément marqué les mathématiques.

Antoine Chambert-Loir

L'ESSENTIEL

- Évariste Galois était un mathématicien prodige, mais incompris. Il est mort très jeune dans des conditions tragiques.
- Il a découvert un important critère pour déterminer si une équation polynomiale est résoluble par radicaux.
- Galois est notamment à l'origine de la théorie des groupes et de celle des corps finis.
- Son héritage mathématique traverse de nombreux domaines et a des applications par exemple en cryptographie.

Bruno Bourgeois

Cet automne, les mathématiciens célèbrent le 200e anniversaire de la naissance d'Évariste Galois. Au cours de sa brève et tumultueuse vie, ce mathématicien prodigieux, dont l'œuvre tient pourtant en à peine 60 pages, a fait plusieurs découvertes fondamentales relatives à la théorie des équations polynomiales. En particulier, on lui doit l'émergence des notions de groupe et de corps fini, des structures algébriques qui jouent aujourd'hui un rôle crucial dans de nombreux domaines des mathématiques et de leurs applications.

Le 200e anniversaire de la naissance de Galois offre l'occasion de revenir sur ces travaux qui ont marqué l'histoire des mathématiques et dont la postérité reste bien vivante. Nous passerons ainsi des équations polynomiales aux équations en congruence, qui permettent d'introduire les corps finis, puis nous terminerons par l'une des applications de la théorie des corps finis, le cryptage dit asymétrique.

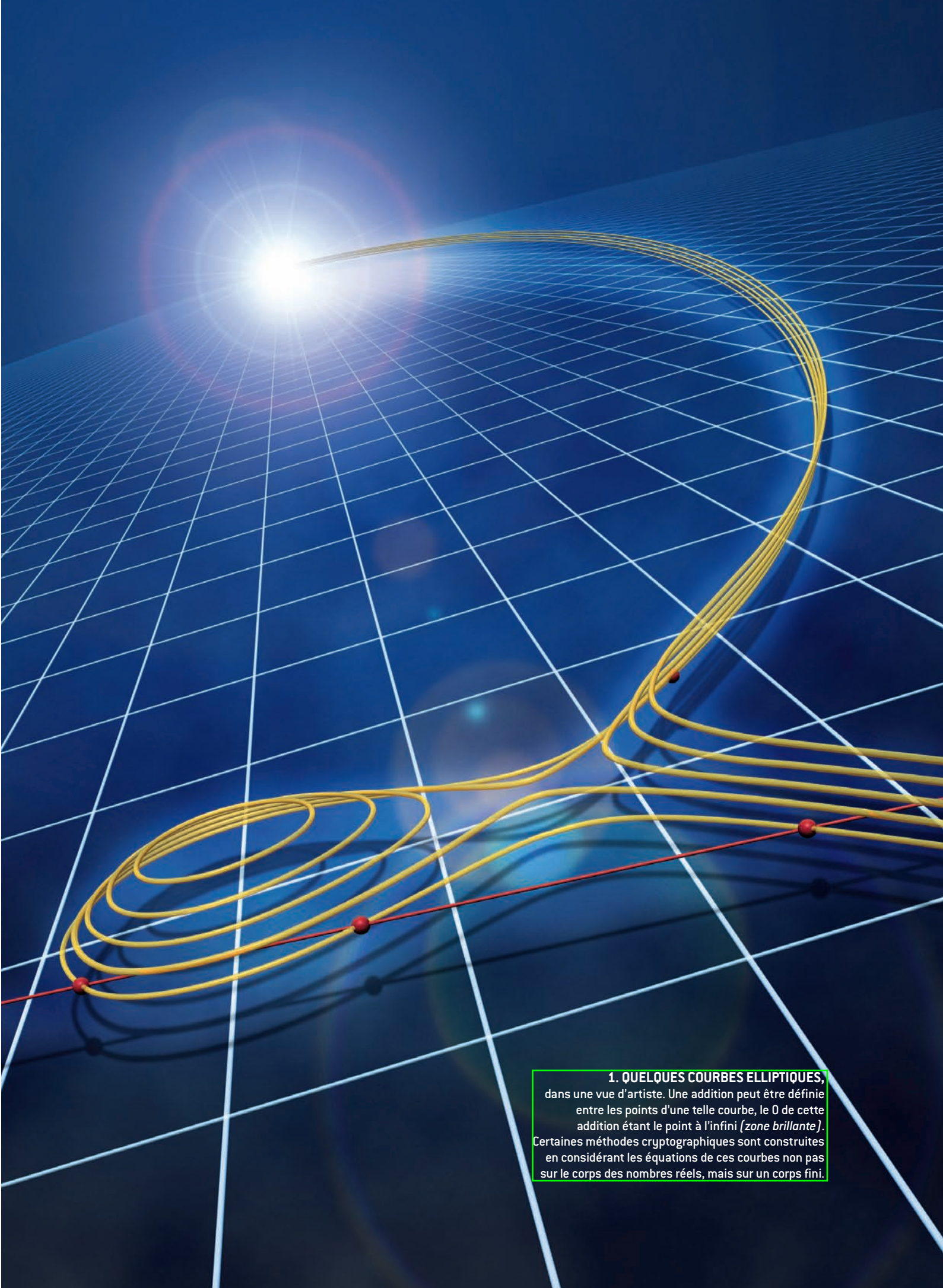
Commençons par les équations polynomiales. Les équations qui nous intéressent ici ont une seule inconnue, qui représente un nombre et que nous noterons x. Elles prennent la forme d'une relation mettant en jeu des sommes de puissances entières et positives (x, x^2, x^3, etc.) de ce nombre. La plus grande puissance qui apparaît dans l'équation est le « degré » de l'équation.

Les équations polynomiales de degré 1 sont élémentaires. Un exemple est l'équation $3x - 5 = 0$, dont la solution s'obtient en faisant passer le terme constant (ici, 5) dans le second membre et en divisant l'équation par le coefficient de x (ici, 3). On trouve ainsi la solution $x = 5/3$.

Existe-t-il une formule pour la solution ?

En degré 2, l'équation prend la forme $ax^2 + bx + c = 0$, où a, b et c sont trois paramètres, avec $a \neq 0$; un exemple d'une telle équation est $x^2 - x - 1 = 0$ (dont une des deux solutions est le nombre d'or). On sait résoudre toutes les équations de degré 2 depuis environ quatre siècles ; la solution générale est donnée par la formule $x = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a$. Cette dernière est bien connue des lycéens, et l'on peut

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



1. QUELQUES COURBES ELLIPTIQUES, dans une vue d'artiste. Une addition peut être définie entre les points d'une telle courbe, le 0 de cette addition étant le point à l'infini *(zone brillante)*. Certaines méthodes cryptographiques sont construites en considérant les équations de ces courbes non pas sur le corps des nombres réels, mais sur un corps fini.

Galois, héros tragique des mathématiques

Évariste Galois, né le 25 octobre 1811 à Bourg-la-Reine, au Sud de Paris, est mort à moins de 21 ans le 31 mai 1832, tué dans un duel auquel il n'avait pu se soustraire et ce, dans des circonstances obscures. Le duel était semble-t-il lié à une « infâme coquette et [...] deux dupes de cette coquette ».



Galois s'intéresse dès l'âge de 16 ans aux mathématiques, qui deviendront l'une de ses passions, avec la politique. Mal préparé, il échoue deux fois au concours d'entrée à l'École polytechnique, la plus prestigieuse de l'époque. Il parvient toutefois à intégrer l'École préparatoire, avatar de ce qui était et redeviendra l'École normale supérieure. Mais il en est expulsé début 1831. Peu après, il remet à l'Académie son mémoire « Sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux ». Ce texte est d'abord égaré par l'Académie, puis rejeté par Sylvestre Lacroix et Denis Poisson, mathématiciens qui l'examinent sans le comprendre.

L'œuvre mathématique de Galois restera dans l'ombre jusqu'à ce que Joseph Liouville, sollicité par le frère d'Évariste et par son ami Auguste Chevalier, la redécouvre et en comprenne la portée. Il la présente à l'Académie en 1843, et commence à la publier en 1846.

même dire qu'elle fait partie du patrimoine culturel ; on la trouve ainsi un peu partout dans les bandes dessinées de Marcel Gotlib, souvent en conjonction avec son personnage d'Isaac Newton. Par exemple, pour l'équation du nombre d'or, $x^2 - x - 1 = 0$, on trouve $x = (1 \pm \sqrt{5})/2$; le nombre d'or lui-même est la racine positive de l'équation, c'est-à-dire $(1 + \sqrt{5})/2$.

Nombres, équations, groupe de Galois

Pour la théorie des nombres, le cas où les coefficients a, b et c de l'équation sont des nombres entiers est le plus important ; on voit que les solutions sont des nombres rationnels précisément dans le cas où le discriminant $b^2 - 4ac$ est un carré parfait (le carré d'un entier). Lorsque le discriminant est négatif, cette solution fait apparaître des nombres qu'on avait, un temps seulement, qualifiés d'imaginaires (parce qu'un carré ne saurait être négatif), mais dont leur utilité est telle qu'ils ont rapidement acquis une place centrale en mathématiques et dans les sciences en général. On les nomme aujourd'hui « nombres complexes », bien qu'une fois passée la surprise de leur découverte, leur maniement n'ait rien de si complexe.

Décidons d'introduire un nombre i tel que $i^2 = -1$. C'est l'apanage des mathématiciens de pouvoir décréter ce genre de chose, qui ressemble au « Que la lumière soit ! » de la Bible. Cependant, comme jadis, c'est là que les choses sérieuses commencent : il faut s'assurer que l'on n'a ni créé un chaos absolu ni tout envoyé dans le néant. Que peut-on faire avec une telle racine « imaginaire » de –1 ? On peut considérer des nombres de la forme $x + yi$ (où x et y sont des nombres réels) et les additionner : la somme de $x + yi$ et de $x' + y'i$ est égale à $(x + x') + (y + y')i$. On peut aussi les multiplier : en développant le produit $(x + yi)(x' + y'i)$ des deux nombres précédents, on trouve qu'il est égal à $xx' + (yx' + xy')i + yy'i^2$, c'est-à-dire à $(xx' - yy') + (yx' + xy')i$ puisque $i^2 = -1$.

Autrement dit, l'ensemble des nombres de la forme $x + yi$ est stable par addition et multiplication ; il est aussi stable par soustraction, et l'on peut aussi diviser par un nombre de cette forme, sauf si $x = y = 0$.

Pourquoi l'introduction des nombres complexes est-elle cruciale en mathématiques et dans beaucoup d'autres domaines scientifiques ? Parce qu'une propriété fondamentale des équations polynomiales leur est liée : toute équation polynomiale, à coefficients réels ou complexes, possède exactement autant de solutions que son degré (supposé au moins égal à 1). J'insiste : avec les nombres réels, usuels, il existe des équations très simples sans solutions, par exemple $x^2 + 1 = 0$ (dont les solutions seraient des racines carrées de –1), mais dès qu'on introduit cette racine carrée de –1 notée i, toutes les équations polynomiales ont des solutions.

Le problème persiste, en revanche, de trouver des formules pour ces solutions. En degrés 3 et 4, il existe des formules analogues à celle dont on dispose pour le degré 2, qu'ont découvertes au XVIe siècle les mathématiciens italiens Jérôme Cardan, Tartaglia (surnom de Niccolo Fontana), Ludovico Ferrari. Mais elles sont plus compliquées et font intervenir des racines cubiques et quartiques (du quatrième ordre).

Au XIXe siècle, le mathématicien norvégien Niels Abel découvrit que les racines de certaines équations du cinquième degré ne peuvent pas être calculées par des formules générales semblables. L'un des apports les plus connus de Galois est d'avoir compris pourquoi il en était ainsi.

Une équation polynomiale étant donnée, Galois introduisit le groupe formé par les permutations de ses « racines » (ses solutions) qui préservent les relations algébriques satisfaites par ces racines. Cela signifie que si l'on a, par exemple, deux racines a et b vérifiant $a + b^2 = 1$, leurs images a' et b' par une permutation du groupe doivent aussi satisfaire $a' + (b')^2 = 1$. Ce groupe est aujourd'hui appelé le « groupe de Galois » de l'équation considérée.

Galois prouva que l'on peut calculer les solutions d'une équation polynomiale à l'aide de radicaux si et seulement si le groupe de Galois de l'équation possède une certaine propriété technique, nommée « résolubilité » en référence à ce résultat. Si le groupe n'est pas résoluble, il est impossible d'exprimer les solutions de l'équation à l'aide d'une formule construite avec des radicaux.

Des congruences aux corps finis

Abordons maintenant une autre découverte importante de Galois : les corps finis, que les Anglo-Saxons nomment d'ailleurs *Galois fields*. Cette découverte fait l'objet d'une petite note d'une dizaine de pages parue en 1830 et intitulée *Sur la théorie des nombres*. D'une certaine façon, Galois se proposait de combiner la théorie des équations polynomiales avec celle des congruences. Rappelons ce qu'est cette dernière.

Parmi les plus anciens ouvrages de mathématiques figure le *Sunzi Suangjing*, texte chinois du Ve siècle environ, où l'on trouve le problème suivant : « Nous avons un nombre inconnu de choses. Si nous les comptons par trois, il en reste deux ; si nous les comptons par cinq, il en reste trois, si nous les comptons par sept, il en reste deux. Trouver le nombre de ces choses. »

Appelons x l'inconnue ; c'est un nombre entier et la phrase centrale du problème affirme que x est égal à 2 plus un multiple

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

(indéfini) de 3, à 3 plus un multiple de 5, et à 2 plus un multiple de 7. On résume ces égalités, à un multiple près de 3, 5 ou 7, par le mot « congruence ». En d'autres termes, on dit que x est congru à 2 modulo 3, à 3 modulo 5, et à 2 modulo 7, ce que l'on écrit $x \equiv 2 \pmod 3$, $x \equiv 3 \pmod 5$, $x \equiv 2 \pmod 7$. Les entiers 3, 5 et 7 sont les « raisons » de ces congruences.

Une chinoiserie ?

Le *Sunzi Sunangjing* explique comment résoudre ces congruences, c'est-à-dire comment trouver les entiers x qui les vérifient. Ce « théorème des restes chinois », comme on le nomme parfois, dit d'ajouter 2×70, 3×21 et 2×15 (cela fait $140 + 63 + 30 = 233$) et de soustraire 105 tant que le résultat est supérieur à 106. Dans cette formule, 70, 21 et 15 ont été choisis parce que 70 est multiple de 5 et de 7 ($70 = 2 \times 5 \times 7$) et est congru à 1 modulo 3 (car $70 = 1 + 69 = 1 + 3 \times 23$), 21 est multiple de 3 et de 7 et est congru à 1 modulo 5, 15 est multiple de 3 et de 5 et est congru à 1 modulo 7. En outre, $105 = 3 \times 5 \times 7$. Dans cet exemple, on trouve donc que x est congru à 23 modulo 105 : trois congruences modulo les nombres premiers 3, 5 et 7 ont été transformées en une seule congruence ayant pour raison le produit $105 = 3 \times 5 \times 7$ de leurs raisons.

Le développement de l'algèbre a permis de comprendre que, dans le calcul des congruences, on peut négliger complètement le multiple indéfini et calculer comme si la raison était nulle. Par exemple, modulo 13, on a $6 \equiv -7$ puisque $6 - (-7) = 13 \equiv 0$; de même, $5 \times 7 \equiv 35 \equiv 3 \times 13 - 4 \equiv -4$. On peut aussi résoudre des équations en congruences ; examinons par exemple la congruence $3x - 5 \equiv 0 \pmod 7$; si l'on multiplie l'équation par 2, on trouve $6x - 10 \equiv 0 \pmod 7$. Mais $6 \equiv -1 \pmod 7$ et $-10 = -14 + 4 \equiv 4 \pmod 7$, si bien que l'équation devient $-x + 4 \equiv 0 \pmod 7$, d'où $x \equiv 4$. Inversement, si $x \equiv 4$, $3x \equiv 12 \equiv 5 \pmod 7$.

Il y a en revanche quelques subtilités nouvelles. Par exemple, 2 et 3 ne sont pas multiples de 6 (ils ne sont pas nuls modulo 6), mais leur produit l'est. Autrement dit, le produit de deux nombres peut être nul (en congruence) sans qu'aucun d'eux ne le soit.

Ce phénomène d'apparence pathologique – un produit égal à zéro alors que les facteurs sont non nuls – ne se présente pas lorsque la raison est un nombre premier, c'est-à-dire un entier positif divisible seulement par 1 et par lui-même. En effet, d'après un résultat d'Euclide, le produit de deux entiers ne peut être multiple d'un nombre premier p sans qu'au moins l'un des deux ne le soit. Pour cette raison, les congruences modulo p, où p est un nombre premier, sont les plus fondamentales en mathématiques.

Ainsi, avec le développement de la théorie des équations et celui de la théorie des nombres, est née peu à peu une théorie des équations polynomiales modulo un nombre premier. Le grand mathématicien allemand Carl Friedrich Gauss avait lui-même largement étudié ce sujet dans lequel, comme le dit Galois lui-même, il s'agit de résoudre une équation en considérant que tout multiple d'un nombre premier donné est nul.

Par exemple, comment résoudre l'équation du nombre d'or, $x^2 - x - 1 = 0$, modulo la raison 7 ou modulo la raison 11 ? On peut commencer par raisonner comme en algèbre classique. Modulo 7, on peut écrire :
$0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 8x - 1 \equiv$
$(x - 4)^2 - 17 \equiv (x - 4)^2 - 3 \pmod 7$;
s'il existe une solution entière x de cette congruence, il faut que 3 soit un carré

L'AUTEUR



Antoine CHAMBERT-LOIR
est professeur de mathématiques
à l'Université de Rennes 1.

✔ SUR LE WEB

Pour des détails sur les célébrations du **bicentenaire de la naissance d'Évariste Galois**, voir : http://www.galois.ihp.fr/

Qu'est-ce qu'un corps ?

Un corps est un ensemble muni d'une addition et d'une multiplication, et de deux éléments distincts notés 0 et 1, qui vérifient les axiomes suivants (a, b et c désignent ici des éléments quelconques du corps) :

- $a + b = b + a$ (commutativité de l'addition) ;
- $(a + b) + c = a + (b + c)$ (associativité de l'addition) ;
- $a + 0 = a$; pour tout a, il existe un unique élément b tel que $a + b = 0$, et on le note $-a$;
- $(a \times b) \times c = a \times (b \times c)$ (associativité de la multiplication) ;
- $a \times 1 = 1 \times a = a$; pour tout $a \neq 0$, il existe un unique élément, noté $1/a$ ou a^{-1}, tel que $a \times a^{-1} = a^{-1} \times a = 1$.
- $(a + b) \times c = a \times c + b \times c$ (distributivité de la multiplication par rapport à l'addition).

La soustraction est alors définie par la formule $a - b = a + (-b)$, la division par un élément non nul par la formule $a/b = a \times (1/b)$. Pour tout a, $a \times 0 = 0$, $a \times (-1) = -a$, etc.

Des exemples de corps sont l'ensemble des nombres rationnels (c'est le calcul des fractions appris à l'école élémentaire) ainsi que ceux des nombres réels et complexes. Ces trois corps sont infinis : ils contiennent une infinité d'éléments (par exemple 1, 2, 3, etc.).

On peut faire de l'ensemble {0, 1} un corps avec les lois d'addition et de multiplication données par les tables suivantes :
(où seule la formule $1 + 1 = 0$ n'est pas explicitement forcée par les axiomes ci-dessus). C'est donc un corps à deux éléments ; l'informatique, avec la numération binaire, lui a donné un rôle fondamental.

+	0	1
0	0	1
1	1	0

×	0	1
0	0	0
1	0	1

Plus généralement, si n est un entier supérieur ou égal à 2, on peut tenter de faire de l'ensemble $\{0, 1, \ldots, n-1\}$ un corps en disant d'abord que la somme (le produit) de deux éléments est le reste de la division par n de leur somme (de leur produit). Cela en fait un « anneau » : la seule propriété qui manque pour en faire un corps est l'existence d'un inverse pour tout élément autre que 0. Lorsque (et seulement lorsque) n est un nombre premier, l'ensemble $\{0, 1, \ldots, n-1\}$ est un corps, que Carl Friedrich Gauss avait étudié en grand détail dans ses *Disquisitiones Arithmeticae* (1798).

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Calculer x^a rapidement

✔ **Il existe un algorithme récursif qui permet de calculer très rapidement la puissance entière x^a d'un nombre x. Cet algorithme est fondé sur la numération binaire de l'entier a, et sur le fait que $x^a = (x^2)^{a/2}$ si a est pair, et que $x^a = x\,(x^2)^{(a-1)/2}$ si a est impair. On a par exemple $x^{19} = x\,(x^2)\,(x^{16})$, où x^{16} est calculé par quatre élévations successives au carré : $x^{16} = (((x^2)^2)^2)^2$. On obtient ainsi une méthode de calcul par récurrence qui ne demande qu'environ $2n$ multiplications pour calculer x^a, où n est le nombre de chiffres du développement binaire de a.**

modulo 7 ; or les carrés modulo 7 sont 0, 1, $2^2 = 4$, $3^2 = 9 \equiv 2$, $4^2 \equiv (-3)^2 \equiv 2$, $5^2 \equiv (-2)^2 \equiv 4$ et $6^2 \equiv (-1)^2 \equiv 1$. On constate en particulier que 3 n'est pas un carré modulo 7 et cette équation en congruence n'a donc pas de solution.

Modulo 11, on écrit plutôt :

$0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 12x - 1 \equiv (x-6)^2 - 37 \equiv (x-6)^2 - 4 \pmod{11}$.

Par conséquent, $(x-6)^2 \equiv 4 \equiv 2^2$, d'où l'on déduit (comme d'habitude !) que $x - 6 = \pm 2$. On trouve ainsi deux solutions modulo 11, à savoir $x = 4$ et $x = 8$.

Équations polynomiales et congruences

Alors que ses prédécesseurs s'étaient contentés de chercher les solutions entières de congruences polynomiales, Galois s'est intéressé aux espèces de nombres complexes (ou, comme il dit, aux « quantités imaginaires ») que l'on peut définir à partir d'une congruence polynomiale, de la même façon qu'on avait créé les nombres complexes à partir d'une solution « imaginaire » de l'équation $x^2 + 1 = 0$.

Galois considère donc une raison, qui est un nombre premier p et, un polynôme arbitraire $F(x)$ de degré d et à coefficients entiers. Il fait deux hypothèses sur ce polynôme $F(x)$: d'une part, que le coefficient de x^d ne soit pas un multiple de p et, d'autre part, qu'on ne puisse pas factoriser F modulo p, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de polynômes F_1 et F_2 tels que $F \equiv F_1 F_2 \pmod{p}$. Galois dit que la congruence $F(x) \equiv 0 \pmod{p}$ est « irréductible ». Par exemple, si $p = 13$, on ne peut pas prendre $F = x^2 + 1$, car $x^2 + 1 \equiv (x-5)(x-8) \pmod{13}$, mais on peut vérifier que le choix $p = 11$ et $F = x^2 + 1$ convient ; il en est de même du choix $p = 13$ et $F = x^2 - 2$, ou encore $p = 7$ et $F = x^2 - x - 1$.

Nous avions introduit un symbole i pour désigner une racine de l'équation $x^2 + 1 = 0$ et vu que l'on pouvait calculer naturellement avec lui. Faisons de même ici : traitons la lettre x, non plus comme une inconnue, mais comme une solution de la congruence $F(x) \equiv 0 \pmod{p}$. Cela donne lieu à un ensemble de p^d « nombres » : tous ceux de la forme :

$$a_0 + a_1 x + \ldots + a_{d-1} x^{d-1},$$

où $a_0, \ldots, a_{d-1}$ sont des entiers compris entre 0 et $p - 1$ (il y a p choix pour chacun des d coefficients, d'où p^d nombres distincts). Ces nombres peuvent être additionnés (on additionne les coefficients de type a_0, ceux de type a_1, etc., en soustrayant p si leur somme dépasse p), ou soustraits. De façon peut-être plus surprenante, on peut aussi les multiplier : si l'on développe le produit de deux nombres de la forme $a_0 + a_1 x + \ldots + a_{d-1} x^{d-1}$, on voit apparaître des puissances de x avec un exposant qui peut dépasser $d - 1$; mais la congruence $F(x) \equiv 0 \pmod{p}$ permet de remplacer x^d par un nombre admissible, x^{d+1} aussi, etc.

Par exemple, si $x^3 + 2x - 1 \equiv 0 \pmod{5}$, alors $x^4 + 2x^2 - x \equiv 0$, et par conséquent $x^4 \equiv -2x^2 + x \equiv 3x^2 + x \pmod{5}$. On en déduit que $x^5 \equiv 3x^3 + x^2 \equiv 3(3x + 1) + x^2 \equiv x^2 + 9x + 3 \equiv x^2 + 4x + 3 \pmod{5}$, etc. Enfin, et c'est là qu'intervient l'hypothèse que la congruence $F(x) \equiv 0$ est irréductible, on peut aussi diviser par tout nombre différent de 0.

On obtient ainsi un ensemble de p^d nombres avec lesquels on peut calculer de façon naturelle : addition, soustraction, multiplication, division par tout élément non nul, ces opérations obéissant aux règles usuelles (commutativité, associativité de l'addition et de la multiplication, distributivité de

L'addition dans une courbe elliptique

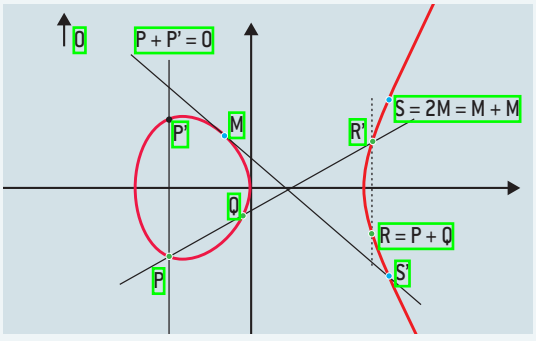
Les courbes elliptiques, qui n'ont pas du tout la forme d'une ellipse, ont été nommées ainsi parce que leurs équations ont un lien avec le calcul de la longueur d'arcs d'ellipses. Une courbe elliptique E est définie par une équation cubique qui peut être mise sous la forme $y^2 = x^3 + ux + v$, où u et v sont des nombres réels tels que $4u^3 + 27v^2$ soit non nul (sinon, la courbe a un point singulier).

Une particularité des courbes elliptiques est qu'on peut définir une addition entre leurs points. L'addition de deux points P et Q d'une courbe elliptique E est définie ainsi : si la droite passant par P et Q rencontre la courbe en un troisième point R', le point R = P + Q est le symétrique de R' par rapport à l'axe (horizontal) de symétrie de la courbe. Si la droite passant par P et Q est verticale, on considère que R est à l'infini ; le point à l'infini est défini comme étant le 0 de l'addition. Et quand Q est confondu avec P, la droite tangente à la courbe en P définit le point R = P + P = 2P. Notamment, la somme de trois points P, Q, R est égale au point 0 si et seulement si ces trois points sont alignés.

Muni de cette addition, l'ensemble des points de la courbe elliptique forme un groupe additif (structure algébrique munie d'une addition, supposée associative, où il existe un élément neutre noté 0 et où chaque élément a possède un inverse a' tel que $a + a' = 0$).

Une courbe elliptique peut aussi être considérée sur un corps F différent de celui des nombres réels *(voir la figure 2)*. Dans ce cas, les paramètres u et v sont des éléments de F et le groupe E(F) des points de la courbe elliptique E est formé des solutions (x, y) de l'équation $y^2 = x^3 + ux + v$ considérée dans le corps F, auquel on adjoint un point à l'infini 0.

Signalons que les courbes elliptiques ont joué un rôle central dans la preuve par Andrew Wiles du « grand théorème de Fermat », selon lequel il n'existe pas d'entiers strictement positifs a, b, c tels que $a^n + b^n = c^n$ pour un entier n supérieur à 2.



© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

la multiplication sur l'addition). C'est un exemple de ce qu'on appelle en mathématiques un corps *(voir l'encadré page 27)*; et comme il n'a qu'un nombre fini d'éléments, on dit que c'est un corps fini.

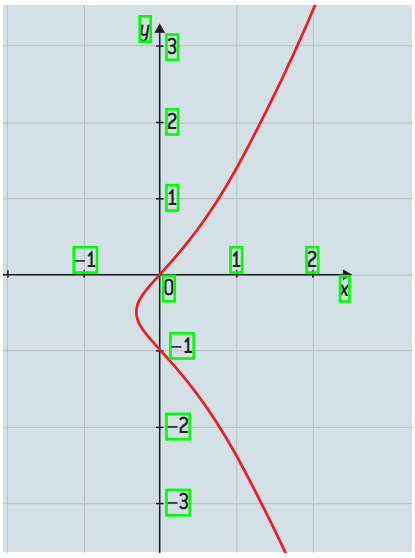
Dans sa note, Galois explique ensuite un certain nombre des propriétés de ces corps finis. Il commence par démontrer que dans un corps fini ayant p^d éléments, tout élément a vérifie $a^{(p^d)} = a$; cela généralise la congruence classique, dénommée « petit théorème de Fermat », selon laquelle $a^p \equiv a \pmod p$ pour tout entier a et tout nombre premier p. Il démontre aussi qu'il existe une « racine primitive » de cette équation $a^{(p^d)} = a$, autrement dit un élément non nul a tel que la suite 0, 1, a, a^2, ..., $a^{(p^d-2)}$ décrive exactement le corps fini.

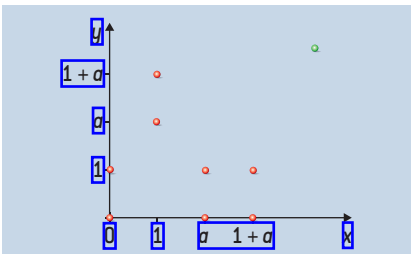
Pour construire un corps fini de « cardinal » p^d, c'est-à-dire ayant p^d éléments, par la méthode expliquée par Galois, il faut partir d'un polynôme F de degré d qui est irréductible modulo p. Galois explique alors qu'un tel polynôme est un facteur modulo p du polynôme $x^{(p^d)} - x$. Peu après, le mathématicien et astronome français Joseph Serret a démontré que l'on peut effectivement trouver un tel facteur, de sorte que, pour chaque puissance p^d d'un nombre premier p, il existe un corps fini de cardinal p^d. Et ce corps est même unique au sens où, pour deux corps finis de même cardinal (obtenus par exemple en suivant la construction de Galois pour deux polynômes F_1 et F_2), on a un dictionnaire reliant un à un les éléments des deux corps qui est compatible avec les règles de calcul (les mathématiciens disent que les deux corps sont isomorphes).

Des corps finis à la cryptographie

Dans les décennies qui ont suivi la note de Galois, plusieurs mathématiciens ont complété les travaux de Galois et formalisé la notion de corps telle qu'elle est présentée dans l'encadré page 27. À la mort de Gauss, en 1855, on a retrouvé un huitième chapitre de ses *Disquisitiones*, qu'il avait écrit en 1797 mais qui n'a été publié par le mathématicien allemand Richard Dedekind qu'en 1863. Dans ce texte, Gauss développait une théorie très proche de celle que Galois avait inventée.

La théorie des corps finis a rapidement montré son importance pour les mathématiques. C'en est aujourd'hui un outil crucial, y compris dans des domaines qui, à première vue, semblent ne pas relever de l'arithmétique tels que la théorie des fonctions automorphes et le programme de Langlands (un grand ensemble de conjectures techniques liant algèbre, théorie des fonctions et théorie des nombres).





2. L'ÉQUATION D'UNE COURBE plane est de la forme $f(x, y) = 0$, à l'instar de l'équation $y^2 + y = x^3 + x^2 + x$ de la courbe elliptique ci-contre. Mais une telle équation peut aussi être considérée dans un corps fini, et non sur le corps des nombres réels. Ainsi, dans le corps à $4 = 2^2$ éléments ($p = 2$, $d = 2$) formés par les polynômes 0, 1, a et $1 + a$ (où l'on a $1 + 1 = 0$ et $a^2 = a + 1$), la courbe elliptique considérée possède huit points *(graphe ci-dessus)* en plus du point 0 à l'infini *(en vert)*.

Les corps finis sont aussi au cœur des télécommunications modernes et des mécanismes intimes du réseau Internet, en particulier dans tout ce qui touche à la sécurité du commerce électronique. Lorsque vous achetez en ligne un livre, un disque ou un appareil photo, vient inévitablement le moment du paiement où il vous faut transmettre votre numéro de carte bancaire. Évidemment, vous aimeriez être certain qu'aucune personne non autorisée ne puisse obtenir ce numéro et l'utiliser à son profit. On est ainsi face à un problème classique de cryptographie : transmettre un message à son destinataire, et que seul ce dernier puisse en avoir connaissance.

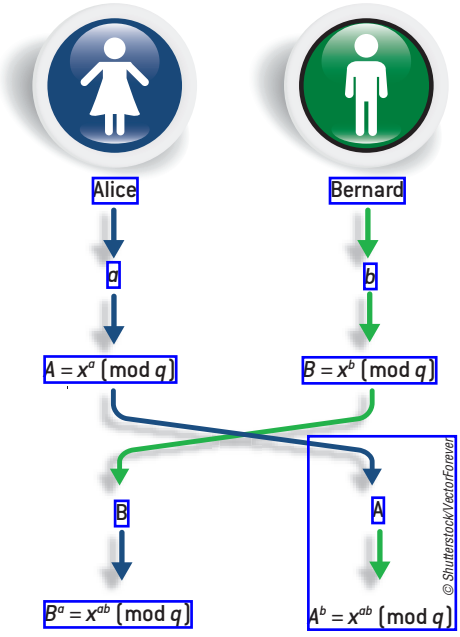
Jusque vers 1975, les seuls procédés connus de cryptographie étaient symétriques. L'émetteur et le destinataire conviennent d'un code secret, lequel sert aussi bien à coder un message qu'à le décoder. Dans sa *Vie des douze Césars*, l'historien romain Suétone écrivait à propos de Jules César qu'il « y employait, pour les choses tout à fait secrètes, une espèce de chiffre qui en rendait le sens inintelligible (les lettres étant disposées de manière à ne pouvoir jamais former un mot), et qui consistait, je le dis pour ceux qui voudront les déchiffrer, à changer le rang des lettres dans l'alphabet, en écrivant la quatrième pour la première, c'est-à-dire le d pour le a, et ainsi de suite ». Comme le suggère très bien Suétone, si vous savez comment Jules César procède pour coder un message, vous êtes aussitôt en mesure de déchiffrer un message qu'il a écrit, même si vous n'en êtes pas le destinataire.

Un tel mécanisme n'est pas très utile pour le commerce en ligne puisqu'un site Web ne peut pas matériellement prendre contact avec tous ses clients potentiels et convenir, avec chacun d'entre eux, d'un tel code secret. En 1976, les Américains Whitfield Diffie, Martin Hellman et Ralph Merkle proposèrent un nouveau type de procédé, nommé aujourd'hui cryptographie asymétrique.

Dans ce schéma, n'importe qui est capable de coder des messages, mais seul son destinataire peut les décoder. Pour cela, le destinataire dispose de deux clefs ; l'une est connue de tous et permet de coder les messages, tandis que l'autre, qui permet de décoder les messages, est gardée secrète. En 1978, au MIT, Ronald Rivest, Adi Shamir et Leonard Adleman inventèrent un tel protocole, appelé depuis RSA et très largement utilisé aujourd'hui, y compris dans des consoles de jeu.

Du point de vue mathématique, on peut penser à la cryptographie comme à deux ensembles de symboles, celui des messages et celui des messages codés (un message étant alors une suite de symboles), et à deux applications, l'une qui transforme un symbole en un symbole codé et l'autre qui transforme un symbole codé en un symbole en clair. Dans le schéma de Jules César, les deux ensembles sont les lettres de l'alphabet (latin) ; la fonction qui code un message décale les lettres de trois crans vers la gauche, celle qui décode les décale de trois crans vers la droite.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



3. LE PRINCIPE DE L'ÉCHANGE entre deux correspondants, nommés Alice et Bernard, permettant de définir en toute sécurité un secret commun représenté par $x^{ab} \pmod q$ (où q est le cardinal d'un corps fini et x une « racine primitive » de ce corps), les données x et q étant publiques.

Pour obtenir un protocole asymétrique pratique et fiable, il faut que la fonction de codage soit facile à calculer, mais qu'au contraire la fonction de décodage soit difficile à calculer si l'on ignore le code secret, même si l'on connaît la fonction de codage. Dans le cas d'une généralisation du chiffre de César où l'on permuterait les lettres d'une façon plus subtile qu'un simple décalage, il suffirait de 24 essais (le nombre de lettres de l'alphabet latin) pour savoir à quelle lettre correspond une lettre chiffrée. Cela prendrait donc juste un peu plus de temps de déchiffrer un message que de le crypter.

Mais lorsque l'ensemble des messages est très grand (10^{100} éléments, par exemple), il devient impossible de coder tous les messages possibles en espérant tomber sur un message chiffré donné : cela prendrait plus de temps que la durée de vie du Système solaire !

Face à ce problème, l'algèbre est potentiellement très utile, car se donner une formule est une façon très économique de définir une application, même entre ensembles gigantesques, et les corps finis fournissent de façon naturelle de tels ensembles tout en étant très faciles à construire.

LA THÉORIE DE GALOIS IRRIGUE

une grande partie des mathématiques d'aujourd'hui, de la théorie des nombres à celle des équations différentielles.

Dans cet ordre d'idées, expliquons comment, suivant W. Diffie et M. Hellman, deux individus, que nous appellerons Alice et Bernard, peuvent convenir d'un code secret même si Charles espionne leur conversation.

Pour cela, nos deux amis choisissent un corps fini, de cardinal q, ainsi qu'une racine primitive x (c'est-à-dire un élément x tel que la suite 0, 1, x, x^2, ..., x^{q-2} décrive tous les éléments du corps).

Alice et Bernard commencent par choisir chacun un nombre entier compris entre 1 et $q - 1$, sans le divulguer. Supposons qu'Alice ait choisi l'entier a et que Bernard ait choisi l'entier b. Alice communique alors à Bernard la valeur de x^a, tandis que Bernard communique à sa correspondante la valeur de x^b. Il est important de remarquer que, bien que x^a soit défini comme le produit de a facteurs égaux à x, un tel produit peut être calculé très rapidement *(voir page 28, en haut)*. Alice calcule alors $(x^b)^a$ dans le corps fini, et Bernard calcule $(x^a)^b$. Ainsi, les deux ont pu calculer l'élément x^{ab}, qui sera leur secret commun *(voir la figure 3)*.

Imaginons que Charles ait espionné tout l'échange entre Alice et Bernard ; il connaît donc x, x^a et x^b. L'efficacité du système repose sur le fait que personne ne sait efficacement calculer x^{ab} à partir de ces données. Une solution consisterait à retrouver la valeur de a ; c'est ce qu'on appelle le problème du « logarithme discret », a étant en quelque sorte le logarithme en base x de x^a. La méthode évidente pour ce faire consiste à calculer successivement x^2, x^3, etc., jusqu'à ce qu'apparaisse la valeur x^a ; mais, si a est choisi très grand, elle n'a aucune chance d'aboutir avant l'extinction du Soleil... Il existe cependant d'autres méthodes, plus subtiles et un peu plus efficaces. Pour que le système de communication secrète soit sûr, l'existence de ces méthodes impose que $q - 1$ ait au moins un facteur premier de très grande taille.

On gagne un peu en sécurité et en souplesse en remplaçant le calcul dans un corps fini par un calcul dans une structure algébrique plus compliquée. L'une des méthodes en vue consiste à utiliser le groupe des points d'une courbe elliptique définie sur un corps fini *(voir l'encadré page 28 et les figures 1 et 2)*. En d'autres termes, on se donne un corps fini assez grand F, une courbe elliptique E définie par une équation dont les coefficients appartiennent à F et un point P de cette courbe (dont les coordonnées appartiennent à F). L'intérêt des courbes elliptiques est que l'on peut y définir une addition entre points. Comme précédemment, Alice et Bernard choisissent des entiers a et b, calculent l'une aP et l'autre bP ; leur secret commun est le point (ab)P de la courbe E.

De tels protocoles sont implantés dans tous les systèmes de télécommunications modernes et témoignent de l'actualité de l'œuvre de Galois. Mais l'héritage de Galois est loin de se réduire au cryptage et au codage de données. Ce que l'on nomme aujourd'hui théorie de Galois est un édifice complexe qui irrigue une bonne partie des recherches mathématiques modernes, de la théorie des nombres à celle des équations différentielles, en passant par la géométrie algébrique et le programme de Langlands, dont la démonstration du célèbre théorème de Fermat constitue une retombée. ■

✔ BIBLIOGRAPHIE

N. Verdier, **Galois, le mathématicien maudit**, Belin-Pour la Science, 2011.

C. Ehrhardt, **Évariste Galois, la fabrication d'une icône mathématique**, Éditions de l'EHESS, à paraître, octobre 2011.

P. Pesic, **Abel, Galois et les équations algébriques**, *Pour la Science*, n° 366, avril 2008.

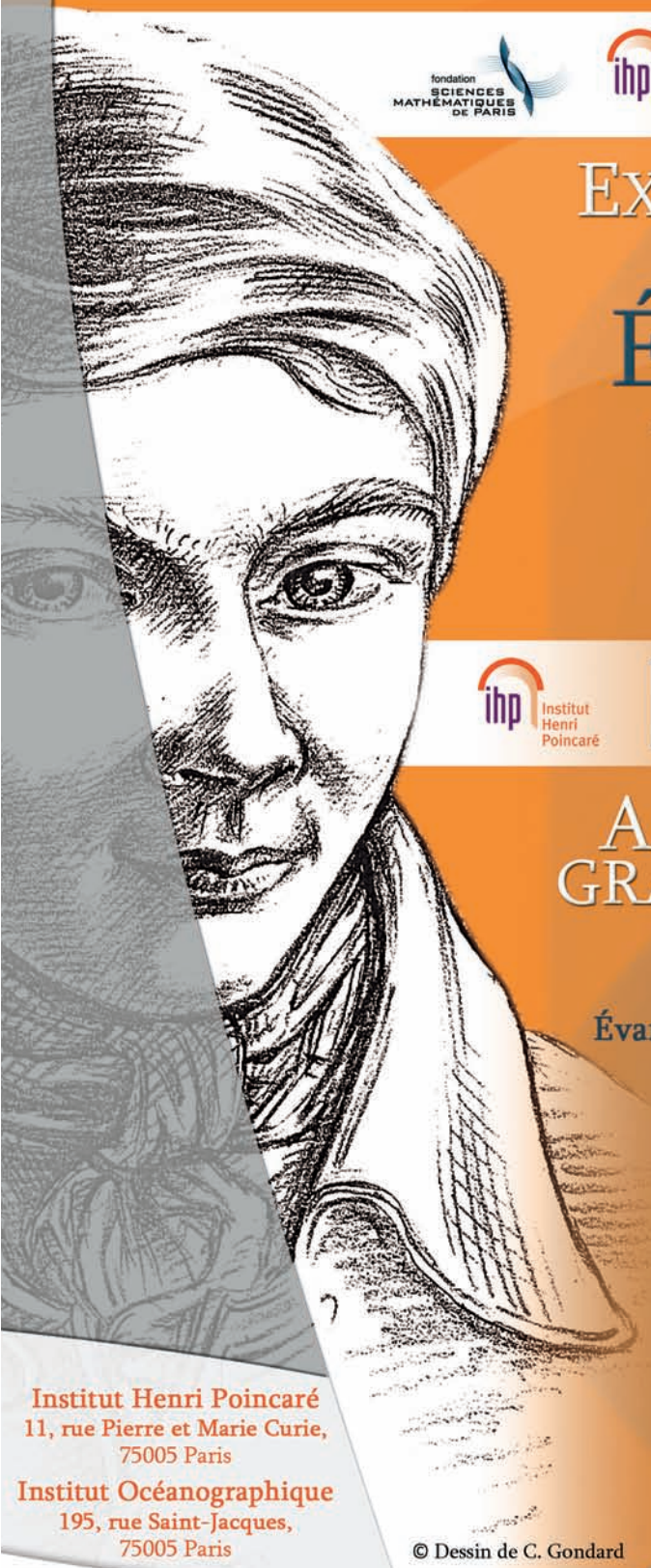
R. Langlands, **Le programme de Langlands**, *Pour la Science*, n° 361, novembre 2007.

A. Chambert-Loir, **Algèbre corporelle**, Éditions de l'École Polytechnique, 2005.

L'art du secret, *Dossier Pour la Science*, n° 36, juillet-octobre 2002.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Bicentenaire de la naissance d'Évariste Galois



du 17 octobre au 25 novembre 2011

EXPOSITION à la Bibliothèque de l'Institut Henri Poincaré

Évariste Galois : un mathématicien dans l'histoire

Commissaire scientifique de l'exposition : C. Ehrardt

Mercredi 26 octobre 2011

APRÈS-MIDI GRAND PUBLIC à l'Institut Océanographique

Projection du téléfilm de A. Astruc sur la vie de Galois

Exposé de B. Belhoste :
Évariste Galois, sa vie et son environnement scientifique

Exposé de V. Robert :
Les amis républicains d'Évariste Galois

Exposé de P. Cartier :
Les idées galoisiennes

Une table ronde sur le thème :
Galois et la figure du génie romantique en mathématiques

Spectacle des clowns scientifiques de la compagnie L'île logique
Pilouface, quand les clowns tombent sur la tranche...

Institut Henri Poincaré
11, rue Pierre et Marie Curie,
75005 Paris

Institut Océanographique
195, rue Saint-Jacques,
75005 Paris

© Dessin de C. Gondard

www.galois.ihp.fr

L'évolution de l'œil



Nos lointains ancêtres auraient été dotés d'un proto-œil qui captait la lumière, mais ne permettait pas de voir. Ensuite, l'œil a acquis des caractéristiques qui lui ont conféré la vision. Cette évolution aurait été très rapide : à peine 100 millions d'années.

Trevor Lamb

L'ESSENTIEL

✔ Les yeux des vertébrés sont très élaborés : ils captent la lumière et la focalisent sur la rétine, laquelle transmet des signaux qui sont traités et interprétés par le cerveau.

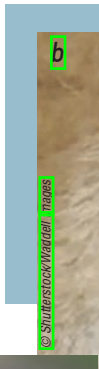
✔ L'étude comparative des composants de l'œil et de sa formation chez des poissons primitifs (lamproies et myxines) nous renseigne sur l'origine de cet organe complexe.

✔ Avant de devenir un organe visuel, l'œil de nos lointains ancêtres fonctionnait comme un détecteur de lumière qui imposait les rythmes circadiens.

ci-dessus : © Shutterstock/Andrei Nekrassov

L'œil humain est un appareil photo perfectionné. Il collecte la lumière, la focalise et la convertit en signaux électriques que le cerveau traduit en images. C'est la rétine qui détecte la lumière et traite les signaux reçus au moyen de dizaines de types différents de neurones. L'œil est si élaboré que les créationnistes l'ont utilisé comme exemple du concept de « complexité irréductible », selon lequel un système si perfectionné n'a pu évoluer naturellement à partir d'une forme ancestrale. De fait, Charles Darwin lui-même, le père de la théorie de l'évolution, reconnaissait dans son ouvrage *De l'origine des espèces*, publié en 1859, qu'il pouvait paraître absurde de penser que l'œil s'était formé au gré de processus évolutifs. Toutefois, il était convaincu que l'œil s'était transformé progressivement, et ce malgré l'absence de preuves de l'existence de formes évolutives intermédiaires.

Les preuves directes se sont fait attendre. En effet, si les paléontologues peuvent étudier facilement l'évolution des os grâce aux squelettes fossilisés, c'est beaucoup plus difficile pour les tissus mous, tels les yeux, dont les fossiles sont rarissimes. Et même quand ils retrouvent des fossiles, cela ne leur permet pas de déterminer comment les structures ont évolué, car il n'y a pas assez de détails. Toutefois, les biologistes ont récemment précisé l'origine de l'œil, en étudiant comment il se développe chez les embryons et en comparant les structures de l'œil de différentes espèces ainsi que les gènes impliqués. Ils ont ainsi reconstitué le moment où sont apparues ses principales caractéristiques. Ainsi, il a fallu moins d'une centaine de millions d'années pour que l'œil des vertébrés s'élabore.



b

© Shutterstock/Wadael Thabes



a

© Shutterstock/Mikael Mennkov

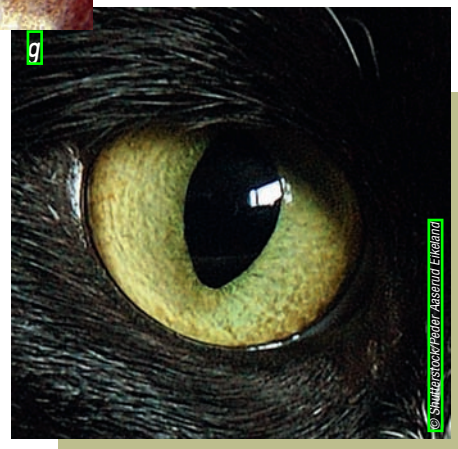
© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011















1. DEUX PRINCIPAUX TYPES D'ŒIL existent dans le règne animal : l'œil composé des arthropodes, tels celui d'un taon *(Haemotopoda pluvialis, a)* ou celui d'un crabe *(h)*, ou l'œil de type caméra des mollusques *(poulpe, e)* et des vertébrés, tels le mouton *(b)*, l'homme *(c)*, le python vert *Morelia viridis (d)*, l'iguane *(f)* ou le chat *(g)*. On comprend mieux aujourd'hui l'évolution de l'œil de type caméra grâce à l'étude de la lamproie, un poisson primitif *(page ci-contre en haut)*

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Il y a environ 600 millions d'années, il aurait évolué à partir d'un simple capteur de lumière qui imposait les rythmes circadiens et saisonniers pour devenir l'organe perfectionné, tant du point de vue optique que neurobiologique, que nous connaissons aujourd'hui. Plus de 150 ans après la publication de la théorie de Darwin, ces découvertes sonnent le glas de la complexité irréductible. Elles expliquent aussi pourquoi l'œil, loin d'être une pièce mécanique parfaite, présente plusieurs défauts importants, qui constituent des « erreurs » de l'évolution. L'évolution ne conduit pas à la perfection. Elle « bricole » avec le matériel disponible, et aboutit parfois à des résultats bizarres.

Des yeux composés et des yeux de type caméra

Avant d'aborder l'histoire de l'œil, rappelons que l'espèce humaine dérive d'une série continue d'ancêtres qui ont évolué depuis l'apparition de la vie sur Terre, il y a presque quatre milliards d'années. Il y a environ un milliard d'années, les animaux pluricellulaires se sont scindés en deux groupes : ceux présentant un plan d'organisation à symétrie radiale et ceux dont la symétrie est bilatérale, c'est-à-dire que leur moitié gauche est symétrique de leur moitié droite par rapport à un plan. C'est le cas de la plupart des animaux. Il y a environ 600 millions d'années, ces derniers organismes, les bilatériens, ont à leur tour divergé en deux branches : l'une qui a donné la plupart des animaux non vertébrés actuels et l'autre d'où sont issus les vertébrés, dont l'homme. Peu après la séparation de ces deux branches, une diversité étonnante de groupes est apparue, constituant l'explosion du Cambrien, il y a 540 à 490 millions d'années. Les fossiles datant de cette période sont très nombreux. Ce puissant élan de l'évolution a préparé l'émergence de l'œil.

L'observation de fossiles montre que pendant l'explosion du Cambrien, deux types d'yeux différents sont apparus. Le premier semble avoir été un œil composé ou œil à facettes, tel celui que l'on observe aujourd'hui chez tous les insectes, araignées et crustacés (un groupe de non-vertébrés nommés arthropodes). Il comprend une série de constituants identiques, nommés ommatidies, dont chacune constitue une lentille ou un réflecteur, faisant converger la lumière vers des cellules sensibles à la lumière, des photorécepteurs. Les yeux composés sont très efficaces pour les petits animaux, car ils offrent un grand angle de vue et une résolution spatiale correcte pour un petit volume. Au Cambrien, une telle capacité visuelle a pu conférer aux trilobites et à d'autres arthropodes anciens un avantage évolutif par rapport à leurs contemporains dont la vision était moins performante. Toutefois, pour les animaux de grande taille, les yeux composés ne sont guère adaptés, car de tels yeux permettant une vision à haute résolution auraient été immenses. Ainsi, lorsque la taille des animaux a augmenté, des pressions de sélection ont favorisé l'apparition d'un œil différent : l'œil de type caméra.



2. LA LAMPROIE, ***Petromyzon marinus (a)***, **et la myxine,** ***Myxine glutinosa (b)***, **sont des animaux à la frontière séparant les vertébrés des non-vertébrés. Elles vivent au fond des mers.**

Dans de tels yeux, les photorécepteurs utilisent tous la même lentille qui focalise la lumière et ils sont disposés en une couche mince, la rétine, qui tapisse la paroi interne de l'œil. Le calmar et le poulpe ont un œil de type caméra ressemblant au nôtre, mais leurs photorécepteurs sont proches de ceux des yeux des insectes. Les vertébrés portent d'autres photorécepteurs, qui, chez les vertébrés à mâchoires (dont l'homme), sont soit des cônes pour la vision diurne, soit des bâtonnets pour la vision nocturne.

Il y a plusieurs années, Edward Pugh, de l'Université de Pennsylvanie, Shaun Collin, de l'Université du Queensland en Australie, et moi, avons tenté de trouver comment ces différents types de photorécepteurs ont évolué. Ce que nous avons découvert allait au-delà de la réponse à cette question, et a fourni un scénario pour l'origine de l'œil des vertébrés.

De nombreuses caractéristiques de l'œil des vertébrés sont identiques parmi tous les représentants actuels de l'une des principales branches de l'arbre des vertébrés : celle des vertébrés à mâchoires. Par conséquent, ces vertébrés ont hérité ces traits d'un ancêtre commun, et notre œil serait apparu il y a environ 420 millions d'années, lorsque les premiers vertébrés à mâchoires (qui ressemblaient probablement aux poissons cartilagineux actuels, tels les requins) parcouraient les océans. Nous en avons déduit que l'œil de type caméra et ses photorécepteurs étaient issus de structures plus anciennes et nous nous sommes intéressés aux vertébrés sans mâchoires, avec lesquels nous partageons un ancêtre commun plus ancien, vieux d'environ 500 millions d'années.

Nous voulions examiner en détail l'anatomie d'un tel animal et avons décidé d'étudier l'un des rares animaux actuels appartenant à ce groupe : la lamproie. Cet animal du groupe des agnathes a un corps allongé, comme celui d'une anguille, et est doté d'une bouche en forme d'entonnoir, par laquelle il suce le sang de ses proies. Or la lamproie est aussi pourvue d'un œil de type caméra, avec un cristallin, un iris et des muscles oculaires. Sa rétine présente même une structure à trois feuillets, comme la nôtre, et ses photorécepteurs ressemblent beaucoup à nos cônes, bien que l'évolution ne l'ait apparemment pas dotée de bâtonnets, plus sensibles. De surcroît, les gènes qui contrôlent de nombreux aspects de la détection de la lumière, du développement de l'œil et du traitement des signaux lumineux par les neurones sont les mêmes que ceux qui régissent ces processus chez les vertébrés à mâchoires.

Ces similitudes avec l'œil des vertébrés à mâchoires sont bien trop nombreuses pour être apparues indépendamment. Un œil quasi identique au nôtre a dû exister chez l'ancêtre commun aux vertébrés sans mâchoires et à mâchoires, il y a 500 millions d'années. À ce stade, nous nous sommes demandé si nous ne pouvions pas remonter encore davantage le temps vers le « premier œil » et ses photorécepteurs. Malheureusement, il n'y a pas de représentants vivants de lignées

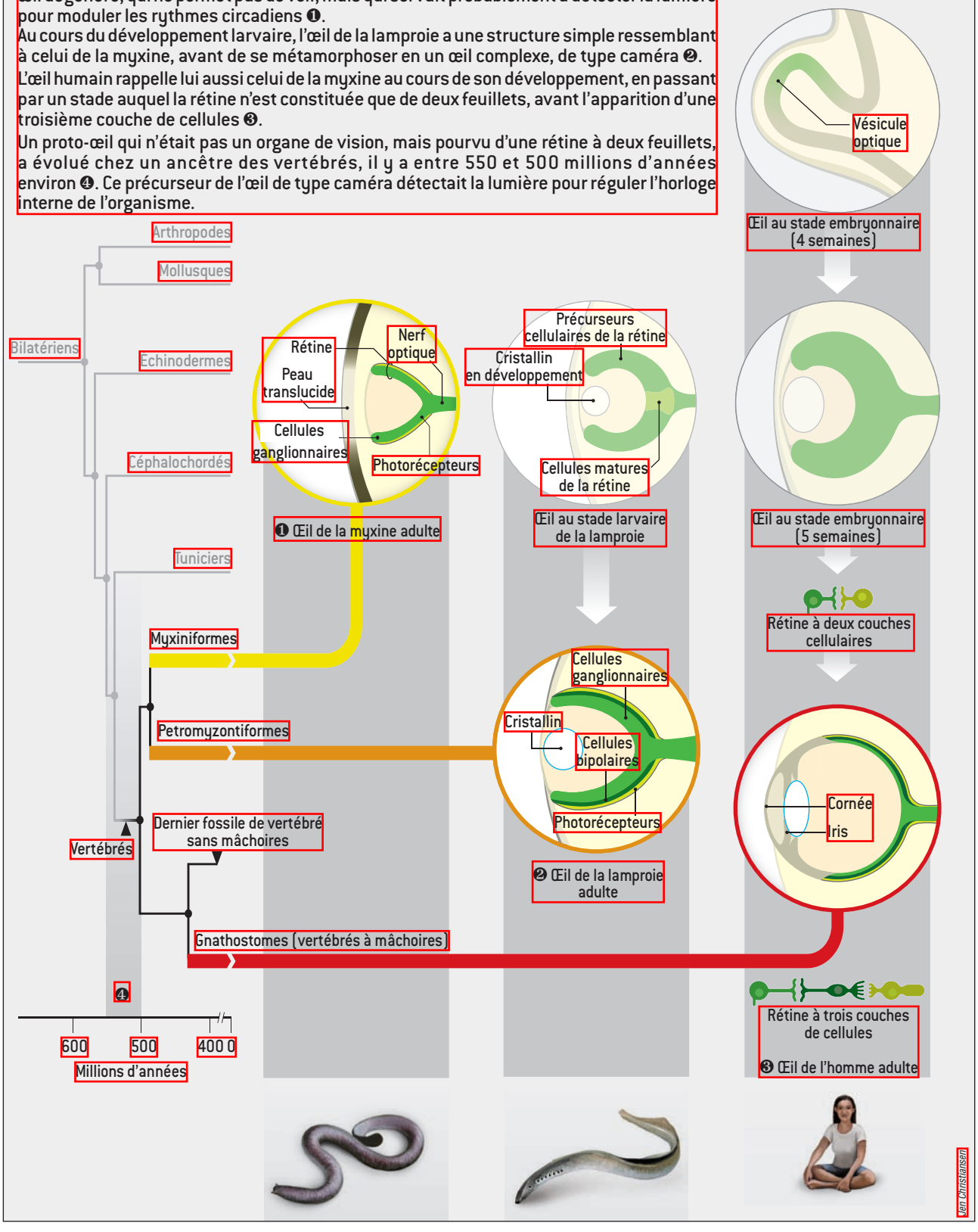
© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Certains aspects du développement embryonnaire d'un animal reflètent des événements survenus au cours de l'évolution de sa lignée. La structure de l'œil et le développement embryonnaire chez la myxine et la lamproie révèlent comment l'œil humain de type caméra a évolué et comment il fonctionnait à ses premiers stades. La myxine possède un œil dégénéré, qui ne permet pas de voir, mais qui servait probablement à détecter la lumière pour moduler les rythmes circadiens ❶.

Au cours du développement larvaire, l'œil de la lamproie a une structure simple ressemblant à celui de la myxine, avant de se métamorphoser en un œil complexe, de type caméra ❷.

L'œil humain rappelle lui aussi celui de la myxine au cours de son développement, en passant par un stade auquel la rétine n'est constituée que de deux feuillets, avant l'apparition d'une troisième couche de cellules ❸.

Un proto-œil qui n'était pas un organe de vision, mais pourvu d'une rétine à deux feuillets, a évolué chez un ancêtre des vertébrés, il y a entre 550 et 500 millions d'années environ ❹. Ce précurseur de l'œil de type caméra détectait la lumière pour réguler l'horloge interne de l'organisme.



L'AUTEUR



Trevor LAMB est neurobiologiste à l'École de recherche médicale John Curtin et au Centre d'excellence en science de la vision de l' ARC, (Conseil australien pour la recherche), à l'Université de Canberra, en Australie.

qui se sont séparées de la nôtre il y a quelque 550 millions d'années, la période qui nous intéresserait pour notre étude. Toutefois, nous avons trouvé des indices dans l'œil d'un animal énigmatique nommé myxine.

Les myxines sont des proches parents des lamproies, ayant également la forme d'une anguille. Elles font partie des chordés (un embranchement d'animaux bilatériens comprenant les vertébrés) sans mâchoires. Elles vivent en général au fond des mers et des océans, où elles se nourrissent de crustacés et de carcasses d'autres organismes marins. En cas de menace, elles sécrètent un mucus visqueux, d'où leur surnom d'« anguilles baveuses ». Bien que les myxines soient des chordés, leur œil est très différent de l'œil de type caméra. Il est dépourvu de cornée, d'iris, de cristallin et de tout muscle de soutien. Sa rétine ne contient que deux couches de cellules au lieu de trois. En outre, chaque œil est enfoui sous une peau translucide. Le comportement des myxines suggère que ces animaux sont pratiquement aveugles, localisant leurs proies grâce à leur odorat très développé.

L'ŒIL DE LA MYXINE

ne participe pas à la vision, mais transmet la lumière à la zone du cerveau qui régule les rythmes circadiens.

La myxine partage un ancêtre commun avec la lamproie et cet ancêtre présentait vraisemblablement un œil de type caméra semblable à celui de la lamproie. L'œil de la myxine a sans doute dégénéré à partir de la forme plus élaborée. Le fait qu'il existe encore dans cet état rudimentaire est révélateur. Nous savons, grâce aux poissons aveugles des grottes, que l'œil peut dégénérer et même disparaître en moins de 10 000 ans. L'œil de la myxine, tel qu'il se présente aujourd'hui, a pourtant persisté durant des centaines de millions d'années. C'est donc qu'il est important pour la survie de l'animal, bien qu'il soit inutile dans les profondeurs sombres de l'océan. Cette découverte implique aussi que l'œil de la myxine est inachevé, que son architecture actuelle refléterait un stade plus ancien de l'évolution. L'œil de la myxine peut ainsi aider à comprendre comment le proto-œil (un œil primitif) fonctionnait, avant d'évoluer en un organe élaboré.

Nous avons trouvé des indications sur le rôle que l'œil de la myxine a pu jouer en observant la rétine de cet animal. Dans la rétine classique à trois feuillets des vertébrés, les cellules de la couche intermédiaire, nommées cellules bipolaires, traitent les informations provenant des photorécepteurs et transmettent aux neurones de sortie des signaux, qui sont acheminés jusqu'au cerveau pour y être interprétés. La rétine à deux feuillets de la myxine est quant à elle dépourvue de la couche intermédiaire de cellules bipolaires, et ses photorécepteurs sont directement connectés aux neurones de sortie.

À cet égard, l'organisation de la rétine de la myxine ressemble beaucoup à celle de la glande pinéale ou épiphyse du cerveau des vertébrés. Cette petite glande sécrète des hormones qui contrôlent l'alternance de la veille et du sommeil en fonction du jour et de la nuit sur une durée d'environ 24 heures). Chez les vertébrés non mammaliens, elle contient des cellules photoréceptrices directement connectées aux neurones de sortie, sans cellules intermédiaires. Chez les mammifères, ces cellules ne sont plus capables de détecter la lumière.

Un œil qui ne voit pas

En 2007, nous fondant sur ce parallèle avec la glande pinéale, nous avons proposé que l'œil de la myxine ne participe pas à la vision, mais transmet la lumière à la zone du cerveau qui régule les rythmes circadiens, ainsi que les activités saisonnières, telles l'alimentation et la reproduction. Dès lors, nous avons supposé que l'œil ancestral des protovertébrés, qui ont vécu il y a 550 à 500 millions d'années, fut d'abord un organe non visuel et que, plus tard, il a acquis la capacité de traiter des signaux neuronaux, ainsi que les composants optiques et moteurs nécessaires à la vision.

Des études portant sur le développement embryonnaire de l'œil des vertébrés étayent cette idée. Lorsqu'une lamproie est au stade larvaire, elle vit dans le lit d'un ruisseau et, comme la myxine, elle est aveugle. À ce stade, son œil ressemble à celui de la myxine par sa structure simple et parce qu'il est sous la peau. Lorsque la larve se métamorphose, son œil rudimentaire grossit, et une rétine à trois feuillets apparaît. Un cristallin se forme, ainsi qu'une cornée et des muscles de soutien. L'organe émerge en surface sous la forme d'un œil de type

BIBLIOGRAPHIE

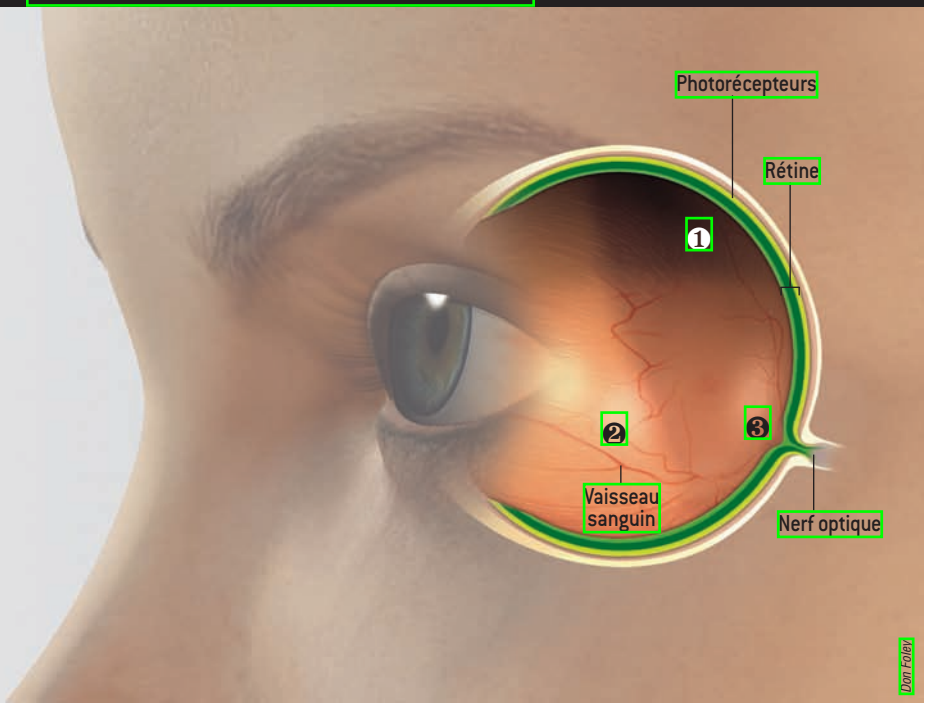
T. D. Lamb *et al.* (éds.), **The evolution of phototransduction and eyes**, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 364, n° 1531, pp. 2789-2967, 2009.

The Evolution of Eyes, *Evolution : Education and Outreach*, numéro spécial, vol. 1, n° 4, pp. 351-516, 2008.

T. D. Lamb *et al.*, **Evolution of the vertebrate eye : opsins, photoreceptors, retina and eye cup**, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 8, pp. 960-975, 2007.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

L'œil des vertébrés n'est pas dépourvu de défauts, dont certains dégradent la qualité des images. Ainsi, la configuration de la rétine oblige la lumière à traverser des neurones avant d'atteindre les photorécepteurs, situés sur sa face arrière ❶. En outre, les vaisseaux sanguins qui parcourent la surface interne de la rétine projettent des ombres parasites sur la rétine ❷. Enfin, les fibres nerveuses se rassemblent pour former le nerf optique. À l'endroit où ce dernier traverse la rétine, il n'y a pas de photorécepteurs, ce qui crée une tache aveugle ❸.



caméra, comme celui des vertébrés. On sait que de nombreux stades du développement d'un animal reflètent les événements qui se sont produits au cours de l'évolution de ses ancêtres : l'ontogenèse récapitule la phylogenèse. Et en observant la formation de l'œil de la lamproie au cours de son développement, on peut tirer des informations permettant de reconstituer la façon dont l'œil a évolué.

Le développement embryonnaire de l'œil des mammifères apporte lui aussi des indices sur son origine évolutive. Benjamin Reese et ses collègues de l'Université de Californie à Santa Barbara, aux États-Unis, ont découvert que la rétine de l'embryon se forme en passant par un stade semblable à la rétine de la myxine, avec des photorécepteurs directement connectés aux neurones de sortie. Il faut ensuite plusieurs semaines pour que les cellules bipolaires se développent et s'insèrent entre les photorécepteurs et les neurones de sortie. Cette séquence correspond au schéma de développement auquel on pourrait s'attendre si la rétine des vertébrés avait évolué à partir d'un organe à deux feuillets contrôlant le rythme circadien, après acquisition d'une puissance supplémentaire de traitement des données et de composants permettant de former des images. Ce stade précoce de développement représenterait alors une réminiscence d'une période de l'évolution se situant avant l'invention du système à cellules bipolaires dans la rétine et avant l'invention du cristallin, de la cornée et des muscles de soutien.

La naissance des photorécepteurs

En étudiant le développement de la rétine à trois feuillets, nous nous sommes demandé quelles ont été les pressions de sélection qui avaient agi sur l'évolution de l'œil. Les cellules photoréceptrices dans le règne animal se répartissent en deux catégories : rhabdomériques et ciliées. Jusqu'à présent, de nombreux biologistes pensaient que les non-vertébrés utilisaient des photorécepteurs rhabdomériques et les vertébrés des photorécepteurs ciliés. En fait, la situation est plus complexe. Chez la majorité des organismes, les photorécepteurs ciliés captent la lumière, mais pas pour la vision (pour les rythmes circadiens, par exemple). Au contraire, les photorécepteurs rhabdomériques captent la lumière pour la vision. L'œil composé des arthropodes et l'œil de type caméra des mollusques (apparu indépendamment de celui des vertébrés) utilisent des photorécepteurs rhabdomériques. Toutefois, les photorécepteurs ciliés des vertébrés captent la lumière pour la vision.

En 2003, Detlev Arendt, du Laboratoire européen de biologie moléculaire à Heidelberg, en Allemagne, a montré que notre œil conserve encore des traces des photorécepteurs rhabdomériques, qui se sont modifiés pour former les neurones de sortie transmettant les informations de la rétine au cerveau. Cela signifie que notre rétine contient des cellules issues des deux catégories de photorécepteurs : les photorécepteurs ciliés, qui continuent à engendrer des photorécepteurs, et les photorécepteurs rhabdomériques, qui se sont transformés en neurones de sortie. Au cours de l'évolution, une structure ancestrale s'est donc modifiée pour devenir un élément adapté à une nouvelle fonction. Quelles sont les pressions de sélection qui ont pu agir sur ces composants de l'œil ?

Nous avons essayé de comprendre pourquoi les photorécepteurs ciliés se sont transformés en capteurs de lumière dans la rétine des vertébrés, alors que les photorécepteurs rhabdomériques ont évolué en neurones ganglionnaires de sortie. Les photorécepteurs contiennent des pigments photosensibles (des molécules activées par la lumière) nommés rhodopsines, dont les propriétés diffèrent suivant la catégorie. En 2004, Yoshinori Shichida et ses collègues, de l'Université de Kyoto au Japon, ont montré qu'à un stade précoce de l'évolution, les rhodopsines des vertébrés

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

s'étaient modifiées de telle sorte que la forme activée par la lumière était devenue plus stable et donc plus efficace. J'ai émis l'hypothèse que ce changement a également bloqué la voie biochimique par laquelle la rhodopsine activée revient à sa forme inactive, voie qui pour les rhodopsines rhabdomériques requiert l'absorption d'un second photon. Il fallait donc une autre réaction biochimique pour que la molécule redevienne activable. Je pense que les photorécepteurs ciliés auraient présenté un autre avantage par rapport aux photorécepteurs rhabdomériques dans des environnements tels que l'océan profond, où l'intensité lumineuse est très faible.

Dès lors, certains chordés primitifs (ancêtres des vertébrés) ont pu coloniser des niches écologiques inaccessibles aux animaux qui n'avaient que des photorécepteurs rhabdomériques. Non pas parce que la rhodopsine des photorécepteurs ciliés leur conférait une meilleure vision (les autres composants essentiels de l'œil de type caméra n'étaient pas encore apparus), mais parce qu'elle permettait de mieux capter la lumière et de synchroniser les horloges circadiennes et saisonnières.

Pour ces anciens chordés des grandes profondeurs, les photorécepteurs rhabdomériques peu sensibles, qui coexistaient avec les photorécepteurs ciliés, étaient quasi inutiles et, par conséquent, libres de remplir un nouveau rôle, celui de neurones transmettant des signaux au cerveau. La rhodopsine n'était plus nécessaire et aurait été éliminée par sélection naturelle de ces cellules.

L'ŒIL DES VERTÉBRÉS,

si performant soit-il, présente des défauts : l'évolution ne conduit pas forcément à la perfection.

Un œil est né

Ayant formulé une hypothèse plausible sur la façon dont les composants de la rétine des vertébrés étaient apparus, nous avons voulu comprendre comment, il y a environ 500 millions d'années, l'œil a évolué d'un organe captant la lumière, mais non destiné à la vision, en un organe formant des images. Là encore, nous avons trouvé des indices chez des embryons en cours de développement. À un stade précoce du développement, la structure neuronale qui va devenir l'œil forme un renflement donnant naissance à deux vésicules. Chacune d'elles se replie sur elle-même pour donner une rétine en forme de croissant, qui tapisse l'intérieur de l'œil. L'évolution a probablement suivi la même stratégie. Nous avons postulé qu'un proto-œil de ce type (avec une rétine en forme de croissant, à deux feuillets, composée de photorécepteurs ciliés à l'extérieur et de neurones de sortie issus des photorécepteurs rhabdomériques à l'intérieur) aurait évolué chez un ancêtre des vertébrés entre 550 et 500 millions d'années. Il aurait assuré le réglage de l'horloge interne et peut-être aidé l'animal à détecter les ombres et à s'orienter.

Au stade suivant du développement embryonnaire, la rétine se replie sur elle-même vers l'intérieur, le cristallin se forme à partir d'un épaississement de l'ectoderme (les cellules de la surface externe de l'embryon), qui bourgeonne dans le creux du croissant rétinien. Ce bourgeon se sépare ensuite du reste de l'ectoderme pour devenir un élément flottant librement. Une séquence similaire de modifications se serait produite au cours de l'évolution. Nous ignorons quand cette modification a eu lieu, mais dans les années 1990, Dan-Eric Nilsson, de l'Université de Lund en Suède, a montré que les composants optiques de l'œil ont pu évoluer en un million d'années seulement. Si tel est le cas, l'œil formant des images serait apparu à partir du proto-œil en... un clin d'œil à l'échelle des temps géologiques.

Avec l'apparition du cristallin focalisant la lumière, la capacité de l'œil à collecter des informations a notablement augmenté. Des pressions de sélection auraient alors favorisé l'émergence d'un meilleur traitement des signaux dans la rétine, au-delà de ce que permettait la simple connexion des photorécepteurs à des neurones de sortie. Le processus de maturation des cellules de la rétine se serait alors modifié, de sorte que certaines cellules en cours de développement, au lieu de former des photorécepteurs ciliés, seraient devenues des cellules rétiniennes bipolaires s'insérant entre le feuillet de photorécepteurs et le feuillet de neurones de sortie. C'est pourquoi les cellules bipolaires de la rétine ressemblent tant aux cônes et aux bâtonnets, même si elles sont dépourvues de rhodopsine et qu'elles reçoivent des informations non pas de la lumière, mais d'une substance chimique – un neurotransmetteur – libérée par les photorécepteurs.

Quelques erreurs...

Bien que les yeux de type caméra fournissent un vaste champ de vision (de l'ordre de 180 degrés), notre cerveau ne peut analyser qu'une fraction des informations disponibles à un instant donné, en raison du nombre limité de fibres nerveuses reliant l'œil au cerveau. Les premiers yeux de type caméra comprenaient vraisemblablement encore moins de fibres nerveuses. Ainsi, une pression de sélection considérable a probablement favorisé l'apparition de muscles permettant aux yeux de bouger. Ces muscles devaient sans doute exister il y a 500 millions d'années, car ils sont présents chez la lamproie, dont la lignée a divergé à cette époque, et arrangés à peu près comme chez les vertébrés à mâchoires, dont nous faisons partie.

À côté des caractéristiques qui rendent l'œil des vertébrés si performant, certaines sont moins adaptées. Par exemple, l'agencement des couches de cellules constituant la rétine : il faut que les rayons lumineux traversent toute l'épaisseur de la rétine, si bien que les prolongements et les corps cellulaires des neurones de sortie dispersent la lumière et dégradent la qualité de l'image. C'est seulement après avoir traversé cet amas de neurones que la lumière atteint les photorécepteurs. De surcroît, les vaisseaux sanguins recouvrant la surface interne de la rétine projettent des ombres parasites sur la couche des photorécepteurs. Enfin, la rétine présente un point aveugle, l'endroit où les fibres nerveuses se rassemblent pour former le nerf optique, traversent la rétine et ressortent à l'arrière *(voir l'encadré page 37)*.

Ces défauts ne sont pourtant pas inévitables. En effet, l'œil de type caméra des poulpes et des calmars, apparu indépendamment, ne les présente pas. En considérant l'œil des vertébrés dans le contexte de l'évolution, ces défauts apparaissent comme des conséquences d'une séquence d'étapes évolutives, chacune ayant conféré un bénéfice à nos ancêtres vertébrés, avant même qu'ils aient pu voir.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

NRJ HIT MUSIC ONLY !

20 minutes

SID Le Petit Scientifique

familiscope.fr

POUR LA SCIENCE

Images DOC

OKAPI 100% ADO

bayard



FÊTE DE LA SCIENCE

du 12 au 16 octobre 2011

www.fetedelascience.fr



L'ESSENTIEL

- La température globale de la Terre s'est élevée de cinq degrés il y a 56 millions d'années en réaction à une augmentation notable des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.
- Ce réchauffement ancien est souvent étudié pour comprendre le réchauffement actuel.
- Mais à l'époque, le dégagement de gaz était dix fois plus lent que celui qui se produit aujourd'hui.
- Or plus un changement climatique est rapide, plus les différentes formes de vie s'y adaptent difficilement.

KOH MIURA



Le dernier grand réchauffement

Lee Kump

De nouveaux indices suggèrent que le plus brutal des réchauffements climatiques préhistoriques s'est fait à un rythme modéré comparé à celui que nous connaissons aujourd'hui. Cet épisode est riche d'enseignements pour notre futur.

La plupart des visiteurs du Spitzberg, la plus grande île de l'archipel norvégien du Svalbard, sont attirés par les ours polaires. Nous l'étions par ses roches. Durant l'été 2007, avec mes collègues, tous géologues et climatologues, nous avons débarqué sur cette île arctique avec l'espoir d'y trouver des preuves de ce que l'on considérait alors comme l'épisode de réchauffement global le plus brutal de tous les temps. Deux heures de marche en terrain accidenté nous séparaient encore des affleurements rocheux susceptibles de renfermer ces indices. Tandis que nous avancions sur des poches de neige glissante et des plantes rabougries, j'imaginai l'époque où des palmiers, des fougères et des alligators peuplaient probablement cette région.

En ce temps-là, il y a quelque 56 millions d'années, j'aurais été ruisselant de sueur. Les recherches ont montré qu'à cette époque, en l'espace de quelques milliers d'années (un bref instant à l'échelle des temps géologiques), les températures globales ont augmenté de 5 °C – une fièvre planétaire que les scientifiques nomment le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène. Les zones climatiques se sont décalées vers les pôles, sur terre et en mer, obligeant plantes et animaux à migrer, à s'adapter ou à mourir. Certaines des régions les plus profondes de l'océan se sont acidifiées et ont été privées d'oxygène, tuant nombre des organismes qui y vivaient. Il a ensuite fallu près de 200 000 ans pour que les mécanismes tampons naturels de la Terre fassent baisser la fièvre.

Le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène présente quelques ressemblances avec le réchauffement climatique d'origine humaine qui se déroule aujourd'hui. En particulier, le coupable était une libération massive, dans l'atmosphère et les océans, de gaz à effet de serre piégeant la chaleur, comparable en volume à ce que libérerait notre combustion des ressources énergétiques fossiles si elle se poursuivait pendant plusieurs siècles au rythme actuel. La connaissance de ce qui s'est exactement passé durant le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène pourrait nous aider à anticiper notre avenir. Mais jusque récemment, plusieurs interrogations demeuraient. Aujourd'hui, des réponses apportent une vision peu réjouissante : elles suggèrent que les conséquences du dernier grand réchauffement global de la planète n'étaient rien comparées à ce qui pourrait nous attendre, et elles confortent les prédictions selon lesquelles l'humanité souffrira si nous ne modifions pas notre comportement.

Le point de départ : des gaz à effet de serre

Les paléoclimatologues pensent aujourd'hui que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène s'est déroulé selon le scénario suivant. Il aurait commencé, en quelque sorte, par la combustion de ressources fossiles. À l'époque, la Pangée, le

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

supercontinent dont sont issus les continents actuels, subissait les dernières étapes de son fractionnement ; la croûte terrestre se déchirait, formant le Nord-Est de l'océan Atlantique. En conséquence, d'énormes quantités de roche fondue et de chaleur intense sont remontées à travers la masse terrestre qui reliait le Groenland et l'Europe, cuisant des sédiments riches en carbone et brûlant peut-être même du charbon et du pétrole près de la surface. Lors de leur cuisson, les sédiments ont libéré à leur tour de grandes quantités de deux puissants gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone et le méthane. D'après le volume énorme de ces éruptions, estimé par les laves et dépôts de cendres datés dans l'Atlantique et à proximité, on pense que les volcans furent probablement responsables d'une accumulation initiale de carbone de l'ordre de quelques centaines de gigatonnes. Cette quantité est suffisante pour faire augmenter les températures globales de quelques degrés. Mais la plupart des analyses, dont la nôtre, suggèrent qu'il a fallu un facteur supplémentaire pour atteindre le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène.

Des réactions en cascade

Une seconde phase de réchauffement plus intense aurait commencé quand la chaleur issue des volcans a déclenché d'autres types de dégagements gazeux. Le brassage naturel des océans a transporté la chaleur jusqu'aux fonds marins froids, où elle semble avoir déstabilisé de vastes réserves d'hydrates de méthane gelé qui y étaient enfouies. Quand les hydrates ont fondu, un bouillonnement de méthane gazeux est remonté à la surface, ajoutant encore du carbone dans l'atmosphère. Dans l'atmosphère, le méthane piège la chaleur beaucoup plus efficacement que le principal gaz à effet de serre actuel, le dioxyde de carbone. Il se convertit vite en dioxyde de carbone, mais aussi longtemps que le dégagement de méthane s'est poursuivi, des concentrations élevées de ce gaz ont pu se maintenir dans l'atmosphère, amplifiant l'effet de serre et la hausse des températures associée.

D'autres réactions en cascade ont sans doute participé au pic de réchauffement, libérant encore davantage de carbone des réservoirs de la terre ferme. Les sécheresses provoquées par le réchauffement dans de nombreuses régions, dont l'Ouest des États-Unis et l'Europe de l'Ouest, ont vraisemblablement exposé les forêts et les tourbières au dessèchement et, dans certains cas, à des incendies généralisés. Le dessèchement, la cuisson ou la combustion de tout matériau vivant ou riche en matière organique émet des gaz à effet de serre. Les feux couvant dans les tourbières et les veines de charbon, que l'on a parfois vu durer des siècles à l'époque moderne, ont pu entretenir un dégagement soutenu.

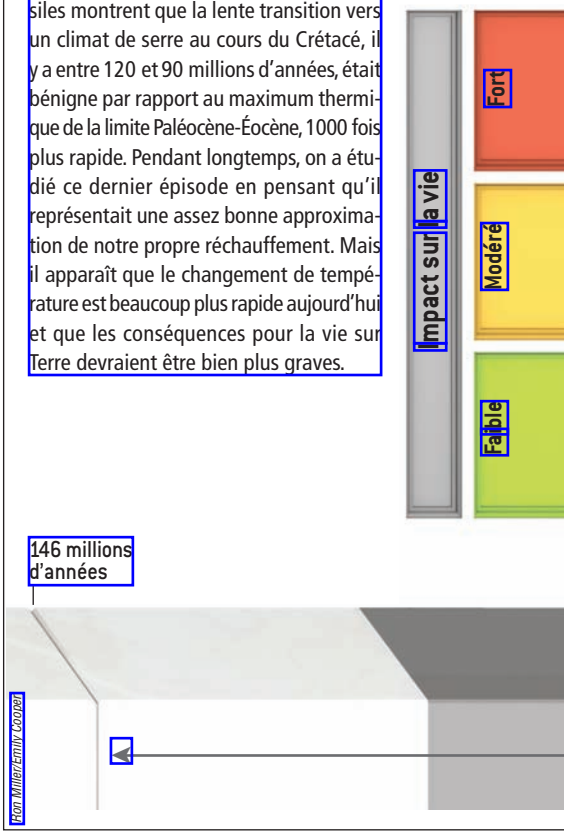
Le dégel du pergélisol dans les régions polaires a probablement lui aussi exacerbé la situation. Ce sol gelé en permanence emprisonne les plantes mortes pendant des millions d'années. Quand il fond, les microbes consomment les restes organiques libérés et rejettent beaucoup de méthane. Aujourd'hui, les scientifiques s'inquiètent des répercussions, sur le réchauffement actuel, des rejets de méthane dus à la fonte de l'Arctique. Mais la contribution du pergélisol au maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène a peut-être été bien plus importante encore. La planète était plus chaude, si bien que même avant le maximum thermique, il n'existait pas, comme aujourd'hui en Antarctique, de calotte polaire recouvrant le sol gelé. Sans protection, le pergélisol y était à la merci du réchauffement.

Au début des émissions de gaz, les océans ont absorbé une bonne partie du dioxyde de carbone (et du méthane qui s'était transformé en dioxyde de carbone). Dans un premier temps, cette séquestration naturelle du carbone a contribué à atténuer le réchauffement. Néanmoins, une quantité de gaz telle s'est infiltrée dans les profondeurs de l'océan que cela a produit un excédent d'acide carbonique – un processus connu sous le nom d'acidification des océans. De plus, à mesure que l'océan profond se réchauffait, son contenu en oxygène diminuait (l'eau chaude ne dissout pas aussi bien ce gaz que l'eau froide). Ces changements ont été catastrophiques pour les foraminifères, organismes microscopiques qui vivaient sur le fond marin, dans les sédiments : selon les données fossiles, 30 à 50 pour cent des espèces de foraminifères des profondeurs ont disparu.

Les grandes lignes de ce scénario font consensus depuis 1990. Il ne fait plus aucun doute que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène a été déclenché par un dégagement spectaculaire de gaz à effet de serre depuis que deux chercheurs

LES LEÇONS DES

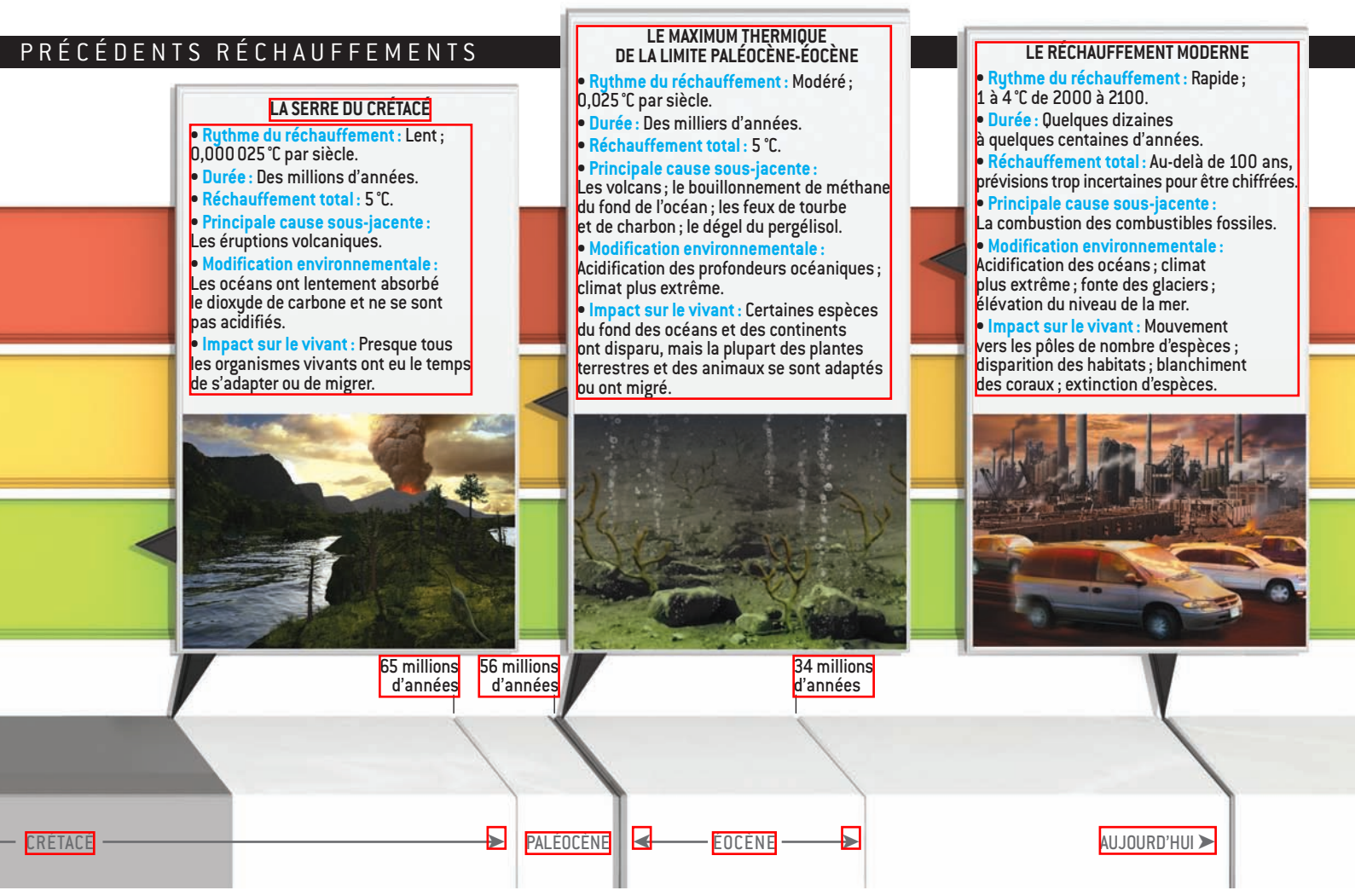
Les réchauffements planétaires soudains sont beaucoup plus dommageables pour les différentes formes de vie que les réchauffements plus lents. Les données fossiles montrent que la lente transition vers un climat de serre au cours du Crétacé, il y a entre 120 et 90 millions d'années, était bénigne par rapport au maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, 1000 fois plus rapide. Pendant longtemps, on a étudié ce dernier épisode en pensant qu'il représentait une assez bonne approximation de notre propre réchauffement. Mais il apparaît que le changement de température est beaucoup plus rapide aujourd'hui et que les conséquences pour la vie sur Terre devraient être bien plus graves.



californiens ont identifié l'événement dans une carotte de sédiments extraite du fond marin près de l'Antarctique. Cette carotte constituait un enregistrement de plusieurs millions d'années de climat. Si nous avons décidé d'affronter le froid du Spitzberg en 2007, c'est que certains détails de ce rejet gazeux restaient à éclaircir : quelle quantité de gaz avait été libérée, quel gaz dominait, combien de temps les rejets avaient duré, et ce qui les avait provoqués.

À la suite de la découverte californienne, nombre de scientifiques avaient analysé des centaines d'autres carottes de sédiments des grands fonds en espérant y découvrir des réponses. À mesure que les sédiments se déposent, lentement, couche par couche, ils piègent des minéraux (y compris les restes des squelettes fossiles de la faune marine) qui conservent des signatures de la composition des océans environnants ou de l'atmosphère, ainsi que des formes de vie présentes à l'époque du dépôt. Par exemple, les proportions des

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



différents isotopes de l'atome d'oxygène dans les restes squelettiques révèlent la température de l'eau au moment de leur sédimentation.

Où trouver une carotte bien conservée ?

Lorsqu'elles sont bien préservées, ces carottes offrent un excellent enregistrement de l'histoire climatique. Ce n'était cependant pas le cas de la plupart des carottes qui correspondaient au maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène. Des morceaux manquaient et le temps avait dégradé ceux qui restaient. Les sédiments du fond marin sont riches en carbonate de calcium, un composé chimique que l'on utilise aujourd'hui couramment comme anti-acide. Au cours du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, l'acidification de l'océan a dissous ce carbonate de calcium en quantité, faisant disparaître une importante fraction des sédiments dans les couches qui auraient dû porter les signatures les plus nettes du maximum thermique.

Pour pallier cette difficulté, nous avons pris rendez-vous au Spitzberg avec un groupe de chercheurs venus d'Angleterre, de Norvège et des Pays-Bas, sous les auspices du Réseau mondial des universités (*Worldwide Universities Network*). Les roches de cette partie de l'Arctique, composées presque entièrement de boues et d'argile, étaient susceptibles de fournir un enregistrement plus complet et accessible. Nous entendions extraire nos échantillons non pas du fond marin, mais d'un plateau érodé, sur l'île. Les sédiments que nous cherchions s'étaient déposés dans un ancien bassin océanique, et les forces tectoniques en jeu depuis le maximum thermique avaient fait remonter cette région au-dessus du niveau de la mer, où les glaciers l'avaient sculptée pour en faire la spectaculaire chaîne de montagnes escarpées et de larges vallées du Spitzberg.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Après une première expédition de repérage, nous avons fait une découverte qui nous a simplifié la tâche. Un géologue local nous a appris que la compagnie minière norvégienne qui l'employait avait prélevé, des années plus tôt, une carotte de sédiments couvrant l'intervalle du maximum thermique. Le géologue avait pris l'initiative de préserver cette carotte de plusieurs kilomètres, débitée en tronçons cylindriques d'un mètre et demi de long, dans un vaste hangar en périphérie du village de Longyearbyen. Le reste de l'expédition et notre seconde visite, en 2008, ont été consacrés au prélèvement d'échantillons sur des portions choisies de cette longue carotte.

De retour au laboratoire, pendant plusieurs années, nous avons extrait de ces échantillons les signatures chimiques spécifiques susceptibles de nous renseigner sur l'état de la Terre pendant et après le maximum thermique. Notamment, pour suivre l'évolution de la quantité de gaz à effet de serre dans l'air, nous avons étudié l'évolution du mélange d'isotopes du carbone issu de la matière organique préservée dans l'argile. En analysant plus de 200 couches de la carotte, nous avons reconstitué ces signatures chimiques au cours du temps. Comme nous le soupçonnions, la signature isotopique du carbone changeait considérablement dans les couches qui correspondaient au maximum thermique.

Un dégagement gazeux plus lent que prévu

Couvrant toute la durée du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, nos carottes arctiques fournissaient un excellent enregistrement de la période où les gaz à effet de serre avaient été libérés dans l'atmosphère. Apporteraient-elles enfin des réponses concluantes sur la quantité, la source et la durée de ce dégagement gazeux ? Il fallait pour cela faire plus que de simples extrapolations sur la composition ou la concentration des matériaux dans les carottes. Nous avons demandé à Ying Cui, mon étudiant en thèse à l'Université d'État de Pennsylvanie, de mettre au point un modèle informatique complexe simulant le réchauffement. Ce modèle est fondé, d'une part, sur les variations des signatures isotopiques du carbone relevées dans les carottes arctiques et, d'autre part, sur le degré de dissolution du carbonate des fonds océaniques fourni par les carottes des profondeurs océaniques, lequel constitue un bon indicateur de l'acidification des océans.

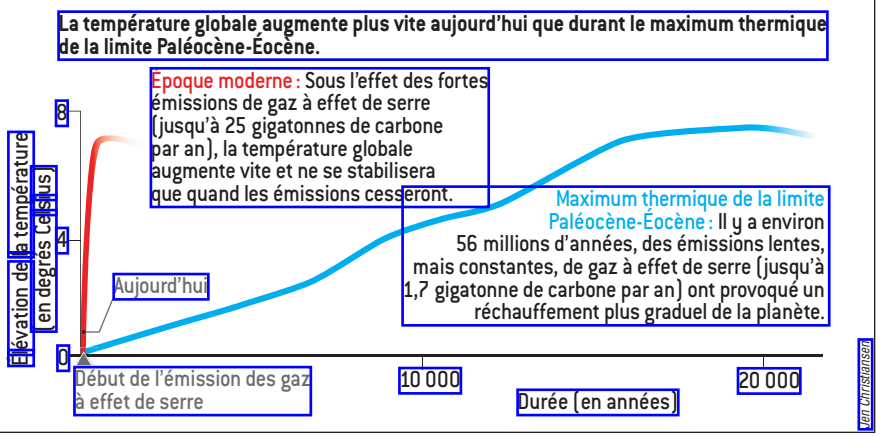
Y. Cui a testé différents scénarios, chacun nécessitant un mois de calculs informatiques. Certains supposaient une contribution plus importante des hydrates de méthane ; dans d'autres, les sources de dioxyde de carbone libéraient plus de gaz. Finalement, le scénario qui correspond le mieux aux données récoltées sur le terrain suppose que, durant le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, 3000 à 10000 gigatonnes de carbone se sont répandues dans l'atmosphère et l'océan, soit beaucoup plus que ce qu'ont pu fournir les volcans et les hydrates de méthane ; le pergélisol ou la tourbe et le charbon ont donc dû aussi jouer un rôle dans cette libération de carbone.



© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

DEUX RÉCHAUFFEMENTS, DEUX SCÉNARIOS

La vitesse à laquelle la planète se réchauffe dépend de la vitesse d'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les modèles anticipent un réchauffement d'environ huit degrés Celsius d'ici 2400 si l'utilisation des combustibles fossiles et la séquestration du carbone restent inchangées. Le dégagement de carbone prédit, environ 5 000 gigatonnes, est comparable en volume à celui qui a conduit au maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène. En revanche, contrairement à ce que l'on pensait, son rythme est bien plus rapide que celui du maximum thermique.



Cette estimation de la quantité de carbone dans l'atmosphère et les océans est parmi les plus élevées. Mais l'évaluation de la durée du dégagement de gaz est encore plus surprenante : d'après notre modèle, il se serait étalé sur environ 20 000 ans, une durée entre 2 et 20 fois plus longue que toutes les estimations précédentes. Cet étalement signifie que le dégagement gazeux s'est produit à une vitesse inférieure à deux gigatonnes de carbone par an, soit bien plus faible que la vitesse de dégagement des gaz à effet de serre dans l'atmosphère observée aujourd'hui : les concentrations de dioxyde de carbone augmentent probablement dix fois plus vite actuellement.

Réchauffement plus rapide : danger

Les implications de cette découverte pour le futur sont importantes. Les données fossiles indiquent que la vitesse du changement climatique contrôle bien plus le sort des êtres vivants et des écosystèmes que l'étendue du changement : la vie répond plus favorablement aux changements lents qu'aux changements abrupts. Ce fut le cas il y a 120 millions d'années, durant le Crétacé, lors d'une lente transition vers un climat de serre *(voir l'encadré page 43)*. L'amplitude du réchauffement climatique du Crétacé était comparable à celle du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, mais le premier épisode s'est étalé sur des millions d'années, et non des milliers. Aucune extinction notoire ne s'est produite alors ; la planète et ses habitants ont eu tout le temps nécessaire pour s'adapter.

Pendant des années, les scientifiques ont considéré le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène comme l'extrême opposé : le changement climatique le plus rapide jamais connu, rivalisant avec les prévisions les plus sombres pour notre avenir. Les résultats que l'on obtenait sur cette période n'étaient alors pas trop alarmistes pour notre situation. À part les foraminifères au fond de l'océan et quelques groupes animaux archaïques, la plupart des animaux et des plantes semblaient avoir survécu à la vague de chaleur, même si cela s'était fait au prix de sérieuses adaptations. Certains organismes avaient rapetissé. En particulier, les mammifères du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène sont plus petits que leurs prédécesseurs et leurs descendants. Ils ont probablement évolué dans ce sens parce que les corps de petite taille dissipent mieux la chaleur que ceux de grande taille. Les insectes fouisseurs et les vers, eux aussi, sont devenus plus petits.

Une grande migration vers les pôles a sauvé d'autres créatures. Certaines ont même prospéré dans leurs nouveaux territoires étendus. En mer, le dinoflagellé *Apectodinium*, un micro-organisme qui réside habituellement sous les tropiques, a investi l'océan Arctique. Sur terre, de nombreux animaux qui avaient été confinés aux tropiques se sont dirigés vers l'Amérique du Nord et l'Europe pour la première fois, y compris des tortues et des ongulés (mammifères à sabots). Chez les mammifères, cette expansion a ouvert une multitude d'occasions d'évoluer et de remplir de nouvelles niches, avec des implications profondes pour les êtres humains : de cette grande diversification est né le groupe des primates.

L'AUTEUR



Lee KUMP est professeur de géosciences à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

Y. Cui *et al.*, **Slow release of fossil carbon during the Palaeocene-Eocene thermal maximum**, *Nature Geoscience*, vol. 4, pp. 481-485, 2011.

F. A. McInerney et S. L. Wing, **The Paleocene-Eocene thermal maximum : a perturbation of carbon cycle, climate and biosphere with implications for the future**, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 39, pp. 489-516, 2011.

L. Kump et M. Mann, **Understanding Global Warming**, DK Adult, 2008.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Ce que nous apprend l'étude géologique des continents

Dès sa découverte en 1990, on s'est aperçu que l'anomalie climatique du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène présentait de nombreuses similitudes avec le réchauffement climatique actuel : émission de gaz à effet de serre, réchauffement des eaux marines, extinctions ou modifications transitoires de certaines microfaunes marines, cycle du carbone concerné à l'échelle globale. Depuis, de nombreux chercheurs, surtout anglo-saxons, l'étudient comme analogue au réchauffement actuel. Toutefois, les modélisations visant à reconstituer la vitesse de libération des gaz à effet de serre sont encore trop peu nombreuses, leurs résultats parfois contradictoires, et les sources possibles d'une libération massive du carbone sont multiples et encore débattues. Les travaux mentionnés ici sont loin de clore le sujet.

De fait, l'étude des carottes en milieux marins est insuffisante. Pour améliorer leurs outils et valider leurs modèles, les modélisateurs des changements climatiques réclament plus de données, si possible régionales, sur l'enregistrement du maximum thermique en milieu continental. L'étude en milieu continental devrait aussi aider à mieux connaître les effets d'une telle crise sur le milieu de vie des humains.

L'impact sur la faune est connu depuis longtemps : des groupes archaïques ont disparu et des groupes modernes sont apparus (périssodactyles, artiodactyles et primates chez les mammifères), se sont diversifiés et répandus très vite dans l'hémisphère Nord, empruntant des passages aux hautes latitudes (à l'époque havres subtropicaux) *via* le détroit de Béring et le Groenland, à la faveur de reliefs entourant l'Atlantique Nord naissant. L'impact sur la végétation est en revanche mal cerné, les données étant contradictoires selon qu'on examine les macrofossiles ou les pollens et spores, et ils dépendent des milieux de dépôt. Quelques travaux ont montré des modifications des régimes hydriques et de l'évolution des sols, mais ils ne concernent que de rares sites isolés (Wyoming, Arctique, Colombie, Tanzanie, Nouvelle-Zélande, Angleterre).

Une équipe de chercheurs européens (majoritairement franco-belges) et russe coordonnée par le Bureau de recherche géologique minière (BRGM) étudie les effets du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène dans les milieux continentaux et littoraux du bassin de Paris et de ses bordures. Les premiers résultats indiquent une sédimentation dans des milieux très variables (rivière, lac, marécage, plage et lagune), une alternance d'épisodes de crues drastiques et d'aridité marquée, et la formation de sols particuliers sur les secteurs émergés, bien différents de ce qui était supposé ou admis auparavant. Peu à peu, les paysages sont reconstitués. La matière organique, souvent abondante, est étudiée en détail, de même que les vestiges animaux et végétaux. Une telle étude intégrée devra être reproduite à d'autres latitudes, sur tous les continents, et à diverses paléoaltitudes (afin de vérifier par exemple la présence de pergélisol sur des hauts plateaux) pour affiner les simulations des paléoclimatologues, et mieux envisager ce qui nous attend si la crise actuelle se poursuit, d'autant plus si le rythme en est plus rapide.

Florence Quesnel
BRGM, Service Géologie, Unité Régolithe et Réservoirs, Orléans

Maintenant que l'on sait que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène s'est imposé plus lentement qu'on ne le pensait, il n'est plus question d'invoquer son innocuité pour justifier le maintien de l'utilisation des combustibles fossiles et des rejets liés. Le changement climatique actuel se produit à une vitesse folle. En quelques décennies, la déforestation, les automobiles et les centrales à charbon de la révolution industrielle ont augmenté de plus de 30 pour cent la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère : aujourd'hui, chaque année, nous injectons neuf gigatonnes de carbone dans l'atmosphère. Selon les projections, qui prennent en compte l'accroissement de la population et l'industrialisation des pays en développement, cette quantité pourrait atteindre 25 gigatonnes par an avant l'épuisement de toutes les réserves de combustibles fossiles.

Les scientifiques et les décideurs aux prises avec les effets potentiels du changement climatique se concentrent généralement sur les bilans finaux : quelle quantité de glace va fondre ? De combien le niveau de la mer va-t-il s'élever ? L'étude du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène montre que d'autres questions sont tout aussi cruciales : à quelle vitesse ces changements auront-ils lieu ? Les habitants de la Terre auront-ils le temps de s'ajuster ? Si le changement se produit trop vite, ou si les barrières à la migration et à l'adaptation sont importantes, la vie est perdante : des espèces animales et végétales disparaîtront, et la face du monde sera changée pour des millénaires.

Les premiers signes du réchauffement actuel déjà visibles

Nous n'en sommes qu'aux premiers stades du réchauffement actuel, et il est difficile de prédire ce qui nous attend. Néanmoins, nous avons déjà quelques éléments de réponse. Comme l'ont résumé des rapports récents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (le GIEC), les écosystèmes ont montré, par leur réaction, qu'ils sont sensibles au réchauffement. Des signes clairs indiquent que les eaux de surface s'acidifient, perturbant la vie marine. Les extinctions d'espèces sont en augmentation, et le déplacement des zones climatiques a déjà poussé des plantes et des animaux à migrer. Contrairement aux organismes vivants du maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, les plantes et les animaux modernes sont bloqués dans leur migration vers des climats mieux adaptés : routes, voies ferrées, barrages, villes, grandes et petites, sont autant d'obstacles qui mettent en danger leurs espèces. De nos jours, la plupart des grands animaux sont déjà *de facto* parqués dans de minuscules zones à cause de la disparition de leurs habitats ; dans de nombreux cas, leurs chances de rejoindre de nouvelles latitudes pour survivre seront nulles.

En outre, les glaciers et les banquises fondent et entraînent une élévation du niveau des mers ; les récifs coralliens sont de plus en plus victimes de maladies et de stress liés à la chaleur ; et les épisodes de sécheresse et d'inondations sont de plus en plus fréquents. Les changements des régimes de précipitations et le recul des côtes à mesure que la glace polaire fond pourraient entraîner des migrations humaines à des échelles sans précédent, dont certaines ont déjà commencé.

Le réchauffement climatique actuel est sur une trajectoire bien plus dangereuse que le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène, mais il n'est peut-être pas trop tard pour éviter une catastrophe. Si toutes les nations prennent immédiatement des mesures pour réduire l'accumulation de dioxyde de carbone atmosphérique, le maximum thermique de la limite Paléocène-Éocène pourrait bien rester le dernier grand réchauffement global de l'histoire. ■

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



cnrs
www.cnrs.fr

cea
énergie atomique • énergies alternatives

BASF The Chemical Company

THALES

UIC

MAIRIE DE PARIS

syctom l'agence métropolitaine des déchets ménagers

casden BANQUE POPULAIRE

rfi

Le Point

POUR LA SCIENCE

Direct Matin

MCE mathématiques étudiante

Le moustique,

Le décryptage du mécanisme par lequel les moustiques flairent les humains pourrait conduire à des pièges et des produits antimoustiques plus efficaces pour lutter contre le paludisme.

John Carlson et Allison Carey

Les moustiques qui disséminent le paludisme sont dotés de capacités olfactives puissantes et d'organes perfectionnés qui leur permettent de repérer et de prélever le sang humain. Alertés par les odeurs d'haleine ou de sueur, ils fondent sur leur proie, perforent la peau avec leurs mandibules en forme d'aiguille et infiltrent leur trompe par la coupure jusqu'à un vaisseau sanguin. Lors d'un tel repas, le parasite du paludisme s'introduit dans la blessure par la salive du moustique, provoquant la mort de près d'un million d'individus chaque année.

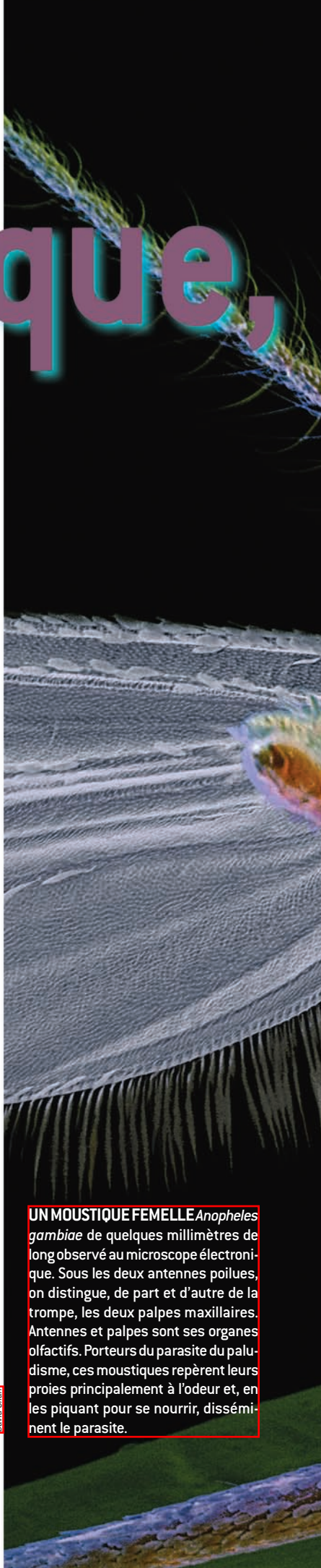
D'autres moustiques marquent une préférence pour telle ou telle espèce animale – bétail ou oiseaux, par exemple. Ceux qui s'attaquent à l'homme opèrent, semble-t-il, une sélection au sein même de l'espèce humaine, s'acharnant sur quelques-uns et laissant leurs voisins en paix. Certains repèrent leurs victimes à plus de 50 mètres.

Mieux comprendre le fonctionnement du système olfactif du moustique – et la façon dont il détecte le mélange unique de composés chimiques volatils qui caractérise son mets favori – permettrait de concevoir des moyens plus efficaces de masquer ces odeurs ou de brouiller les signaux des organes olfactifs du moustique afin d'empêcher qu'il ne pique. Nous avons effectué récemment un grand pas dans ce sens en décryptant la façon dont le moustique *Anopheles gambiae*, principal vecteur du parasite du paludisme en Afrique, détecte l'odeur de ses proies. Ces découvertes laissent entrevoir de nouveaux outils pour repousser ou piéger les moustiques, qui pourraient être utilisés en complément des mesures déjà mises en œuvre – principalement des moustiquaires imprégnées d'insecticides, utilisées tant dans les habitations que sur les cultures.

À la recherche des gènes de l'odorat

Pour étudier la façon dont les moustiques détectent leurs proies humaines, nous avons utilisé comme modèle la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*. La drosophile est le modèle favori des biologistes. Contrairement au moustique, elle s'y reproduit rapidement et sans difficulté, et ses gènes sont faciles à manipuler. On l'utilise donc pour mettre en évidence les mécanismes cellulaires et moléculaires de base du système olfactif de l'insecte. Les connaissances acquises sur cette mouche sont ensuite mises à profit pour réaliser les expériences sur le moustique, plus délicates.

À l'instar des moustiques, les drosophiles détectent les odeurs grâce à leurs antennes et leurs palpes maxillaires, organes qui avancent sur leur tête et ont fonction de nez. Ces organes sont hérissés de minuscules poils qui enveloppent les terminaisons axonales des neurones olfactifs *(voir l'encadré page 50)*. Les molécules odorantes s'infiltrent dans les poils par des pores et



UN MOUSTIQUE FEMELLE *Anopheles gambiae* de quelques millimètres de long observé au microscope électronique. Sous les deux antennes poilues, on distingue, de part et d'autre de la trompe, les deux palpes maxillaires. Antennes et palpes sont ses organes olfactifs. Porteurs du parasite du paludisme, ces moustiques repèrent leurs proies principalement à l'odeur et, en les piquant pour se nourrir, disséminent le parasite.

David Shain

expert en odeur humaine



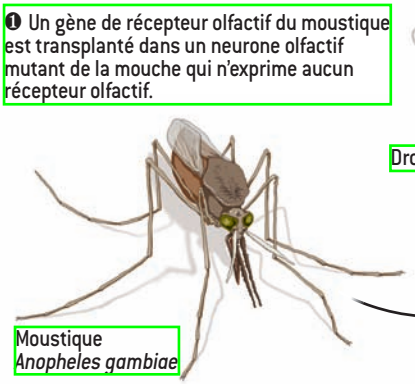
L'ESSENTIEL

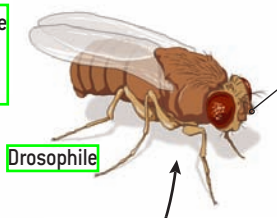
- ✔ Les moustiques *Anopheles gambiae*, qui transmettent le paludisme en Afrique, distinguent l'odeur humaine à plusieurs mètres.
- ✔ En introduisant des gènes de récepteurs olfactifs du moustique chez des mouches, des biologistes ont créé des détecteurs olfactifs imitant l'odorat du moustique.
- ✔ L'identification des substances odorantes qui activent ces détecteurs permet d'envisager de nouveaux pièges et produits antimoustiques.

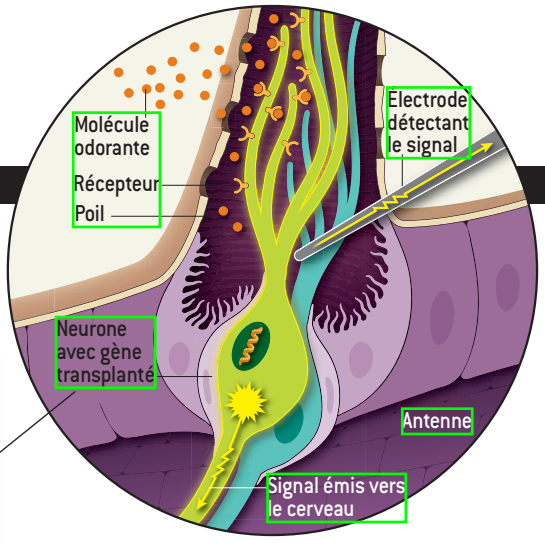
LE PRINCIPE DE L'EXPÉRIENCE

Des chercheurs ont identifié des récepteurs olfactifs du moustique *Anopheles gambiae* qui réagissent fortement aux odeurs humaines. Leur méthode : tester un grand nombre d'odeurs, une à une, sur chaque récepteur du moustique… chez une drosophile mutante.

❶ Un gène de récepteur olfactif du moustique est transplanté dans un neurone olfactif mutant de la mouche qui n'exprime aucun récepteur olfactif.







❷ Le gène conduit le neurone à produire un type de récepteur sur lequel ne se fixent que les molécules odorantes ayant la forme adéquate. Les molécules odorantes traversent les pores du poil et atteignent le neurone. Si ces molécules se lient au récepteur produit par le neurone, ce dernier envoie un signal au cerveau, indiquant la présence de l'odeur. Une électrode détecte le signal. Ce protocole est exécuté sur chaque récepteur à tester.

Tommy Moorman

atteignent les neurones olfactifs. À leur surface, elles se lient à des récepteurs olfactifs, molécules qui les reconnaissent spécifiquement. Lorsque des molécules odorantes se lient à leurs récepteurs, un signal électrique est émis par le neurone et atteint le cerveau de l'insecte, qui perçoit l'odeur.

Comment un insecte distingue-t-il avec précision les innombrables substances odorantes contenues dans l'environnement ? Pour le savoir, avec nombre d'autres biologistes, nous avons recherché pendant des années les gènes associés aux récepteurs olfactifs chez les insectes. Les premiers résultats ont été obtenus en 1999. Des membres de notre équipe, à l'Université Yale, et d'autres chercheurs ont découvert les premiers gènes codant des récepteurs olfactifs. Petit à petit, nous en avons repéré 60 chez la drosophile. Connaissant la séquence de leur ADN, nous allions pouvoir comprendre le fonctionnement des récepteurs, en étudiant la capacité olfactive des mouches en fonction de l'expression des gènes codant des récepteurs.

Simultanément, nous avions aussi découvert que la génétique du système olfactif est similaire chez la drosophile et chez le moustique. Étudier la mouche nous aiderait donc à comprendre l'odorat du moustique. L'arrivée fortuite, dans notre laboratoire, d'un mutant de *Drosophila melanogaster* accéléra nos recherches. Cette lignée mutante provenait d'un professeur de l'Université de Brandeis. En novembre 2001, l'un d'entre nous (John Carlson) avait organisé dans cette université un colloque sur *Or22a*, le premier gène de récepteur olfactif de la drosophile que nous avions découvert. Au terme d'un exposé, le professeur avait annoncé qu'il possédait une souche mutante de *Drosophila melanogaster* dépourvue du gène *Or22a* et avait offert sa collaboration, que nous nous étions empressés d'accepter.

Chaque odeur active une combinaison de récepteurs

Notre objectif principal consistait à déterminer quels récepteurs de drosophile répondaient à quelles molécules odorantes. Un neurone olfactif porte des milliers de récepteurs olfactifs, tous identiques. Chaque poil olfactif contient plusieurs neurones, chacun portant donc un type de récepteur particulier. Chaque type de récepteur ne reconnaît qu'un petit sous-ensemble de molécules odorantes. Les drosophiles mutantes étant dépourvues d'un gène de récepteur olfactif particulier *(Or22a)*, nous avons supposé qu'un de leurs neurones olfactifs, qui aurait dû porter ce récepteur, n'exprimait aucun récepteur à cause de la mutation : les drosophiles mutantes présentaient-elles une sorte de neurone « vide » ?

C'était bien le cas : un des neurones de leurs antennes ne répondait à aucune odeur. À l'aide de techniques de génie génétique, nous avons introduit, chez des mouches mutantes, un gène de récepteur de drosophile dans ce neurone, qui s'est mis à produire ce type de récepteur. En utilisant cette méthode avec chaque récepteur dont nous connaissions le gène, nous avons déterminé les substances odorantes qui l'activaient : en insérant un gène codant un récepteur olfactif particulier dans un neurone vide, puis en exposant ce neurone à un ensemble de composés odorants, nous avons défini les molécules qui déclenchent un signal électrique dans chacun des récepteurs présents chez la mouche.

C'est le travail qu'a accompli Elissa Hallem, alors doctorante à Yale, au cours des trois années suivantes. Elle a ainsi découvert que chaque récepteur répond à un sous-ensemble restreint de molécules odorantes et que chaque molécule odorante active une combinaison particulière de récepteurs. Des résultats similaires ont été observés avec le système olfactif des mammifères. Ainsi, de la drosophile à l'homme, les animaux détectent les odeurs de façon similaire : différentes odeurs activent diverses combinaisons de récepteurs. Cette stratégie leur permet de distinguer un grand nombre d'odeurs présentes dans la nature sans pour autant que chaque récepteur soit dédié à chacune d'elles.

Après avoir caractérisé les gènes des récepteurs olfactifs chez la drosophile, nous sommes revenus au moustique porteur du paludisme : le neurone vide de la drosophile, qui nous avait permis d'analyser les propriétés de ses récepteurs olfactifs, pourrait-il nous servir aussi à caractériser les récepteurs du moustique ? En recherchant chez *Anopheles gambiae* des séquences d'ADN similaires à celles des gènes des récepteurs de la mouche, nous avions identifié, en collaboration avec Laurence Zwie-

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

bel, de l'Université Vanderbilt, dans le Tennessee, Hugh Robertson, de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign, et leurs collègues, une famille de 79 gènes susceptibles de coder des récepteurs olfactifs. Transplanter un de ces gènes dans un neurone vide de drosophile devait en théorie produire un récepteur olfactif de moustique chez la mouche. Mais l'expérience pouvait aussi échouer : les deux espèces d'insectes sont séparées par 250 millions d'années d'évolution et le gène de moustique ne fonctionnerait peut-être pas dans un neurone de drosophile.

Des récepteurs liés à peu d'odeurs

Notre dispositif expérimental est relié à un haut-parleur. Si un neurone olfactif est stimulé, une électrode le détecte et l'enceinte produit une série de petits claquements. Nous avons testé une série de substances odorantes sur le premier neurone vide de drosophile dans lequel avait été introduit un gène de moustique. Le haut-parleur resta silencieux jusqu'à ce que le neurone soit mis en présence d'un composé nommé 4-méthylphénol. Or le 4-méthylphénol, qui dégage une odeur de chaussette sale, est un composant de la sueur humaine. Notre dispositif avait détecté une affinité récepteur-odeur ! En d'autres termes, nous avions découvert un moyen de décrypter quelles substances odorantes suscitent une réponse chez quels récepteurs du moustique.

Munis de ces résultats encourageants, nous avons étudié la littérature disponible sur les odeurs humaines et sélectionné 110 composés – dont beaucoup issus de la sueur – pour les tester. Nous avons choisi des composés de structures moléculaires variées pour que l'échantillonnage soit le plus vaste possible. Puis nous avons introduit un par un les 79 gènes de récepteurs possibles de l'*Anopheles gambiae* dans des neurones vides. Cinquante de ces gènes se sont révélés fonctionnels dans notre dispositif expérimental. Nous avons alors entrepris de tester les 110 composés odorants sur ces 50 récepteurs, créant plus de 5 500 combinaisons récepteur-substance odorante.

À partir de ces données, nous avons identifié plusieurs récepteurs qui réagissaient fortement à un unique composé ou à un tout petit nombre de molécules. Ces récepteurs à spectre restreint nous intéressaient tout particulièrement : nous avions fait l'hypothèse que pour détecter un composé spécifique avec acuité – une substance signalant la proximité d'une source de sang, par exemple –, un moustique utilisait peut-être un récepteur dédié à la perception de ce composé. De fait, nous avons découvert que la plupart de ces récepteurs à spectre étroit répondent à des composants de la sueur humaine. Par exemple, le premier récepteur de moustique testé par E. Hallem dans le neurone vide – le récepteur qui a répondu de façon si intense au 4-méthylphénol – est de ce type. Sur les 110 composés odorants, seuls quelques autres excitent à ce point ce récepteur. Un autre récepteur a réagi très fortement et spécifiquement à l'1-octen-3-ol (octénol), que l'on retrouve à la fois dans l'odeur humaine et dans l'odeur animale. Il attire plusieurs espèces de moustiques, dont le *Culex pipiens*, répandu dans les jardins aux États-Unis et porteur du virus du Nil occidental. Certains pièges à moustiques utilisés par les particuliers dans les jardins diffusent cette substance.

Neutraliser le moustique en l'embrouillant

Ces résultats pourraient accélérer le développement de pièges et de produits antimoustiques plus efficaces. Une méthode classique pour tester le pouvoir attractif de substances chimiques consiste à placer ces substances dans des pièges *in situ* et voir si elles attirent les moustiques. Toutefois, ce processus est lent et ne permet de tester qu'un nombre limité de composés chimiques. Les expériences classiques en laboratoire ont aussi leurs inconvénients. Souvent, elles consistent à enduire d'un composé le bras de volontaires, avant de l'insérer dans une boîte transparente contenant des dizaines de moustiques ; les substances qui repoussent les moustiques dans ce système sont alors envisagées comme produits antimoustiques.

Notre approche permet de tester un nombre de composés chimiques beaucoup plus important, ce qui augmente la probabilité de découvrir de nouvelles méthodes pour piéger ou éloigner les moustiques – qui plus est, sans avoir recours à des sujets humains. L. Zwiebel, par exemple, utilise des récepteurs olfactifs d'*Anopheles gambiae* exprimés dans des cellules cultivées en laboratoire. Des robots exposent ces cellules à des milliers de composés en

LES AUTEURS




John CARLSON est professeur de biologie moléculaire, cellulaire et du développement à l'Université Yale.
Allison CAREY, docteur en neurosciences de l'Université Yale, effectue un postdoctorat à l'Institut Pasteur, à Paris.

✔ BIBLIOGRAPHIE

A. F. Carey *et al.*, **Odorant Reception in the Malaria Mosquito *Anopheles gambiae***, *Nature*, vol. 464, pp. 66-71, 2010.

J.-M. Hougard, **Les moustiquaires imprégnées**, *Pour la Science*, n° 366, pp. 48-52, 2008.

Cl. Panosian Dunavan, **La lutte contre le paludisme**, *Pour la Science*, n° 343, pp. 42-48, 2006.

W. van der Goes van Naters et J. R. Carlson, **Insects as chemosensors of humans and crops**, *Nature*, vol. 444, pp. 302-307, 2006.

L. J. Zwiebel et W. Takken, **Olfactory regulation of mosquito-host interactions**, *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, vol. 34, n° 7, pp. 645-652, 2004.

✔ SUR LE WEB

Page de l'Organisation mondiale de la santé sur le paludisme : www.who.int/malaria/fr/

Photographies en microscopie électronique à balayage du système olfactif du moustique *Anopheles gambiae* : ScientificAmerican.com/jul2011/carlson

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Vers une application concrète

Les résultats de John Carlson et Allison Carey permettent d'entrevoir de nouvelles perspectives de recherche à plus ou moins long terme dans la lutte contre les moustiques qui transmettent le paludisme. Les méthodes classiques à base d'insecticides se heurtent au développement drastique de la résistance des moustiques aux principales molécules utilisées en santé publique, notamment les pyréthrinoïdes. De plus, les stratégies préconisées par l'Organisation mondiale de la santé – moustiquaires imprégnées d'insecticides, pulvérisations d'insecticide dans les domiciles – visent à protéger les populations humaines dans les habitations, alors qu'une fraction non négligeable de moustiques vecteurs du paludisme piquent à l'extérieur et même parfois à des heures matinales (lorsque les gens ne sont plus sous moustiquaires). La découverte de récepteurs olfactifs répondant fortement aux odeurs libérées par l'homme aidera à développer des pièges à moustiques plus performants et spécifiques que ceux disponibles actuellement (pièges lumineux ou pièges au dioxyde de carbone…). De même, la découverte de récepteurs olfactifs inhibés par certaines molécules volatiles devrait permettre d'identifier et de synthétiser de nouveaux répulsifs plus efficaces pour brouiller la localisation de l'hôte et ainsi mieux protéger les utilisateurs.

Depuis quelques années, les chercheurs, notamment de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), travaillent sur des nouvelles stratégies de lutte fondées sur la modification du comportement des moustiques. Au lieu de tuer les moustiques, on cherche par exemple à les repousser hors des habitations à l'aide de molécules dites « excito-répulsives », qui agissent à la fois sur leur système nerveux périphérique et sur leur système olfactif, puis à les capturer à l'extérieur grâce à des pièges à odeur spécifiques de l'espèce. D'autres résultats encourageants ont été obtenus en combinant, sur des moustiquaires, des répulsifs et des insecticides non pyréthrinoïdes, afin d'obtenir une protection personnelle efficace et un effet létal puissant sur les moustiques vecteurs tout en évitant de sélectionner des moustiques résistants aux pyréthrinoïdes. Les molécules perturbant le système olfactif des moustiques pourraient fournir de nouvelles pistes pour améliorer l'effet protecteur des moustiquaires imprégnées.

À plus long terme, l'identification des récepteurs olfactifs répondant spécifiquement aux odeurs de l'homme offrirait des perspectives intéressantes en matière de lutte génétique. On pourrait par exemple envisager la dissémination de moustiques vecteurs génétiquement modifiés, dépourvus de gènes codant les récepteurs olfactifs impliqués spécifiquement dans le repérage de l'homme. En attendant de pouvoir vivre « en harmonie » avec des moustiques exclusivement zoophiles, il est conseillé de dormir sous des moustiquaires imprégnées d'insecticides et d'utiliser des répulsifs appropriés (voir le site Internet de l'AFSSAPS) lors de séjour en zones tropicales…

Vincent Corbel
Entomologiste médical, IRD (Bénin)

seulement quelques heures. L. Zwiebel a déjà passé au crible plus de 200 000 composés, et plus de 400 d'entre eux ont activé ou inhibé les récepteurs olfactifs. Ces composés seront ensuite analysés et testés plus avant, et les meilleurs feront l'objet d'essais sur le terrain.

Le travail de laboratoire permet aussi de tester des composés agissant comme des « superactivateurs », c'est-à-dire des composés qui brouillent les neurones olfactifs en les surexcitant à tel point que leurs signaux désactivent ou déroutent le cerveau des moustiques. Ce type de composés pourrait, par exemple, être diffusé à proximité des habitations où dorment les villageois en Afrique subsaharienne, empêchant ainsi les moustiques de parvenir jusqu'à eux.

Ces tests en laboratoire permettraient aussi d'identifier des molécules qui inhiberaient les récepteurs olfactifs à spectre restreint, empêchant ainsi les insectes de sentir leur proie. Ces agents masquants pourraient être disséminés près des lieux d'habitation ou utilisés en tant que produits antimoustiques à appliquer sur la peau. Des composés perçus comme offensifs par les moustiques seraient aussi introduits dans la composition des antimoustiques. Nos collègues de l'Université de Wageningen, en Hollande, testent sur *Anopheles gambiae* des mélanges des composés que nous avons identifiés afin de déterminer s'ils pourraient être utiles dans l'une ou l'autre approche. Ils ont d'ores et déjà trouvé plusieurs combinaisons efficaces.

Par le passé, de nombreuses méthodes utilisées pour contrôler les insectes, tel l'usage à grande échelle de l'insecticide DDT, ont été nocives pour les animaux et, sans doute aussi, pour l'homme. Les méthodes de contrôle fondées sur l'olfaction seraient beaucoup moins nuisibles. Un piège olfactif ne requiert qu'une petite quantité de produit, car les moustiques sont très sensibles à ces signaux. De même, les substances attractives courantes de la sueur humaine et de l'haleine ne devraient pas être nocives à petite dose. Et si des produits toxiques étaient introduits dans la composition de ces pièges, ce serait en quantité limitée.

Vers un contrôle plus ciblé

En outre, le contrôle olfactif des insectes serait bien plus précis que celui effectué avec un insecticide. D'après nos données, la plupart des récepteurs olfactifs à spectre restreint des *Anopheles gambiae* sont activés par des composés de la sueur humaine, alors que ceux de la drosophile sont sensibles aux substances volatiles émises par les fruits. On pourrait envisager des mélanges de produits qui leurreraient spécifiquement tel ou tel insecte, limitant ainsi l'empreinte du procédé sur l'environnement. Et s'ils se révélaient efficaces, les cocktails de composés seraient à privilégier par rapport aux composés uniques, car les populations de moustiques sont moins susceptibles de développer une résistance à leur égard.

Reste à remplir les exigences liées au développement à grande échelle de ces procédés. Pour une utilisation généralisée dans les régions défavorisées, les agents olfactifs devront être conditionnés à peu de frais. Les bombes aérosol, par exemple, répandues dans les pays riches, ne sont pas adaptées aux zones rurales des pays en développement. Les produits attractifs et répulsifs fabriqués devront aussi rester stables sous les chaleurs tropicales. Diverses stratégies sont d'ores et déjà envisagées *(voir l'encadré ci-contre)*.

Le paludisme ne sera éradiqué que par une action diversifiée. Certes, les moustiquaires et des médicaments toujours plus efficaces continueront de jouer un rôle essentiel. Et les chercheurs restent déterminés à mettre au point un vaccin. Néanmoins, il est urgent de développer des outils supplémentaires pour combattre cette maladie. Manipuler avec précision le comportement des moustiques par le biais de leurs facultés olfactives pourrait être l'un de ces outils. À l'échelle d'une maladie qui affecte chaque année des centaines de millions de personnes, même une contribution modeste peut sauver nombre de vies.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

IRD Éditions

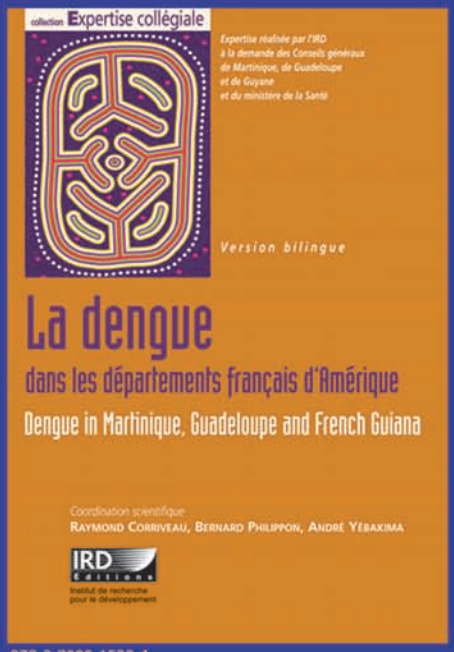
Institut de recherche pour le développement

www.ird.fr

Un éditeur pour le développement



978-2-7099-1667-7
15 €



978-2-7099-1532-4
15 €



978-2-7099-1446-8
Cédérom



978-2-7099-1379-8
Cédérom



978-2-7099-1380-1
Cédérom



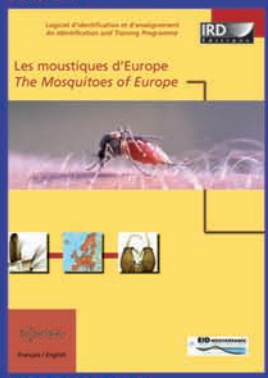
978-2-7099-1453-0
Cédérom



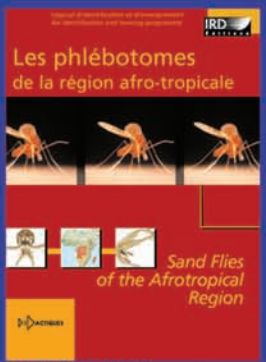
978-2-7099-1498-0
Cédérom



978-2-7099-1662-2
48 €



978-2-7099-1485-9
Cédérom



978-2-7099-1499-9
Cédérom



978-2-7099-1624-0
21 €



978-2-7099-1567-7
22 €



978-2-7099-1514-6
26 €

Diffusion libraires Eyrolles/Géodif

Vente par correspondance IRD Diffusion
32, av. Varagnat
F 93143 Bondy cedex
Tél : 01 48 02 56 49
Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@ird.fr



Malgré la découverte de nombreuses planètes extrasolaires, l'existence d'une civilisation extraterrestre dans notre région de la Galaxie serait peu probable.

Howard Smith

Avant la découverte de 51 Pegasi b, en 1995, nous ne connaissions aucune planète en orbite autour d'une autre étoile semblable au Soleil. À peine 16 ans plus tard, 570 planètes environ ont été caractérisées, et plus de 1 500 candidates proposées. Le rythme des découvertes d'exoplanètes s'est accéléré depuis le lancement du satellite européen CoRoT, en 2006, et, surtout, de la mission *Kepler* de la NASA, en 2009.

Les astrophysiciens ne sont pas les seuls à se passionner pour ces découvertes. Le public s'intéresse beaucoup aux planètes extrasolaires et à la possibilité qu'elles abritent la vie, voire des formes de vie intelligente. En 2010, la Société royale de Londres a parrainé un symposium intitulé « La détection de la vie extraterrestre et ses conséquences pour la science et la société ». Les participants observaient que « s'il se révélait que nous ne sommes pas seuls dans l'Univers, cela bouleverserait la représentation que l'humanité se fait d'elle-même ».

La plupart des gens pensent que nous ne sommes pas seuls dans l'Univers. Certains analystes expliquent que le public veut croire aux extraterrestres car « ils viendraient de sociétés utopiques qui ne connaissent ni la guerre, ni la mort, ni la maladie » et qu'ils « pourraient aider l'humanité à surmonter ses problèmes ».

Les scientifiques eux-mêmes encouragent parfois cette vision sensationnaliste. L'astronome Ray Jayawardhana écrivait ainsi en 2010 dans le *New York Times* que les gens ne devraient pas s'inquiéter de « la vie extraterrestre, surtout si elle maîtrise une technologie susceptible de nous faire sentir tout petits et insignifiants ». Mais ce scénario de science-fiction pourrait au contraire déresponsabiliser les gens et les rendre désinvoltes à l'égard d'autrui ou de notre planète !

L'étude des planètes extrasolaires (ou exoplanètes) apporte les premiers éléments concrets pour réévaluer l'hypothèse répandue selon laquelle la vie intelligente existe ailleurs dans l'Univers. Un raisonnement courant est que, puisque les exoplanètes sont légion, les civilisations extraterrestres doivent être nombreuses. Pourtant, l'un n'entraîne pas l'autre. Je pense pour ma part que ces données renforcent au contraire l'idée qu'il est très improbable qu'une civilisation extraterrestre plus ou moins semblable à la nôtre existe, du moins dans l'Univers proche.

Il serait ainsi plus pertinent de réfléchir à la place de l'humanité en la considérant comme une espèce rare et précieuse

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



L'ESSENTIEL

- **La plupart des gens pensent qu'il existe des formes de vie intelligente dans l'Univers, avec qui nous pourrions communiquer.**
- **L'abondance des planètes extrasolaires découvertes renforce à première vue cette idée.**
- **Les planètes qui remplissent tous les critères sont cependant sans doute très rares.**
- **Il est improbable que d'autres civilisations existent dans notre voisinage galactique.**

dans l'Univers, ni négligeable ni cosmiquement insignifiante.

La vie – et en particulier la vie intelligente, pas juste des micro-organismes – devrait être omniprésente dans un univers aussi vaste et riche que le nôtre. Cet univers est sans doute rempli de planètes rocheuses (ou telluriques) abritant la vie. Peut-être même les êtres intelligents sont-ils le produit inévitable de la vie et de l'évolution. Telle est en tout cas la position classique, illustrée par Percival Lowell, astronome et fervent défenseur des canaux martiens, qui écrivait en 1908 : « Nous savons que la vie est une phase de l'évolution planétaire aussi inévitable que le quartz, le feldspath ou le sol azoté. Les uns comme les autres ne sont que les manifestations d'affinités chimiques. »

Nous savons aujourd'hui que les canaux de Mars n'étaient que des chimères. En 1993, dans l'ouvrage *The Search for Life in the Universe* (La recherche de la vie dans l'Univers), Donald Goldsmith et Tobias Owen présentaient cependant une vision moderne de la même idée : « Nous prévoyons que tous les systèmes planétaires sont dotés d'un groupe de planètes intérieures rocheuses, avec des atmosphères engendrées par le dégazage et l'érosion, pour les mêmes raisons que [dans le Système solaire]. À en juger par notre propre exemple, il y a de bonnes chances pour que l'une de ces planètes intérieures soit en orbite autour de son étoile à la « bonne » distance […]. Nous estimons cette proportion à une sur deux au moins. »

Seuls… en pratique

Aujourd'hui, cette vision semble elle aussi obsolète. La principale leçon de l'étude des planètes extrasolaires est en effet qu'il existe une incroyable diversité de systèmes planétaires, avec un éventail d'environnements bien plus vaste qu'on ne l'imaginait. Une cinquantaine de planètes de moins de 25 masses terrestres ont été détectées à ce jour. Les planètes de la taille de la Terre, susceptibles d'abriter de l'eau liquide et une atmosphère propice à la vie, se situent encore au-dessous du seuil de détection des instruments actuels ; mais d'ici quelques années, il est raisonnable de penser qu'on en découvrira quelques-unes. On s'apercevra alors peut-être que notre Système solaire est représentatif de la moyenne. Toutefois, nous savons d'ores et déjà que certains systèmes planétaires n'ont rien à voir avec le nôtre. En attendant, ces résultats nous permettent de perfectionner les modèles de formation planétaire, et de mieux comprendre les planètes en général.

Avant d'aller plus loin, clarifions deux points. Tout d'abord, seule l'existence d'êtres intelligents m'importe dans cet article. Il n'est pas encore exclu que nous découvrions des formes de vie primitive sur Mars, voire des formes de vie pluricellulaire sur des planètes extrasolaires proches. Ces découvertes seraient

1. LE FILM *LE JOUR OÙ LA TERRE S'ARRÊTA* ***(ici, la version de 2007)*** **illustre le désir du public de croire en l'existence de civilisations extraterrestres utopiques qui aideraient l'humanité à surmonter les difficultés auxquelles elle est confrontée. Mais si nous sommes seuls dans l'Univers, en prendre conscience nous aiderait à apprécier le caractère précieux de l'humanité et de notre planète.**

L'AUTEUR



Howard SMITH est astrophysicien au Centre d'astrophysique *Harvard-Smithsonian* de Cambridge, aux États-Unis.

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

SUR LE WEB

Société française d'exobiologie : http://www.exobiologie.fr/

L'Encyclopédie des exoplanètes : http://exoplanet.eu/

Institut SETI : http://www.seti.org

La mission Kepler de la NASA : http://kepler.nasa.gov/

assurément révolutionnaires et nous éclaireraient sur l'apparition et l'évolution de la vie sur Terre. Mais faute d'une espèce douée de pensée consciente et apte à communiquer, nous serons toujours seuls dans l'Univers, sans personne avec qui interagir.

La vie intelligente signifie ici capable de communiquer d'une étoile à une autre ; cela implique la maîtrise d'une technologie équivalente à celle de la radio. À l'aune de cette définition, notre civilisation n'a qu'une centaine d'années. Si la vie intelligente est fréquente dans un Univers âgé de 13,7 milliards d'années, alors nous en sommes l'une des formes les plus jeunes ! Cependant, comme le soulignait le physicien italien Enrico Fermi dans son célèbre « paradoxe », la vie intelligente ne doit pas être monnaie courante dans l'Univers, sinon, pourquoi n'en avons-nous jamais découvert ?

Le second point découle de deux caractéristiques de notre monde qui étaient inconnues au début du XX^{e} siècle. D'une part, aucun signal ne peut dépasser la vitesse finie de la lumière. D'autre part, l'Univers est en expansion : les galaxies s'éloignent de nous, et ce d'autant plus vite qu'elles sont distantes.

Cela devrait refroidir l'enthousiasme de certains physiciens qui avancent que dans un univers infini ou dans des univers multiples, même si la vie intelligente est rare, elle existe quelque part, car tout scénario, même extrêmement peu probable, est réalisé.



SETI Institute/Seth Shostak

2. UNE MESURE DE L'INTELLIGENCE D'UNE FORME DE VIE est sa capacité à communiquer d'une étoile à l'autre, par exemple par ondes radio. Ces antennes du radiotélescope *Allen*, en Californie, sont ainsi utilisées dans le cadre du projet SETI pour rechercher une intelligence extraterrestre. Selon ce critère, notre propre civilisation n'a pas plus d'une centaine d'années.

Cette hypothèse est en effet intéressante, mais inopérante en pratique. L'Univers est peut-être infini, mais nous ne pouvons pas recevoir d'information de la plus grande partie de ce monde : notre vision se limite à l'horizon cosmique, c'est-à-dire la distance qu'a pu parcourir la lumière depuis le Big Bang. Cet horizon s'élargit avec le temps, mais attendre n'arrangera rien, car avec l'expansion cosmique, les galaxies reculées s'éloignent plus vite que l'horizon ne s'étend. Pour ce qui est d'envoyer des messages, la situation est encore pire ; la lumière envoyée aujourd'hui de la Terre ne pourra jamais atteindre des galaxies dont la lumière a mis dix milliards d'années pour nous parvenir. Ces galaxies s'éloignent de plus en plus rapidement et sont à jamais hors d'atteinte.

La vitesse finie de la lumière pose aussi des limites pratiques pour les étoiles plus proches. La plupart des étoiles de la Voie lactée, et leurs milliards de planètes présumées, se trouvent à plusieurs dizaines de milliers d'années-lumière. Il faudrait donc autant d'années avant que des extraterrestres reçoivent nos signaux, et encore le même temps pour recevoir une réponse.

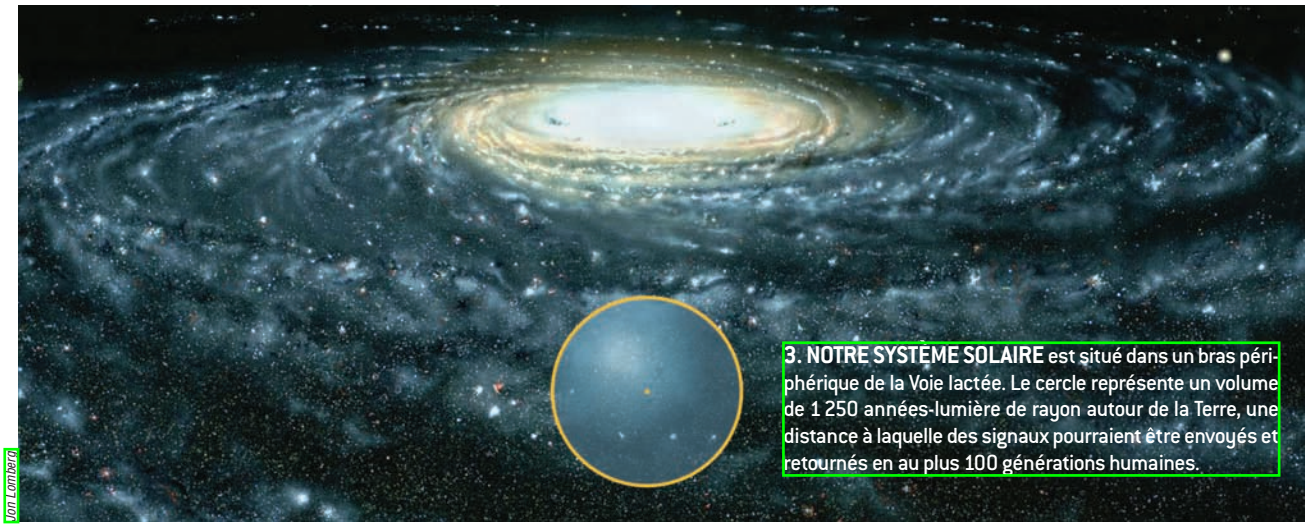
La vie en équation

Nous n'avons pas besoin d'attendre aussi longtemps pour nous sentir seuls dans l'Univers, sans personne avec qui communiquer. Cent générations, soit 2500 ans, me semblent déjà être une éternité à notre échelle. Un aller-retour des signaux étant nécessaire, je me limiterais donc dans ce qui suit à examiner les étoiles situées dans un rayon de 1250 années-lumière.

Nous connaissons beaucoup de choses sur les étoiles de ce proche voisinage, ce qui permet de faire des estimations quantitatives. Si nous nous focalisions sur un aller-retour de 25 ans, soit une région de 12,5 années-lumière de rayon, les chances de communiquer avec une vie intelligente diminueraient d'un facteur un million (le nombre d'étoiles est proportionnel au volume, donc au cube de la distance). Nous aurions cependant une réponse – positive ou négative – plus tôt. Inversement, plus le volume exploré est grand, plus les chances, mais aussi le temps d'attente, augmentent.

On pourrait imaginer qu'une civilisation extraterrestre lointaine scrute la galaxie à la recherche de jeunes planètes telluriques et envoie avec optimisme ses saluta-

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



Von Lombeig

3. NOTRE SYSTÈME SOLAIRE est situé dans un bras périphérique de la Voie lactée. Le cercle représente un volume de 1 250 années-lumière de rayon autour de la Terre, une distance à laquelle des signaux pourraient être envoyés et retournés en au plus 100 générations humaines.

tions très longtemps à l'avance, pour qu'elles arrivent juste au moment où une espèce intelligente a suffisamment évolué pour se mettre à écouter les signaux provenant de l'espace. Difficile cependant de concevoir une telle entreprise en pratique.

En fin de compte, il y a une explication simple au fait que l'espace reste désespérément silencieux, malgré des décennies d'écoute attentive : comme le soutenait Fermi, les extraterrestres ne sont tout simplement pas là. Et même en imaginant qu'il existe une technologie de communication fantastique plus rapide que la lumière, l'absence de signaux impliquerait alors non seulement que de tels êtres ne vivent pas dans notre Galaxie, mais qu'ils sont, au mieux, très rares ailleurs dans l'Univers.

La probabilité qu'une vie extraterrestre intelligente existe a été formalisée par l'astronome américain Frank Drake il y a tout juste 50 ans. L'équation de Drake fournit une estimation du nombre de civilisations extraterrestres détectables à l'époque actuelle dans le voisinage de la Terre. Il ne s'agit pas de la formulation mathématique d'un phénomène physique, et tout le monde n'y met pas exactement les mêmes termes, mais la formule la plus classique est le produit de cinq termes : le nombre d'étoiles appropriées, le nombre de planètes potentiellement propices à la vie autour de ces étoiles, la probabilité que la vie se développe sur l'une de ces planètes, la probabilité que la vie évolue jusqu'à l'intelligence, et la durée de vie typique d'une civilisation, rapportée à celle de son étoile.

Ces facteurs et leurs valeurs font l'objet de vifs débats depuis le début, car seule la première variable, le nombre d'étoiles adaptées, peut être raisonnablement estimée à partir d'un échantillon statistiquement significatif. Les récents résultats en matière de planètes extrasolaires précisent le deuxième terme de l'équation de Drake. Les autres facteurs restent assez mystérieux et ne sont que des extrapolations à partir du seul exemple connu : la vie sur Terre.

Le point de vue classique est qu'avec environ 10^{20} étoiles dans l'Univers visible, même si on surestime plusieurs centaines de fois chacun de ces facteurs, il reste pléthore de civilisations dans l'Univers. Cependant, si nous ne sommes pas disposés à attendre un milliard d'années pour recevoir des signaux et que nous nous focalisions donc sur notre voisinage stellaire, alors de petites surestimations font de grosses différences. Or s'il est impossible de réévaluer à la hausse les estimations classiques, optimistes, il est en revanche très facile de les revoir fortement à la baisse.

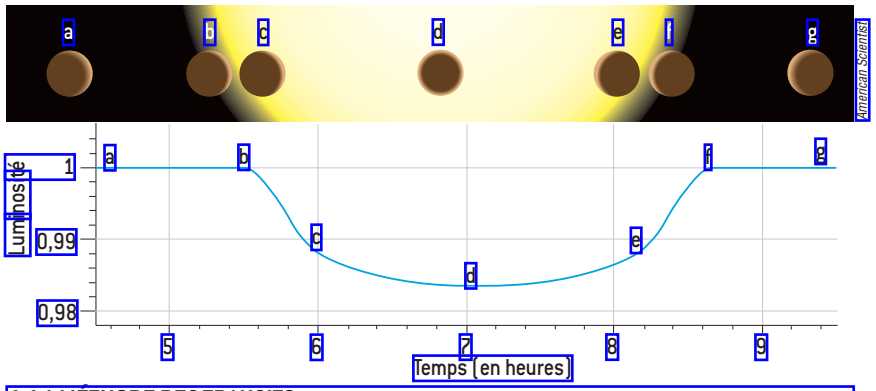
Le Soleil se trouve dans une cavité de gaz interstellaire d'environ 600 années-lumière appelée Bulle locale. Celle-ci est elle-même située dans la Ceinture de Gould, un filament d'étoiles, d'amas stellaires et de nuages moléculaires s'étendant au maximum sur environ 1 200 années-lumière. Dans cette région, le nombre d'étoiles par année-lumière au cube est approximativement égal à 0,004, à un facteur deux près. Cela signifie qu'environ 30 millions d'étoiles de tous types sont présentes dans un rayon de 1 250 années-lumière. C'est là une limite supérieure pour le premier facteur de l'équation de Drake dans le voisinage que nous avons défini. Intéressons-nous maintenant au deuxième terme.

Les premières planètes extrasolaires découvertes étaient les plus faciles à trouver, pour la simple raison que ce sont les plus grosses ou qu'elles ont des orbites assez proches de leur étoile pour que plusieurs transits successifs devant l'astre puissent être observés en quelques années seulement. Andrew Howard, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont néanmoins montré que parmi les 1 235 candidats planétaires détectés par *Kepler* dont la période orbitale est inférieure à 50 jours, les petites planètes sont plus abondantes. Nous n'avons pas encore déniché de planètes de type terrestre, mais sans doute n'est-ce qu'une question de temps. Les premières planètes de type terrestre qui seront découvertes seront peut-être non représentatives des planètes rocheuses.

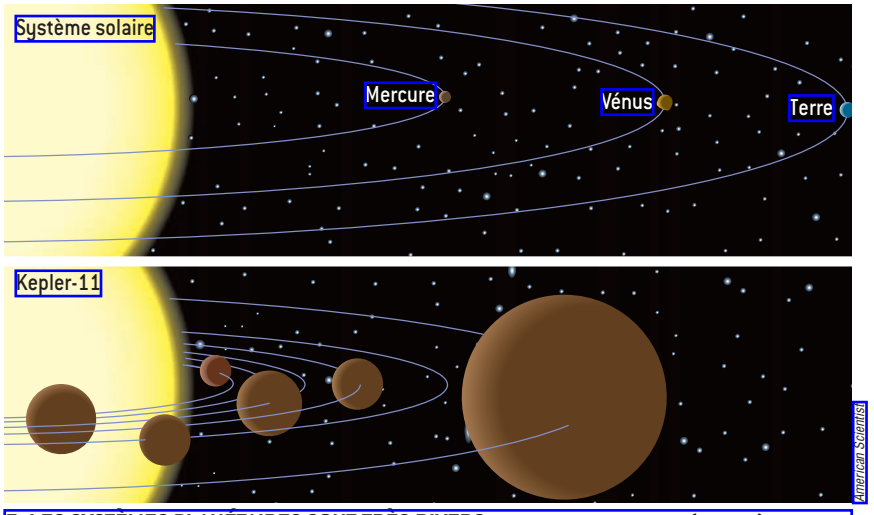
L'HYPOTHÈSE DE LA « TERRE RARE »

retient quatre critères essentiels : stabilité de l'étoile, habitabilité et présence d'eau, masse et composition.

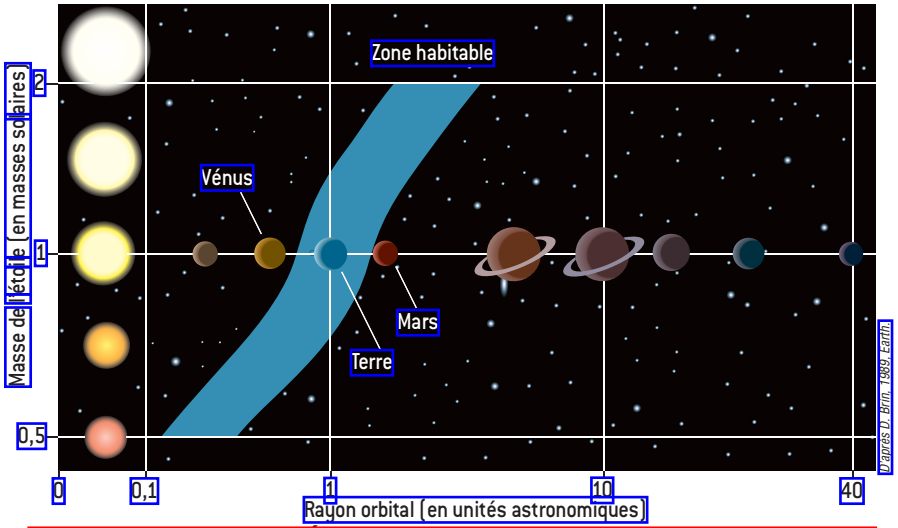
L'hypothèse dite de la « Terre rare » exprime l'idée que les planètes telluriques propices à l'émergence d'une vie intelligente sont très rares. Le paléontologue Peter Ward et l'astrophysicien Donald Brownlee, de l'Université de Washington,



4. LA MÉTHODE DES TRANSITS est utilisée par les satellites *Kepler* et CoRoT pour découvrir des planètes extrasolaires. Lorsqu'une telle planète passe devant son étoile, elle bloque une partie de la lumière stellaire. La durée et l'amplitude de la baisse de luminosité pendant ce transit révèlent les caractéristiques de la planète.



5. LES SYSTÈMES PLANÉTAIRES SONT TRÈS DIVERS. Le système Kepler 11 *(en bas)* abrite par exemple six planètes géantes, dont cinq sont plus proches de l'étoile que Mercure ne l'est du Soleil *(en haut)*, et la dernière est à l'intérieur de l'orbite de Vénus. Notre Système solaire n'est sans doute pas la norme dans l'Univers *(ces représentations ne sont pas à l'échelle)*.



6. LA ZONE HABITABLE D'UNE ÉTOILE, la plage de distance où la température autorise le maintien d'eau liquide, varie en fonction de la masse et de l'âge de l'étoile *(bande bleue)*. Si la zone habitable est trop proche de l'étoile, une planète s'y trouvant se synchronisera par effet de marée et finira par présenter toujours la même face à son étoile. Quant aux étoiles trop massives, elles se consument vite, et leur zone habitable ne persiste pas assez longtemps pour qu'une vie intelligente apparaisse.

entre autres, ont proposé un ensemble de conditions nécessaires, qu'on peut regrouper en quatre critères essentiels : stabilité de l'étoile, habitabilité et présence d'eau, masse et composition.

Pour remplir le critère de stabilité, l'étoile hôte doit avoir une taille et un rayonnement stables durant les milliards d'années nécessaires à l'évolution de formes de vie intelligente. C'est le cas du Soleil, mais il n'est pas représentatif de la majorité des étoiles. Plus de 90 pour cent d'entre elles sont plus petites, et beaucoup n'atteignent pas le dixième de sa masse. Or les petites étoiles sont plus froides. La zone habitable – la bande orbitale où les températures permettent à l'eau de subsister sous forme liquide – est donc plus proche de l'étoile.

Et lorsqu'une planète est très près de son étoile, elle a tendance à être piégée par les effets de marée dans une résonance synchrone, c'est-à-dire à présenter toujours la même face à l'étoile (comme la Lune vis-à-vis de la Terre). L'un des hémisphères de la planète est alors perpétuellement plongé dans l'ombre et le froid, tandis que l'autre, toujours exposé à l'étoile, est une fournaise. Il semble improbable que la vie se développe sur de telles planètes, bien que certains soutiennent qu'elle pourrait se nicher à la frontière entre la partie éclairée et la partie obscure.

Une étoile ni trop grosse ni trop petite

À l'autre bout de l'échelle, les étoiles de masse beaucoup plus élevée que le Soleil sont elles aussi peu adaptées : plus une étoile est massive, moins elle vit longtemps. Une étoile de deux masses solaires ne brûle de l'hydrogène de façon stable (phase dite « séquence principale ») que pendant 1,8 milliard d'années, soit cinq fois moins longtemps que le Soleil et quelques milliards d'années de moins qu'il n'en a fallu à la vie intelligente pour apparaître sur Terre. Les étoiles de huit masses solaires explosent en supernovae après quelques dizaines de millions d'années à peine. En fin de compte, moins de dix pour cent des étoiles se situent dans un intervalle de masse correspondant à une durée de vie acceptable, soit 0,7 à 1,7 masse solaire.

En outre, l'âge de l'étoile aussi a son importance. Une étoile trop jeune n'a pas encore laissé le temps à la vie d'évoluer, et une étoile trop vieille voit sa luminosité

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

augmenter (le Soleil sera 40 pour cent plus lumineux dans 3,5 milliards d'années) ; sa zone habitable se décale donc vers l'extérieur. Autre problème : la plupart des étoiles – dont les deux tiers des étoiles de type solaire – vivent en couples au sein d'un système binaire. Des planètes peuvent être en orbite autour de l'une ou l'autre étoile, ou des deux, mais l'influence gravitationnelle complexe d'une étoile compagnon perturberait sans doute la longue période de gestation d'une planète dans la zone habitable.

Des orbites bien ajustées

La deuxième condition pour le développement d'une vie intelligente sur une planète est l'habitabilité : une planète doit résider dans la zone habitable de son étoile ou permettre la conservation de l'eau à l'état liquide par un mécanisme quelconque. Son orbite doit aussi être stable et suffisamment circulaire pendant plusieurs milliards d'années. Or la découverte la plus remarquable sur les planètes extrasolaires est la diversité de leurs orbites : certaines sont extrêmement elliptiques, d'autres sont très serrées autour de l'étoile (on parle de « jupiters chauds »), etc.

La présence de jupiters chauds dans un système n'exclut pas qu'il y ait une planète de type terrestre plus loin de l'étoile, dans la zone habitable, mais cela complique les choses. On pense que les planètes se forment à bonne distance de l'étoile par accrétion progressive de matériaux du disque protoplanétaire. Une fois leur cœur rocheux formé, les planètes géantes auraient tendance à migrer vers des orbites plus serrées en raison de l'interaction avec le matériau du disque. Lors de cette migration, elles perturbent et éjectent certainement les petits corps rocheux présents dans la zone habitable. Certains pourraient néanmoins subsister.

Un autre paramètre est l'excentricité de l'orbite, c'est-à-dire la forme plus ou moins allongée de la trajectoire elliptique. L'excentricité détermine les variations annuelles de la distance par rapport à l'étoile, et donc d'« ensoleillement ». De fortes variations orbitales n'empêchent pas forcément la présence d'eau liquide, mais pourraient entraver le développement de systèmes biologiques. Dans un système multiple, une orbite excentrique augmente aussi la probabilité d'interactions gravitationnelles avec les autres planètes et ainsi le risque d'une évolution chaotique de l'orbite. L'orbite de la Terre est pratiquement circulaire. Sur les quelque 500 planètes extrasolaires actuellement confirmées et dont les paramètres orbitaux sont déterminés, seules 11, soit 2,2 pour cent, ont une excentricité inférieure ou égale à celle de la Terre. La moitié d'entre elles voient leur distance à l'étoile varier de 20 pour cent au cours d'une révolution, et pour 20 pour cent d'entre elles, cette distance varie du simple au double !

Un paramètre connexe est l'obliquité de la planète, c'est-à-dire l'angle entre son axe de rotation propre et celui de l'orbite. L'obliquité de la Terre, égale à 23,5 degrés, résulte d'une collision avec un objet de la taille de Mars dans sa jeunesse – impact dont est née la Lune. L'obliquité de la Terre est à peu près stabilisée par l'attraction exercée par la Lune. Elle explique les saisons, chaque pôle étant alternativement orienté vers le Soleil et recevant alors davantage de lumière. La valeur de l'obliquité est telle que le climat à la surface de la Terre n'est ni trop chaud ni trop froid tout au long de l'année.

Des chercheurs ont calculé que si l'obliquité de la Terre atteignait 90 degrés, une partie importante de sa surface deviendrait inhabitable (un hémisphère serait en permanence tourné vers le Soleil, l'autre restant dans l'ombre). Aucune autre planète de notre Système solaire n'a une obliquité aussi stable. Celle de Mars vaut actuellement environ 25 degrés, mais elle aurait varié de façon chaotique entre 0 et 60 degrés.

Les modèles actuels de formation des planètes de la taille de la Terre suggèrent qu'en raison des collisions en tous sens aux stades précoces de la formation planétaire, des obliquités initiales élevées devraient être fréquentes ; cependant, leur évolution ultérieure reste à mieux comprendre.

Le bon mélange chimique

L'axe de rotation des étoiles elles-mêmes peut aussi être incliné par rapport au plan orbital des planètes. Les données suggèrent pour l'instant que les étoiles abritant des jupiters chauds ont des obliquités importantes, résultant probablement de fortes perturbations gravitationnelles dans ces systèmes extrêmes.

✔ BIBLIOGRAPHIE

W. J. Borucki *et al.*, **Characteristics of Kepler planetary candidates based on the first data set**, *The Astrophysical Journal*, vol. 728, article 117, 2011.

D. Sasselov et D. Valencia, **Des super-Terres accueillantes**, *Pour la Science*, n° 396, octobre 2010. http://bit.ly/pls396 sasselov

F. Raulin Cerceau, **Sur la piste des extraterrestres**, *Dossier Pour la Science* n° 60, juillet-septembre 2008. http://bit.ly/doss60 raulin

P. Ward et D. Brownlee, **Rare Earth : Why Complex Life is Uncommon in the Universe**, Springer-Verlag, 2000.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Là encore, l'ensemble des planètes extrasolaires connues représente la partie émergée de l'iceberg ; la plupart des systèmes extrasolaires pourraient se révéler différents. Cependant, les explications avancées pour rendre compte des paramètres orbitaux observés sont générales. Le mécanisme qui façonne des orbites très elliptiques, par exemple, est sans doute à l'œuvre d'une façon ou d'une autre dans d'autres systèmes planétaires encore inconnus.

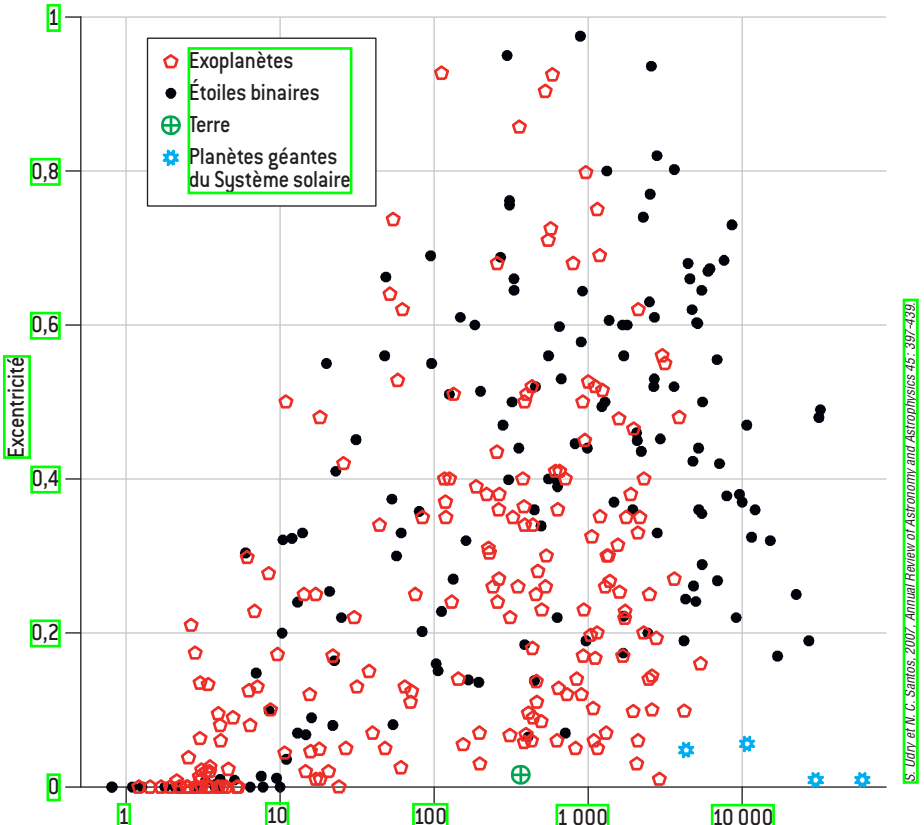
La troisième condition pour une « bonne » planète porte sur sa masse. La planète doit être suffisamment massive pour retenir une atmosphère, mais pas au point que la tectonique des plaques soit bloquée. La tectonique, qui alimente l'atmosphère par le biais des volcans et permet l'existence d'un cycle du carbone, semble en effet indispensable pour la vie. D'après les estimations actuelles, les planètes de moins de 0,4 masse terrestre ne se prêtent pas à l'existence durable d'une atmosphère, et au-delà de 4 masses terrestres, la tectonique ne peut se mettre en place sur une planète rocheuse.

La fréquence à laquelle de telles planètes se forment n'est pas encore connue, mais, d'après les premières données du satellite *Kepler*, elles sont abondantes : environ 13 pour cent des planètes en orbite serrée ont une taille comparable à celle de la Terre, et des indices laissent penser que sur des orbites plus éloignées, elles seraient encore plus nombreuses, notamment autour des petites étoiles.

Le quatrième et dernier grand critère pour une planète adaptée concerne sa composition. Une planète habitable doit à l'évidence contenir les éléments nécessaires à la chimie organique (carbone, hydrogène, oxygène, etc.). Mais certains éléments favorisent aussi la vie de façon indirecte. Le silicium et le fer, par exemple, facilitent la tectonique des plaques. La chaleur dégagée par les éléments radioactifs maintient le noyau de fer de la Terre à l'état liquide, d'où l'existence d'un champ magnétique qui protège la surface des particules chargées éjectées par le Soleil. Cette chaleur alimente aussi la convection du manteau et donc la tectonique.

La distribution des éléments chimiques n'est pas uniforme dans la Galaxie. Certaines régions entières pourraient ainsi être inadaptées à l'émergence de la vie. En outre, la présence d'éléments radioactifs signifie qu'une supernova – leur principale source – a explosé récemment dans le voisinage de la planète considérée (mais pas trop près...). La Bulle locale où se situe le Soleil aurait été sculptée par des explosions de supernovae, mais certains des éléments lourds vitaux présents dans le Système solaire pourraient être absents dans d'autres régions de la zone d'investigation de 1 250 années-lumière de rayon.

Enfin, il existe sans doute de nombreuses planètes flottant dans l'espace intersidéral, éjectées de leur système planétaire par des interactions gravitationnelles. Il est difficile d'imaginer la vie s'y développer sans l'énergie apportée par une étoile.



7. L'EXCENTRICITÉ D'UNE PLANÈTE mesure le degré d'allongement de son orbite elliptique, c'est-à-dire le rapport entre les distances minimale et maximale de la planète à son étoile, et donc les variations d'ensoleillement au cours d'une orbite. L'excentricité de la Terre *(en vert)* est presque nulle (son orbite est quasi circulaire). La plupart des exoplanètes connues *(en rouge)* ont une excentricité supérieure à celle de la Terre, et la moitié environ voient leur distance à l'étoile varier de 20 pour cent ou plus au cours d'une révolution.

Des facteurs biologiques difficiles à estimer

Même si toutes les conditions précédentes étaient remplies, rien ne garantit que la vie se développe. Le fait que la vie n'ait pas encore été créée en laboratoire signifie que sa genèse n'est pas évidente. Mars se situe à peu près dans la zone habitable, mais n'abrite aucune vie intelligente. Et même si la vie était le résultat inévitable des processus chimiques se déroulant sur toutes les planètes dotées d'eau, rien ne laisse penser que cela se fait rapidement. Sur Terre, la vie a mis entre 500 millions et un milliard d'années à apparaître, et quelques autres milliards d'années à évoluer jusqu'à notre civilisation. Il suffit qu'ailleurs la chimie soit deux ou trois fois plus lente, ou que l'évolution se « fourvoie », et il est trop tard : une étoile de type solaire se sera alors dilatée jusqu'à atteindre l'équivalent de l'orbite de la Terre.

À cela, certains partisans de l'intelligence extraterrestre rétorquent que la vie peut évoluer de façon beaucoup plus efficace à partir de formes non carbonées. Outre l'absence de tout élément de preuve allant dans ce sens, la plupart des spécialistes s'accordent à penser qu'au minimum, l'intelligence requiert une certaine complexité.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Quelle que soit leur nature, ces formes de vie extraterrestre doivent avoir évolué assez longtemps pour que des organes relativement complexes prennent forme.

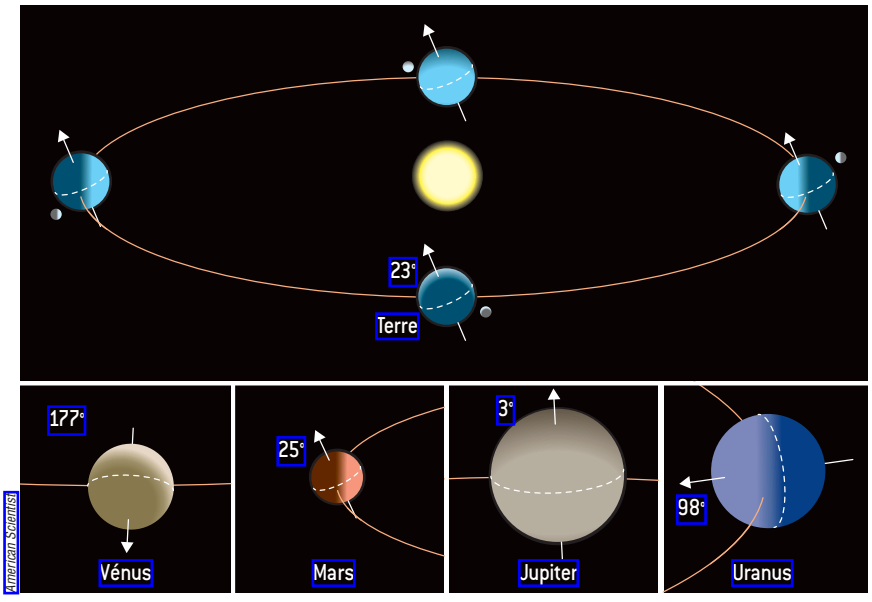
Par ailleurs, l'habitabilité d'une planète est une condition nécessaire, mais pas suffisante. La Terre, par exemple, a subi un certain nombre de catastrophes improbables – essentielles ou secondaires ? – qui ont facilité l'évolution.

Une collision gigantesque, survenue tôt dans l'histoire de la Terre, a créé la Lune, inclinant suffisamment l'axe de rotation de notre planète pour lui conférer l'obliquité et les saisons dont elle jouit, mais sans aller jusqu'à la faire voler en éclats. La Lune, engendrée dans le même impact, nous apporte les marées et stabilise les oscillations de l'axe terrestre. Quelques milliards d'années plus tard, tout autant par hasard, les dinosaures qui avaient dominé la planète durant 100 millions d'années ont été éradiqués par la chute d'un astéroïde, catastrophe qui a permis l'essor des mammifères. Il y a eu environ 15 extinctions massives, dont six catastrophiques, avant que l'homme n'entre en scène, ce qui souligne le caractère complexe, tumultueux et aléatoire de notre évolution.

De nombreuses autres conditions particulières ont permis à la vie de prospérer sur Terre. Par exemple, l'eau est essentielle à la vie, mais si la planète avait été couverte d'océans, les poissons ne se seraient jamais aventurés sur la terre ferme pour évoluer en quadrupèdes, puis en bipèdes. En outre, le chemin emprunté par l'évolution est sinueux. Selon le paléontologue Stephen Jay Gould, notre évolution était tellement aléatoire qu'elle ne pourrait probablement jamais se répéter.

Enfin, la principale incertitude dans l'équation de Drake est la longévité d'une civilisation intelligente. Si la durée typique est courte – notre civilisation radio n'a qu'une centaine d'années –, alors il doit y en avoir très peu autour de nous en ce moment même.

Les valeurs des probabilités associées à tous ces facteurs biologiques de l'équation de Drake sont très incertaines, et l'astronomie n'apporte pas de nouvelles données permettant de les affiner. Généralement, on a tendance à ne considérer que les deux extrêmes : soit la vie intelligente est inévitable sur toute planète vaguement adaptée, soit elle est hautement improbable.



8. L'OBLIQUITÉ DE LA TERRE, c'est-à-dire l'angle entre l'axe de rotation de notre planète et la perpendiculaire au plan de son orbite, vaut 23,5 degrés *(en haut)*. Cette inclinaison permet aux hémisphères Nord et Sud d'être alternativement orientés vers le Soleil (l'été), maintenant ainsi une température modérée à peu près constante sur l'ensemble du globe *(en haut)*. L'obliquité de la Terre est stabilisée par le couple exercé par la Lune. Celle des autres planètes du Système solaire *(en bas)*, et peut-être de certaines planètes extrasolaires, est très variable.

F. Drake pense désormais que « seule environ une étoile sur dix millions héberge une civilisation détectable », si bien que dans notre volume d'espace comprenant 30 millions d'étoiles, il pourrait y en avoir deux autres. Chacun peut faire sa propre estimation. Il n'y aura pas de civilisation si l'étoile est trop grosse ou trop petite, si l'orbite de la planète ou son obliquité ne sont pas bonnes, si sa taille ou sa composition chimique ne sont pas adaptées, si sa surface ne s'y prête pas, si son histoire géologique est trop défavorable, si la chimie nécessaire pour engendrer les premières formes de vie est trop compliquée ou trop lente, si l'évolution de ces formes de vie vers l'intelligence avorte ou s'égare trop souvent sur des voies stériles, ou si les civilisations s'éteignent facilement.

Un principe misanthropique ?

Pour que nous ayons une chance raisonnable d'avoir de la compagnie dans notre volume d'espace galactique, il faudrait que la probabilité moyenne pour chacune de ces conditions soit assez élevée (disons, supérieure à 20 pour cent). Si la probabilité de l'une d'elles est beaucoup plus faible, alors même si les autres sont certaines, il devient très improbable qu'une étoile proche de nous abrite des êtres intelligents.

Ainsi, malgré le discours enthousiaste souvent tenu sur la vie extraterrestre, tout indique que nous sommes probablement seuls, isolés comme les habitants d'une île magnifique, mais éloignée de tout. Dans 100 générations, l'humanité n'aura sans doute toujours pas reçu de signaux cosmiques intelligents.

Le « principe anthropique » est l'idée que les conditions dans l'Univers sont remarquablement bien ajustées pour que la vie émerge, puisque nous sommes là. Il me semble que l'on pourrait aussi énoncer un « principe misanthropique », stipulant que les environnements possibles dans l'Univers sont si vastes, variés et peu appropriés, au moins à un moment quelconque durant les trois ou quatre milliards d'années que met la vie intelligente à émerger, qu'il est peu vraisemblable que celle-ci se développe et se maintienne.

Adopter ce point de vue rend la vie sur Terre encore plus rare et précieuse. Même si nous ne sommes pas uniques dans l'Univers, nous avons beaucoup de chance. Voilà qui appelle une plus grande humilité et une plus grande responsabilité envers l'humanité et l'environnement. La recherche de nouvelles planètes, parmi lesquelles se trouvent peut-être des cousines de la Terre, nous permettra au moins de mieux comprendre la nôtre. Et c'est déjà beaucoup. ■

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Concevoir plus rapidement des vaccins

Alan Aderem

L' analyse simultanée de toutes les composantes du système immunitaire après une vaccination accélérerait la mise au point de vaccins efficaces, et porterait un coup fatal au virus du sida.

Les biologistes travaillant sur le sida avaient espéré que le vaccin développé par les Laboratoires *Merck* et l'Institut américain d'étude des allergies et des maladies infectieuses serait celui que l'on attend depuis 30 ans. Ces espoirs furent anéantis en 2007, quand les conclusions d'un essai clinique impliquant 3 000 personnes révélèrent que le vaccin était inefficace. Non seulement l'inoculation du vaccin ne protégeait pas les personnes participant à l'essai clinique, mais elle augmentait, pour certaines d'entre elles, le risque de contamination par le VIH. Des millions de dollars et plus de dix ans de recherche avaient été nécessaires à la mise au point de ce vaccin. Pendant la même période, 18 millions de personnes ont succombé au sida et des millions d'autres ont été contaminées.

En fait, aujourd'hui encore, après des dizaines d'années de recherches, on ignore comment élaborer un vaccin efficace contre le VIH. Certes, quelques vaccins, tels ceux utilisés contre la poliomyélite ou la variole, ont connu un succès spectaculaire. Mais en réalité, la chance joua un grand rôle dans leur réussite. À partir de leurs connaissances limitées du système immunitaire et des agents pathogènes, les biologistes ont en effet imaginé des vaccins qui, après quelques ajustements, se sont révélés efficaces pour protéger les sujets contre ces infections. Mais trop souvent, quand on ignore quelles sont les réactions immunitaires qui protègent réellement, les résultats sont décevants, surtout quand on ne constate l'inefficacité qu'au terme d'un essai clinique de grande ampleur.

D'où la question que se posent les immunologistes : comment mettre au point des vaccins efficaces et accélérer leur évaluation ? Pour y parvenir, il faudrait comprendre précisément toutes les réactions immunitaires induites par un vaccin réellement efficace. Il faudrait, par exemple, découvrir quelles sont les cellules immunitaires en jeu et comment elles interagissent, ou encore quels sont les gènes activés ou inhibés par ces cellules. Les immunologistes pourraient ensuite rassembler ces informations pour préciser quelle serait la réaction immunitaire réellement protectrice. Ce profil servirait à déterminer les constituants d'un vaccin protecteur contre la maladie.

En comparant des centaines de formulations possibles, les biologistes choisiraient celles qui produisent un profil immunologique proche du profil type. Ils améliore-

L'ESSENTIEL

- **Pour mettre au point un vaccin, les biologistes sélectionnent une molécule supposée déclencher des réactions immunitaires efficaces contre l'agent infectieux. Puis ils testent la molécule sur des milliers de personnes.**
- **Une nouvelle approche, la biologie des systèmes, permettrait d'accélérer la mise au point des vaccins.**
- **Dans cette approche, on étudie les modifications de l'activité des gènes après injection du vaccin en cours d'évaluation.**
- **En comparant ces résultats avec les réactions immunitaires idéales pour lutter contre une infection, les biologistes améliorent la formulation et l'efficacité des vaccins.**

Illustrations de Jude Buffum

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

raient alors ces formulations en réalisant des essais cliniques rapides et à petite échelle, jusqu'à obtenir des vaccins déclenchant les signatures biologiques optimales. En s'approchant de la signature idéale, ils sauraient rapidement si un vaccin a des chances d'être efficace. Ainsi, avant même que le vaccin expérimental ne soit testé lors d'essais cliniques de grande ampleur, on serait quasi assuré de son succès.

Jusqu'à présent, les biologistes n'avaient ni les connaissances ni les outils nécessaires pour atteindre cet objectif. Il fallait des équipes interdisciplinaires, d'immunologistes et de microbiologistes, capables de modéliser les systèmes biologiques complexes et d'en préciser les caractéristiques parmi de grandes quantités de données. Nous avions aussi besoin d'outils mesurant simultanément et de façon reproductible les changements d'activité des gènes, les quantités de protéines produites, le comportement des cellules et divers paramètres spécifiques des réactions immunitaires – sans oublier des ordinateurs puissants et des logiciels capables de traiter toutes ces données. Aujourd'hui, des équipes travaillant dans le domaine dit de la biologie des systèmes mettent au point des outils qui amélioreront notre façon de concevoir les vaccins. La communauté scientifique commence ainsi à découvrir les détails des réactions immunitaires nécessaires pour protéger une personne contre le VIH. Cette approche est aujourd'hui utilisée pour la mise au point des vaccins contre le sida, la tuberculose, le paludisme et la grippe.

Une combinaison idéale

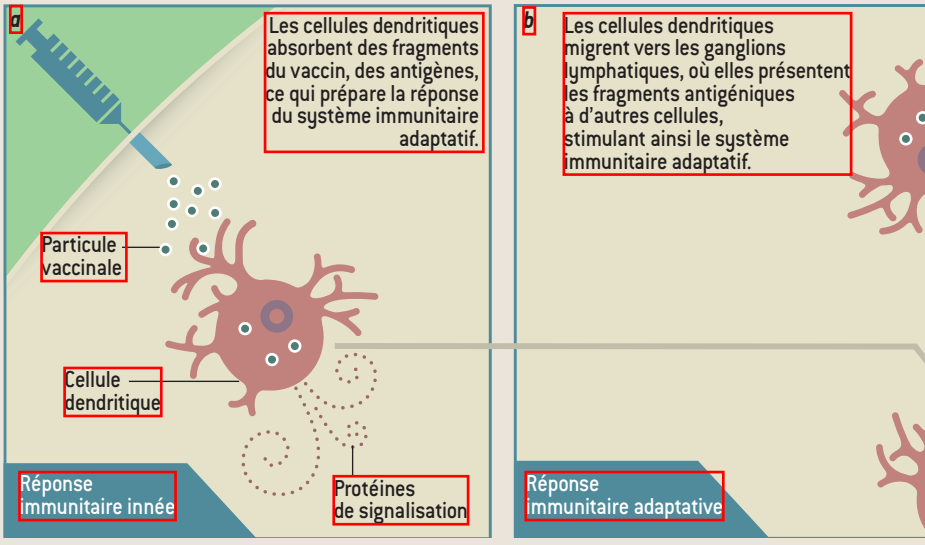
Qu'ils soient formulés de façon classique ou selon l'approche de la biologie des systèmes, les vaccins contiennent des antigènes (des fragments de protéines ou d'ADN) de l'agent pathogène (virus, bactéries ou parasites), qui déclenchent des réactions immunitaires très spécifiques. Parfois, les antigènes sont des virus entiers atténués (tel le vaccin contre la variole mis au point par Edward Jenner, il y a 200 ans, à partir du pus extrait d'une pustule de variole d'une vache laitière). Dans d'autres cas, les antigènes sont des fragments d'un agent infectieux inactivé (tel le vaccin Salk contre la poliomyélite), ou bien les particules antigéniques servent à elles seules de vaccin (par exemple, les vaccins contre la diphtérie, la coqueluche et le tétanos). Les vaccins contiennent souvent des adjuvants – des substances qui renforcent les réactions immunitaires. Le système immunitaire réagit aux antigènes d'un vaccin selon une séquence précise d'événements moléculaires et cellulaires qui permettent à l'organisme d'éviter une infection future par un virus ou une bactérie portant les mêmes antigènes ou des antigènes similaires. Pour les concepteurs de vaccins, l'objectif est de trouver la combinaison d'antigènes et d'adjuvants qui offre la protection la plus efficace.

Bien qu'il ait été mis au point de façon classique, le vaccin contre la fièvre jaune, YF-17D, a été l'un des plus efficaces jamais



© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Pour être efficace, un vaccin doit préparer l'organisme à se défendre contre un virus, une bactérie ou tout autre micro-organisme pathogène avant que l'infection ne se produise. Les meilleurs vaccins (virus entiers inactivés ou fragments de virus) activent successivement les deux composantes du système immunitaire : le système immunitaire inné et le système immunitaire adaptatif. La première ligne des défenseurs de l'organisme est constituée des cellules dendritiques, des cellules généralistes qui réagissent rapidement après l'inoculation du micro-organisme pathogène *(a)*. Elles engloutissent les particules vaccinales, puis transmettent le relais à des cellules plus spécialisées, les lymphocytes *T* et les lymphocytes *B* qui produisent les anticorps *(b)*. Ces lymphocytes gardent l'identité de l'envahisseur en mémoire et permettront à l'organisme de repousser très rapidement de futures attaques de ces ennemis *(c)*.



produits. Une seule injection suffit, le sujet est protégé une semaine après la piqûre, et la protection dure au moins 30 ans. Ce succès a permis de tester les principes et les méthodes de la biologie des systèmes. Une étude a été menée par Bali Pulendran et l'équipe de Rafi Ahmed de l'Université Emory à Atlanta, et mon équipe de l'Institut de biologie des systèmes à Seattle. Nous avons essayé d'établir un profil précis des changements moléculaires et cellulaires expliquant l'efficacité de ce vaccin. À partir de ce profil, nous avons essayé de déterminer pourquoi les vaccins contre le VIH ne déclenchent pas la réponse immunitaire nécessaire pour vaincre l'infection.

Nous avons commencé notre expérimentation en inoculant le vaccin YF-17D à 25 volontaires en bonne santé. Puis nous avons prélevé des échantillons de sang sur ces sujets à différents moments : lors de l'injection, puis 1, 3, 7 et 21 jours après. Chaque échantillon de sang a été placé dans un dispositif de criblage automatique pour identifier la nature des gènes activés (sur tous les constituants du sang). Les gènes ne produisent pas directement les protéines dont la cellule a besoin. Les séquences d'ADN sont d'abord transcrites en ARN messagers qui, à leur tour, sont utilisés pour l'élaboration des protéines. Ainsi, en examinant les concentrations d'ARN, nous déterminons quels gènes ont été activés ainsi que leur niveau d'expression.

Comme nous l'avions prévu, l'inoculation du vaccin YF-17D a tout d'abord activé le système immunitaire inné, le premier des deux systèmes de défense de l'organisme. Le système immunitaire inné contre-attaque immédiatement les agents pathogènes, les « ingère » et tue la plupart d'entre eux. Bien que le système inné, rapide, mais non spécifique, assure souvent seul la défense immédiate contre les menaces extérieures, il est secondé par un autre système de défense, le système immunitaire adaptatif, qui produit une réponse spécifique de l'agent pathogène en cause. Cette réponse est telle que les dommages sont limités, voire inexistants, si le sujet rencontre à nouveau le même agent infectieux *(voir l'encadré ci-dessus)*.

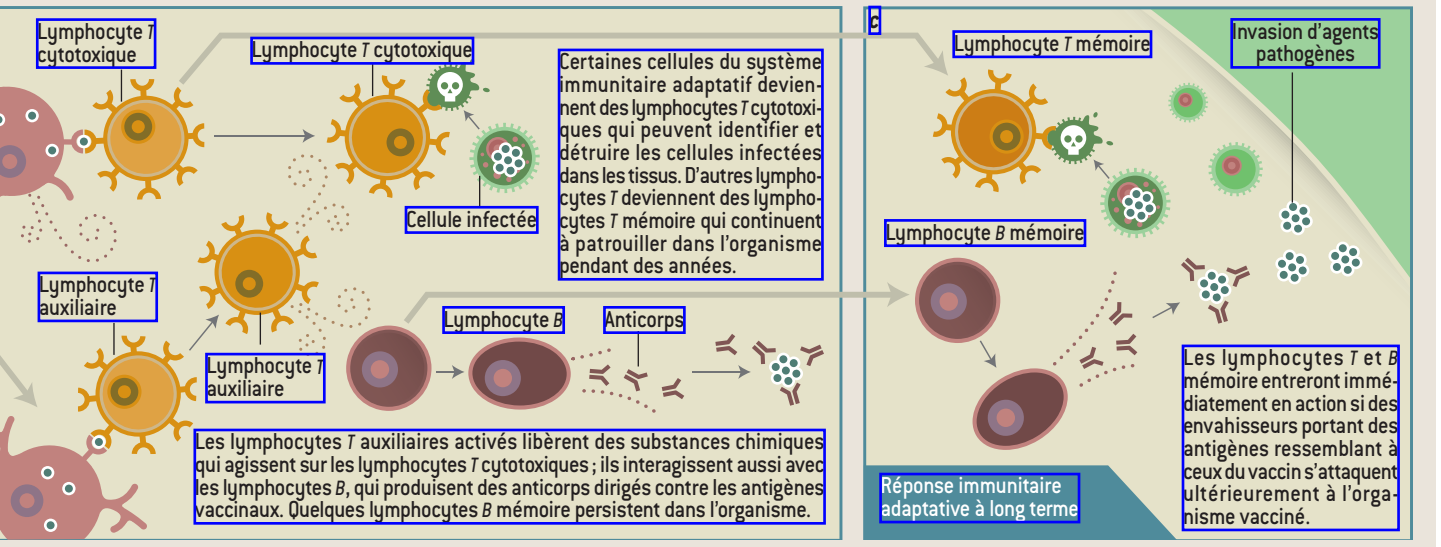
Environ dix jours après l'inoculation, les défenses innées des volontaires inoculés avec YF-17D ont stimulé leur système immunitaire adaptatif, provoquant une réponse en deux temps. Des anticorps (des protéines spécifiques de certaines parties du virus de la fièvre jaune) ont d'abord été produits, puis un autre groupe de cellules immunitaires, les lymphocytes *T* cytotoxiques, qui identifient et détruisent les cellules infectées, est apparu. Nous avons identifié 65 gènes jouant un rôle majeur dans la réponse de l'organisme au vaccin YF-17D. La séquence d'expression de ces gènes révèle une puissante activation des gènes codant les anticorps et des lymphocytes *T* cytotoxiques.

Ainsi, nous avions validé notre hypothèse : nous pouvions identifier, de façon très précise, quels gènes codant les différents acteurs du système immunitaire étaient ou non activés par le vaccin de la fièvre jaune. Indépendamment, Rafick-Pierre Sékaly, de l'Institut de vaccination et de thérapie génique de Floride, trouva des résultats similaires.

Le fait que l'on puisse « lire » dans le sang si les réactions immunitaires déclenchées à l'endroit de la vaccination sont efficaces permettrait de mettre au point un test diagnostique simple : en prélevant du sang par une simple piqûre au bout d'un doigt, on pourrait très vite savoir si un vaccin est efficace. Pour collecter et analyser de tels prélèvements, il ne serait pas nécessaire de faire appel à du personnel très qualifié ni à des équipements coûteux. C'est un point important quand on sait

NOUS POUVIONS IDENTIFIER, DE FAÇON TRÈS PRÉCISE, quels gènes codant les différents acteurs du système immunitaire étaient ou non activés par le vaccin.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



que le VIH, le paludisme et la tuberculose frappent surtout les régions les plus pauvres du monde.

Après avoir montré que la biologie des systèmes pouvait donner une image précise de l'effet produit par un vaccin sur le système immunitaire, nous nous sommes attaqués au problème que pose le VIH. Nous voulions comparer plusieurs formulations vaccinales, afin de voir si l'une d'elles déclencherait une réponse immunitaire « idéale ». À ceci près que nous ignorions – et que nous ignorons toujours – à quoi ressemble une réponse immunitaire idéale dans le cas du VIH. C'est aujourd'hui l'un de nos principaux objectifs. Nous avons commencé par rechercher des indices chez des animaux.

À la recherche du profil immunologique idéal

Certains singes peuvent être infectés par le virus de l'immunodéficience simienne (VIS) qui présente beaucoup de similitudes avec le VIH. Louis Picker, de la Faculté de médecine et de sciences de l'Oregon, Robert Seder, de l'Institut américain de la santé, et les biologistes de l'Institut *Seattle Biomed* testent aujourd'hui différents vaccins contenant des antigènes du VIS pour préciser le profil immunologique caractérisant une réponse efficace. Ainsi, nous avons identifié plusieurs caractéristiques de la réponse immunitaire innée qui permettent de prévoir quels vaccins limiteront le plus efficacement la quantité de virus dans le sang d'animaux exposés au VIS.

Les gènes en jeu, dont l'expression est liée à une meilleure capacité à combattre le virus, apparaissent comme les nœuds d'un réseau constitué de tous les acteurs de la réponse immunitaire ; chaque nœud représente un gène et les connexions entre eux indiquent l'influence qu'ils exercent les uns sur les autres. Puisque les singes et les hommes ont un grand nombre de gènes en commun, le profil de la réponse immunitaire idéale pour un singe pourrait nous renseigner sur celui de la réponse au VIH chez l'homme, et servir à évaluer différents vaccins.

L. Picker et R.-P. Sékaly explorent une piste voisine. Ils appliquent une approche biologique des systèmes afin de déterminer pourquoi les vaccins contenant des formes atténuées du VIS protègent efficacement les singes. Malheureusement, dans le cas du VIH, l'utilisation d'un virus affaibli est beaucoup trop dangereuse. Avec le temps, il pourrait se recombiner avec des formes actives du virus et rendre malades les personnes qu'il était censé protéger (c'est pour cette raison que la forme vivante atténuée du virus de la poliomyélite a été abandonnée dans de nombreux pays). Si cette approche est couronnée de succès, on saura comment déclencher une réponse immunitaire semblable à celle produite par un virus atténué sans prendre le risque de l'utiliser dans un vaccin.

L'AUTEUR

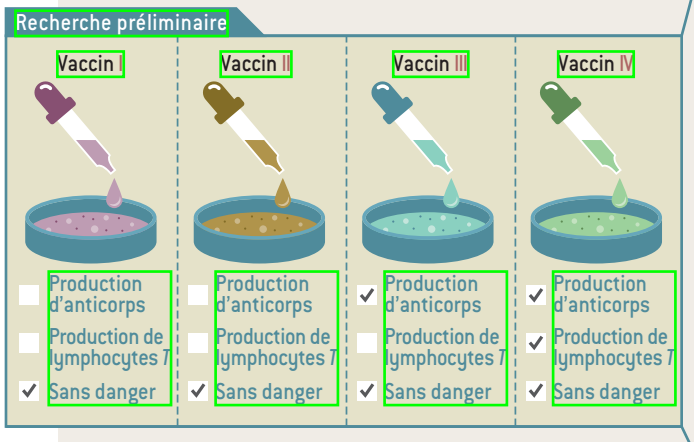


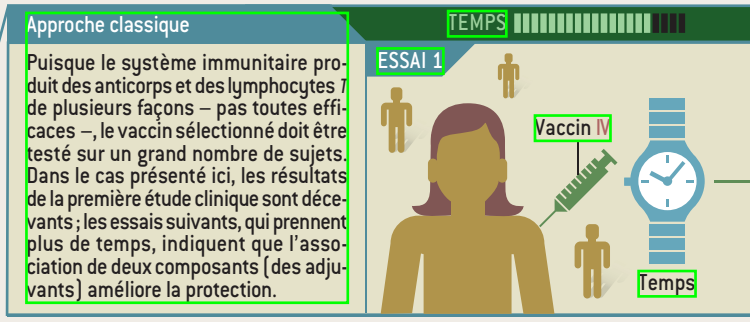
Alan ADEREM dirige l'Institut *Seattle BioMed*, spécialisé dans la mise au point de vaccins et localisé à Seattle, aux États-Unis.

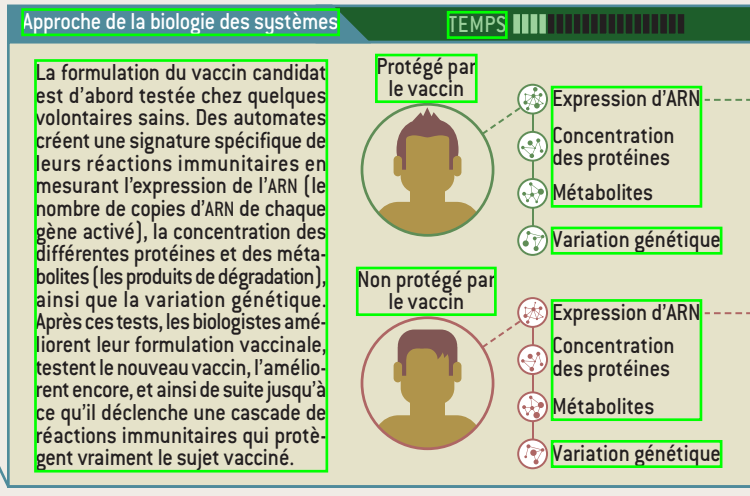
© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

UNE NOUVELLE FAÇON DE CONCEVOIR DES VACCINS

Quelle que soit leur approche dans la mise au point des vaccins, les biologistes commencent par tester différentes préparations simples. Dans l'exemple présenté ici, un seul des quatre mélanges déclenche les réactions recherchées : la production par l'organisme des anticorps et des lymphocytes *T*. Bien sûr, ces mélanges doivent être sans danger pour l'homme.







Les biologistes ont aujourd'hui confirmé qu'une approche « système » peut être utile pour la mise au point d'un vaccin. Nous avons obtenu la signature immunologique correspondant à un vaccin efficace (YF-17D) et des signatures immunologiques de singes vaccinés avec succès. Il reste cependant quelques inconnues à lever avant d'expérimenter un nouveau vaccin contre le VIH. Comment expliquer, par exemple, l'échec du vaccin des Laboratoires *Merck* en 2007, qui pourtant semblait prometteur ?

Le vaccin des Laboratoires *Merck* (nommé MRKAd5/HIV-1) n'est pas le premier à avoir été testé contre le VIH. Les essais cliniques précédents cherchaient à déclencher une production massive d'anticorps qui auraient éliminé les particules virales avant qu'elles ne colonisent l'organisme. Toutefois, deux des trois stratégies envisagées pour produire de tels vaccins ne pouvaient être appliquées. L'utilisation d'une version atténuée du VIH est trop dangereuse (en raison d'un risque de réactivation de la virulence) et celle de particules virales inactivées ne déclenche pas la production d'anticorps efficaces. Il reste à utiliser des fragments du VIH lui-même, seuls ou associés à d'autres virus (pour stimuler la réponse immunitaire). Hélas, ce type de vaccins n'a pas produit jusqu'à présent d'anticorps efficaces. Les résultats d'un essai vaccinal réalisé en Thaïlande, publiés en 2009, ont laissé entrevoir une production d'anticorps assez efficace, mais pas suffisamment pour protéger tous les sujets qui seraient vaccinés.

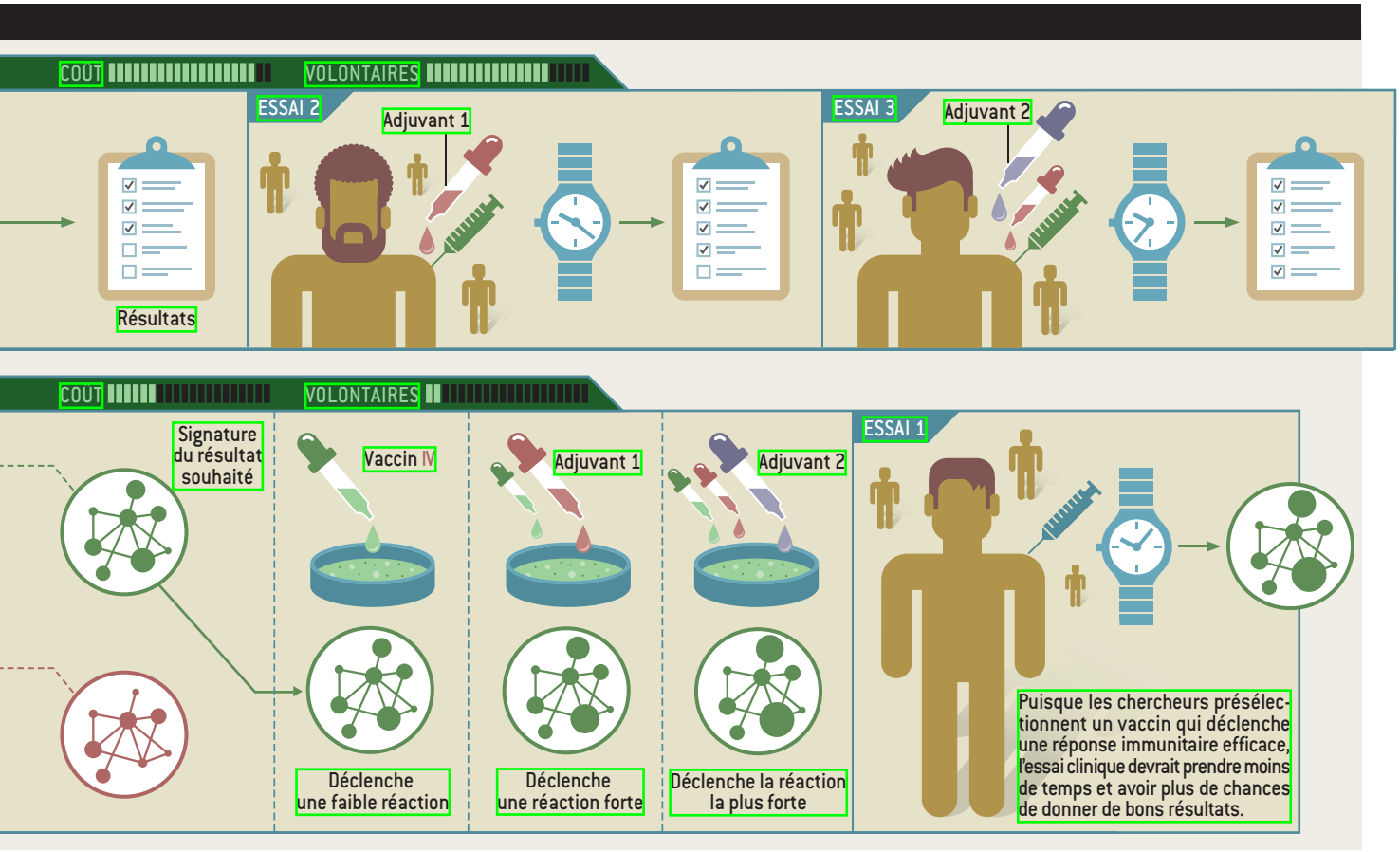
Les leçons d'un échec

Les Laboratoires *Merck* ont choisi une approche différente. Plutôt que de chercher à stimuler la production d'anticorps, ces biologistes se sont tournés vers l'autre fer de lance du système de protection : les lymphocytes *T* cytotoxiques. Le vaccin des Laboratoires *Merck* utilisait des antigènes spécifiques du VIH combinés à un virus anodin, un adénovirus de type 5 (les adénovirus sont responsables de la plupart des rhumes). Les immunologistes ont compris que même s'ils réussissaient à déclencher une réponse cytotoxique, cette dernière n'empêcherait pas le virus d'infecter des cellules. En revanche, le vaccin tuerait les cellules infectées, ce qui éviterait que l'infection s'emballe : en théorie, ce vaccin permettrait aux personnes contaminées par le VIH de contenir le virus indéfiniment.

Cette approche semblait très prometteuse. C'était le premier essai à grande échelle d'un vaccin spécifiquement conçu pour activer des lymphocytes *T* cytotoxiques afin de tuer des cellules infectées par le VIH. Pourtant, le vaccin ne protégeait pas les personnes vaccinées. Bien qu'il ait déclenché une réponse spécifique des lymphocytes *T* contre les cellules infectées par le VIH chez plus de 75 pour cent des sujets, les charges virales ne différaient pas entre les sujets vaccinés et ceux du groupe placebo. Plus surprenant encore, les sujets vaccinés ayant des anticorps anti-Ad5 (en raison d'une exposition préalable à un adénovirus de type 5) semblaient plus sensibles à l'infection que ceux du groupe placebo.

Pour analyser le vaccin des Laboratoires *Merck*, nous nous sommes associés à Julie

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



McElrath, du Centre de recherche sur le cancer Fred Hutchinson à Seattle. Nous avons découvert que le vaccin MRKAd5/HIV-1 activait des milliers de gènes pendant les 24 heures qui suivaient l'injection, ce qui confirmait une très forte activation des lymphocytes *T*. Nous avons aussi constaté que ces gènes concernaient les principaux acteurs du système immunitaire inné. Mais en examinant des échantillons de sang prélevés sur des sujets ayant des anticorps anti-Ad5 (appartenant au groupe qui présentait une susceptibilité accrue à l'infection par le VIH), nous avons constaté que leur système immunitaire inné était très affaibli.

Cette déficience imprévue a probablement favorisé l'infection des personnes vaccinées exposées ultérieurement au virus. Nous essayons de confirmer cette hypothèse et de comprendre pourquoi la puissante activation des lymphocytes *T* n'a procuré aucune protection.

L'approche de la biologie des systèmes semble plus adaptée pour tester les vaccins expérimentaux et évaluer leur protection. L'objectif est de concevoir des vaccins dont on sait par avance qu'ils déclencheront les réactions immunitaires souhaitées *(voir l'encadré ci-dessus)*. Les biologistes ont déjà accompli des progrès notables, par exemple en comprenant comment certains adjuvants stimulent le système immunitaire.

Prochaines étapes

Nous avons examiné les réseaux de gènes activés par un grand nombre d'adjuvants. Certains d'entre eux activent des gènes stimulant les lymphocytes *T*, tandis que d'autres favorisent la production d'anticorps. En combinant nos connaissances sur les adjuvants et la signature moléculaire d'une « réaction immunitaire idéale », nous pensons optimiser la conception de vaccins contre certains agents pathogènes.

Les agents pathogènes responsables des épidémies de sida, de paludisme et de tuberculose ont jusqu'à présent tenu en échec les vaccins classiques. En utilisant la nouvelle approche de la biologie des systèmes, nous espérons mieux comprendre les réactions du système immunitaire et concevoir des vaccins plus efficaces contre ces fléaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Querec *et al.*, **Systems biology approach predicts immunogenicity of the yellow fever vaccine in humans**, *Nature Immunology*, vol. 10, n° 1, pp. 116-125, 2009.

R.-P. Sékaly, **The failed HIV Merck vaccine study: a step back or a launching point for future vaccine development?**, *Journal of Experimental Medicine*, vol. 205, n° 1, pp. 7-12, 2008.

H. Saïdi *et al.*, **HMGB1-dependent triggering of HIV-1 replication and persistence in dendritic cells as a consequence of NK-DC cross-talk**, PLoS ONE, vol. 3(10),e3601, 2008.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Les robots font de la science

Ross King

Des machines peuvent-elles émettre des hypothèses, réaliser des expériences et évaluer les résultats, sans l'intervention de l'homme ? Des prototypes montrent que oui.

Peut-on automatiser la recherche scientifique ? Il ne s'agit pas d'automatiser les expériences – cela se fait déjà –, mais de construire une machine qui découvrirait de nouvelles connaissances scientifiques. Depuis dix ans, mon équipe et moi développons un tel robot scientifique.

Pourquoi construire un robot scientifique ? Nous avons deux motivations. La première est de mieux comprendre la science. Le physicien Richard Feynman remarquait que « ce que je ne sais pas créer, je ne le comprends pas ». Dans la même ligne philosophique, tenter de construire un robot scientifique nous oblige à prendre des décisions concrètes reliant des objets abstraits et physiques, des phénomènes observés et théoriques, ainsi que nos différentes façons de poser des hypothèses.

Notre seconde motivation est technologique. Les robots scientifiques pourraient rendre la recherche plus productive et rentable. Certains problèmes scientifiques sont si complexes qu'ils nécessitent une importante quantité de travail : il n'y a pas assez de chercheurs pour tout faire. L'automatisation pourrait résoudre ce problème.

En science, l'informatique a connu d'importants progrès, par exemple l'automatisation des laboratoires à « haut débit » pour le séquençage de l'ADN et la recherche de nouveaux médicaments (avec les techniques dites de criblage). Les ordinateurs effectuent même des opérations moins évidentes : ils analysent aussi des données et commencent à produire des hypothèses scientifiques. En chimie par exemple, les programmes d'apprentissage automatique aident à la conception de nouvelles molécules. L'intérêt d'un robot scientifique serait de combiner ces techniques pour automatiser l'ensemble de la démarche scientifique : formuler des hypothèses, concevoir et réaliser des expériences pour tester ces hypothèses, interpréter les résultats et recommencer le cycle jusqu'à ce que de nouvelles connaissances soient trouvées.

Sommes-nous capables de mettre au point un robot scientifique qui puisse vraiment accomplir cette démarche ? Les caractéristiques de deux robots que nous avons conçus, et de quelques autres dans le monde, suggèrent que oui.

Un robot scientifique nommé Adam

C'est dans les années 1960 et 1970 que des chercheurs de l'Université Stanford, aux États-Unis, ont pour la première fois tenté d'appliquer l'intelligence artificielle à la découverte scientifique. Ils ont conçu un programme informatique nommé DENDRAL pour analyser les données de spectrométrie de masse, et le programme apparenté, Meta-DENDRAL, a été l'un des premiers systèmes d'apprentissage automatique. Les scientifiques voulaient créer des instruments capables de chercher des signes de vie sur Mars dans le cadre de la mission *Viking* de la NASA en 1975. Mais la tâche était trop importante pour la technologie de l'époque.

Depuis, des programmes tels que *Prospector* (pour la géologie), *Bacon* (pour l'exploration de terrains) et des successeurs plus récents ont automatisé certaines tâches proposant des hypothèses et des expériences à mettre en œuvre. Toutefois, la plupart de ces automates ne réalisent pas eux-mêmes les expériences. C'est pourtant une composante nécessaire si l'on veut que les systèmes à intelligence artificielle fonctionnent même de façon semi-indépendante.

Notre robot, Adam, n'est pas un humanoïde ; c'est un laboratoire automatisé qui remplit un petit bureau *(voir l'encadré page 71)*. L'équipement comprend notamment un congélateur, trois robots pour manipuler les liquides, trois incubateurs, une centrifugeuse, et chaque composant est automatique. Adam a aussi un « cerveau » réalisant des calculs : c'est un ordinateur qui fait des raisonnements, contrôle les ordinateurs individuels actionnant le matériel, et compare les résultats des expériences à ceux prédits selon chaque hypothèse.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Adam réalise des expériences sur les mécanismes de croissance des microbes ; il sélectionne des souches microbiennes et des milieux de culture (des liquides nécessaires à leur développement), puis observe comment les souches se multiplient dans le milieu sur plusieurs jours. Le robot peut tester seul environ 1 000 combinaisons de souches et de milieux par jour. Nous avons conçu Adam afin qu'il étudie un domaine important de la biologie : la génomique fonctionnelle, à savoir les relations entre les gènes et leurs fonctions.

La première étude concernait la levure *Saccharomyces cerevisiae*, un micro-organisme constitué d'une seule cellule et utilisé pour faire du pain ou de la bière par exemple. Les biologistes s'intéressent surtout à cette levure en tant que « modèle » pour comprendre comment fonctionnent les cellules humaines. Les levures ont beaucoup moins de gènes que les cellules humaines et se multiplient rapidement et facilement. Bien que le dernier ancêtre commun des hommes et des levures ait vécu il y a environ un milliard d'années, l'évolution conserve de nombreux caractères, de sorte que l'on peut considérer que ce qui est vrai pour une levure l'est aussi pour une cellule humaine.

Adam a étudié les enzymes, des protéines qui catalysent, c'est-à-dire favorisent et accélèrent, des réactions biochimiques particulières : comment la levure les utilise-t-elle pour se multiplier et produire des déchets à partir de son milieu de culture ? Bien que les scientifiques étudient ces mécanismes depuis plus de 150 ans, ils n'en comprennent pas tous les détails. Ils connaissent de nombreuses enzymes produites par la levure, mais dans certains cas, ils ignorent les gènes qui les codent. Adam a pour objectif de découvrir ces gènes.

Pour faire des découvertes, Adam doit disposer d'importantes connaissances scientifiques. Nous avons programmé Adam avec un bagage approfondi de données sur le métabolisme et la génomique fonctionnelle des levures. Certains disent qu'Adam détient des informations plutôt qu'il n'a des « connaissances ». Le débat philosophique est ouvert. Mais nous pensons que le terme de connaissances est justifié, parce qu'Adam les utilise pour raisonner et guider ses interactions avec l'environnement.

La logique permet à Adam de représenter ses connaissances. Elle a été inventée il y a 2 400 ans pour décrire la connaissance avec plus de précisions que ne le permet le langage. La logique est la façon la plus juste de représenter les données scientifiques et d'en échanger entre robots et êtres humains. De façon pratique, en intelligence artificielle, la logique peut aussi être un langage de programmation, ce qui permet aux connaissances d'Adam d'être interprétées comme un logiciel informatique.

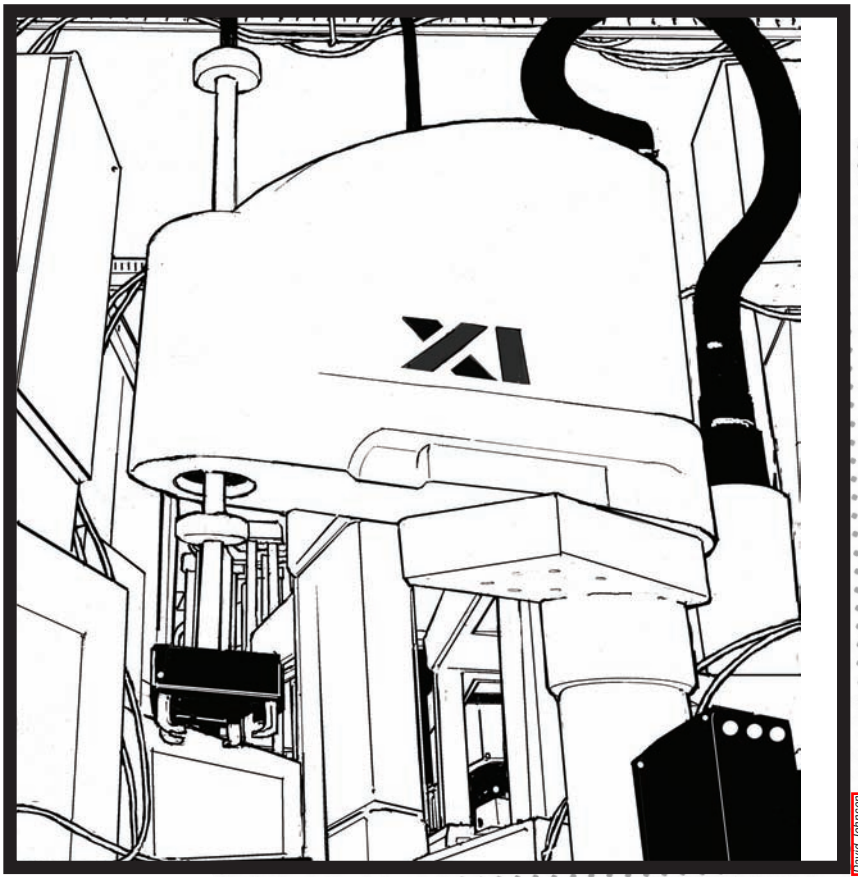
Lui fournir des connaissances

Pour lancer les recherches d'Adam, nous l'avons programmé avec de nombreuses données. Par exemple, chez *S. cerevisiae*, le gène *ARO3* code une enzyme nommée 3-deoxy-D-arabino-heptulosonate-7-phosphate (DAHP) synthase. Nous avons également fourni à Adam des données liées, par exemple que cette enzyme catalyse une réaction chimique transformant les composés phosphoénolpyruvate et D-érythrose 4-phosphate en 2-dehydro-3-deoxy-D-arabino-heptonate 7-phosphate et phosphate.

Ces faits forment un modèle du métabolisme de la levure, qui comprend des connaissances sur les gènes, les enzymes et les métabolites (de petites molécules

L'ESSENTIEL

- ✔ **La conception et la réalisation de certaines expériences scientifiques exigent beaucoup de travail humain.**
- ✔ **Un robot prototype, nommé Adam, émet des hypothèses sur les gènes de levure et leurs fonctions, conçoit des expériences et les réalise.**
- ✔ **Avec l'intelligence artificielle et l'équipement robotique, Adam a découvert trois gènes particuliers de levure.**
- ✔ **L'intervention de l'homme est nécessaire au fonctionnement d'Adam, mais, ensemble, les hommes et les machines obtiendraient davantage de résultats.**



David Parkins

produites par le métabolisme). À l'inverse d'une encyclopédie, ce modèle est converti en un logiciel qui peut agir sur les données pour faire des prédictions. Un robot scientifique peut alors combiner des modèles scientifiques abstraits avec la robotique de laboratoire pour tester et améliorer automatiquement les modèles.

Quand les chercheurs travaillent, ils formulent des hypothèses, puis les testent expérimentalement. De même, Adam émet des hypothèses nouvelles concernant la biologie de la levure, puis il en déduit les conséquences avec son modèle de métabolisme. Il réalise ensuite des expériences pour voir si les hypothèses concordent avec les observations.

D'abord, Adam a prédit quels gènes pouvaient coder les enzymes. La formulation de telles hypothèses met en jeu différentes capacités de raisonnement *(voir l'encadré page 72)*. Pour ne retenir que les hypothèses les plus vraisemblables, Adam a utilisé ses connaissances. Par exemple, il connaissait une enzyme, la 2-aminoadipate transaminase, dont on ignorait le gène. Cette enzyme catalyse la réaction du 2-oxoadipate avec le L-glutamate pour donner le L-2-aminoadipate et le 2-oxoglutarate (la réaction inverse peut aussi avoir lieu). Ce composé participe à la multiplication des levures ; cette réaction est importante, car elle est une cible potentielle des médicaments antifongiques.

Poser des hypothèses

Pour formuler une hypothèse, à savoir quel gène de la levure pourrait coder cette enzyme, Adam a interrogé sa base de données pour trouver des gènes d'autres organismes qui codent cette enzyme. Ainsi, chez *Rattus norvegicus* (le rat brun ou rat d'égout), un gène nommé *Aadat* code l'enzyme.

Adam a examiné la séquence d'acides aminés de l'enzyme codée par le gène *Aadat* et a cherché une séquence similaire codée par le génome de la levure. Adam sait que si des séquences d'acides aminés se ressemblent, il est raisonnable d'en déduire qu'elles sont « homologues », c'est-à-dire qu'elles partagent un ancêtre commun. Adam sait aussi que si des séquences sont homologues, alors la fonction de leur ancêtre commun a pu être conservée. Par conséquent, à partir de séquences d'acides aminés similaires, Adam peut conclure que les gènes correspondants peuvent avoir la même fonction. Adam a trouvé trois gènes de levure ayant des séquences semblables à celle d'*Aadat* : *YER152c*, *YJL060w* et *YJL202w*. Il a supposé que chaque gène code l'enzyme 2-aminoadipate transaminase.

Pour tester ses hypothèses, Adam a utilisé les souches de levure de sa collection, conservées dans son congélateur, où chaque souche a un gène qui lui a été retiré. Le robot a examiné dans des conditions particulières la croissance de trois souches de levure, auxquelles il manquait respectivement les gènes *YER152c*, *YJL060w* et *YJL202w* ; il les a fait pousser avec des substances chimiques qui participent à la réaction catalysée par l'enzyme.

LE PROCESSUS PERMETTANT À ADAM de faire des hypothèses et de confirmer expérimentalement les connaissances nouvelles ne nécessite pas d'intervention humaine.

L'étape suivante serait de faire de multiples expériences avec chaque souche. Les financements de la recherche sont toujours limités, et les scientifiques font souvent la course pour être les premiers à résoudre un problème. Nous avons donc configuré Adam de façon à ce qu'il mette au point des expériences efficaces testant les hypothèses rapidement et à moindre coût. Ainsi, Adam suppose que chaque hypothèse a une certaine probabilité d'être vraie.

Cette supposition est controversée, et certains philosophes, tel l'Autrichien Karl Popper, ont rejeté l'idée que des hypothèses puissent avoir des probabilités associées. Toutefois, la plupart des chercheurs supposent tacitement que certaines hypothèses ont plus de chances d'être vérifiées que d'autres. Par exemple, ils se rangent souvent derrière l'idée du « rasoir d'Occam » : toutes choses égales par ailleurs, une hypothèse simple est plus probable qu'une hypothèse plus complexe. Adam prend également en compte le coût des expériences, que nous définissons comme le prix des produits chimiques utilisés. Une approche plus exacte considérerait aussi le « coût » du temps nécessaire.

Étant donné un ensemble d'hypothèses associées à des probabilités et un ensemble d'expériences ayant un coût, le but que nous avons fixé à Adam est de choisir une série d'expériences qui minimise le coût et élimine toutes les hypothèses excepté une. Suivre cette approche de façon optimale est difficile à programmer, mais nos analyses ont montré que le choix réalisé par Adam sélectionne des expériences qui résolvent les problèmes plus rapidement et pour un meilleur coût que les autres choix possibles ; par exemple, il met en œuvre l'expérience la moins chère. Dans certains cas, Adam peut concevoir une seule expérience qui vérifie de nombreuses hypothèses. Les êtres humains ont du mal à en faire autant : ils ne considèrent en général qu'une hypothèse à la fois.

Quand le système d'intelligence artificielle d'Adam a déterminé les expériences les plus prometteuses, il utilise ses équipements robotiques pour les réaliser et observer les résultats. Adam n'est pas capable de voir directement les gènes ou les enzymes ; il mesure quelle quantité de lumière traverse les cultures de levure. Avec ces données, Adam met en œuvre une chaîne de raisonnements compliquée qui lui permet de savoir si oui ou non les indices s'accordent avec les hypothèses sur les gènes et les enzymes. Ces chaînes de raisonnement existent souvent en science ; par exemple, les astronomes déduisent ce qui se passe dans des galaxies lointaines à partir du rayonnement qu'ils observent avec leurs instruments.

Faire des découvertes

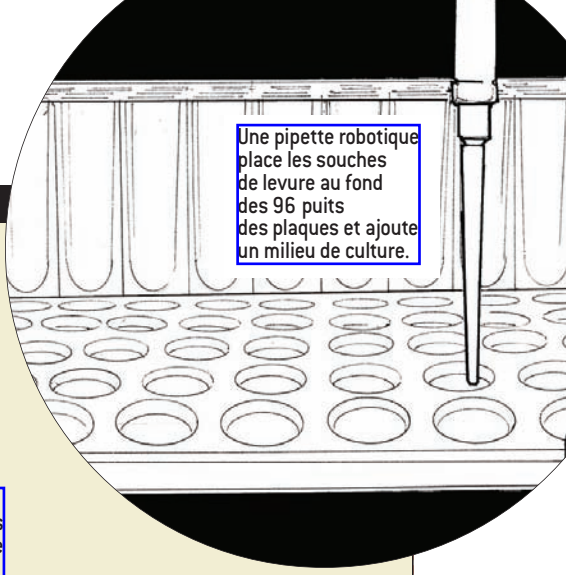
Adam a produit et confirmé expérimentalement 20 hypothèses suggérant quels gènes codent des enzymes de la levure. Comme toute découverte scientifique, celles d'Adam devaient être confirmées. Nous avons donc vérifié les conclusions d'Adam avec d'autres sources d'information qui ne lui étaient pas accessibles et de nouvelles expériences que nous avons réalisées nous-mêmes. Sept des conclusions d'Adam étaient connues, une semblait fausse, et 12 constituaient des nouveautés scientifiques.

En vérifiant ces résultats, nous avons confirmé que trois gènes (*YER152c*, *YJL060w* et *YJL202w*) codent l'enzyme 2-aminoadipate transaminase. Pourquoi nul n'avait découvert la fonction de ces gènes auparavant ? Parce que ces trois gènes codent la même enzyme, et celle-ci peut catalyser différentes réactions ; nous n'avions pas affaire à une simple correspondance entre un gène et une fonction enzymatique (le scénario classique). Les expériences et

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

UN ROBOT QUI FAIT DE LA BIOLOGIE

Adam est un robot scientifique créé à l'Université d'Aberystwyth, au pays de Galles. Il étudie les gènes et leurs fonctions. Récemment, son système d'intelligence artificielle a formulé 20 nouvelles hypothèses portant sur les gènes de la levure susceptibles de coder des enzymes indispensables à sa multiplication. Puis Adam a réalisé des milliers d'expériences pour déterminer quelles hypothèses étaient justes ou fausses. Voici comment il a procédé.



Une pipette robotique place les souches de levure au fond des 96 puits des plaques et ajoute un milieu de culture.

1 Préparation des échantillons

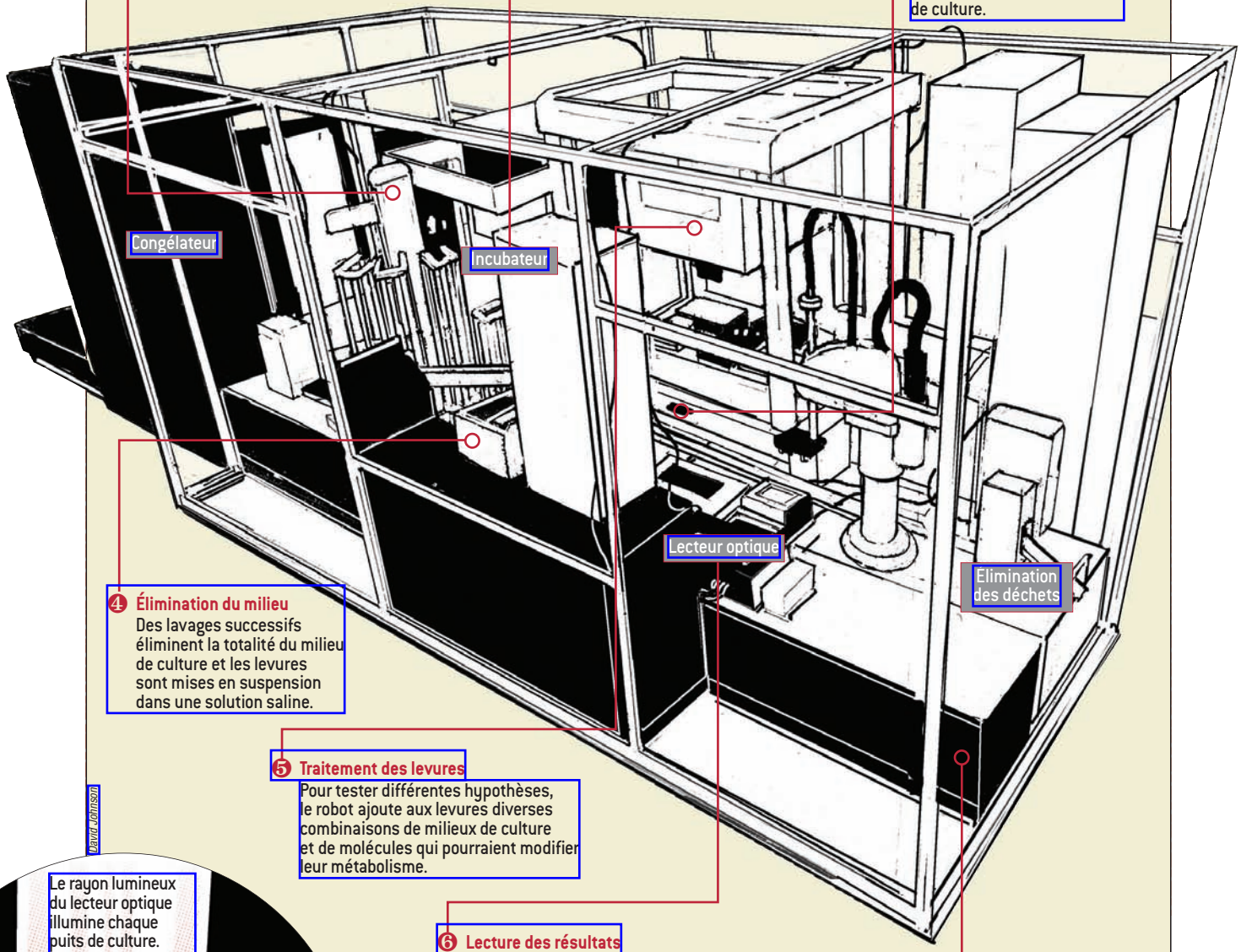
Les bras du robot récupèrent des souches de levure congelées et les placent dans différents puits de plaques de culture qui contiennent un liquide nécessaire à leur développement – un milieu de culture *(voir le cartouche en haut)*.

2 Croissance des levures

L'incubateur chauffe les plaques pendant 24 heures. Toutes les 40 minutes, un bras du robot installe chaque plaque de culture dans un lecteur optique qui contrôle la multiplication des levures *(voir le cartouche en bas)*.

3 Séparation des cellules

Une centrifugeuse fait tourner chaque plaque pour séparer la levure de son milieu de culture.



4 Élimination du milieu

Des lavages successifs éliminent la totalité du milieu de culture et les levures sont mises en suspension dans une solution saline.

5 Traitement des levures

Pour tester différentes hypothèses, le robot ajoute aux levures diverses combinaisons de milieux de culture et de molécules qui pourraient modifier leur métabolisme.

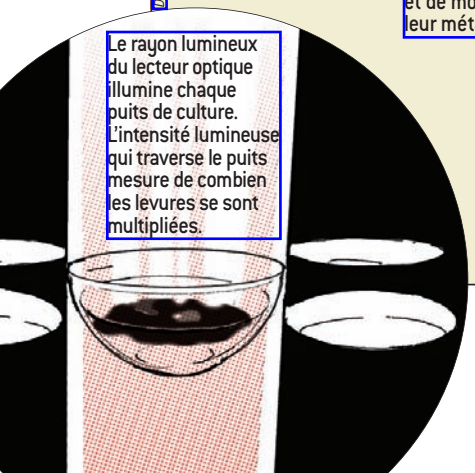
6 Lecture des résultats

Les plaques restent dans l'incubateur plusieurs jours. Toutes les 20 minutes, un bras robotisé place les plaques dans le lecteur optique qui envoie les données de croissance des levures à un ordinateur.

7 Analyse des données

Les logiciels d'Adam analysent les résultats, ce qui peut prendre plusieurs heures.

David Johnson



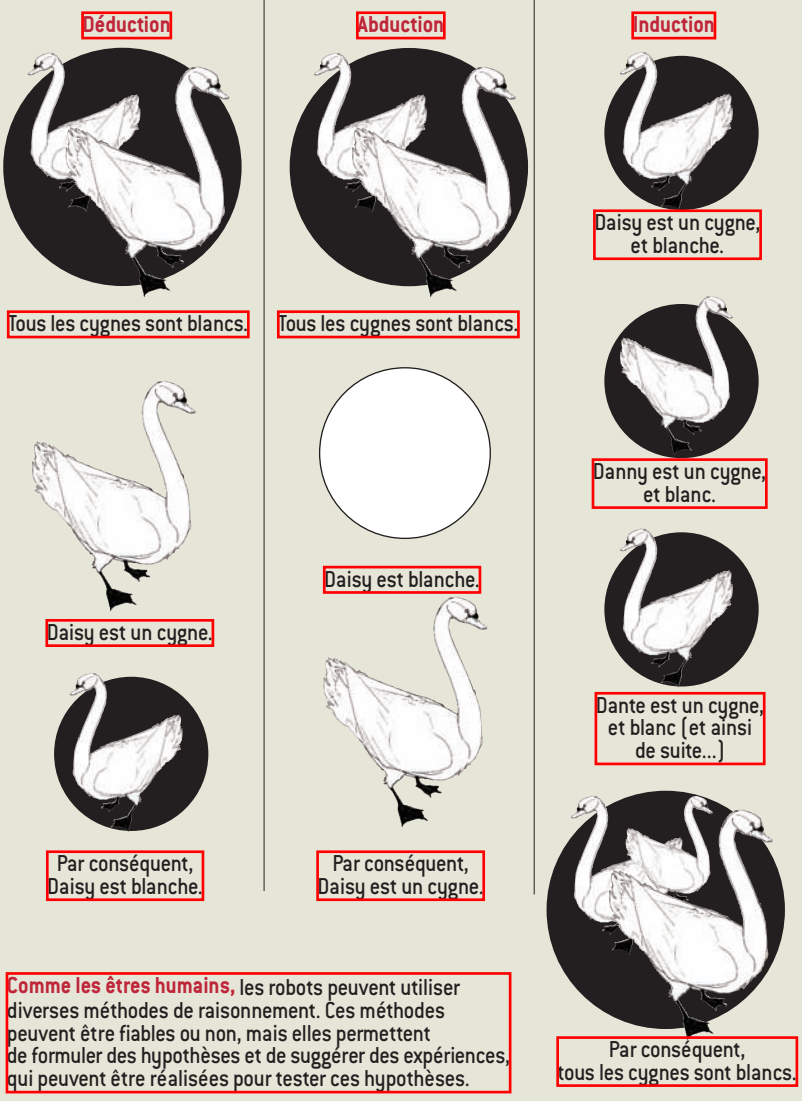
Le rayon lumineux du lecteur optique illumine chaque puits de culture. L'intensité lumineuse qui traverse le puits mesure de combien les levures se sont multipliées.

COMMENT LES ROBOTS RAISONNENT

Un robot scientifique utilise les mêmes alternatives que les hommes pour raisonner. L'une d'elles est la déduction logique (ou l'inférence déductive), qui représente le fondement des mathématiques et de l'informatique. La déduction logique est « fiable ». En d'autres termes, si vous avez pour point de départ une proposition vraie, vous ne pouvez déduire que de nouvelles vérités. Mais en l'absence d'une « théorie du tout », la déduction est insuffisante en science, parce qu'elle ne fournit que les conséquences de ce qui est déjà connu.

La deuxième alternative, l'abduction, n'est pas fiable, comme le montre l'exemple du cygne ci-dessous : de nombreuses choses sont blanches sans être des cygnes. Cependant, l'abduction permet de produire des hypothèses qui ont une chance d'être vraies. En science, la vérité ne se décide pas par pure déduction à partir de suppositions, mais par l'expérimentation sur le monde réel. Si Adam émet l'hypothèse que Daisy est un cygne, le seul moyen pour Adam de vérifier si cette proposition est vraie consiste à attraper Daisy et à déterminer si c'est un cygne, un canard ou autre chose.

L'induction, comme l'abduction, permet d'avancer des hypothèses nouvelles. Si tous les cygnes que nous voyons sont blancs, il est naturel d'en déduire, comme l'a fait Aristote, que tous les cygnes sont blancs. Mais l'induction n'est pas fiable, et l'induction de Aristote a été réfutée par la découverte de cygnes noirs en Australie. Nous utilisons tous les jours l'induction. Elle nous rassure sur le fait que le Soleil se lèvera demain et que notre petit déjeuner ne nous empoisonnera pas. Mais le rôle de l'induction en science est controversé, parce que la principale justification de l'induction est qu'en général elle fonctionne, ce qui est, en soi, une induction.



Comme les êtres humains, les robots peuvent utiliser diverses méthodes de raisonnement. Ces méthodes peuvent être fiables ou non, mais elles permettent de formuler des hypothèses et de suggérer des expériences, qui peuvent être réalisées pour tester ces hypothèses.

David Johnson

l'analyse statistique d'Adam étaient nécessaires pour résoudre ce problème.

Certaines personnes contestent l'utilisation du terme *robot scientifique* en faisant remarquer, ce qui se défend, qu'Adam ressemble davantage à un assistant qu'à un scientifique. Est-il alors légitime de prétendre qu'Adam a découvert de façon autonome des connaissances scientifiques nouvelles ?

Le robot est-il un scientifique ?

Commençons par le terme *autonome*. Nous ne nous contentons pas seulement d'installer et de régler Adam, puis de revenir quelques semaines plus tard pour voir ses conclusions. Adam est un prototype : son matériel et ses logiciels ont souvent des défaillances, ce qui nécessite l'intervention d'un technicien. Nous devons aussi améliorer ses logiciels. Cependant, le processus permettant à Adam d'émettre des hypothèses et de confirmer expérimentalement les connaissances nouvelles ne nécessite pas d'intervention humaine.

Le terme *a découvert* soulève une discussion datant du milieu du XIX^{e} siècle, avec lady Ada Lovelace. Fille du poète anglais lord Byron, elle était la collaboratrice de Charles Babbage, la première personne à concevoir une véritable machine à calculer. Certains la considèrent comme la première programmeuse. L'argument de lady Lovelace était le suivant : « La machine analytique n'a nullement la prétention de *créer* quelque chose par elle-même. Elle peut *faire tout ce que nous saurons lui ordonner* d'exécuter. » Cent ans plus tard, l'informaticien Alan Turing a proposé un contre-argument sous forme d'analogie avec les enfants. De même que les professeurs ne se voient pas attribuer (tout) le mérite des découvertes de leurs élèves, il serait injuste que les hommes revendiquent tout le mérite des idées de leurs machines. Ces arguments ont une importance commerciale croissante ; par exemple, aux États-Unis, la loi des brevets stipule que seule une « personne » peut « inventer » quelque chose.

Enfin, dans quelle mesure peut-on dire qu'Adam découvre des *connaissances scientifiques nouvelles* ? Certaines des correspondances entre gènes et fonctions enzymatiques de *S. cerevisiae*, dont Adam a fait l'hypothèse et qu'il a expérimentalement vérifiées, sont nouvelles. Bien que ces connaissances soient modestes, elles ne sont

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

pas triviales. Dans le cas de l'enzyme 2-aminoadipate transaminase, Adam a trouvé trois gènes distincts qui pourraient résoudre une énigme vieille de 50 ans. Une partie des conclusions d'Adam pourrait être fausse, toute connaissance scientifique étant provisoire. Cependant, il est peu probable que toutes ses conclusions soient fausses. Cela fait maintenant deux ans que les résultats d'Adam sont dans le domaine public, et personne n'a signalé d'erreur. À ma connaissance, les scientifiques d'autres groupes n'ont pas encore essayé de reproduire les résultats d'Adam.

Adam, puis Ève

Une autre façon d'évaluer si Adam est un scientifique est de voir si l'approche d'Adam pour produire des hypothèses nouvelles est généralisable. Une fois les expériences d'Adam lancées, nous avons développé un deuxième robot. Ève applique les mêmes cycles automatisés de recherche au criblage et à la conception de nouvelles molécules biologiquement actives, une activité médicale et commerciale importante. Les leçons que nous avons tirées de la conception d'Adam font d'Ève un système plus élégant. Les recherches d'Ève concernent le paludisme, la schistosomiase (la deuxième maladie parasitaire après le paludisme dans le monde), la maladie du sommeil et la maladie de Chagas. Nous n'avons pas terminé la mise au point des logiciels d'Ève, mais le robot a déjà trouvé des composés intéressants pour la lutte contre le paludisme.

D'autres scientifiques développent des robots semblables. Hod Lipson, de l'Université Cornell aux États-Unis, tente d'améliorer la conception de la robotique mobile et de comprendre les systèmes dynamiques. Et certains chercheurs essaient de créer des robots scientifiques dans les domaines de la chimie, de la biologie et de l'ingénierie.

En outre, plusieurs équipes, dont la mienne, veulent automatiser la recherche en physique quantique, en particulier le contrôle des processus quantiques. Par exemple, Herschel Rabitz, de l'Université de Princeton, cherche à utiliser des lasers femtoseconde (10^{-15} seconde) pour créer ou briser des liaisons chimiques.

Si nous acceptons que les robots puissent être des scientifiques, nous aimerions

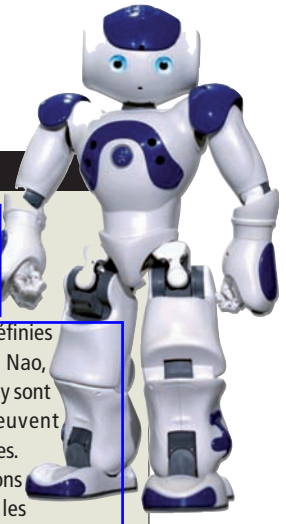
L'AUTEUR



Ross KING est professeur d'informatique à l'Université d'Aberystwyth, au pays de Galles, au Royaume-Uni.



NAO, UN ROBOT APPRENTI



Outre ces robots machines dont traite Ross King, d'autres robots sont conçus pour assister des personnes dans leur vie quotidienne, qu'elles soient scientifiques ou non. Chaque année, les derniers fleurons de la robotique s'exposent et s'affrontent dans des compétitions internationales. Notre robot Nao a obtenu le quatrième prix à la compétition libre du championnat *Robocup@Home* tenu à Istanbul le 11 juillet 2011. Contrairement à d'autres robots, notre petit humanoïde est capable d'apprendre de nouvelles activités coopératives en temps réel, par exemple aider une personne à ranger des objets, grâce à un système cognitif artificiel inspiré de celui de l'homme.

Une voie aujourd'hui en plein essor dans le domaine de la robotique est le développement des capacités d'apprentissage des robots. Jusqu'alors, la plupart des robots domestiques réalisaient des tâches préprogrammées dans leurs logiciels et leurs réseaux de neurones, mais n'étaient pas capables d'effectuer une nouvelle activité : ils ne savaient simplement pas apprendre à coopérer pour améliorer leur comportement.

C'était le cas du robot Nao, un humanoïde autonome interagissant avec l'homme, développé par la Société française *Aldebaran Robotics* depuis 2005. Nao dispose de nombreux capteurs (optique et auditif par exemple), de sorte qu'il reconnaît des voix et des visages, et réalise des tâches – préprogrammées – quand un homme le lui demande.

En collaboration avec les concepteurs de Nao, nous l'avons équipé d'un système cognitif artificiel reproduisant certaines capacités d'apprentissage du cerveau humain.

Le système nerveux humain analyse et ordonne de nouvelles informations, soit en écoutant, soit en observant une démonstration, et les apprend vite. Les neurobiologistes ont reproduit ces facultés en donnant au robot la capacité d'apprendre : Nao peut observer une séquence d'actions réalisées par l'homme et analyser la façon dont elles sont coordonnées dans le temps. Si le robot ne connaît pas une action, il la mémorise par interaction directe avec son interlocuteur. Il devient autonome et reproduit la tâche apprise, voire l'adapte selon une nouvelle exigence. Par exemple, il peut apprendre à ouvrir et fermer une boîte, en coordination avec une personne qui range un objet dans la boîte ; et si on le change de pièce, il sait toujours effectuer le rangement dans le nouvel environnement.

Pour ce faire, nous avons intégré à Nao plusieurs systèmes : un système de compréhension du discours ; un système d'apprentissage des tâches coordonnées entre deux personnes, dont ne disposait aucun autre robot et qui permet de suivre une série d'actions en l'observant ou en l'écoutant ; et un système qui met en mémoire les nouvelles informations.

Sans être prédéfinies dans les circuits de Nao, les nouvelles tâches y sont mémorisées et peuvent donc être reproduites.

Nous poursuivons nos recherches sur les fondements neurologiques de la compréhension et du sens. Nous espérons construire des systèmes cognitifs artificiels encore plus proches du cerveau humain.

Ces robots interactifs seraient-ils des scientifiques ? Nous pourrions en effet apprendre à Nao à réaliser une expérience de neuropsychologie, comme le fait un chercheur, pour répondre à une hypothèse qu'il aurait formulée.

Peter Dominey et Stéphane Lallee
Institut cellule souche et cerveau, CNRS, Bron

connaître leurs limites. Pour cela, comparons l'automatisation de la science à celle du jeu d'échecs. L'automatisation des échecs est un problème résolu. Les ordinateurs jouent aux échecs aussi bien, voire mieux, que les meilleurs joueurs humains. Une telle maîtrise des échecs par les ordinateurs est possible parce que le monde des échecs est abstrait et clos : 64 cases, 32 pièces. Les sciences partagent la nature abstraite des échecs, mais l'automatisation des sciences sera plus compliquée, car l'expérimentation se fait dans le monde réel. Je pense néanmoins qu'il sera plus facile de développer des robots scientifiques capables de faire des sciences que des systèmes d'intelligence artificielle qui interagissent socialement avec les êtres humains *(voir l'encadré ci-dessus)*. En science, nous pouvons penser que le monde réel n'essaie pas de nous tromper, ce qui n'est pas vrai en société.

Aujourd'hui, les maîtres des échecs améliorent leur jeu en utilisant les ordinateurs pour analyser les positions et préparer les attaques. De même, en travaillant de concert, les hommes et les robots scientifiques devraient arriver à des résultats supérieurs à ce que les uns ou les autres pourraient obtenir séparément. Les progrès de l'informatique et des systèmes d'intelligence artificielle produiront des robots scientifiques encore plus intelligents. Ces créations seront-elles un jour capables de faire des découvertes remettant en question les paradigmes, ou se limiteront-elles à des investigations scientifiques de routine ? Voilà une question clé de la science de demain.

Les hommes et les robots travaillent ensemble

Certains scientifiques, tel le lauréat du prix Nobel de physique Philip Anderson, pensent que la science qui change les paradigmes se fait à un niveau si élevé qu'elle pourrait ne pas être accessible à l'automatisation. Mais un autre Nobel de physique, Frank Wilczek, a écrit que, dans 100 ans, le meilleur physicien sera une machine. L'avenir nous dira qui a raison.

Quoi qu'il en soit, j'entrevois un futur où des réseaux d'êtres humains et de robots scientifiques travailleront ensemble. La connaissance scientifique sera décrite en utilisant la logique et disséminée aussitôt *via* Internet. Les robots vont jouer un rôle de plus en plus important dans les progrès de la science. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. D. King *et al.*, **The automation of science**, *Science*, vol. 324, pp. 85-89, avril 2009.

R. Carnap, **An Introduction to the Philosophy of Science**, édité par Martin Gardner, Dover, 1995.

J. Lederberg, **How DENDRAL was conceived and born**, *ACM Symposium on the History of Medical Informatics, National Library of Medecine*, novembre 1987.

A. M. Turing, **Computing machinery and intelligence**, *Mind*, vol. LIX, pp. 433-460, octobre 1950.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

www.espgg.org

Expositions • Ateliers • Démonstrations • Conférences •
Pédibus des sciences • Librairie • Ciné débats •
Rencontres avec des chercheurs •
Café des sciences • Jeux …

Scolaires
Du mercredi 12 au
samedi 15 octobre
Réservations sur www.espgg.org

Public
Vendredi 14 et samedi 15 octobre 10h-19h
Dimanche 16 octobre 10h-17h



Entrée gratuite

Quartier des sciences

12 au 16 octobre 2011

ESPCI - 10 rue Vauquelin
Paris 5e

© ideaccom - 01 47 53 82 10 - Paris - 09/2011

ESPACE Paris-Grilles de Gennes
ESPCI ParisTech
PARIS SCIENCES & LETTRES PSL QUARTIER LATIN
cea
Inserm
INRIA
Cemagref
IFP Énergies nouvelles
INERIS
Paris Montagne
IRD
institut Curie
Sciences pour un monde en mouvement
SANOFI
Belin
Le Divan
EDF
SCIENCE
Année internationale de la CHIMIE 2011
SCIENCES SUR SEINE 2011
MAIRIE DE PARIS
îledeFrance
casden

Un fléau mondial : la contamination de l'eau par l'arsenic

Romain Millot, Laurent Charlet et David Polya

Dans plusieurs régions du monde, l'eau contient de l'arsenic. Cet élément y est naturellement présent, mais l'utilisation de puits profonds a fait augmenter sa concentration. Des solutions de dépollution sont à l'étude.

Dans les années 1980, le dermatologue indien Kshitish Saha, d'une école de médecine tropicale proche de Calcutta, est frappé par les symptômes de plusieurs des malades qu'il voit en consultation. Ils présentent des lésions cutanées et des taches noires sur les paumes des mains et les plantes des pieds. Pour lui, ces marques sont les premiers signes d'une intoxication à l'arsenic. Or ces malades sont pour la plupart originaires de l'État voisin du Bengale de l'Ouest, d'autres venant du Bangladesh. Suspectant l'eau d'en être responsable, il fait prélever et analyser l'eau des puits approvisionnant la population du Bangladesh. Effectivement, elle contient des traces d'arsenic.

Pourtant, toutes les analyses effectuées auparavant par les autorités indiquaient que l'eau était consommable… à ceci près que l'arsenic n'avait pas été dosé. Ce n'est qu'en 1993 que l'hypothèse d'une contamination de l'eau par l'arsenic fut confirmée par le gouvernement bangladeshi : l'eau des puits contenait de fortes concentrations d'arsenic. Ces puits avaient la particularité d'être tubés, prélevant l'eau à des profondeurs allant de 10 à 40 mètres. En effet, dans les années 1970 et 1980, le gouvernement bangladeshi avait mis en place avec l'UNICEF, la Banque mondiale et l'ONU un vaste programme de forage de puits pour capter les eaux souterraines. Une dizaine de millions de puits tubés ont ainsi été creusés pour approvisionner les villages du pays. Pourquoi creuser des puits si profonds ? Parce que les eaux de surface y étaient contaminées par de nombreux agents infectieux, responsables de diarrhées ou du choléra. En 40 ans, grâce en partie aux puits tubés, la mortalité infantile a été réduite de moitié. Mais personne n'avait imaginé la catastrophe qui se profilait : un empoisonnement collectif à l'arsenic.

En 2000, l'ensemble des puits tubés a été sondé, montrant qu'environ 30 pour cent d'entre eux fournissaient de l'eau contenant plus de 50 microgrammes d'arsenic par litre, et cinq à dix pour cent en contenaient six fois plus. Or l'Organisation mondiale de la santé – OMS – recommande une teneur maximale en arsenic dans l'eau de boisson de dix microgrammes par litre. Au Bangladesh, on estime à quelque 35 millions le nombre de personnes exposées à des concentrations supérieures à 50 microgrammes d'arsenic par litre, soit un quart de la population du Bangladesh *(voir la figure 1)*.

Des polluants naturels

La toxicité de l'arsenic dépend de sa forme chimique, et une trop longue exposition à des doses trop élevées provoque l'arsenicisme, une maladie chronique commençant à se manifester par des lésions cutanées et des extrémités rongées par la gangrène. Au bout de cinq à dix ans, les organes internes, tels le foie, les reins, la vessie et les poumons, sont atteints, et un cancer peut apparaître en une vingtaine d'années. Dans le Sud du Bangladesh, où les concentrations en arsenic de l'eau sont particulièrement élevées, on estime qu'un décès d'adulte sur dix serait dû à un cancer engendré par une exposition prolongée à l'arsenic.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



1. L'EAU CONSOMMÉE par les habitants des grandes plaines situées en contrebas de l'Himalaya contient beaucoup d'arsenic. Les techniques de forage utilisées ont encore augmenté cette concentration, rendant l'eau toxique.

Comme nous l'examinerons, l'intoxication par des eaux trop concentrées en polluants naturels toucherait des millions de personnes de par le monde. L'arsenic, le fluor, le sélénium, le manganèse ou encore l'antimoine sont des polluants d'origine géologique fréquents dans les eaux souterraines. Ces éléments polluants naturels, dits géogéniques, car issus des sols et non des activités humaines, causent de graves problèmes sanitaires, à l'instar de la crise frappant le Bangladesh depuis une trentaine d'années. Afin d'apporter des solutions aux populations menacées, les géologues étudient les causes d'une concentration si élevée en arsenic et autres polluants dans les eaux souterraines des pays concernés, et mettent au point des méthodes de purification qui, comme nous le verrons, doivent être efficaces, mais bon marché. Aujourd'hui, force est de constater que de telles solutions ne sont pas encore en application. Au Bangladesh, on estime que la majeure partie de la population utilise les eaux souterraines pour l'alimentation en eau potable, les autres continuant à utiliser l'eau de surface. L'eau issue des profondeurs est également utilisée pour l'irrigation des rizières durant la période sèche. Or l'arsenic se concentre dans le riz, l'élément principal de l'alimentation locale. Les populations ingèrent donc des quantités notables d'arsenic : de façon directe par l'eau, ou indirecte par la consommation de végétaux ayant concentré cet élément.

Pourquoi le Bangladesh ?

Or les doses ingérées se cumulent. On estime que la part provenant de la consommation d'eau représente entre 50 et 80 pour cent des apports en arsenic, le riz entre 10 et 40 pour cent, et l'eau de cuisson des aliments environ 10 pour cent supplémentaires.

Toutefois, la concentration globale de ces éléments ne reflète pas totalement le risque, la toxicité de l'arsenic et celle du sélénium dépendant de leur spéciation, c'est-à-dire de la forme chimique sous

L'ESSENTIEL

- ✔ **200 millions de personnes dans le monde consommeraient une eau trop chargée en polluants naturels.**
- ✔ **La mise en œuvre de puits profonds au Bangladesh a eu pour conséquence que la population consomme une eau trop riche en arsenic. Des lésions cutanées et des cancers sont apparus en grand nombre.**
- ✔ **Des méthodes de dépollution sont à l'étude, mais elles restent trop onéreuses pour être applicables dans les pays en développement.**

© Roger Hutchings/In Pictures/Corbis

laquelle ils se trouvent dans l'environnement *(voir l'encadré page 81)*. Par exemple, le riz accumule une grande partie de l'arsenic sous forme organique, beaucoup moins toxique que les formes inorganiques présentes dans l'eau. Selon la forme, la toxicité peut être aiguë ou chronique.

Pourquoi le Bangladesh semble-t-il être l'un des pays les plus touchés ? En raison de la géologie et de la topographie des fleuves et des rivières de la région. Le Bangladesh correspond au bassin sédimentaire de l'Himalaya et forme un large delta, où une cinquantaine de fleuves (dont le Gange et le Brahmapoutre) s'écoulent avant de se jeter dans le golfe du Bengale. Issu de la collision de l'Inde et de l'Asie, l'Himalaya est la chaîne de montagnes la plus importante au monde. Les fleuves prenant leur source dans l'Himalaya participent à l'érosion de la chaîne. Ces phénomènes d'érosion, actifs depuis environ 70 millions d'années, ont accumulé dans les plaines de grandes quantités de sédiments arrachés aux roches himalayennes : une couche sédimentaire épaisse de trois à quatre kilomètres forme le sous-sol du pays. Au cours de ce processus, l'arsenic s'est dissous dans l'eau et concentré dans les nappes phréatiques du delta.

Le cas de l'Himalaya

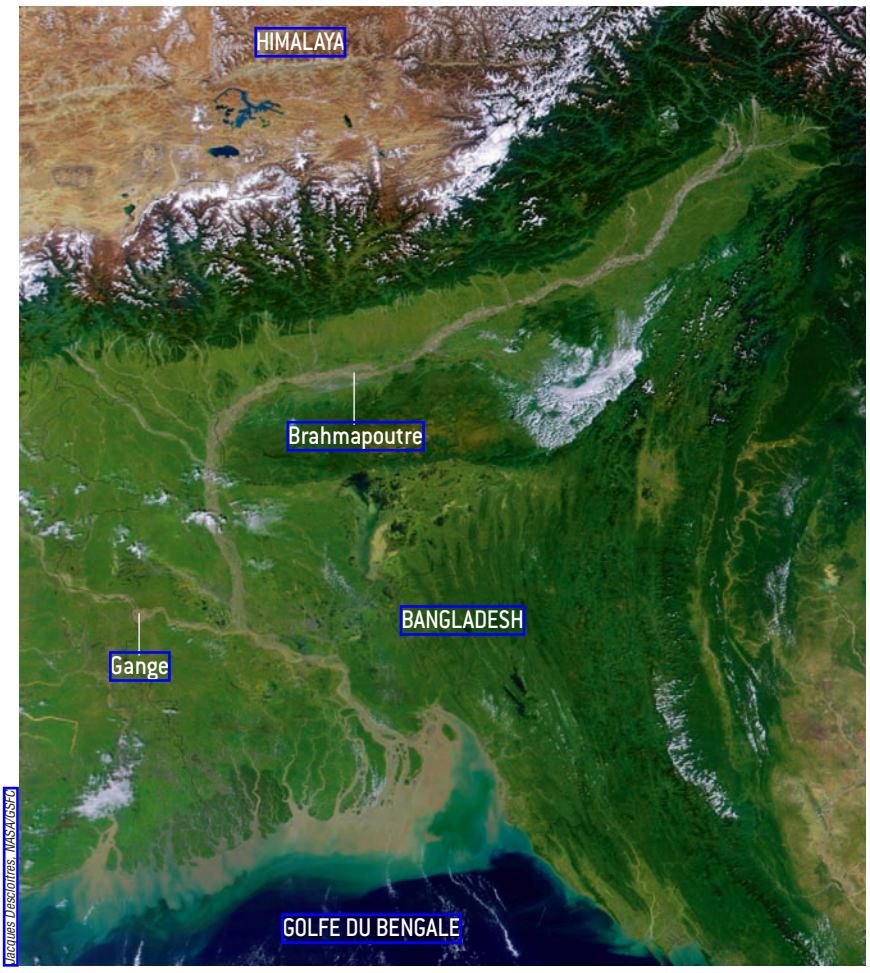
Les éléments géogéniques, tels l'arsenic, le sélénium et le fluor, entrent dans la composition de nombreux minéraux présents dans la croûte terrestre. Les principaux minerais contenant de l'arsenic sont l'arsénopyrite (FeAsS), l'orpiment (As_2S_3) et le réalgar (AsS), où As est l'arsenic, Fe le fer et S le soufre. Lors de la formation des chaînes de montagnes, ces roches issues des profondeurs de la Terre affleurent à la surface. Elles sont alors soumises à l'érosion par la pluie, les glaciers, les fleuves et les vents.

Les eaux de ruissellement s'enrichissent en ces éléments sous forme de très fines particules, et alimentent les rivières ou s'infiltrent dans le sol jusqu'aux réserves souterraines, les nappes phréatiques. D'autres processus géologiques, tels que les éruptions volcaniques et la circulation d'eau chaude en profondeur, entraînent, à l'échelle des temps géologiques, une remontée de ces éléments naturels en surface. Ils s'accumulent ensuite dans les sédiments et les eaux souterraines *(voir la figure 2)*. Ainsi, ces éléments se retrouvent dans les nappes phréatiques situées dans certaines plaines proches des montagnes et dans les sols situés à proximité des volcans, tel l'Etna, en Italie.

La concentration de ces substances potentiellement toxiques dans les eaux souterraines dépend de divers phénomènes géologiques et des conditions physico-chimiques qui règnent dans le sol. L'érosion de l'Himalaya étant plus forte et plus rapide que celle de massifs montagneux plus jeunes, tel la chaîne alpine, la contamination des eaux souterraines par l'arsenic est plus importante – et plus problématique – dans les plaines alimentées par les eaux himalayennes que dans les plaines alpines.

La concentration de l'arsenic dans les eaux souterraines dépend aussi de diverses réactions physico-chimiques que subissent les éléments dissous, telles que l'adsorption sur des particules solides, les produits de solubilité qui imposent le seuil au-dessous duquel le composé reste en solution et au-dessus duquel il précipite, ou encore la présence de certaines bactéries. Ces processus ont lieu au sein de l'aquifère, le système formé par le terrain perméable et les nappes d'eaux souterraines. Dans un aquifère, la mobilité d'un élément dépend aussi des propriétés physico-chimiques de l'eau (sa température, son acidité, la quantité d'oxygène, par exemple) et des sédiments (leur composition, la présence d'argiles, de matière organique, la taille des particules sédimentaires, etc.). Ces caractéristiques déterminent la biodisponibilité de l'élément, c'est-à-dire sa faculté à être absorbé par un organisme.

La libération de l'arsenic dans les eaux souterraines est un phénomène naturel, mais l'activité humaine l'a renforcé dans certaines parties du monde. Ainsi, les sédiments des aquifères situés dans les deltas des grands fleuves du Sud-Est asiatique présentent des concentrations en arsenic plus élevées que dans d'autres bassins sédimentaires, même si elles restent inférieures à la norme. Et pourtant, l'eau y est parmi les plus contaminées, car les conditions physico-chimiques qui y règnent ont favo-



Jacques Descloitres, NASA/GSFC

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

risé la prolifération de bactéries réductrices, lesquelles favorisent la solubilisation de l'arsenic dans l'eau.

Au Bangladesh, le forage des innombrables puits aurait accentué la libération d'arsenic dans les nappes phréatiques en raison de la présence de telles bactéries. Avant leur mise en place, les aquifères représentaient un milieu anaérobie (privé d'oxygène). Le forage et le pompage de l'eau ont introduit de l'oxygène et des micro-organismes, qui ont modifié l'équilibre chimique *(voir la figure 4)*. Des bactéries aérobies, notamment celles qui ont une activité réductrice, ont trouvé un environnement favorable à leur multiplication. Ces bactéries ont ensuite libéré en masse l'arsenic naturellement présent dans les sédiments.

Un problème mondial

Le Bangladesh n'est pas le seul pays où les concentrations en arsenic dans l'eau sont supérieures aux normes. Les États-Unis, l'Australie, l'Argentine, le Chili, le Mexique, la Hongrie, l'Inde, le Népal, certaines provinces de la Chine sont également concernés *(voir la figure 3)*. La présence d'arsenic dans l'eau potable constituerait une menace pour plus de 500 millions de personnes dans le monde.

Historiquement, le Bangladesh a été le révélateur des problèmes causés par la contamination par l'arsenic de l'eau de consommation, mais d'autres éléments naturels (sélénium, manganèse, fluor, etc.) toxiques à forte concentration posent les mêmes difficultés. Ces éléments causent des milliers de morts chaque année, et ces chiffres risquent d'augmenter au cours des années à venir, en raison de la demande croissante en eau liée à l'explosion démographique dans certaines régions du monde. De nombreux programmes locaux et internationaux ont été mis en place pour évaluer le risque d'exposition des populations et rechercher des solutions techniques et politiques.

Les zones à risques se situent là où ces polluants naturels se sont accumulés au cours du temps et se sont dissous dans les eaux souterraines. En 2008, Lenny Winkel et ses collègues, de l'Institut suisse de la science et technologie de l'eau, EAWAG,

LES AUTEURS

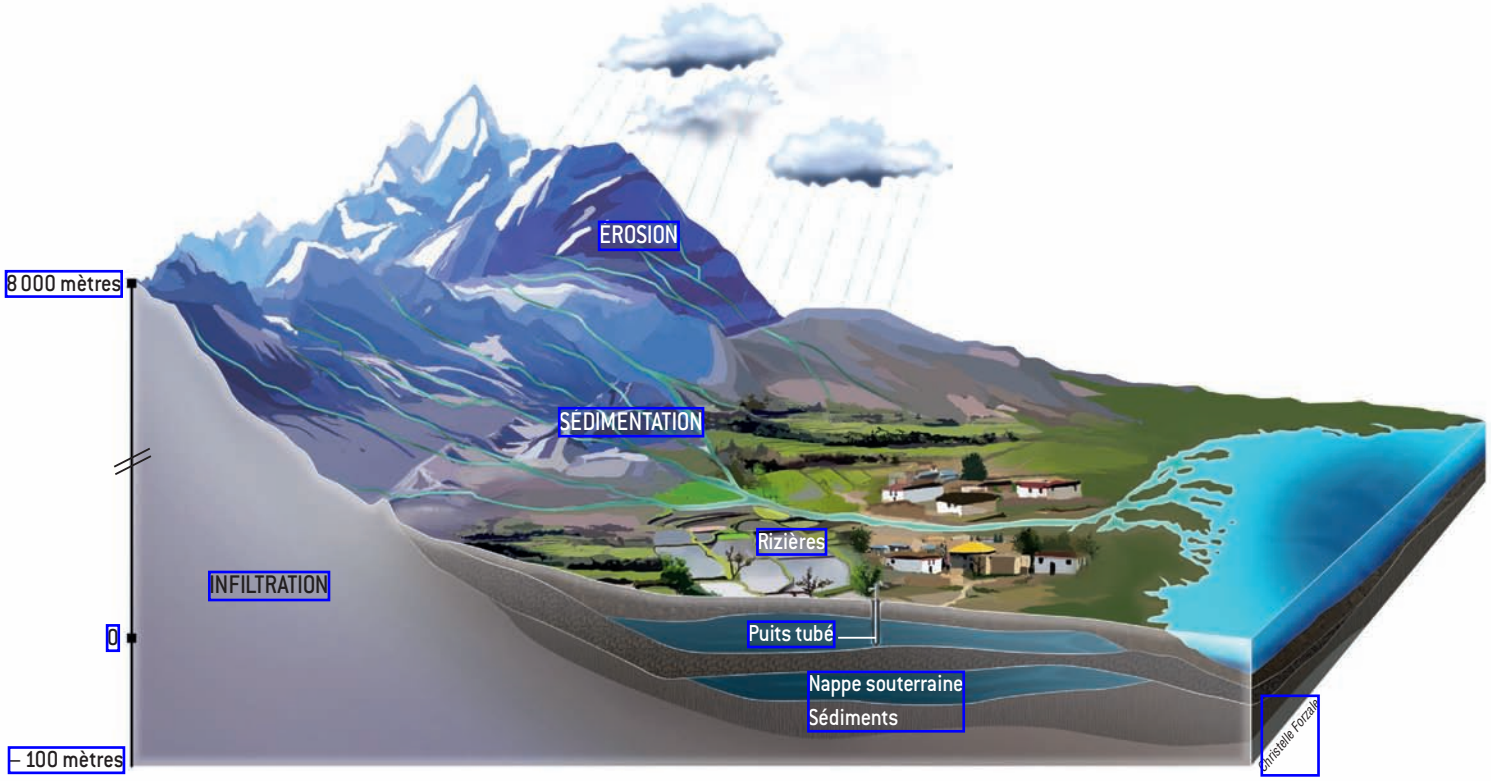




Romain MILLOT est géochimiste au Bureau de recherches géologiques et minières, BRGM, à Orléans.

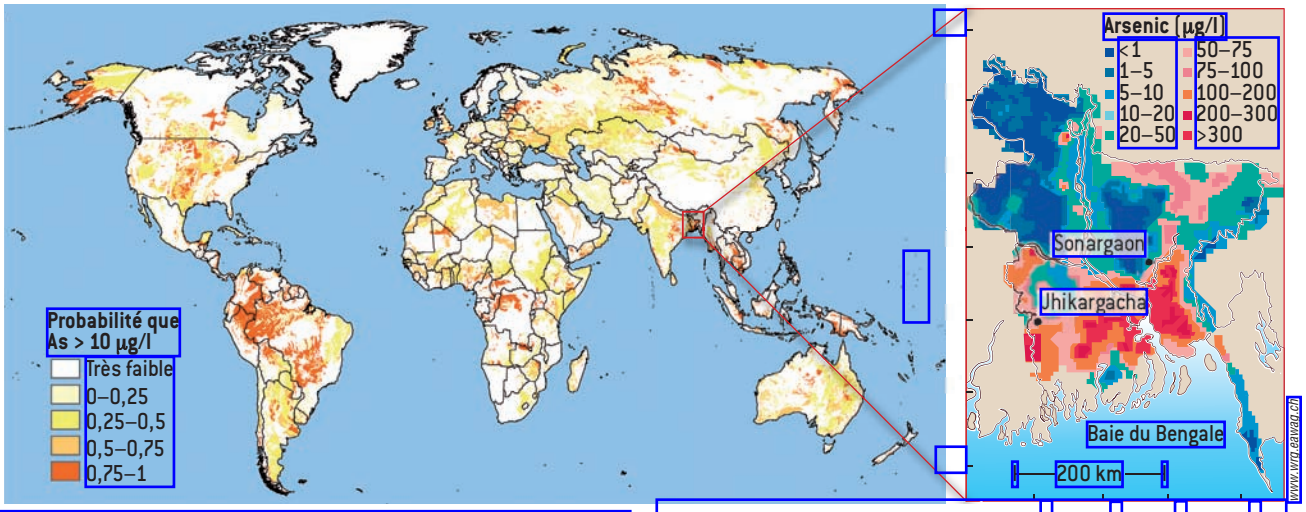
Laurent CHARLET est géochimiste et professeur à l'Université Joseph Fourier, à Grenoble.

David POLYA est géochimiste à l'Université de Manchester, en Grande-Bretagne.



2. L'HIMALAYA, LA PLUS IMPORTANTE CHAÎNE DE MONTAGNES *(ci-contre, à gauche)*, subit une érosion plus forte que les chaînes plus jeunes, les Alpes par exemple. Les sédiments arrachés à la montagne, riches en divers éléments, en arsenic notamment, s'accumulent dans les plaines situées au pied de la montagne. Les eaux de ruissellement entraînent l'arsenic dans le sol, notamment dans les nappes phréatiques où l'eau est prélevée à plus de dix mètres de profondeur au moyen de puits tubés *(ci-dessus)*. Mais cette eau, trop chargée en arsenic, est impropre à la consommation.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011



3. SI L'ARSENIC EST TOXIQUE POUR LES POPULATIONS du Bangladesh, c'est aussi le cas dans d'autres régions du monde où l'eau est impropre à la consommation. Au Bangladesh *(à droite)*, la concentration peut atteindre 300 microgrammes par litre. Selon l'Organisation mondiale de la santé, cette concentration ne devrait pas dépasser dix microgrammes par litre. Les zones les plus menacées sont le Nord de l'Amérique du Sud, certaines régions d'Europe centrale, de Sibérie ou d'Afrique où la concentration peut atteindre 100 microgrammes par litre *(à gauche)*.

à Dübendorff, ont établi des cartes du risque lié à la teneur en arsenic des eaux souterraines, en admettant qu'elle est supérieure à la norme de potabilité au Cambodge, au Bangladesh et au Vietnam. Les modèles de prédiction intègrent la topographie, la nature des sols, la porosité, la teneur en matière organique et le renouvellement de l'eau dans les aquifères.

Les cartes de risques ainsi obtenues indiquent la probabilité que ces éléments (arsenic, fluor, sélénium…) soient présents à des concentrations potentiellement dangereuses pour la santé dans les eaux souterraines de ces différentes régions *(voir la figure 3)*. Toutefois, leur résolution spatiale est limitée et des contrôles de qualité doivent être réalisés dans les zones à risques pour mesurer les concentrations réelles.

En Europe, de 2007 à 2010, des géologues et des géochimistes de 15 universités, instituts et organismes de recherche ont conduit le projet AQUATRAIN. Doté d'un budget de plus de trois millions d'euros, ce projet coordonné par l'Université de Manchester, en Grande-Bretagne, visait à élaborer des méthodes d'analyse et de modélisation des polluants naturels, à identifier les zones à risques et à proposer des recommandations aux responsables sanitaires et politiques. Un autre objectif de ce projet consistait à développer des techniques de dépollution *(voir l'encadré page 82)*.

Comment définir une stratégie efficace de dépollution d'un site contaminé ? Il faut tenir compte, d'une part, de l'intensité de la pollution de la ressource en eau et, d'autre part, de l'état sanitaire et du niveau socio-économique des populations exposées. Au Bangladesh, où la distribution de l'eau n'est pas centralisée, il s'agit de mettre en place des techniques efficaces à court terme, facilement applicables au quotidien par la population. Les techniques actuelles reposent sur des traitements de l'eau contaminée soit en profondeur, soit en surface après pompage de l'eau.



4. LES PUITS DE FORAGE évitent que l'on ne prélève l'eau de surface, souvent contaminée par des bactéries et donc vectrice de maladies infectieuses. Mais les eaux profondes sont particulièrement chargées en arsenic au Bangladesh, où a été prise cette photographie.

Les techniques de dépollution

Plusieurs de ces techniques de dépollution reposent sur la forte affinité du fer pour l'arsenic. Ainsi, dans l'un des dispositifs portables permettant de filtrer l'eau des puits tubés, l'eau contaminée traverse une couche de copeaux de fer (limaille ou clous) qui piège l'arsenic, puis une couche de charbon et de sable, qui retient les particules de fer ayant réagi avec l'arsenic. Le filtrat est débarrassé des copeaux de fer et de l'arsenic, qui a réagi avec le fer. L'inconvénient de cette technique est qu'elle engendre des déchets arséniés et que les filtres doivent être renouvelés fréquemment. Ces filtres ont été testés dans certains villages au Bangladesh, mais sont insuffisants pour couvrir les besoins de l'ensemble de la population.

Aujourd'hui, malgré les efforts des organisations non gouvernementales locales qui, depuis une dizaine d'années, cherchent à mettre en place des solutions, le problème

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

n'a pas reculé. En attendant le déploiement de techniques de dépollution efficaces et applicables à grande échelle, une autre alternative consiste à traiter les eaux de surface qui étaient utilisées avant l'avènement des puits tubés. Ici le traitement est bactériologique, puisque, comme nous l'avons évoqué, ce sont essentiellement les contaminations par des micro-organismes pathogènes qui en empêchent la consommation.

L'agriculture également concernée

Enfin, l'eau de consommation est en cause, mais les pratiques agricoles le sont aussi. Les solutions envisagées visent à réduire l'usage de l'eau souterraine polluée, notamment grâce à la sélection de variétés cultivées moins consommatrices d'eau. Une étude sur la riziculture au Bangladesh a indiqué que sur les quatre millions d'hectares de terres irriguées, environ 2,4 le sont avec de l'eau des puits tubés. Cette eau est utilisée pour la production de riz Boro durant la saison sèche. Les concentrations en arsenic dans les grains de différentes variétés de riz atteindraient 1,8 ppm (partie par million), alors qu'elle est de 0,1 ppm en Europe ou aux États-Unis. Cette contamination est deux à trois fois plus importante dans les légumes à feuilles, tels les épinards.

En 2001, un rapport de la FAO *(Food and Agriculture Organization)* préconisait plusieurs solutions. La première consiste à privilégier des cultures exigeant moins d'eau, par exemple à remplacer le riz Boro par du blé ou du maïs (moins consommateurs). Par ailleurs, on peut aussi sélectionner des variétés de riz qui absorbent moins d'arsenic que d'autres.

En outre, il est recommandé de diminuer la culture du riz irrigué au profit du riz cultivé sur sol sec (avec des graines prégermées hors-sol) et de limiter la période d'irrigation, afin de réduire le transfert de l'arsenic, provenant du sol et de l'eau, vers la plante. L'Institut de recherche sur le riz du Bangladesh estime que les agriculteurs pourraient réduire l'eau d'irrigation de 40 pour cent sans perte de rendement. Des tests sont effectués pour connaître la concentration en

LA DOUBLE FACE DE L'ARSENIC ET DU SÉLÉNIUM

Les éléments chimiques présentent souvent un caractère double : à faibles doses, ce sont des oligoéléments nécessaires au bon fonctionnement des organismes. Ils entrent dans la composition de nombreuses protéines et sont indispensables pour qu'elles fonctionnent correctement (par exemple, les protéines dites à doigts de zinc). Ainsi, les carences en oligoéléments, tels le zinc, le sélénium, le fer ou le cuivre, entraînent entre autres des retards de croissance ou une plus grande sensibilité aux infections.

En revanche, beaucoup d'éléments deviennent toxiques à des doses trop élevées. Ainsi, l'homme présente un déficit en sélénium au-dessous de 40 microgrammes par jour, mais sa concentration devient toxique au-delà de 400 microgrammes par jour. Il apparaît alors une sélénose, dont les symptômes sont des troubles gastro-intestinaux, une perte des cheveux, des taches sur les ongles et parfois des atteintes neurologiques. Les besoins quotidiens de l'homme en arsenic sont compris entre 10 et 20 microgrammes. Au-delà de 100 microgrammes par jour, l'arsenic entraîne des gangrènes des extrémités, des ulcères, des lésions cutanées et des cancers de la peau et des organes.

L'arsenic est toxique à doses élevées, car il entre en compétition dans les réactions biochimiques avec d'autres éléments chimiques, tel le phosphore, dont il prend la place, ce qui perturbe le fonctionnement cellulaire.

La toxicité de l'arsenic dépend également de son degré d'oxydation ; on parle alors de spéciation. À l'état naturel, il se trouve sous forme inorganique (dans les minéraux) ou sous forme organique (dans les organismes vivants). L'arsenic peut adopter quatre degrés d'oxydation : (–3), (0), (+3), (+5), dont les plus fréquents dans l'environnement correspondent à l'arséniate As(V) (degré d'oxydation +5) et à l'arsénite As(III) (degré d'oxydation +3). L'arsenic inorganique réduit As(III) est plus toxique que la forme inorganique oxydée As(V). Les effets diffèrent selon le degré d'oxydation. Par exemple, la forme oxydée As(V) se substitue au phosphore dans le phosphate de l'ATP, l'adénosine triphosphate, l'énergie des cellules. Cela perturbe les réactions de la « respiration cellulaire ». L'arsenic réduit As(III) forme des complexes avec de nombreuses enzymes telle la lipoamide, cofacteur nécessaire à la conversion du pyruvate en acétyl-coenzyme A *(voir le tableau ci-contre)*.

Le sélénium se présente également sous différentes formes et degrés d'oxydation dans l'environnement. Sous forme métallique, il est nécessaire en infime concentration, car il participe au métabolisme du glutathion, le principal antioxydant cellulaire. Ses formes composées, tels la sélénite de sodium (Na_2SeO_3) et le séléniate de sodium (Na_2O_4Se), sont plus solubles que la forme métallique et ainsi plus toxiques. Le sélénium interfère avec le métabolisme de certaines enzymes de la respiration cellulaire, ce qui expliquerait sa toxicité.

À mesure que les connaissances sur la toxicité de ces éléments progressent, les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé sont mises à jour, indiquant les doses minimales et maximales à respecter pour la consommation. Toutefois, les directives concernant les apports quotidiens recommandés varient suivant les pays, notamment pour ceux dont les habitants sont naturellement exposés à des concentrations élevées à cause de l'eau qu'ils consomment.



© Roger Hutchings/In Pictures/Corbis

LES TACHES NOIRES sur les mains : un signe d'intoxication à l'arsenic.

Composé	Formule	Spéciation	Toxicité	Effets
Arsénite	H_3AsO_3 AsO_2^-	Degré d'oxydation III	+++	Inhibition de certaines enzymes
Arséniate	H_3AsO_4 $HAsO_4^{2-}$ $H_2AsO_4^-$ AsO_4^{3-}	Degré d'oxydation V	++	Perturbation de la synthèse de l'ATP Inhibition de la glycolyse

LES TECHNIQUES D'ÉLIMINATION DE L'ARSENIC

Il existe aujourd'hui une cinquantaine de méthodes pour éliminer l'arsenic de l'eau. Mises au point en laboratoire, certaines sont utilisées par l'industrie. Cependant, la plupart restent inapplicables dans les pays en développement. Les différents procédés sont fondés sur l'inversion des réactions naturelles qui ont entraîné la solubilisation d'un polluant dans les eaux souterraines. Ils reposent sur quatre types de réactions : adsorption, précipitation, floculation (formation de « flocons » accélérant la sédimentation des particules de matière) et oxydo-réduction.

Dans le premier type de réaction, l'arsenic s'adsorbe à la surface du fer et forme un complexe. Dans la réaction de précipitation, l'arsenic est incorporé dans un solide, comme c'est le cas du réalgar As_4S_4 ou certains sulfures et disulfures de fer. C'est également le cas de la floculation, mais les particules solides sont petites. Enfin, les réactions d'oxydation convertissent l'arsenic dont le degré d'oxydation est égal à trois en arsenic dont le degré d'oxydation est égal à cinq, qui s'adsorbe mieux. L'oxydation est soit chimique (par exemple par le peroxyde d'oxygène ou la limaille de fer), soit photochimique. Dans ce dernier cas, le procédé SORAS *(Solar Oxidation and Removal of Arsenic)* a été développé par des chimistes et ingénieurs de l'Institut EAWAG et testé dans les pays en développement, dont le Bangladesh.

En laboratoire, on ajoute aux eaux à traiter de l'acide citrique (ou jus de citron) et de la limaille de fer, on les place dans des bouteilles en polyéthylènetéréphtalate (PET), que l'on expose pendant quelques heures au soleil. L'arsenic dissous se fixe sur des oxydes de fer, qui sont filtrés le jour suivant. Des essais de terrain au Bangladesh sont en cours pour tenter d'adapter le processus aux conditions physico-chimiques de l'eau extraite des puits.

Une autre technique consiste à modifier les conditions physico-chimiques de l'aquifère *in situ* pour oxyder, puis piéger les polluants contenus dans l'eau. Dans ce cas, on injecte de l'oxygène directement dans l'aquifère. Cette méthode est efficace dans la région de Hanoï (au Vietnam), car les eaux souterraines sont riches en fer dissous. Au contact de l'air, le fer s'oxyde en formant des précipités de rouille sur lesquels l'arsenic s'adsorbe. Ces précipités sont ensuite éliminés en surface par un filtre à sable. Des études en laboratoire et sur le terrain ont été réalisées au Bangladesh, au Salvador, en Grèce et en Roumanie pour optimiser le fonctionnement de ces filtres.

Quant aux équipes du projet européen AQUATRAIN, elles mettent au point des techniques de dépollution des eaux, testées dans les laboratoires du Bureau de recherches géologiques et minières en France, le BRGM. Parmi elles, des techniques de bioremédiation consistant à traiter l'eau polluée par des particules de fer en présence de bactéries réductrices. Ces dernières dégradent les composés arséniés *(voir l'illustration ci-dessus)*.

Enfin, une technique de piégeage après extraction, qui consiste à faire circuler l'eau dans des colonnes contenant des agrégats nanométriques d'aluminium, ou des oxydes de manganèse pour retenir les polluants, a été récemment mise au point en laboratoire, puis testée sur le terrain en Roumanie et Hongrie. Ce procédé est efficace, mais très coûteux.



EXPÉRIENCES DE BIOREMÉDIATION sur des colonnes de sols dans lesquelles circule une eau polluée en As en présence de particules de Fer et de bactéries qui vont accélérer le processus de dépollution

BIBLIOGRAPHIE

S. Fendorf *et al.*, **Spatial and temporal variations of groundwater arsenic in South and Southeast Asia**, *Science*, vol. 328, pp. 1123-1127, 2010.

D. Polya et L. Charlet, **Rising arsenic risk ?**, *Nature Geoscience*, vol. 2, pp. 383-384, 2009.

L. Winkel *et al.*, **Predicting groundwater arsenic contamination in Southeast Asia from surface parameters**, *Nature Geoscience*, vol. 1, pp. 536-542, 2008.

L. Charlet et D. Polya, **Arsenic in shallow, reducing groundwaters in Southern Asia : An environmental health disaster**, *Elements*, vol. 2, pp. 91-96, 2006.

SUR LE WEB

http://www.eawag.ch/index

http://www.aquatrain.eu/

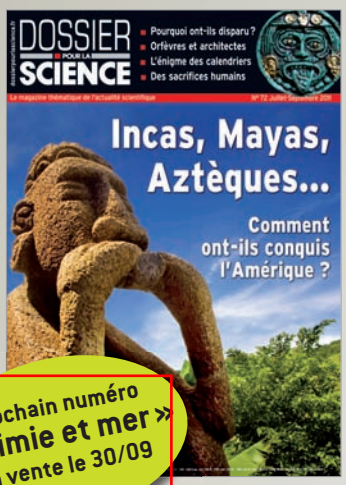
polluants dans le riz, mais aussi dans les autres céréales et les légumes cultivés dans les pays concernés.

Devant l'ampleur du problème au Bangladesh, le gouvernement a tenté de trouver des solutions. L'OMS, et l'UNICEF ont soutenu un projet de réduction des concentrations d'arsenic dans l'eau et d'approvisionnement en eau potable. Lancé en 1998, ce projet bénéficia d'un prêt de la Banque mondiale de 32,5 millions de dollars. En outre, les organisations non gouvernementales participent à des campagnes de sensibilisation des populations et à des projets pilotes. Ainsi, l'Institut suisse EAWAG commence à développer une méthode d'élimination de l'arsenic adaptée aux conditions physico-chimiques de l'eau au Bangladesh et au Vietnam, et celle plus prometteuse d'élimination de l'arsenic par photo-oxydation. En Europe, des recherches ont débuté avec le projet AQUATRAIN, visant notamment à faire un inventaire des zones polluées en Hongrie et en Roumanie, et à tester sur le terrain des solutions de dépollution adaptées.

Par ces différents projets européens ou mondiaux, les chercheurs s'associent pour mieux caractériser les pollutions des eaux souterraines en fonction de la géologie et des activités humaines locales. Toutefois, près de 20 ans après la révélation de la crise au Bangladesh, aucune solution à la mesure du problème n'a été mise en place. La première difficulté est scientifique, car s'il existe des techniques performantes en laboratoire, rares sont celles qui s'appliquent à grande échelle. S'ajoutent à cela les incontournables verrous financiers. Face à l'urgence, l'une des solutions serait sans doute d'abandonner les puits tubés pour revenir à l'exploitation des eaux de surface, qui nécessiteraient certes d'être traitées, mais avec des méthodes qui ont fait leurs preuves. Il ne resterait plus qu'à trouver les fonds et à convaincre les autorités locales...

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Prochain numéro « Chimie et mer » en vente le 30/09

Dossier Pour la Science

Incas, Mayas, Aztèques... Mais aussi Olmèques, Inuits, Cheyennes... Bien avant les Européens, des hommes avaient déjà conquis l'Amérique du cercle arctique à la Terre de Feu et y avaient fondé de nombreuses civilisations. La plupart font encore rêver aujourd'hui. Comment sont-elles apparues ? Comment fonctionnaient-elles ? Ont-elles vraiment disparu ? Ce Dossier retrace l'histoire, entre grandeur et décadence, des peuples d'Amérique.

Numéro 72, juillet-septembre 2011 – Prix de vente : 6,95 €

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Émotions sociales, émotions individuelles, neuropsychologie des émotions : les émotions ont une influence notable sur nos comportements et nos décisions. Dans ce nouveau numéro thématique, découvrez les émotions dans tous leurs états et apprenez pourquoi elles sont les alliées de la raison.

Numéro 7, août-octobre 2011 – Prix de vente : 6,95 €



Format classique ou pocket



Format classique ou pocket

Cerveau & Psycho

Notre attention est-elle menacée ? Sollicitations de la publicité, des smartphones, des alertes e-mail au travail : il est de plus en plus difficile de rester concentré. Les enfants sont les premiers à en subir les conséquences à l'école. Neurobiologistes et psychologues dévoilent les rouages de cette capacité. Au sommaire également: les liens entre grands-parents et petits-enfants, des gaz dans le cerveau, et bien d'autres sujets.

Numéro 47, septembre-octobre 2011 – Prix de vente : 6,95 €

POUR LA SCIENCE

HISTOIRE DES SCIENCES

L'art de la navigation dans le Pacifique

Sans cartes ni instruments d'aucune sorte, les peuples océaniens ont conquis le Pacifique bien avant les Européens, grâce à une connaissance exceptionnelle des mers et de la navigation qui n'a rien à envier aux pratiques occidentales.

Emmanuel DESCLÈVES

Pendant cet espace de trois mois et vingt jours, nous parcourûmes à peu près 4 000 lieues dans cette mer que nous appelâmes Pacifique parce que, durant tout le temps de notre traversée, nous n'essuyâmes pas la moindre tempête. Nous ne découvrîmes non plus pendant ce temps aucune terre, excepté deux îles désertes.

Ainsi Antonio Pigafetta, un officier de Magellan, relate-t-il la première traversée connue du Grand Océan par des Européens, réalisée en 1520 – plus de 10 000 milles marins (1 mille marin vaut 1 852 mètres) sans escale, soit près de la moitié de la circonférence terrestre. Au fil des voyages, les îles se sont révélées bien plus nombreuses et… habitées. Et pour cause : les immenses espaces du Pacifique, qui couvrent près de 40 pour cent du globe terrestre et comptent environ 25 000 îles, avaient été explorés, mis en valeur, puis peuplés bien avant l'arrivée des Européens, par des vagues successives de migrants venus des rivages de l'Asie du Sud-Est. La dernière migration avait débuté il y a environ 6 000 ans, pour atteindre la Polynésie centrale au moins cinq siècles avant notre ère, et la côte américaine avant l'an mille. À l'époque où les Vikings parcouraient seulement 200 à 300 milles de navigation hauturière, les Océaniens étaient déjà allés chercher la patate douce en Amérique, qu'ils avaient implantée dans les îles Cook (10 000 milles aller-retour).

Les nombreux voyages hauturiers ainsi réalisés d'île en île, sur des distances parfois bien supérieures à celle de la traversée de l'Atlantique, supposent une exceptionnelle maîtrise de l'art de la navigation par les premiers colonisateurs du Grand Océan. À bord de pirogues à balancier et de grands catamarans – inventés par leurs ancêtres il y a plus de 2 000 ans –, leurs navigateurs les ont guidés de façon précise, fiable et reproductible, sur des trajets dépassant 5 000 kilomètres hors de vue de la terre, sans cartes ni instruments de navigation. À partir de la fin des années 1960, de nombreux voyages réalisés dans des conditions comparables à celles d'autrefois ont permis d'étudier en détail l'art de la navigation océanien. Depuis, tant la technique de construction des embarcations *(voir l'encadré page 87)* que celle de la navigation en haute mer ne cessent de nous surprendre.

Sans carte ni boussole

L'épopée des Grandes Découvertes date de siècles récents au regard de l'histoire : traversée de l'Atlantique en 1492 par Christophe Colomb ; ouverture de la route des Indes et de l'Extrême-Orient *via* le cap de Bonne-Espérance, que Vasco de Gama franchit en 1497 ; grands voyages de circumnavigation inaugurés par Magellan dès 1519 avec la première traversée du Grand Océan ; avènement, enfin, des expéditions à caractère scientifique et humaniste à partir de 1765, commandées notamment par Bougainville, Cook, Lapérouse ou Dumont d'Urville, qui s'illustrèrent particulièrement dans le Pacifique.

Peu à peu, les Occidentaux ont constaté que non seulement les innombrables îles habitables du Grand Océan étaient peuplées, mais que leurs habitants présentaient une étonnante identité culturelle et linguistique, reflétant une origine commune. L'un des capitaines européens les plus éclairés – James Cook – fut le premier à exprimer officiellement son étonnement : « Il est extraordinaire que la même nation se soit répandue sur toutes les îles dans ce vaste océan, depuis la Nouvelle-Zélande jusqu'à l'île de Pâques, c'est-à-dire sur presque un quart de la circonférence du globe. » En réalité, la zone géolinguistique malayo-polynésienne est encore plus vaste, puisqu'elle s'étend de l'île de Pâques à Madagascar.

Aucun de ces capitaines des Lumières ne semble pour autant en avoir tiré de conclusion sur la maîtrise de l'art de la navigation hauturière par ces populations migrantes. Sans doute aveuglés par une vision trop dualiste du monde, avec d'un côté une minorité de conquérants civilisés et, de l'autre, une masse indigène attardée à un stade primitif, ils ont décrit et commenté, souvent avec éloge, les qualités nautiques des « pirogues » et les connaissances des indigènes en navigation et en astronomie, mais n'ont pas su y voir une culture maritime évoluée.

C'est à partir de ces descriptions et témoignages, conjugués aux rares vestiges astronomiques exhumés dans les îles et au savoir-faire transmis oralement de génération en génération – mais jalousement tenu secret –, que l'on redécouvre aujourd'hui la richesse de l'art océanien de la navigation. Voici un aperçu de l'étendue de ce savoir-faire, reconstitué à partir de ces différentes sources.

Exempt de tout artifice matériel, le secret des premiers navigateurs du Pacifique réside

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

dans l'utilisation corrélée et cohérente, par un fin pilote doublé d'un observateur averti, de l'ensemble des informations disponibles en mer : données astronomiques indispensables pour les voyages au long cours, mais aussi connaissance approfondie des vents, de la houle et des courants, des phénomènes géophysiques, hydrologiques, météorologiques, océanographiques et hydrographiques, et encore de tout ce qui concerne la vie végétale et animale en mer – oiseaux, poissons, algues, etc.

Le navigateur océanien ne recourt ni aux cartes ni à la boussole ou tout autre instrument. Contrairement aux Occidentaux, il ne dissocie pas la mesure du temps, la vitesse, la dérive due au vent, le courant et la distance à parcourir sur l'eau. Ces facteurs constituent pour lui un ensemble cohérent dont il établit en permanence une synthèse faisant appel à tous ses sens. Son itinéraire est balisé par d'autres symboles, d'autres références inscrites dans le ciel et la mer. Le Soleil, la Lune et les étoiles se déplacent selon des tracés établis depuis la nuit des temps et sont utilisés pour repérer des îles ou des itinéraires. La proximité d'une île est signalée par la forme des nuages et leur couleur : certaines terres sont surplombées de deux nuages en forme de sourcils ; les lagons reflètent une couleur turquoise sur les nuages localisés au-dessus, tandis qu'une terre couverte de végétation leur donne une teinte brune. Même lorsque l'horizon est sans nuage, le pilote sait observer une légère surbrillance ou un trait plus sombre, marquant par temps clair la présence d'une île à une distance de l'ordre de 30 milles (à l'œil nu, elle n'est visible qu'à environ 10 milles).

Une excellente mémoire

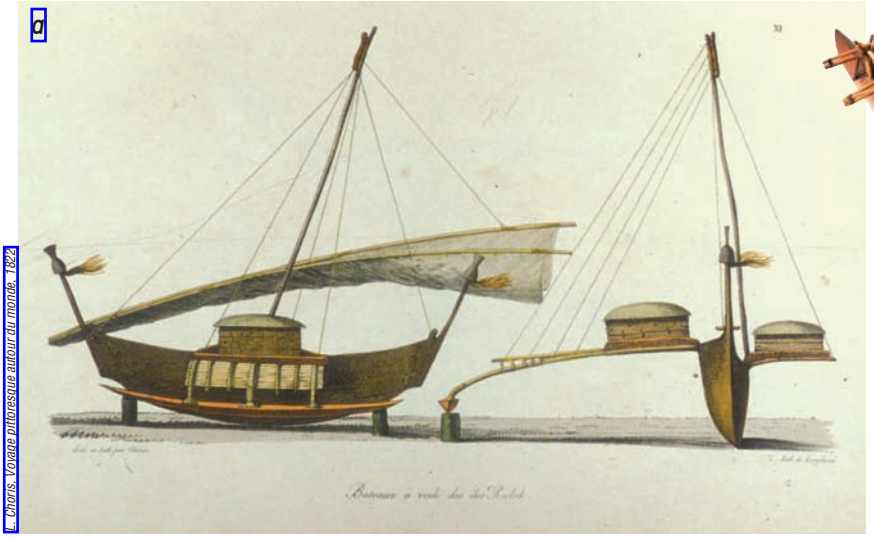
La mer a aussi ses lois : les courants et les vagues sont déviés d'une certaine façon par chaque île qu'ils rencontrent ; les oiseaux peuvent ouvrir la voie ; les algues marquent l'orientation d'un contre-courant ; la houle indique le chemin des tempêtes sur l'océan. Les navigateurs océaniens savent même interpréter les interférences de plusieurs houles croisées : certains pilotes traditionnels discernent encore aujourd'hui une houle particulière parmi une conjugaison de trois ou quatre houles croisées, par la seule sensation qu'ils ont du mouvement du

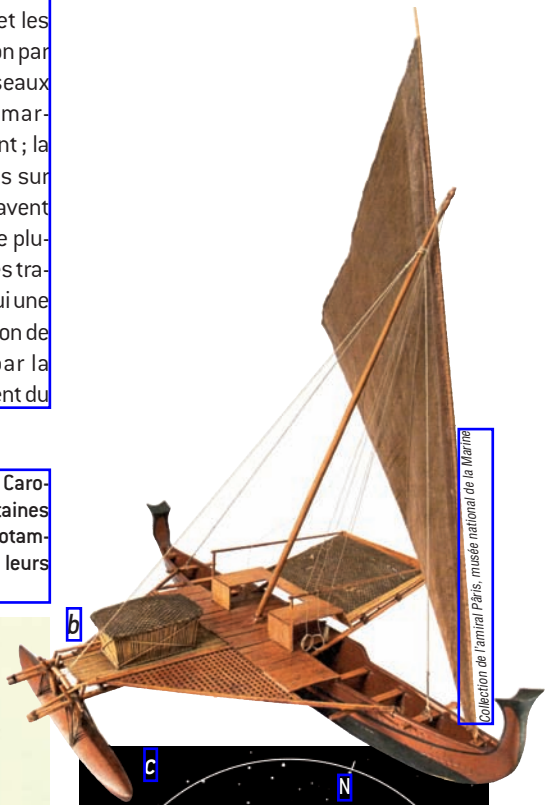
L'AUTEUR

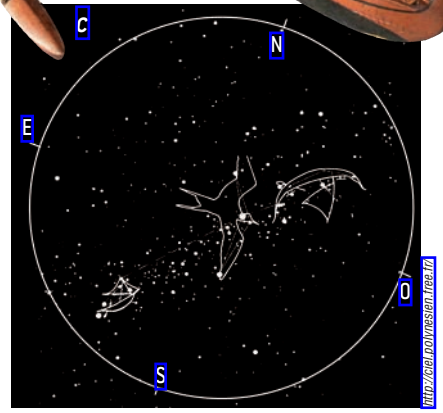


L'amiral Emmanuel DESCLÈVES est membre de l'Académie de marine.

DEUX PRAOS « VOLANTS » AMPHIDROMES, l'un des îles Mariannes *(a)*, l'autre des îles Carolines *(b)*. Ces pirogues à balancier dépassaient les 20 nœuds, suscitant les éloges des capitaines européens dès le début des années 1600. Les navigateurs polynésiens se repéraient en mer notamment grâce à l'observation astronomique. Associées à de nombreuses légendes de la mer, leurs constellations sont des pirogues, une frégate, etc. *(c)*.







© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

bateau sur l'eau. Ils ont aussi une connaissance poussée des vents, de leur force et de leur direction suivant le lieu et la période de l'année, la façon dont ils soufflent (en continu, par rafales, etc.) : en bons musiciens, ils décryptent à l'oreille la direction et la force du vent, et prédisent ses évolutions à court et moyen termes.

Le navigateur a mémorisé toutes ces connaissances et les relie en mer avec ses observations *in situ*, fruits de ses sens en éveil constant. Il ajuste ainsi sa route, s'aidant des éléments pour tracer son sillage. Compte tenu de l'étendue des connaissances nécessaires à la pratique de cet art, les plus avertis de ces navigateurs devaient faire preuve d'une vaste intelligence encyclopédique, avec en particulier des capacités de mémorisation exceptionnelles. De nombreux témoignages l'attestent, tel celui de Cook, rapportant les précieux conseils de Tupa'ia, un prince de l'île Ra'iatea exilé à Tahiti, qu'il avait embarqué lors de son premier voyage de circumnavigation en 1769 : « Tupa'ia avait beaucoup d'expérience et de lumière sur la navigation. Il nous a fait de temps en temps la description de plus de 130 de ces îles et dans une carte qu'il a tracée lui-même, il en a placé jusqu'à 74. »

À chaque île son étoile

Si les connaissances de la mer et des phénomènes météorologiques constituaient des données importantes pour corriger la trajectoire du bateau, l'itinéraire dans ses grandes lignes était avant tout décidé et suivi grâce à l'observation astronomique. D'après les vestiges archéologiques trouvés sur diverses îles, dès le II^{e} millénaire avant notre ère, les Océaniens avaient exploré le centre du Pacifique, ce qui suggère qu'ils utilisaient déjà couramment l'astronomie. Face aux distances à parcourir et à la dispersion des îles, ce qui n'était qu'une connaissance expérimentale s'est probablement peu à peu mû en une science de la navigation astronomique, qui atteignit sans doute son apogée au cours du I^{er} millénaire de notre ère, lors de l'exploration et du peuplement du triangle polynésien, entre Hawaï, l'île de Pâques et la Nouvelle-Zélande.

De fait, le ciel astronomique avait peu de secrets pour le navigateur polynésien. À terre, les pilotes restaient des nuits entières à contempler les astres. Par cette expérience systématique et continue, ils ont acquis une mémoire visuelle précise et fidèle des différentes voûtes célestes, à chaque heure et au-dessus de chaque île.

Leur répertoire identifie les noms d'au moins 220 étoiles : « Ils distinguent toutes les étoiles par des noms particuliers ; ils connaissent dans quelle partie du ciel elles paraîtront durant chacun des mois où elles sont visibles sur l'horizon ; ils savent aussi, avec plus de précision que ne le croira peut-être un astronome d'Europe, le temps de l'année où elles commencent à paraître ou à disparaître », souligne Cook.

Louis Antoine de Bougainville observe à son tour : « Les gens instruits de cette nation ont une nomenclature des constellations les plus remarquables ; ils en connaissent le mouvement diurne et ils s'en servent pour diriger leur route en pleine mer. Leur boussole est le cours du soleil pendant le jour et la position des étoiles pendant les nuits. [...] Aoturu, après avoir attentivement considéré le ciel, nous fit remarquer l'étoile brillante qui est dans l'épaule d'Orion, disant que c'était sur elle que nous devions diriger notre course et que, dans deux jours, nous trouverions une terre abondante [...]. Au reste, il nous avait nommé la veille en sa langue sans hésiter la plupart des étoiles brillantes que nous lui montrions ; nous avons eu depuis la certitude qu'il connaît parfaitement les phases de la lune et les divers pronostics qui avertissent souvent en mer des changements qu'on doit avoir dans le temps. »

Pour se repérer en mer, le pilote utilisait notamment les étoiles qui culminent au-dessus des îles. Par exemple, du fait de la rotation de la Terre, l'île de Ra'iatea, dont la latitude est d'environ 16°45' Sud, passe à un moment donné à l'aplomb de Sirius, dont la déclinaison est de 16°33' Sud. Pour apprécier la direction de Ra'iatea, il faut donc attendre le moment de la culmination de Sirius. Le ciel était ainsi une référence fondamentale permettant de se situer et de se déplacer d'île en île, avec une liaison quasi biunivoque entre une île et son étoile culminante.

Cet effet d'« image miroir » du ciel sur l'océan ne vaut qu'à un moment donné et pour une zone géographique limitée, mais le Polynésien est un navigateur : son point de référence n'est ni une terre ni un méridien virtuel, mais son navire sur l'eau, autour duquel tout est mobile et changeant, l'étoile comme l'île. Le pilote a mémorisé les variations du ciel sur la route qu'il doit suivre, jusqu'à l'image finale à son point de destination. Sa vision est proche de celle que l'on a dans un planétarium, où le ciel tourne en permanence autour de soi, à laquelle seraient intégrés les mouvements du navire et des îles sur l'horizon.

Les chemins des étoiles

Comment le pilote repère-t-il sa route par rapport aux variations du ciel ? En connaissant la trajectoire céleste de chaque étoile de son répertoire. À une latitude donnée, les étoiles se lèvent et se couchent à la même place, nuit après nuit. Dans les eaux de Hawaï, par exemple, Deneb se lève à 46° à l'Est du Nord géographique (azimut 046°) et se couche à 46° à l'Ouest (azimut 314°), marquant ainsi deux points sur l'horizon et dessinant un arc de grand cercle entre les deux – le chemin de l'étoile. Cet arc définit un plan donnant une précieuse indication angulaire par rapport à la verticale : toute variation de cet angle signale un écart de route.

Transposés sur une couronne de compas magnétique, ces différents azimuts constituent un « compas stellaire » selon un mode de représentation occidental. À l'instar d'une rose des vents, cet outil fait correspondre les directions données par des étoiles au lever ou au coucher à des azimuts sur l'horizon. Ayant intégré dans sa mémoire les chemins d'étoiles, le pilote océanien est capable de dire qu'à telle époque de l'année, à partir de tel endroit, le premier cap théorique à suivre pour atteindre telle île est donné par l'étoile Mailemua (Bêta du Centaure), puis par telle autre étoile qui se lève ou va se coucher ensuite à l'horizon, et ainsi de suite.

Outre les variations dues à la latitude, il lui faut bien sûr intégrer des corrections à

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

LES « PIROGUES » DU GRAND OCÉAN

Chez les peuples les plus sauvages, ce qui a rapport à la navigation dénote un degré d'intelligence que l'on chercherait souvent en vain dans la manière dont ils bâtissent leurs habitations ou subviennent à leurs premiers besoins.

Amiral Pâris, 1843

On ne se lance pas dans de grandes traversées sans embarcations sûres et rapides, remontant bien au vent. Les Océaniens avaient atteint un haut degré de perfectionnement dans l'art de la construction navale, encore en partie inégalé. Ils ont construit toutes sortes de navires, tant pour les coques que pour les gréements ou l'agencement des voilures, que l'on peut regrouper en deux catégories : les pirogues à balancier simple ou double (trimaran) et les pirogues doubles (catamarans), à l'exclusion notable de tout monocoque.

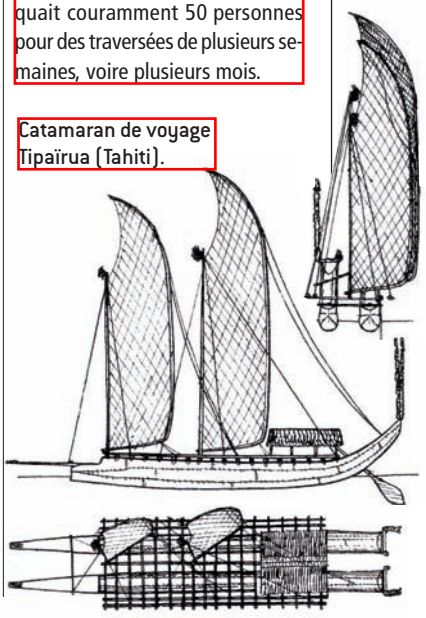
Avant l'arrivée des Européens, tous ces navires étaient construits avec des outils en pierre, le métal étant inconnu. Sur les plus grands, on assemblait les différentes pièces de bois, très soigneusement taillées, avec des cordages de coco. Le calfatage était traité par la bourre de coco enduite de gommes végétales.

Les coques étaient toutes d'une finesse et d'une légèreté inconcevables en Occident. Elles ne comportaient aucun appendice fixe sous l'eau (pas de quilles ni de gouvernail). Même avec l'usage actuel de matériaux composites, le poids des monocoques et des multicoques occidentaux modernes excède encore celui des réalisations océaniennes de longueur équivalente, notamment à cause des quilles lestées.

Les gréements étaient d'une grande variété. Il n'y avait jamais de foc, ce qui permettait des mâtures sans étai, légères et réglables. Enverguées sur au moins deux côtés, les voiles étaient en végétaux tissés assez rigides (pandanus). Leurs formes aérodynamiques permettaient dans bien des cas de dépasser la vitesse du vent. Les voiles de type aile rigide étaient les plus répandues à Tahiti au XVIIIe siècle.

Les pirogues à balancier nommées praos volants dépassaient couramment les 20 nœuds. Certaines étaient amphidromes (capables de se déplacer dans les deux sens : avant et arrière identiques), naviguant toujours balancier au vent, avec des coques souvent dissymétriques sur le plan longitudinal pour contrer les effets de la dérive.

Les pirogues doubles étaient constituées soit de deux coques identiques (navire monodrome), soit de deux coques de tailles différentes (navire amphidrome). Les coques étaient proches l'une de l'autre pour bénéficier d'un effet d'accélération de la veine fluide entre les coques. L'équipage et les passagers vivaient sur la plateforme au ras de l'eau, sans aucune protection particulière. Les grands catamarans de voyage mesuraient entre 15 et 25 mètres, parfois plus de 30 mètres. On embarquait couramment 50 personnes pour des traversées de plusieurs semaines, voire plusieurs mois.



Catamaran de voyage Tipaïrua (Tahiti).

l'observation directe : l'étoile n'est pas exactement dans la direction de l'île, le vent et le courant entraînent des dérives, l'azimut de l'astre varie au cours du temps, etc. La ligne directe entre le départ et l'île est connue, et l'art du pilote consiste à apprécier l'écart entre cette direction théorique et la route réelle, lorsqu'il navigue face au vent en tirant des bords. Il utilise notamment des astres guides à tribord et à bâbord, qui servent de garde-fous lorsque des nuages masquent les étoiles de l'avant ou de l'arrière. Le pilote expérimenté sait aussi reconnaître un astre qui apparaît seul au milieu d'un ciel voilé et l'utiliser pour maintenir son cap.

Certaines pratiques se sont perpétuées, mais leur secret est bien gardé. Par exemple, on utilise encore en Micronésie une méthode de navigation fort ancienne, caractérisée par le fractionnement de la route à suivre en plusieurs segments successifs, dénommés *etak*. Le navigateur a recours à un point de référence, réel ou imaginaire, situé au large de sa route. Ce point sert d'axe autour duquel pivotent les différents repères directionnels qu'il va successivement utiliser. Le premier azimut de référence du voyage est celui qui relie le point de départ à une certaine étoile se levant à l'horizon, en passant par le point pivot. À la fin du premier segment de route – *etak* –, le navigateur verra une deuxième étoile se lever à l'horizon, dans l'alignement du point de référence, et ainsi de suite.

Pour mémoriser ces routes maritimes, les navigateurs ont associé à chaque *etak* des images de la vie en mer – un banc de thons jaunes, un vol de frégates, un croisement de houles… L'ensemble constitue un récit de voyage ponctué d'événements réels ou imaginaires. Simplifiés et chantés en cœur par les équipages, ces récits rythment les efforts et marquent les principaux changements de cap, sans dévoiler aux non-initiés les secrets de la route maritime…

BIBLIOGRAPHIE

E. Desclèves, **Le peuple de l'Océan,** L'Harmattan, 2010.

M.-F. Péteuil, **Ciel d'îles,** *Journal de la Société des Océanistes*, 2003.

B. Finneys, **Voyagers into Ocean Space,** University of California Press, 1985.

J. Neyret, **Pirogues océaniennes,** Association des amis du musée de la Marine, 1976.

D. Lewis, **We, the Navigators,** University of Hawaï, 1972.

E. Dodd, **Polynesian Seafaring,** Dodd, Mead & Company, 1972.

A. Gerbault, **Un paradis se meurt,** Self, 1949.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

LOGIQUE & CALCUL

La maîtrise des nombres premiers

Comme l'eau et le feu, les polynômes et les nombres premiers se rencontrent et donnent naissance à un violent bouillonnement... mathématique.

Jean-Paul DELAHAYE

Les polynômes, tels $n \to 2n + 1$, $n \to n^2$, $n \to 5n^3 - 35n^2 + 11$, etc., sont les plus simples des fonctions. Ils représentent l'« ordre mathématique » et ce qui se calcule facilement. Parfois, ils servent d'échelle pour mesurer la difficulté des problèmes.

Les nombres premiers (2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, ...) se situent à l'opposé : ce sont des êtres mathématiques délicats, récalcitrants, incontrôlables, et dont la nature ne sera sans doute jamais entièrement élucidée. Il en résulte que la confrontation entre polynômes et nombres premiers ne peut que produire des idées stimulantes et soulever des problèmes passionnants et difficiles. C'est à ces sujets et à certains résultats nouveaux que nous consacrons cette rubrique.

Existe-t-il une formule polynomiale donnant les nombres premiers ? Une telle formule ne peut donner tous les nombres premiers, ni même ne donner *que* des nombres premiers. Les mathématiciens ont en effet démontré que : *Si un polynôme P(n) à coefficients entiers n'est pas constant, alors il existe une infinité de valeurs entières de n telles que P(n) n'est pas un nombre premier.*

Plus puissant, le résultat qui suit, démontré par Robert Buck en 1946, enlève tout espoir de faire produire uniquement des nombres premiers à une fonction polynomiale ou même à un quotient de fonctions polynomiales : *Si un quotient de deux polynômes à coefficients entiers P(n)/Q(n) donne des nombres dont la valeur absolue est première pour les valeurs entières de n, alors P(n)/Q(n) est constant...* et donc sans intérêt.

Un polynôme qui fait illusion

Ces résultats et quelques autres du même type montrent que les polynômes sont trop simples pour engendrer les nombres premiers. Ils ne contredisent pas le résultat suivant : le polynôme P de degré 25 à 26 variables *(voir la figure 2)* est tel qu'il y a identité entre l'ensemble des valeurs positives qu'il prend pour des valeurs entières de ses variables et l'ensemble des nombres premiers. En bref : ses valeurs positives sont les nombres premiers.

Ce polynôme construit en 1976 par James Jones, Daihachiro Sato, Hideo Wada et Douglas Wiens résulte du codage de la définition de l'ensemble des nombres premiers sous la forme d'un système d'équations, qui ensuite a été réduit à une seule équation. De tels codages sont possibles pour tous les ensembles de nombres dont on connaît un algorithme qui en calcule les éléments les uns après les autres. On sait produire ces polynômes grâce aux méthodes que Yuri Matiyasevich a élaborées pour la résolution du dixième problème de Hilbert et qui a conduit à l'affirmation : *Il n'existe aucun algorithme général pour connaître les solutions entières des équations de la forme* P = 0, *où* P *est un polynôme à coefficients entiers d'une ou plusieurs variables.*

Malheureusement, le polynôme de 1976 produit aussi des nombres négatifs qui ne



1. CONTRIBUTEURS à la théorie des nombres premiers mettant en jeu des polynômes. L. Euler (1707-1783, *a*) a montré que le polynôme $n^2 + n + 41$ donne des nombres premiers pour $n = 0, 1, 2, ..., 39$. A.-M. Legendre (1752-1833, *b*) s'est intéressé à $n^2 - n + 41$, qui donne des nombres premiers pour $n = 1, 2, ..., 40$. G. Dirichlet (1805-1859, *c*) a démontré le résultat conjecturé par Legendre : si *a* et *b* sont premiers entre eux, il existe une infinité de nombres premiers de la forme $an + b$. V. Bunyakovsky (1804-1889, *d*) a conjecturé que, sauf pour les cas faciles à repérer, toute formule polynomiale de degré 2 engendre une infinité de nombres premiers. S. Ulam (1909-1984, *e*) a trouvé des spirales où les alignements correspondent aux suites de nombres premiers. Y. Matiyasevich *(f)* a montré comment produire des polynômes dont les valeurs positives sont des

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

sont généralement pas l'opposé de nombres premiers. Pire, il est presque impossible de lui faire produire des nombres positifs sans comprendre la façon dont il a été construit. Par conséquent, si vous procédez au hasard, ne soyez pas étonné de ne tomber que sur des nombres négatifs et... composés !

En considérant l'expression :

$Q = 2 + (P - 2 + |P - 2|)/2$ qui vaut P quand $P > 2$ et 2 quand $P < 2$, on obtient une fonction qui est polynomiale à l'exception de l'utilisation de la valeur absolue. Cette expression « quasi polynomiale » ne donne que des nombres premiers et les donne tous, ce qui est assez remarquable. Malheureusement, elle donne 2 le plus souvent, et lui faire produire d'autres nombres premiers est aussi difficile que faire produire des nombres premiers à P : en procédant au hasard, vous tomberez presque toujours sur $Q = 2$.

En 2003, Nachiketa Gupta, de l'Université de Pennsylvanie, a étudié comment on peut produire des nombres premiers avec ce type de polynômes. Son mémoire de thèse se termine par le traitement du cas 2, c'est-à-dire par la détermination des valeurs des 26 variables qui permettent d'avoir $P = 2$.

L'existence du polynôme de Jone-Sato-Wada-Wiens, inutile en pratique, a une conséquence théorique intéressante. Il est possible de vérifier qu'un nombre n est premier en opérant au plus 87 additions et multiplications, car s'il l'est, il existe un jeu de valeurs pour les 26 variables du polynôme qui donne n.

En pratique, cependant, trouver les bonnes valeurs des 26 variables conduisant à n sera très long : contrairement à ce que pensent de nombreux mathématiciens, trouver une preuve courte est parfois un jeu inutile et maladroit.

Ce dernier point est confirmé par le résultat suivant, obtenu par des méthodes du même type. Si un système S de démonstration est donné (par exemple la théorie des ensembles de Zermelo-Fraenkel, système suffisant pour pratiquement toutes les mathématiques), alors on peut trouver un polynôme associé au système S tel que, quelle que soit la longueur de la démonstration d'une formule F de S, il existe une démonstration de l'affirmation que « F est un théorème de S » faisable en 100 additions et multiplications. Autrement dit, celui qui reste dans le système S est parfois obligé de faire de très longues démonstrations, mais celui qui calcule le polynôme associé à S dispose, lui, de la possibilité – théorique – d'établir tout résultat démontré par S à l'aide d'une série de 100 opérations arithmétiques au plus.

Ce jeu avec les polynômes a conduit récemment Christoph Baxa à écrire explicitement un polynôme à coefficients entiers dont les valeurs indiquent toutes les décimales du nombre e (ou du nombre π) qui se trouve donc codé par la donnée d'un nombre fini d'entiers.

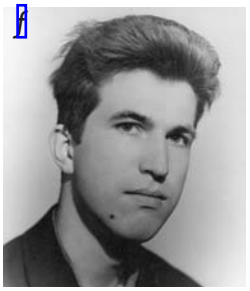
2. Le polynôme de Jones

$$P = (k+2)\{1-[wz+h+j-q]^2-[(gk+2g+k+1)(h+j)+h-z]^2-[2n+p+q+z-e]^2$$
$$-[16(k+1)^3(k+2)(n+1)^2+1-f^2]^2-[e^3(e+2)(a+1)^2+1-o^2]^2-[(a^2-1)y^2+1-x^2]^2$$
$$-[16r^2y^4(a^2-1)+1-u^2]^2-[((a+u^2(u^2-a))^2-1)(n+4dy)^2+1-(x+cu)^2]^2-[n+l+v-y]^2$$
$$-[(a^2-1)l^2+1-m^2]^2-[ai+k+1-l-i]^2-[p+l(a-n-1)+b(2an+2a-n^2-2n-2)-m]^2$$
$$-[q+y(a-p-1)+s(2ap+2a-p^2-2p-2)-x]^2-[z+pl(a-p)+t(2ap-p^2-1)-pm]^2\}$$

Des algorithmes polynomiaux

Puisque les polynômes sont des fonctions lentement croissantes (comparées aux fonctions exponentielles $n \to 2^n$, $n \to n!$, $n \to n^n$, etc.), la question de savoir s'il est difficile ou non de tester la primalité (c'est-à-dire la nature première ou non d'un entier) se formule ainsi : existe-t-il un algorithme indiquant si OUI ou NON l'entier n est un nombre premier, et dont le temps de calcul pour n est inférieur à la valeur d'un polynôme dont la variable est la longueur de l'écriture de n ? Plus brièvement : existe-t-il des tests de primalité polynomiaux ?

On a longtemps pensé que la réponse était positive, sans réussir à le démontrer. Ce n'est qu'en 2002 qu'une équipe de trois mathématiciens indiens, Manindra Agrawal, Neeraj Kayal, Nitin Saxena, a réglé le problème affirmativement en proposant un test


f


g


h


i


j

nombres premiers. T. Tao *(g)* a prouvé avec B. Green que pour tout entier k, il existe une infinité de suites arithmétiques de longueur k, composées uniquement de nombres premiers. R. Mollin *(h)* a généralisé le polynôme d'Euler et démontré, sous réserve d'une conjecture vraisemblable, que si M est un entier fixé (aussi grand qu'on le désire), il existe un entier k tel que le polynôme $n^2 + n + k$ donne des nombres premiers pour $n = 0, 1, 2, ..., M$. M. Agrawal *(i)* a prouvé avec ses collègues N. Kayal et N. Saxena qu'il existe des tests de primalité polynomiaux. Ch. Mauduit *(j)* a démontré avec J. Rivat que, dans les progressions arithmétiques de Dirichlet, il y a autant de nombres premiers dont la somme des chiffres de leur écriture décimale est paire, que de nombres premiers dont la somme des chiffres est impaire.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

3. Records de progressions arithmétiques de nombres premiers

Les trois nombres premiers les plus grands en progression arithmétique :
$9\,094\,283\,341\,425 \times 2\,666\,669 - 1 + n \times 32\,289\,41\,5\,560\,495 \times 2\,666\,666$ pour $n = 0, 1, 2$.

Le premier terme possède 200 701 chiffres décimaux. Cette progression a été trouvée en mars 2011 par David Broadhurst. Il est bien sûr plus difficile de trouver quatre nombres premiers en progression arithmétique que d'en trouver trois. Il y a donc aussi un record pour quatre, cinq, etc.

Les quatre nombres premiers les plus grands en progression arithmétique :
$1\,631\,979\,959 \times 225\,000 - 1 + n \times (164\,196\,977 \times 280\,000 - 1\,631\,979\,959 \times 225\,000)$ pour $n = 0, 1, 2, 3$.

Cette progression a été trouvée en 2010 par D. Broadhurst.

Les cinq nombres premiers les plus grands en progression arithmétique :
$(82\,751\,511 + 20\,333\,209 \times n) \times 16229\# + 1$ pour $n = 0, 1, 2, 3, 4$.

La notation $k\#$ désigne le produit de tous les nombres premiers inférieurs ou égaux à k (par exemple, $7\# = 2 \times 3 \times 5 \times 7 = 210$). Cette progression a été trouvée en 2009 par Ken Davis. Plus une progression arithmétique est longue, plus elle est difficile à découvrir. Même si l'on sait, grâce au théorème de B. Green et T. Tao, qu'il existe des progressions arithmétiques de nombres premiers de toute longueur, le record actuel n'est que de 26.

La plus longue progression arithmétique de nombres premiers :
$43\,142\,746\,595\,714\,191 + 23\,681\,770 \times 23\# \times n$ pour $n = 0, 1, 2, 3, \ldots, 25$.

Cette progression de 26 termes a été trouvée en 2009 par Benoît Perichon.

Pour une liste plus complète de tels records : http://users.cybercity.dk/~dsl522332/math/aprecords.htm

BIBLIOGRAPHIE

G. Tenenbaum et M. Mendès France, **Les nombres premiers, entre l'ordre et le chaos**, Dunod, 2011.

T. Tao, **Structure and randomness in the prime numbers**, dans D. Schleicher et M. Lackmann (éds.), *An Invitation to Mathematics*, Springer-Verlag, 2011 (http://terrytao.files.wordpress.com/2009/09/primes paper.pdf).

Ch. Mauduit et J. Rivat, **Sur un problème de Gelfond : la somme des chiffres d'un nombre premier**, *Annals of Mathematics*, vol. 171(3), pp. 1591-1646, 2010.

B. Green et T. Tao, **The primes contain arbitrarily long arithmetic progressions**, *Ann. of Math.*, vol. 167(2), pp. 481-547, 2008.

R. Crandall et C. Pomerance, **Prime Numbers : A Computational Perspective**, Springer-Verlag, 2005.

M. Agrawal *et al.*, **PRIMES is in P**, *Ann. of Math.*, vol. 160(2), pp. 781-793, 2004.

P. Ribenboim, **The Little Book of Bigger Primes**, Springer-Verlag, 2004.

M. Dietzfelbinger, **Primaly Testing in Polynomial Times**, Springer, 2004.

J.-P. Delahaye, **Merveilleux nombres premiers**, Belin/Pour la Science, 2000.

de primalité polynomial (*voir Pour la Science n° 303, janvier 2003, pages 98-103*).

Bien sûr, un algorithme dont le temps de calcul est un polynôme de degré 50 est moins intéressant qu'un algorithme dont le temps de calcul est un polynôme de degré 2. Une fois trouvé un test de primalité polynomial, le travail n'était donc pas terminé, et on a tenté d'obtenir des tests polynomiaux de degré aussi petit que possible.

L'analyse de l'algorithme des trois chercheurs indiens montre que leur test est de degré 12, ce qui est beaucoup. Mais en admettant une conjecture considérée comme probable, on établit que leur algorithme permet un test de degré 6.

On a d'abord trouvé une preuve, n'utilisant cette fois aucune conjecture, avec des polynômes de degré 11, puis 8. Une variante de l'algorithme a été proposée par Carl Pomerance et Henry Lenstra, et ils prouvèrent en 2005 que leur test est polynomial de degré 6. Une autre variante fut prouvée de degré 3, mais cette fois, sous réserve d'une conjecture assez risquée. Ce degré 3 ne doit donc pas être considéré comme acquis.

Enfin, un autre résultat établit que, sauf cas exponentiellement rares, la primalité est démontrable en temps polynomial de degré 4. On ne pense pas pouvoir faire mieux. Cela conduit à la conclusion suivante, probablement définitive : prouver qu'un entier n est premier exige un temps de calcul qui augmente comme un polynôme de degré 4 de la longueur de l'entier n auquel on s'intéresse.

Notons cependant que pour l'instant les algorithmes polynomiaux mis au point et prouvés tels ne sont pas aussi rapides que les anciens algorithmes (qui eux ne sont pas prouvés polynomiaux !). L'approche théorique n'est pas pour autant inutile, mais il faudra peut-être attendre un moment pour qu'elle ait des retombées pratiques.

Des suites arithmétiques

Abordons maintenant les suites arithmétiques de nombres premiers. Les plus simples des polynômes sont les formes linéaires : $n \to an + b$.

Nous avons vu qu'une telle expression ne donne pas des nombres premiers pour tout entier n (sauf si elle est constante et égale à un nombre premier). En revanche, il n'est pas interdit qu'elle donne une infinité de nombres premiers. L'une des plus simples questions liant nombres premiers et polynômes est ainsi celle de l'existence de paramètres a et b tels qu'il y ait une infinité de nombres premiers de la forme $an + b$ quand n prend des valeurs entières.

Bien sûr, il ne peut pas y avoir une infinité de nombres premiers de la forme $5n + 10$ puisque tout nombre de cette forme est multiple de 5 si n est entier. Plus généralement, si a et b sont multiples d'un même entier $k > 1$ (on dit qu'ils ne sont pas premiers entre eux), alors les nombres de la forme $an + b$ ne peuvent pas être premiers

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

plus de deux fois. La condition nécessaire est aussi suffisante. Si a et b sont premiers entre eux, alors il existe une infinité de nombres premiers de la forme $an + b$.

Ce célèbre résultat, conjecturé par Adrien-Marie Legendre, a été prouvé par Gustav Dirichlet en 1838. Depuis, beaucoup de travail a été fait pour préciser comment les nombres premiers se répartissent quand a est fixé et que l'on fait varier b. Par exemple, il est intéressant de comparer les nombres d'entiers premiers produits par les polynômes $4n + 1$ et $4n + 3$ quand n varie jusqu'à M.

Les deux formules sont aussi efficaces l'une que l'autre : le rapport du nombre d'entiers premiers produits par la première, sur le nombre d'entiers premiers produits par la seconde, tend vers 1 quand M tend vers l'infini. Un examen numérique de la question montre cependant que $4n + 3$ surpasse légèrement $4n + 1$. Donner un sens précis à cette domination et la prouver mathématiquement a été un long travail qui n'a abouti qu'en 1994, avec les résultats obtenus par Michael Rubinstein et Peter Sarnak, sous réserve de conjectures vraisemblables. Des détails sur ces compétitions numériques figurent dans la rubrique de mars 2010 (*Un terrain de course numérique*, *Pour la Science*, n°389, mars 2010).

Suites de Dirichlet : de beaux résultats

En 2010, Christian Mauduit et Joël Rivat, de l'Institut de mathématiques de Luminy, ont démontré un résultat attendu depuis longtemps sur les chiffres des nombres premiers dans des progressions arithmétiques de Dirichlet. L'une des conséquences, exprimée en langage simple, est la suivante : il y a autant de nombres premiers dont la somme des chiffres de leur écriture décimale est paire, que de nombres premiers dont la somme des chiffres est impaire. Le résultat se généralise dans toute base de numération. Il est valable aussi quand on s'intéresse aux nombres premiers (en nombre infini) dont la somme des chiffres vaut 0, 1, 2, ..., $k - 1$ modulo k.

Parmi les plus beaux résultats sur les suites arithmétiques de nombres premiers, le théorème de Ben Green et Terence Tao

4. Les polynômes de degré 2 et la spirale d'Ulam

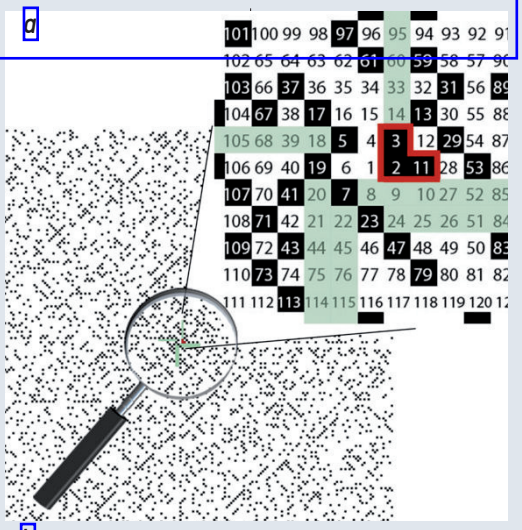
Le polynôme $n^2 + n + 41$ découvert par Euler donne des nombres premiers (distincts) pour $n = 0, 1, 2, 3, \ldots, 39$. Celui de Legendre, $n^2 - n + 41$, en donne pour $n = 1, 2, \ldots, 40$. Y a-t-il mieux ? La théorie indique que probablement oui, mais ne propose rien de concret. Ce sont les ordinateurs qui ont permis de faire mieux.

Voici ce que la recherche d'un polynôme de degré 2 donnant des suites de nombres premiers, pour des valeurs successives de sa variable, a donné.
G. Fung, 1988 : $47n^2 + 9n - 5209$ produit 43 nombres premiers, pour $n = -24, -23, \ldots, 0, 1, \ldots, 18$.
R. Ruby, 1988 :
$103n^2 + 31n - 3391$ produit 43 nombres premiers, pour $n = -23, -22, \ldots, 0, 1, \ldots, 19$.
R. Ruby, 1989 : $36n^2 + 18n - 1801$ produit 45 nombres premiers, pour $n = -33, -32, \ldots, 0, \ldots, 11$.

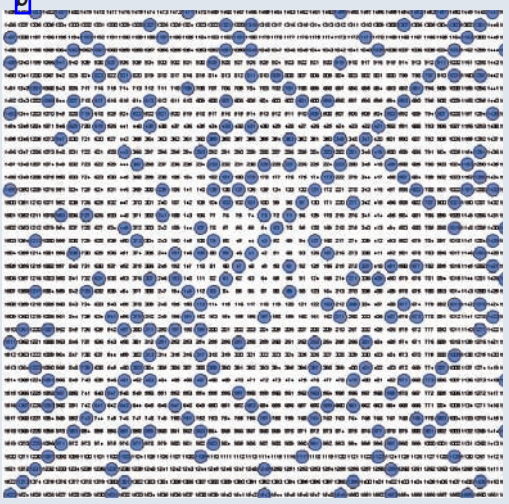
Les polynômes de degré 2 donnant beaucoup de nombres premiers expliquent en partie pourquoi dans la spirale de Stanislas Ulam *(a)* (les entiers écrits en spirale en noircissant les nombres premiers), on voit de nombreux alignements rectilignes diagonaux de points noirs. D'ailleurs, en faisant partir la spirale d'Ulam non pas de 1, mais de 41 *(b)*, les nombres premiers donnés par la formule d'Euler s'alignent.

Selon une variante de la spirale d'Ulam proposée par Jean-François Colonna, on dispose les entiers en spirale comme précédemment, puis on dessine autour de chaque entier n un cercle dont le rayon est proportionnel au nombre de diviseurs de n. Des alignements obliques apparaissent *(c)*, qui, cette fois, ne représentent plus les nombres premiers, mais les nombres ayant de nombreux diviseurs.

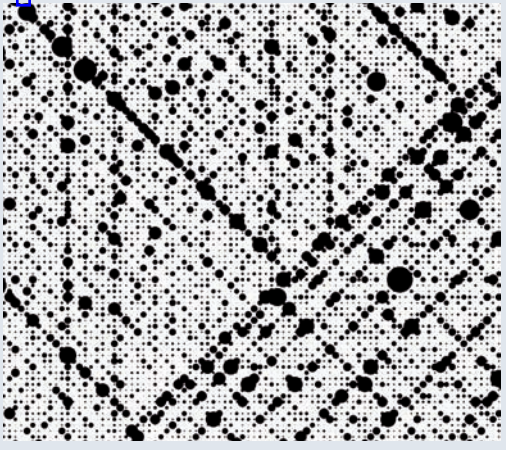
a



b



c

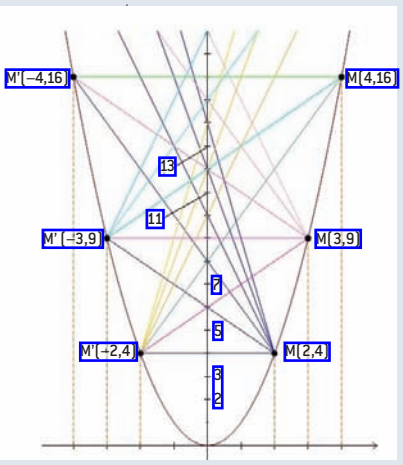


5. Un crible géométrique

Une des plus étranges façons de relier polynômes et nombres premiers a été proposée par Yuri Matiyasevich. À partir du simple polynôme $P(n) = n^2$, il explique comment un tracé de segments de droites conduit directement à l'ensemble des nombres premiers.

On part de la parabole $y = x^2$. On y repère les points d'abscisse entière ayant une valeur absolue supérieure à 2, à savoir les abscisses 2, −2, 3, −3, 4, −4, etc. Ce sont les points : M(2, 4), M'(–2, 4), M(3, 9), M'(–3, 9), M(4, 16), M'(–4, 16), etc.

On relie les points M avec les points M', ce qui donne des segments qui coupent l'axe O*y* en des points d'ordonnée entière. Le segment reliant M(n, n^2) et M'($-m$, m^2) coupe l'axe O*y* en (0, nm). De ce fait, tous les nombres composés sont traversés par au moins deux segments. Les nombres premiers apparaissent donc sur l'axe O*y* comme les points ayant une ordonnée entière et qui ne sont coupés par aucun segment. L'ensemble des nombres premiers a ainsi été déduit géométriquement du polynôme $P(n) = n^2$.



de 2004 indique que pour tout entier positif k, il existe une infinité de suites arithmétiques de longueur k composées uniquement de nombres premiers. On peut donc trouver des progressions arithmétiques de nombres premiers de toutes longueurs… cela même si on n'en connaît pour l'instant aucune de plus de 26 termes *(voir la figure 3)*.

En 2006, un perfectionnement des méthodes utilisées pour ce premier résultat a conduit T. Tao et Tamar Ziegler à l'énoncé remarquable suivant concernant les progressions polynomiales de nombres premiers : si $P_1, P_2, \ldots, P_n$ sont des polynômes sans terme constant (c'est-à-dire vérifiant $P_i(0) = 0$), alors on peut trouver un a et un b (et même une infinité de a et de b) tels que $P_1(a) + b$, $P_2(a) + b$, …, $P_n(a) + b$ soient tous des nombres premiers.

Avec $P_1(a) = a, P_2(a) = 2a, \ldots, P_n(a) = na$, on retrouve le résultat de B. Green et T. Tao qu'il existe des progressions arithmétiques de nombres premiers aussi longues qu'on le veut : $a + b$, $2a + b$, …, $na + b$.

Bien d'autres énoncés intéressants sur les suites polynomiales de nombres premiers en résultent. Par exemple, en prenant $P_1(a) = a, P_2(a) = a^2, \ldots, P_n(a) = a^n$, on obtient le résultat nouveau qu'il existe des suites de nombres premiers aussi longues qu'on le veut de la forme $a + b$, $a^2 + b$, …, $a^n + b$.

Ces résultats sont positifs : les mathématiciens savent trouver des nombres premiers ayant une forme donnée ou, au moins, réussissent à prouver qu'ils existent. Mais d'autres résultats sont moins brillants : nous restons bien ignorants des valeurs premières des polynômes les plus simples. Ainsi, bien que cela ait été conjecturé depuis longtemps, personne ne réussit à démontrer qu'il existe une infinité de nombres premiers de la forme $n^2 + 1$.

Un blocage pour $n^2 + 1$

Une conjecture de Viktor Bunyakovsky datant de 1857 affirme que, sauf si c'est impossible pour une raison simple *(voir plus bas)*, toute formule polynomiale de degré 2 engendre une infinité de nombres premiers. Selon cette conjecture, si $P(n)$ est un polynôme à coefficients entiers, alors deux cas sont possibles : *(a)* toutes ses valeurs sont multiples d'un entier $k > 1$; *(b)* $P(n)$ produit une infinité de nombres premiers.

Voyons deux exemples. Le polynôme $n^2 + n + 4$ ne donne que des nombres pairs (si n est pair, $n^2 + n + 4$ l'est aussi ; si n est impair, n^2 est impair et $n^2 + n + 4$ est alors pair), donc toutes ses valeurs sont multiples de 2 ; nous sommes dans le cas *(a)*.

En revanche, le polynôme $n^2 + 1$, pour les valeurs n = 1, 2, 3, 4, 5, donne 2, 5, 10, 17, 26 qui ne sont pas multiples d'un même nombre entier. D'après la conjecture de Bunyakovsky, nous sommes dans le cas *(b)* et le polynôme $n^2 + 1$ doit donner une infinité de nombres premiers.

Notons que la conjecture est démontrée dans le cas des polynômes de degré 1, car elle est alors équivalente au théorème de Dirichlet ; mais on ne sait la démontrer pour aucun autre polynôme. Pire, on ne sait même pas prouver que les polynômes qui, d'après la conjecture, doivent donner une infinité de nombres premiers, en donnent tous au moins un !

Parmi les cas délicats qui inquiètent sur la véracité de la conjecture, il y a le polynôme $n^{12} + 488\,669$ qui ne donne aucun nombre premier avant $n = 616\,980$.

L'AUTEUR



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

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

À l'origine de beaucoup de ces travaux se trouve la remarque formulée en 1772 par Euler que le polynôme n^2+n+41 donne des nombres premiers pour $n = 0, 1, 2, 3, ..., 39$. Legendre proposa en 1798 le polynôme n^2-n+41 qui donne des nombres premiers pour $n = 1, ..., 40$. Dans les deux cas, on a 40 valeurs consécutives d'un polynôme de degré 2 produisant un nombre premier.

Le polynôme d'Euler a l'avantage, sur celui de Legendre, qu'il peut se généraliser d'une étonnante manière. Richard Mollin a en effet prouvé que si M est un entier fixé (aussi grand qu'on le veut), il existe un entier k tel que le polynôme $n^2 + n + k$ donne des nombres premiers pour $n = 0, 1, 2, ..., M$. Autrement dit, si vous voulez un polynôme de degré 2 qui donne un million de nombres premiers quand la variable n va de un à un million, c'est possible et le polynôme peut avoir la forme très simple $n^2 + n + k$.

On doit formuler plusieurs réserves sur ce beau résultat de R. Mollin. Une fois encore, elles nous font prendre conscience que l'écart entre la théorie et la pratique est parfois très grand. D'une part, le résultat de R. Mollin est démontré en utilisant une conjecture assez forte qui généralise la conjecture des nombres premiers jumeaux (celle-ci affirme qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers espacés de 2, comme 11 et 13, 17 et 19, 41 et 43). Cette conjecture, même si elle est vraisemblable et bien testée expérimentalement, ne semble pas à la portée des mathématiques d'aujourd'hui et le résultat de R. Mollin reste donc incertain.

D'autre part, la constante k qu'il faut utiliser dans la définition du polynôme n^2+n+k prend des valeurs considérables si l'on veut que le polynôme donne beaucoup d'entiers premiers : pour obtenir plus de 40 nombres premiers, k doit dépasser 10^{18}. Enfin, et c'est le pire, la méthode de démonstration utilisée par R. Mollin n'est pas constructive : elle ne permet pas en pratique de trouver k !

Pour pallier ce défaut de la théorie qui nous suggère que sont vraies certaines choses qu'elle ne sait pas montrer, d'autres mathématiciens s'occupent de trouver « pour de vrai » des polynômes qui produisent beaucoup de nombres premiers. Leurs résultats, obtenus bien sûr à l'aide d'astucieux programmes informatiques et de longues heures de calcul, sont de nature variée : recherche de longues progressions arithmétiques de nombres premiers, recherche de polynômes de bas degré donnant beaucoup de valeurs premières consécutives ou une grande proportion de nombres premiers dans un intervalle, etc.

Comme ils ne réussissent pas à trouver de polynôme de degré 2 donnant plus de 43 nombres premiers différents pour des valeurs successives de n, les mathématiciens ont essayé avec des polynômes de degré 3 ou plus.

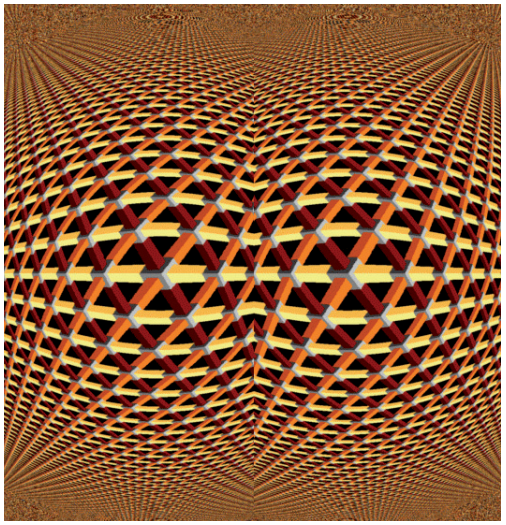
Au-delà du degré 2

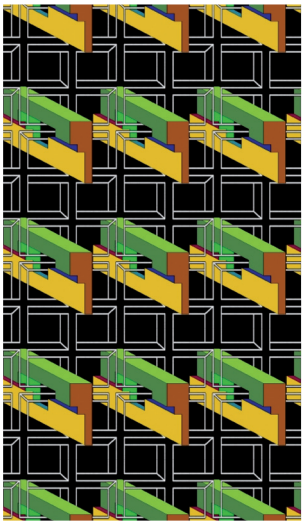
De nombreux records sont dus à F. Dress et B. Landreau. Pour le degré 3, le polynôme $66n^3 + 83n^2 + 13\,735n + 30139$ donne 46 nombres premiers différents pour $n = -26, -25, ..., 0, 1, ..., 18, 19$ (record en 2000). Degré 4, record en 2002 : le polynôme $3/4n^4+1/2n^3-4\,323/4n^2+34\,415/2n-62\,099$ donne 49 nombres premiers différents pour $n = -16, -15, ..., 31, 32$. Degré 5, record en 2002 : le polynôme $1/4n^5+1/2\,n^4-345/4\,n^3 + 879/2\,n^2 + 17\,500\,n + 70\,123$ donne 57 nombres premiers différents, pour $n = -27, -26, ..., 28, 29$. Degré 6, record en 2010 : $1/72\,n^6 + 1/24\,n^5 - 1\,583/72\,n^4 - 3\,161/24\,n^3 + 200807/36\,n^2 + 97973/3\,n - 11\,351$ donne 58 nombres premiers différents, pour $n = -45, -44, ..., 11, 12$. C'est le record absolu pour un polynôme de petit degré.

En augmentant le degré, on sait de façon certaine, grâce à un théorème de Lagrange, que l'on pourra obtenir des polynômes donnant autant de nombres premiers différents que l'on veut pour des valeurs consécutives de la variable.

Les mathématiciens combinent deux notions mathématiques difficilement miscibles et découvrent un trésor de problèmes et de résultats, quelques joyaux de pure théorie... et parfois des théorèmes illusoires. Ce trésor s'enrichit des trouvailles autorisées par les calculs colossaux sur ordinateur qui guident les mathématiciens dans leur exploration du monde des entiers.

FIGURES IMPOSSIBLES ET INFINIES





À la suite de l'article de mai 2011, Jean-François Colonna m'a proposé de nouveaux dessins infinis et impossibles *(ci-dessus à droite)*, dont plusieurs autostéréogrammes. Il me signale qu'il avait conçu l'idée des dessins impossibles infinis dès 1974 et en avait réalisé quelques-uns (voir son site Internet http://www.lactamme.polytechnique.fr/). Dominique Caudron m'a aussi envoyé des images impossibles infinies intéressantes. Il a en particulier réalisé le stéréogramme ci-dessus, à gauche, d'une figure infinie impossible (voir son site http://oncle.dom.pagesperso-orange.fr/art/index.htm).

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

ART & SCIENCE

Donner à voir les mathématiques

Une exposition se propose de rendre perceptibles les mathématiques et l'esprit de ceux qui les font : pour cela, mathématiciens et artistes se sont associés pour transformer des idées abstraites en œuvres d'art.

Loïc MANGIN

Comment rendre compte des mathématiques ? Comment concilier l'art avec la pensée abstraite des mathématiciens ? Comment représenter leurs idées, leurs intuitions, leur création ? La *Fondation Cartier pour l'art contemporain*, à Paris, à travers son directeur, Hervé Chandès, a voulu relever le défi. Il s'est tourné vers un lieu d'excellence de cette discipline, l'Institut des hautes études scientifiques (IHÉS), à Bures-sur-Yvette, pour réfléchir à une façon artistique d'exposer les mathématiques en restant au plus près d'elles. Il s'agissait d'instaurer un dialogue entre artistes et mathématiciens. Le résultat de cette collaboration est l'exposition *Mathématiques, un dépaysement soudain*, un titre qui reprend une expression du mathématicien Alexandre Grothendieck.

Six mathématiciens ont accepté de se prêter à l'exercice : sir Michael Atiyah, Alain Connes, Nicole El Karoui, Mikhaïl Gromov, Don Zagier et Cédric Villani. Les artistes sollicités, des habitués de la *Fondation Cartier*, sont les cinéastes Raymond Depardon, Claudine Nougaret et David Lynch, la chanteuse Patti Smith, la peintre Beatriz Milhazes, le plasticien Jean-Michel Alberola et, enfin, le photographe et sculpteur Hiroshi Sugimoto. Voyons comment ce dernier s'est emparé des mathématiques à travers une sculpture *(voir la figure a)* et une photographie *(voir la figure b)*.

Il échange depuis 2004 avec Jean-Pierre Bourguignon, directeur de l'IHÉS et commissaire de l'exposition à venir (avec l'astrophysicien Michel Cassé). À cette époque, H. Sugimoto présentait une série de 19 photographies prises au musée de l'Université de Tokyo. J.-P. Bourguignon avait rédigé les notices de chacune d'elles. De fait, certaines représentent des modèles stéréométriques en plâtre destinés à faciliter la visualisation de fonctions mathématiques complexes. Man Ray avait fait de même au début du XX^{e} siècle avec des objets conservés à l'Institut Henri Poincaré, à Paris.

Hiroshi Sugimoto sculpte avec des outils perfectionnés, tels des robots, pour accéder à la rigueur mathématique.

H. Sugimoto ne fait pas que photographier les objets mathématiques, il les sculpte aussi, à plus grande échelle. Pour ce faire, il utilise les outils perfectionnés d'aujourd'hui, tels des robots, pour coller au mieux à la précision et à la rigueur mathématiques du modèle. L'observation de la photographie et de la sculpture (de trois mètres de hauteur) révèle la différence. Le modèle mathématique illustré *via* ces deux médiums est une surface à courbure constante négative. Cet objet est défini par trois équations *(voir la figure c)* où x, y et z définissent l'objet dans l'espace à trois dimensions de la même façon que l'on peut définir une sphère (une surface) dans l'espace. Les paramètres u et v correspondent aux coordonnées nécessaires pour se repérer sur cette surface ; ils sont équivalents à la latitude et à la longitude utilisées sur une sphère.

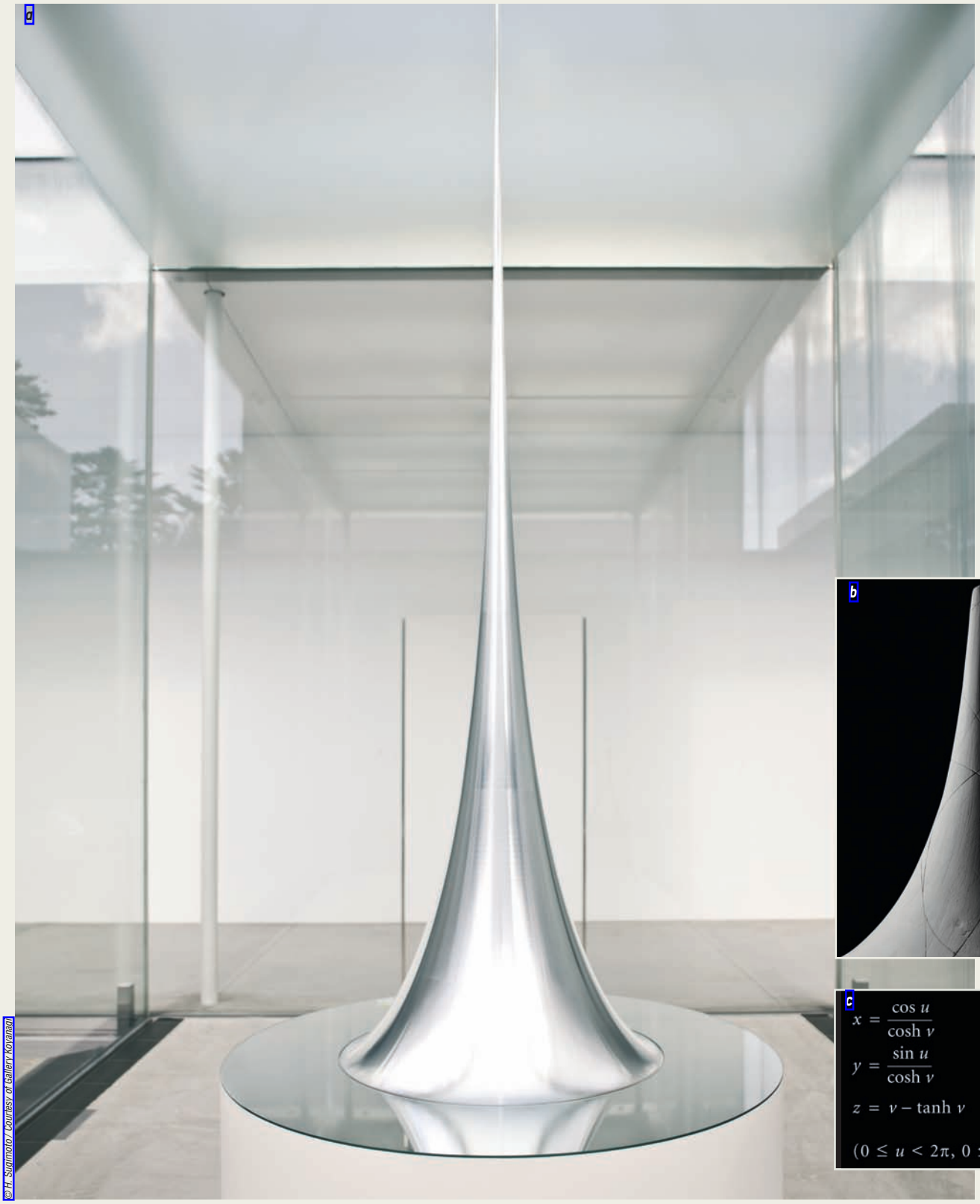
Cette surface est la représentation d'une géométrie dite hyperbolique, car sa courbure est négative en tout point. Cela se traduit, pour tout triangle donné, à une somme des angles inférieure à 180 degrés. Rappelons que sur un plan euclidien, cette somme est égale à 180 degrés et que sur une surface à courbure positive, par exemple sphérique, elle est supérieure à 180 degrés.

Que pourra-t-on voir encore ? À partir de la bibliographie de Henri Poincaré, J.-M. Alberola a conçu une carte du ciel mathématique où des « constellations » réunissent des références partageant des thèmes communs. D. Lynch a mis en scène le rez-de-chaussée du bâtiment à partir d'une intense correspondance avec M. Gromov. Ce dernier a notamment proposé l'idée d'une bibliothèque « idéale » rassemblant un choix personnel de livres, des classiques de l'Antiquité à ceux plus récents, tels les ouvrages de Richard Feymann. Sur une idée d'A. Connes, R. Depardon et Cl. Nougaret ont filmé plusieurs mathématiciens qui, en quatre minutes, expliquent leur rapport aux mathématiques, leurs idées… Et bien d'autres choses qui permettront d'accéder à la magie des mathématiques à travers l'esthétique ! ■

Mathématiques, un dépaysement soudain, à la Fondation Cartier, du 21 octobre 2011 au 19 février 2012. http://fondation.cartier.com

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

a



©H. Sugimoto / Courtesy of Gallery Kovanagi

b



c

$$x = \frac{\cos u}{\cosh v}$$

$$y = \frac{\sin u}{\cosh v}$$

$$z = v - \tanh v$$

$$(0 \leq u < 2\pi,\ 0 \leq v < \infty)$$

IDÉES DE PHYSIQUE

Juste une mise au point

Les appareils photo plénoptiques ouvrent la voie à des images qui sont nettes là où on veut, avec une mise au point effectuée après la prise de vue.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Une erreur de mise au point à la prise de vue et voici que le grâcieux visage, en partie dissimulé derrière les branches, est immortalisé flou sur la pellicule ou le capteur. Est-ce une fatalité des lois de la physique ? Des travaux récents montrent qu'il n'en est rien. Grâce à l'informatique, des idées datant de plus d'un siècle prennent vie dans de nouveaux appareils, où la capture optique de l'énergie lumineuse et des informations qu'elle transporte est complètement dissociée de la reconstitution, par le calcul, de la scène photographiée. Ces appareils permettent d'effectuer la mise au point sur la partie de la scène de son choix… après avoir pris la photo, et l'on parvient même à obtenir une photo nette partout !

Du sténopé à l'objectif classique

La crainte d'obtenir une image floue était inconnue de Nicéphore Niepce, le premier photographe. Une chambre noire percée à l'avant par un petit trou et équipée à l'arrière d'un dispositif sensible à la lumière, tel est le sténopé, un appareil photographique rudimentaire mais aux indéniables qualités. Idéalement, dans la limite d'un trou ponctuel, le sténopé réalise une projection sur un plan de l'espace situé devant le trou : à partir d'un point du paysage, un seul rayon lumineux traverse le trou et atteint le capteur *(voir la figure 1)*. Cette correspondance biunivoque assure que l'image (à l'envers), obtenue avec un très grand champ angulaire, sera nette partout, sans distorsion. Un rêve de photographe !

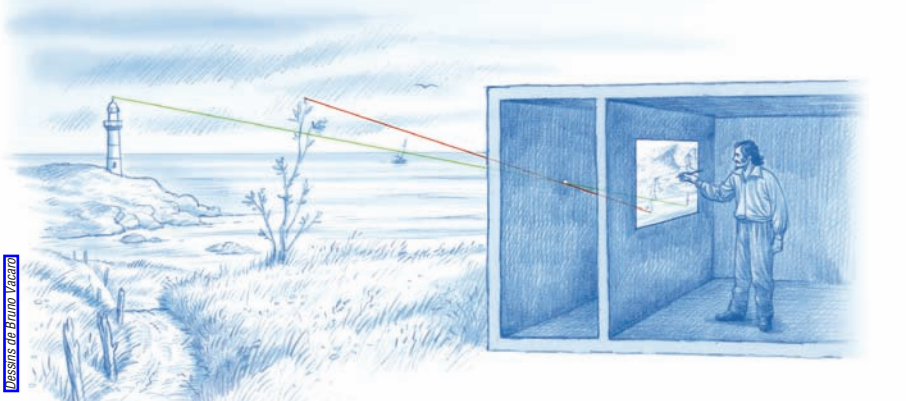
En pratique, des limitations surgissent. Le trou du sténopé doit être assez petit ; sinon, un point du capteur pourrait recueillir des rayons issus de différents points du paysage. Mais si le trou est trop petit, le phénomène de diffraction élargit le pinceau lumineux après le trou et forme sur le capteur une tache d'autant plus étendue que le trou est petit. La taille optimale, pour laquelle la taille du trou est égale à celle de la tache de diffraction, est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre pour des distances trou-capteur de quelques centimètres.

Or très peu de la lumière ambiante traverse un trou aussi petit. Si les capteurs actuels ne nécessitent plus d'attendre huit heures comme Niepce pour sa première photographie, les temps de pose sont forcément longs, souvent de plusieurs minutes… ce qui limite fortement l'utilisation du sténopé.

L'appareil photographique tel que nous le connaissons est une réponse à ce manque de lumière : l'objectif recueille sur une grande surface la lumière issue d'un point du paysage et la focalise en un point sur le capteur. Hélas, cette correspondance point par point n'est valable, pour une position donnée de l'objectif, que pour un seul plan du paysage, le « plan objet » *(voir la figure 2)*.

La lumière des autres éléments du paysage converge au-delà ou en deçà du capteur : sur ce dernier, les points hors plan donnent donc des taches et seul le plan objet est net sur l'image – en théorie. En pratique, il faut compter avec la taille des pixels et la résolution de l'œil. Une toute petite tache ne produit pas nécessairement une sensation de flou : aussi, c'est toute une zone autour du plan objet qui apparaît nette. La dimension de cette zone définit la « profondeur de champ ».

En réduisant l'ouverture de l'objectif, c'est-à-dire en fermant le diaphragme, le photographe élimine les pinceaux lumineux



Dessins de Bruno Vacaro

1. DANS UNE « CHAMBRE NOIRE », un petit trou, nommé sténopé, remplit le rôle de l'objectif. Pour chaque point source, il ne laisse passer qu'un seul pinceau lumineux. L'image, formée à l'envers, est alors nette partout. Mais le trou laisse passer très peu de lumière, d'où des temps de pose très longs. Des peintres exploitaient le procédé pour reproduire fidèlement une scène.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

les plus éloignés de l'axe et réduit la taille des taches sur le capteur ; cela améliore la netteté et accroît la profondeur de champ. En revanche, comme on collecte moins de lumière, il faut augmenter le temps d'exposition. On retrouve le compromis entre temps d'exposition (priorité à la vitesse, dans les appareils) et luminosité (priorité au diaphragme).

Des microlentilles pour récupérer l'information

Cependant, la netteté partout n'est pas irrémédiablement perdue. Gabriel Lippmann, physicien français et lauréat du Nobel, s'interrogeait déjà au début du XX^{e} siècle : comment la photographie peut-elle rendre la variété de la vue directe des objets ? Il a découvert une réponse : la photographie « intégrale » (1908), dite aujourd'hui plénoptique. Plutôt que de capter la lumière avec un objectif de grand diamètre, il s'agit de capter la même quantité de lumière avec plusieurs objectifs plus petits et de former autant de petites photos.

Quel est l'avantage de ce procédé ? Considérons un objectif classique et découpons par la pensée sa surface en une multitude de petites cellules. En sélectionnant avec un diaphragme la lumière passant par l'une de ces cellules, on obtient au niveau du capteur une photo nette, mais peu lumineuse. On peut alors interpréter la photographie obtenue avec l'objectif entier comme l'addition de ces multiples images.

Toutefois, comme chacune de ces images montre la scène d'un point de vue différent (c'est l'effet de parallaxe), les images additionnées ne sont pas identiques. Il est possible de les superposer parfaitement si tous les objets observés sont à la même distance ; ce n'est pas le cas s'ils sont à des distances différentes, et la moyenne introduit du flou.

Ces multiples images, avant qu'elles ne soient superposées, portent l'information de parallaxe. Elles permettent donc d'estimer la position des objets dans l'espace, comme on le fait en stéréoscopie binoculaire. Encore faut-il savoir récupérer cette information pour restituer une image nette. Lippmann avait imaginé dès 1908 comment réaliser cela de façon optique, mais les limites techniques, le coût et le soin nécessaire à chaque prise de vue étaient prohibitifs pour une grande diffusion.

En 1992, Edward Adelson et John Wang, deux chercheurs du MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts), ont ouvert la voie à la conception d'appareils photo plénoptiques guère plus encombrants que les appareils habituels, à condition de disposer d'algorithmes puissants de traitement

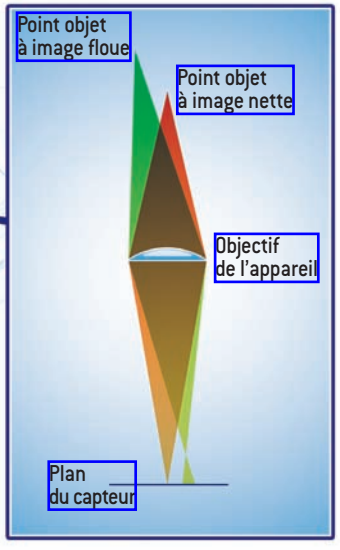
LES AUTEURS



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

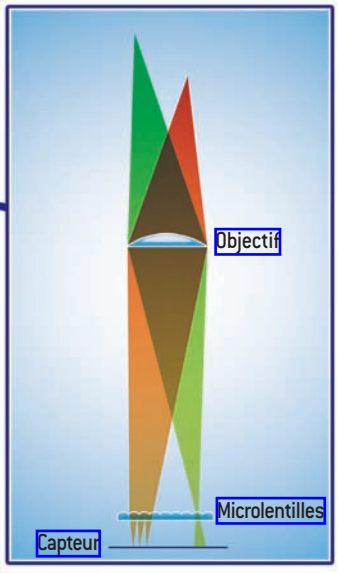
Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr





2. DANS UN APPAREIL PHOTO CLASSIQUE, la lumière issue de points sources situés à des distances différentes de l'objectif ne converge pas en des points situés sur le même plan. Le plan du capteur ne peut donc pas enregistrer une image qui soit nette partout. Le photographe doit choisir lors de la prise de vue la région qui doit être nette.





3. DANS UN APPAREIL PHOTO PLÉNOPTIQUE, un réseau de microlentilles est placé en avant du capteur. La lumière issue d'un point source n'est pas forcément focalisée sur le plan du capteur, mais l'information sur la position de ce point est contenue dans la répartition des pixels éclairés sur le capteur. Un traitement informatique des données permet alors, après la prise de vue, de construire une image nette à l'endroit souhaité, voire une image nette partout.

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

BIBLIOGRAPHIE

E. H. Adelson et J. Y. A. Wang, **Single lens stereo with a plenoptic camera**, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14(2), pp. 99-106, 1992.

M. G. Lippmann, **Épreuves réversibles. Photographies intégrales**, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, vol. 146(9), pp. 446-451, 1908.

Integral photography, a new discovery by professor Lippmann, *Scientific American*, p. 164, 19 août 1911 (voir http://www.tgeorgiev.net/).

de l'information. En pratique, au lieu d'utiliser un objectif composite, ils placent un réseau de microlentilles derrière un objectif classique *(voir la figure 3)*.

À chacune de ces microlentilles correspond sur le capteur un « macropixel » qui regroupe plusieurs pixels, typiquement 5 × 5. Par définition, la lumière d'un point net se focalise sur le capteur et n'éclaire que l'un de ces macropixels. Un point flou éclaire plusieurs macropixels, mais la lumière arrive sur chacun d'eux avec une inclinaison différente. C'est là qu'interviennent la microlentille et les pixels qui composent le macropixel : seuls certains d'entre eux sont éclairés, selon l'angle d'arrivée de la lumière. Connaissant la position et l'angle d'incidence des rayons, un calcul permet de reconstituer le trajet des rayons lumineux et d'obtenir l'image correspondant au plan de mise au point que l'on a choisi. Ou de réaliser une projection conique, pour laquelle toute l'image sera nette.

Adieu le flou : on prend la photo, puis on choisit là où on veut qu'elle soit nette ! En revanche, la résolution spatiale, donnée par le nombre de macropixels, est plus faible qu'en photographie numérique classique, puisque chacun est constitué de plusieurs pixels.

Aujourd'hui, plusieurs entreprises commercialisent des appareils photo plénoptiques. Les puristes regrettent la perte de définition, mais les performances s'améliorent et la Société allemande *Raytrix* annonce une résolution apparente variant entre un et trois mégapixels. La netteté partout, pour des images classiques ainsi que pour des images en trois dimensions, est ainsi à notre portée. Le rêve de Lippmann commence à se réaliser.



© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

AU FIL DES DU 5 OCTOBRE 2011 AU 2 JUILLET 2012

ARAIGNÉES

EXPOSITION AU JARDIN DES PLANTES



36 RUE GEOFFROY SAINT-HILAIRE — PARIS 5e — http://araignees.mnhn.fr

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM { Partagez les savoirs }

Entrée gratuite

UNE EXPO/DES DÉBATS

Lundi 17 octobre, 18h

Les relations hommes-araignées, idées reçues, phobies…

Antoine Pelissolo, psychiatre, Professeur des Universités Praticien Hospitalier (PU-PH),Christine Rollard, aranéologue, maître de conférences au Département de systématique et évolution du Muséum entourée de deux autres intervenants. Débat animé par Marie-Odile Monchicourt.

UN CHERCHEUR/UN LIVRE

Lundi 10 octobre, 18h

Archana. Les voyages d'une femme-araignée

Par Christine Rollard, aranéologue, maître de conférences au Département de systématique et évolution du Muséum entourée de deux autres intervenants.

MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 27 novembre, 15h

Aranéologue - Christine Rollard

Au Jardin des Plantes

Détails sur www.jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"

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

MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

La librairie POUR LA SCIENCE

Sélection spéciale « mathématiciens »



VIENT DE PARAÎTRE

Galois ■ Norbert Verdier

Dès son plus jeune âge, la vie d'Évariste Galois (1811-1832) est marquée par une passion démesurée pour les mathématiques. Ses travaux, incompris à son époque, marquent le début de la théorie des groupes et irriguent aujourd'hui de nombreux champs des mathématiques.

144 pages • 18 euros • ISBN 978-2-8424-5112-7

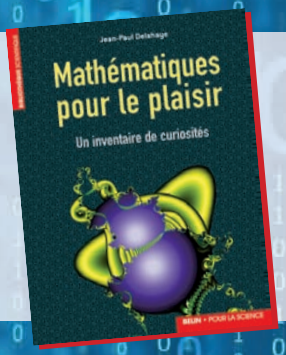


NOUVELLE ÉDITION ENRICHIE

Les mathématiciens ■ Collectif

« Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaia. D'Archimède à Jacques Hadamard, cet ouvrage dresse les portraits d'une vingtaine de mathématiciens, autant artistes que scientifiques.

280 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5109-7



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-2



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

Les auteurs retracent un épisode fascinant et dramatique de la création mathématique. Sur les traces de chercheurs russes et français du XXe siècle, ils nous éclairent sur les liens étroits entre science, religion et politique.

288 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5107-3

Des livres à découvrir en librairie et sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Mijotons

Certains plats sont meilleurs réchauffés : l'hydrolyse, c'est-à-dire la décomposition par l'eau, est un moteur essentiel de l'amélioration de certains produits.

Hervé THIS



Les plats réchauffés sont-ils toujours meilleurs ? En général, de telles... généralisations mènent à l'erreur : le poulet rôti réchauffé a un goût de carton ! Il est toutefois vrai que le réchauffage augmente la durée du traitement thermique, lequel agit sur les composés des aliments. Parmi les produits formés, certains ont du goût – soit parce que ce sont des composés hydrophobes et que, volatils, ils communiquent de l'odeur, soit parce qu'ils sont hydrophiles et contribuent à la saveur (certains ont de l'odeur et de la saveur : l'éthanol !). Et il y a ceux qui stimulent le système trigéminal (les piquants, les frais), qui donnent de la couleur, de la consistance... et aussi ceux qui ont une action sur la santé : des biochimistes belges viennent ainsi de découvrir la bioactivité de « bouillons de viande » longuement cuits.

La cuisson est le plus souvent un « traitement thermique en phase aqueuse » : traitement thermique, parce que l'on chauffe ; en phase aqueuse, parce que les tissus animaux et végétaux, qui font l'essentiel de nos aliments, sont principalement faits d'eau. Lorsque la température de cuisson dépasse 100 °C, la partie superficielle des tissus peut former une croûte et être pyrolysée, libérant une série de composés odorants, comme lorsqu'on fait un caramel ; en revanche, à l'intérieur de l'aliment, sous la croûte, la température reste inférieure à 100 °C, et le traitement thermique se fait en phase aqueuse.

Des processus d'hydrolyse (décomposition d'un corps par l'action de l'eau) ont lieu avec ces polymères abondants que sont les protéines ou les polysaccharides. Examinons d'abord les végétaux, dont les tissus sont des assemblages de cellules, cimentées par la paroi cellulaire. Cette dernière est faite de cellulose, très inerte chimiquement, et de pectines qui, elles, s'hydrolysent, libérant dans le milieu aqueux environnant des « maillons » tels que l'acide galacturonique et divers autres saccharides. Ces petites molécules ont des saveurs, qui enrichissent celle du mets initial !

Dans certains végétaux, l'amidon ajoute sa contribution, comme le montre la vieille expérience de détection des sucres qui fait usage de la « liqueur de Fehling » (un mélange de sulfate de cuivre, de tartrate de sodium et de potassium, et d'hydroxyde de sodium) : avant cuisson, des pâtes dans l'eau laissent ce réactif d'un beau bleu profond, mais après une cuisson de quelques dizaines de minutes, la liqueur de Fehling vire au rouge, révélant la présence du glucose libéré par l'hydrolyse des constituants de l'amidon.

Pour les viandes, le tissu collagénique qui gaine les fibres musculaires des tissus animaux et les regroupe en faisceaux est une sorte de... non-tissé, les fibres de collagène étant associées faiblement. Lors d'une cuisson, elles se séparent et se dissocient dans la solution environnante, libérant d'abord les trois brins qui constituent chaque molécule de la protéine. Surtout, ces brins sont hydrolysés, ce qui libère des fragments de tailles variées, les plus petits étant des acides aminés, souvent très sapides.

Parmi les fragments plus gros figurent des peptides, dont on découvre la bioactivité. À l'Université de Gand, Griet Herregods et ses collègues ont ainsi montré que certains peptides issus de l'hydrolyse du collagène, modifiés par des enzymes telles que nous en avons dans le système digestif, réduisent la tension artérielle. Évidemment, les biochimistes ont alors cherché quels tissus engendrent la plus grande activité biologique et, mieux, quels peptides sont responsables de cette activité. Les peaux de bovins semblent particulièrement actives... mais les cuisiniers doivent laisser de telles matières à la pharmacie !

La cuisine est une « chimie verte ». Des composés comestibles, des traitements en phase aqueuse, aucun solvant organique... L'expérience la plus démonstrative est sans doute celle qui consiste à chauffer pendant une journée l'acide galacturonique, la brique du collagène. Ce composé, une poudre blanche, forme une solution limpide, transparente, incolore ; après chauffage, la solution est d'un brun soutenu, avec un goût puissant ! De même, le chauffage dans l'eau du fructose que l'on peut récupérer par cuisson d'un sirop de sucre (saccharose) engendre, en plus du glucose, de l'hydroxyméthylfurfural. La réaction est longue... mais le composé formé a un goût puissant de caramel.

Cuisons donc longtemps, mijotons, pour notre santé et, surtout, pour notre plaisir.



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

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

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

➜ CLIMAT

Climat : le vrai et le faux

Valérie Masson-Delmotte
Le Pommier, 2011
(203 pages, 19,90 euros).

Dans ce petit ouvrage, Valérie Masson-Delmotte développe un argumentaire qui étaye les thèses du GIEC sur l'origine anthropique du réchauffement climatique. Le titre et l'avant-propos appellent à la lecture : « Nous avons souhaité exposer les faits, les certitudes et les incertitudes, et faire le point sur un certain nombre d'idées reçues. » La conclusion – « Tout reste à faire » – ouvre de vastes perspectives pour les sciences du climat et pose des questions fondamentales. La première partie, la plus scientifique, est axée sur la compréhension et la prévision des changements climatiques. La seconde présente deux « défis politiques » : quelles actions mener pour limiter les effets du changement climatique ? Quelles mesures proposer pour s'adapter aux changements inévitables ?

On en retire plusieurs certitudes, telle l'existence d'un net réchauffement climatique depuis la fin du XIXe siècle et, depuis une trentaine d'années, d'une augmentation accrue de la température, bien corrélée aux prédictions des modèles fondés sur l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Plusieurs encadrés intitulés « Idées reçues » sont l'occasion de commenter des points soulevant des objections de la communauté scientifique, tel le rôle du Soleil sur le réchauffement actuel.



On attendrait du titre une présentation plus équilibrée des faits scientifiques, ne serait-ce que par la présence en fin d'ouvrage de références à des publications ou à des sites Internet non totalement acquis à la thèse défendue. Malgré quelques remarques de bon sens montrant un réel souci de distinguer entre « le vrai et le faux », ce livre prend souvent l'allure d'un procès à charge contre les détracteurs des thèses favorables à une origine anthropique du réchauffement climatique.

Une autre faiblesse pour un ouvrage de communication scientifique est le développement trop excessif de la partie portant sur les « défis politiques ». Tablant sur une volonté de ne pas tomber dans le catastrophisme, examinant de façon critique plusieurs solutions préconisées pour recourir aux énergies renouvelables, l'auteur met son espoir dans le développement de nouvelles voies de production d'énergie nucléaire avec la fusion, et préconise une meilleure gestion des ressources pour réduire l'émission des gaz à effet de serre.

Pris comme un plaidoyer sur l'origine anthropique du changement climatique récent, cet ouvrage est à recommander à tous ceux qui souhaitent disposer d'une présentation concise des arguments scientifiques étayant le rôle des rejets de gaz à effet de serre sur le réchauffement climatique.

➜ Michel Cara
Université de Strasbourg

➜ HISTOIRE DES SCIENCES

La Terre, des mythes au savoir

Hubert Krivine
Cassini, 2011
(290 pages, 26 euros).

Quelle bonne idée que de traiter de l'évolution des conceptions sur la Terre ! Hubert Krivine examine l'évolution des idées sur l'âge et le mouvement de la Terre de l'Antiquité à nos jours. Le sujet est traité avec soin et intelligence : H. Krivine a la sagesse de ne pas trop en demander au lecteur, qui pourra lire les annexes pour une analyse quantitative de certains aspects, lesquels manifestement plaisent à l'auteur (toujours professera un professeur). Le livre est limpide et j'ai été ébloui par la simplicité et la concision de l'explication des mesures du diamètre de la Lune, puis de son éloignement et, partant, de l'éloignement du Soleil et de son diamètre. Les Grecs n'étaient pas que de froids raisonneurs, mais aussi de bons observateurs et ils tiraient parti avec talent de leur géométrie. Le style de H. Krivine, dépourvu de facétie, est d'une pureté scientifique absolue.

Une grande partie du livre traite des rapports de l'Église avec la science naissante. Ce serait une litote que de dire que l'opposition de l'Église à ce qui pouvait contredire une version de la Bible ne fut pas favorable à la divulgation de la science.

Nous gémissons avec l'auteur du supplice infligé à Giordano Bruno (lequel avait osé contester la position centrale de notre Terre). Nous nous insurgeons contre la persistance de l'Église a reléguer l'infortuné dans l'enfer du mal : les papes se sont opposés à l'érection de la statue romaine actuelle de Bruno après avoir détruit la première. Nous sourions à la contradiction selon laquelle Dieu n'a fait le Soleil qu'au troisième « jour » : qu'était un jour avant la création du Soleil ? Nous nous étonnons quand Newton passe du temps à calculer l'âge de la Terre en additionnant les âges des acteurs de la généalogie biblique (Mathusalem, 969 années de vie, son fils Lamech, 777 ans !). Nous pensons que la croyance au déluge a inspiré le catastrophisme de Buffon, partiellement justifié depuis.



Les scientifiques doivent lutter pour élucider le fonctionnement de la nature et quand ils ont soulevé un coin du voile, lutter contre les préjugés de leur temps. Au temps de Galilée et de Copernic, la Bible était la référence qu'il était périlleux de contredire. Reposons la question : cela a-t-il retardé les progrès scientifiques ? Pas nécessairement : les progrès de l'imprimerie ont diffusé la Bible, et les intellectuels avaient ainsi au moins une base à réfuter. Faut-il prendre la Bible au pied de la lettre ? La question est toujours ouverte dans certains milieux. H. Krivine présente avec lucidité et honnêteté les arguments des tenants de la Bible, lesquels affirment que Dieu nous oblige à croire, car il n'a pas la patience d'attendre que nous comprenions : il est vrai que nos progrès sur le comment sont immenses, et sur le pourquoi très ténus…

© Pour la Science - n° 408 - Octobre 2011

Merci H. Krivine de votre excellent livre, dont chacun tirera quelques pépites et une vue enrichie des progrès de nos connaissances sur la Terre.

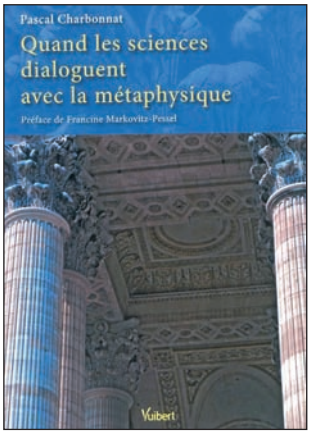
→ Philippe Boulanger

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Quand les sciences dialoguent avec la métaphysique

Pascal Charbonnat
Vuibert, 2011
(218 pages, 27 euros).

C'est l'histoire d'un divorce. Celui de la science et de la théologie. Il a mis des lustres à se conclure, mais le XVIIIe siècle constitue le moment névralgique de cette séparation. Comme nous le raconte Pascal Charbonnat dans ce livre, c'est en effet au cours de cette époque que les savants, du moins bon nombre d'entre eux, ont



réussi à s'extirper de l'emprise de la théologie. Cela n'a pas été facile. Il a bien sûr fallu composer avec une Église prompte à condamner les œuvres qui s'affranchissaient d'une interprétation littérale de la Bible. Mais, sur un plan conceptuel, la séparation n'a pas été aisée non plus. De fait, comment aborder la question de l'origine sans référence à une cause première, identifiée au Dieu de la Genèse ?

Nonobstant ces difficultés, le désir d'expliquer la formation du globe terrestre et des êtres vivants sans recourir à une cause transcendante devient de plus en plus pressant au XVIIIe siècle. Pour fonder cette science autonome, les savants de l'époque peuvent prendre modèle sur la physique newtonienne, qui est parvenue à se passer de Dieu pour expliquer le mouvement des corps. Serait-il possible de faire de même pour leur formation ? La doctrine de la préexistence des germes, qui explique le développement embryonnaire par le déploiement de structures préexistantes dans l'œuf, va dans ce sens. Elle présente l'avantage de limiter l'action divine à la production des premiers germes. Mais n'est-ce pas déjà trop concéder pour une science qui se veut vraiment autonome ?

Il va donc y avoir un affrontement entre, d'un côté, ceux qui cherchent à concilier références théologiques et explications mécaniques et, d'un autre côté, ceux qui ne tolèrent pas ce type d'intrusion métaphysique dans leurs explications. Ce second camp doit encore être divisé entre ceux qui adoptent un matérialisme métaphysique et ceux qui se contentent de prôner un matérialisme méthodologique. Alors que les premiers cherchent à anéantir l'idée d'origine divine, les seconds la tolèrent tant qu'elle n'intervient pas dans les explications.

À travers une analyse serrée de toutes ces prises de position, P. Charbonnat souligne les mérites de cette seconde stratégie propice au développement des premières théories de la formation des corps. Il en tire même une leçon : en science, il n'y aurait point de salut en dehors de cette « abstinence métaphysique ». De quoi éclairer les débats récurrents concernant les relations entre science et religion.

→ Thomas Lepeltier
Université d'Oxford

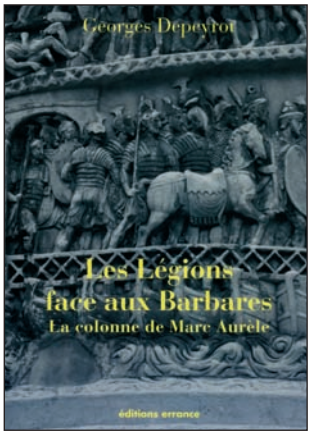
→ ARCHÉOLOGIE

Les Légions face aux Barbares

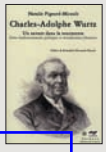
Georges Depeyrot
Errance, 2011
(235 pages, 28 euros).

L'originalité de ce livre tient à la fois à son sujet et à sa conception. Pour en comprendre le propos, il faut rappeler que l'empereur stoïcien Marc Aurèle (161-180) mena des guerres longues et dures contre des peuples qui vivaient au Nord (Germains) et au Nord-Est (Sarmates) du Danube ; il mourut de la peste alors qu'il commandait ses armées. Les exploits accomplis furent gravés sur une colonne de 29,60 mètres, installée dans la partie Nord du Champ de Mars, à Rome.

Alors que, par tradition, on attribue ces campagnes aux années 172-173 et 174-175, Georges Depeyrot a choisi une autre chronologie : 174, 175 et 178-180. Après une courte présentation générale, l'auteur découpe le récit continu – une vraie bande dessinée sans



Brèves



CHARLES-ADOLPHE WURTZ. UN SAVANT DANS LA TOURMENTE

Natalie Pigeard-Micault
Hermann, 2011 (170 pages, 24 euros).

Des tourmentes, ce chimiste reconnu en a traversé : querelle sur l'existence de l'atome, chute du Second Empire, guerre de 1870, Commune de Paris, mouvements étudiants, lutte des femmes pour accéder à l'enseignement supérieur… Doyen de la Faculté de médecine de 1866 à 1876, il est aux premières loges. C'est son histoire que raconte ce livre, offrant un regard nouveau et passionnant sur cette période mouvementée.



LES DÉCHETS NUCLÉAIRES : ÉTAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES

Bernard Bonin (coord.)
EDP science, 2011
(293 pages, 34 euros).

Qu'est-ce qu'un déchet nucléaire ? Comment le traite-t-on, le transporte-t-on, l'entrepose-t-on ? Quelles stratégies sont envisagées pour le futur ? Telles sont les questions auxquelles ce livre, rédigé par des spécialistes, répond en détail. Un point de vue indispensable pour comprendre le débat actuel.

POLITIQUE DE SANTÉ ET PRINCIPE DE PRÉCAUTION



A. Aurengo, D. Couturier, D. Lecourt, Cl. Sureau, M. Tubiana (sous la dir.)
PUF, 2011
(192 pages, 32 euros).

Toute action médicale présente un risque. Comment, alors, appliquer le principe de précaution à la santé sans tomber dans la suspicion, voire l'abstention systématique ? Dans cet ouvrage, juristes, philosophes, médecins et sociologues proposent des pistes de réponses.

Brèves

SORTIR DE L'EAU



P. Corvol et J.-L. Elghozi (dir.)
Odile Jacob, 2011
(240 pages, 28,90 euros).

Cet ouvrage propose une analyse du passage de la vie aquatique à la vie terrestre. Les grands spécialistes rassemblés par ses directeurs éclairent ainsi tant nos évidentes origines marines, que leurs conséquences physiologiques, voire psychiques. Leurs textes restent accessibles malgré un niveau très soutenu, notamment en biologie.



CORENT

Matthieu Poux (dir.)
Errance, 2011
(288 pages, 34 euros).

Corent, vous connaissez ? Non, et pourtant, cet oppidum situé non loin du site de la bataille de Gergovie, pourrait avoir été la capitale des Arvernes. C'est en effet un cas spectaculaire de culture urbaine gauloise que documente ce bel ouvrage. Les principaux résultats des fouilles menées sur place au cours des années 2000 y sont expliqués et illustrés. Le rôle de Corent, qui pourrait n'avoir été qu'une partie d'un vaste ensemble urbain arverne comprenant Gergovie, y est discuté.

GUYANE. MILIEUX, FAUNE ET FLORE



Pierre Charles-Dominique
CNRS Éditions, 2011
(224 pages, 35 euros).

La Guyane française : une nature exubérante et variée, par ses milieux comme par les espèces qui les peuplent. Cet ouvrage remarquable, rédigé par un spécialiste, offre un panorama pointilliste et richement illustré de l'écologie de cette région amazonienne, avec ses animaux et ses végétaux. Truffé d'exemples et d'étonnantes curiosités, il passionnera tant les amateurs de nature que les scientifiques.

légendes – en une série de scènes. On voit l'armée romaine partir, prendre une ville, libérer des camps assiégés par les barbares et leur livrer bataille, ce qui provoque leur soumission (174). La deuxième campagne semble une suite de victoires pour les légionnaires (175). Les dernières saisons de guerre sont marquées par des raids, des marches et, évidemment, des victoires (178-180).

Ces guerres furent pourtant dures et les sculptures en apportent deux preuves. D'une part, le traitement des personnages traduit un fort sentiment de tragique. Il n'est pas sans évoquer la célèbre statue équestre de Marc Aurèle qui se trouve encore sur le Capitole. D'autre part, les dieux durent intervenir dans les batailles par des « miracles ». Le plus connu de ces phénomènes est le miracle de la pluie, revendiqué à la fois par les païens et par les chrétiens : alors que l'armée errait dans une vaste plaine au milieu de l'été, les puits avaient été empoisonnés par des charognes. Une pluie, anormale en cette saison, lui apporta le salut.

La principale difficulté de cette enquête vient de ce que les images ne sont pas accompagnées de texte ; il faut donc les interpréter, ce qui peut toujours donner matière à débat. Et la discussion portera sur deux points, la chronologie, nous l'avons vu, et l'identification des personnages. Il est difficile, par exemple, de dire si des soldats portant la cotte de mailles sont des prétoriens ou des auxiliaires. Nous ajouterons que les photographies ne sont pas toujours claires ; mais les sculptures elles-mêmes ne le sont pas toujours, elles non plus. En dépit de ces difficultés, l'ouvrage ne peut pas ne pas intéresser les lecteurs.

→ Yann Le Bohec
Université Paris IV-Sorbonne

→ SOCIOLOGIE-ÉCOLOGIE

L'homme contre le loup

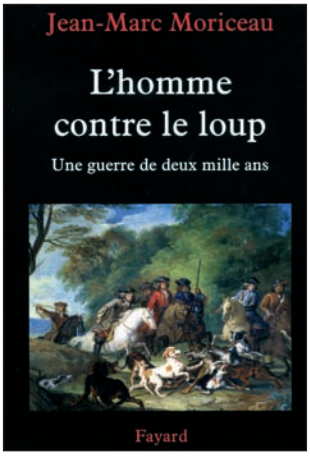
Jean-Marc Moriceau
Fayard, 2011
(479 pages, 26 euros).

Comme dans son précédent ouvrage, *Histoire du méchant loup, 3000 attaques sur l'homme en France* (Fayard, 2007), l'auteur, historien et professeur d'université, étudie les rapports de l'homme et du loup au fil des siècles. Son approche est cette fois centrée sur la société et sa politique de gestion des loups, depuis l'Antiquité jusqu'à l'époque contemporaine.

Le loup est probablement l'animal qui suscite encore de nos jours les réactions les plus contrastées pour ou contre lui. Comme le précise l'auteur, les représentations de la société se heurtent à la difficulté d'intégrer l'évolution de son statut d'espèce nuisible à espèce protégée en 50 ans.

L'auteur est immergé dans les représentations de la société rurale traditionnelle, dont il retrace particulièrement bien les conditions de vie, en particulier sous l'Ancien Régime. Sa démonstration s'efforce notamment de comprendre le renversement du statut du loup dans une société en mutation.

Toutefois, malgré une approche qui se veut impartiale, l'auteur nous livre davantage un procès à charge contre le loup qu'une étude objective. D'une part, le ton de l'ouvrage est sans nuances : il traite de « ponctions brutales sur l'élevage », ou affirme en introduction que « le loup est le seul animal sauvage à avoir maintenu, sur



plus de 2000 ans, un système de prime de destruction ». Cette affirmation n'est nuancée qu'en fin d'ouvrage, où l'on découvre que les primes ont été mises en place de manière hétérogène dans l'espace et le temps, et n'ont été décisives qu'à partir de 1882.

D'autre part, l'ouvrage fait largement référence aux « 3000 attaques sur l'homme » recensées par les équipes de recherche de l'auteur. Il s'agit de 3000 événements imputés au loup. Sans nier l'évidence de drames liés à ce prédateur au cours de l'histoire, il est surprenant de ne retrouver aucune des études suggérant que des hommes ont pu être à l'origine de meurtres camouflés en attaques de loups. Ce travail d'historien manque de l'éclairage de données scientifiques, notamment d'écologues, sur le loup et sur les faits rapportés.

L'ouvrage n'en constitue pas moins une somme impressionnante d'informations tant sur la vie dans les campagnes que sur la perception du loup au fil des siècles.

→ Vincent Vignon
Office de génie écologique, Saint-Maur-des-Fossés

.fr 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 – OCTOBRE 2011 – N° d'édition 077408-01 – Commission paritaire n° 0912K82079 –
Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/167396 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.