ASTROPHYSIQUE
La matière noire guide les galaxies

BOTANIQUE
Le pommier raconté par ses genes

TECHNOLOGIE
Drones : la menace du piratage

POUR LA SCIENCE

NOUVELLE FORMULE

SCIENCE

Mai 2014 - n° 439

a s c i e n c e . f r

Edition française de Scientific American

Le proton défie les physiciens

Deux mesures inconciliables de son rayon

M 02687 - 439 - F: 6,20 € - RD

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

Un événement

Cosmetic Valley France

COSMETIC & SENSORY

Des neurosciences au marketing : la parole aux experts

23 & 24 JUIN 2014
NOUVEL OLYMPIA, TOURS

SENSORY 2014

le seul rendez-vous dédié au monde du sensoriel

toutes les facettes du sensoriel discutées : neurophysiologie, émotions et prises de décisions, perceptions sensorielles, analyse sensorielle, comportements des consommateurs, design sensoriel, neuromarketing, analyse big data, nouvelles technologies sensorielles …

4 THEMATIQUES CENTRALES :

RECHERCHE & SENSORIEL / MARKETING & SENSORIEL
CONSOMMATEUR & SENSORIEL / DESIGN PRODUIT & SENSORIEL

+ de 400 participants attendus : R&D, recherche académique, designers, marketing, publicitaires ..

+ de 30 conférences académiques et industrielles : Alstom, Renault, Brain Impact, Diasonic, Cerveau & Psycho, Dior, CGP-Etiqroll, École de Biologie Industrielle, École Normale Supérieure, École des Mines, Inserm, Quinten, L'Oréal, Pierre Fabre, RCP Design Global, Symrise, TheFamily, Université de Genève, Université de Tours.

programme complet sur
www.sensory2014.com

contact@sensory2014.com

PARTENAIRE

Communauté d'agglomération Tour(s)plus

SOUTENU PAR

Société Française de Cosmétologie · cap-digital · Techni'Sens · EMOSPIN · CCI Touraine · 2014 année de l'innovation

MEDIAS

Cerveau & Psycho · abc-luxe.com Le portail des professionnels du luxe ©

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice de la rédaction : Françoise Pétry
Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteur : Sébastien Bohler
L'Essentiel Cerveau & Psycho
Rédactrice en chef adjointe : Bénédicte Salthun-Lassalle
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe
Directrice artistique : Céline Lapert
Secrétariat de rédaction/Maquette : Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove
Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne assistée d'Olivier Lacam
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 :
Sébastien Balibar, François Biraben, Jérôme Bourjea, Patrick Cordier, Jean Dalibard, Sylvie Demouchy, Evelyne Host-Platret, François Képès, Yvan Pandelé, Christophe Pichon, Serge Planton, Jean-Pierre Rouet, David Ruelle, Bruno Sicardy, Gabriel Tobie

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

Commande de livres ou de magazines :
Pour la Science 628 Avenue du Grain d'Or 41350 Vineuil

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

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.
Editors : Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek.
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

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

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

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2013

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Erreurs ou anomalies ?

L'erreur peut être mentale, l'individu confondant « l'apparence de la vérité avec la vérité elle-même », selon l'expression du philosophe Emmanuel Kant (1724-1804). Elle peut aussi être expérimentale. L'anomalie, dans son acception courante, est une exception à la règle, un écart à la normalité. L'une comme l'autre doivent être testées par de nouvelles expériences. Alors seulement, on sait s'il faut revoir la théorie. Selon le philosophe et homme d'État Ciceron (–106 à –43) : « C'est le propre de l'homme de se tromper ; seul l'insensé persiste dans son erreur. » À condition qu'elle soit corrigée, l'erreur fait partie du processus permettant d'établir la vérité.

Les anomalies en sciences ne sont pas exceptionnelles. Elles soulèvent des questions auxquelles les scientifiques tentent de répondre. En physique, par exemple, deux expériences récentes fondées sur des méthodes différentes livrent deux valeurs du rayon du proton *(voir Le proton, un problème de taille, page 28)*. Anomalie ? Erreur ? Anomalie, l'écart ayant été confirmé. Aujourd'hui, le problème reste ouvert, mais les physiciens espèrent de sa résolution une meilleure compréhension du monde des particules.

> « L'expérience est le nom que chacun donne à ses erreurs. » (Oscar Wilde)

Erreur ou anomalie encore dans l'Univers ? Les astrophysiciens ne comprenaient pas pourquoi les petites galaxies satellites de la Voie lactée forment des alignements particuliers. Certains ont proposé que la matière noire s'est condensée pour former une « toile cosmique », sorte de gigantesque toile d'araignée dont les fils seraient des filaments de matière noire ; les galaxies massives se formeraient aux nœuds et les galaxies naines le long des filaments *(voir Les galaxies naines et la toile cosmique, page 48)*. L'avenir dira si c'est bien l'explication de cette anomalie.

Avec le temps, certaines anomalies perdent leur statut. Ce fut le cas en biologie avec l'étude des gamètes. La variété des spermatozoïdes et des ovules dans le monde animal a pu faire croire à une multitude d'anomalies. En fait, les biologistes découvrent les mécanismes évolutifs qui expliquent cette diversité *(voir Spermatozoïdes et ovules : une étonnante diversité, page 62)*. Et ainsi s'enrichit l'expérience qui, selon Oscar Wilde, « est le nom que chacun donne à ses erreurs » (*L'Éventail de Lady Windermere*, 1893). ■

sommaire

1 Edito

Actualités

4 L'empreinte des premières ondes gravitationnelles

6 Le premier chromosome synthétique

8 Le nez humain, bien plus fin qu'on ne le pensait

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

12 Point de vue
Tests génétiques : le défi de l'interprétation
Dominique Stoppa-Lyonnet

14 Entretien
Expertise scientifique : l'indépendance n'est pas tout
Entretien avec Marie-Angèle Hermitte

18 Homo sapiens informaticus
L'enseignement en ligne et la bombe démographique
Gilles Dowek

20 Cabinet de curiosités sociologiques
Comment faire un miracle ?
Gérald Bronner

22 Questions ouvertes
Comment améliorer l'acceptation des vaccins
Pierre Bégué

26 Lu sur SciLogs.fr
Les filles, sous-notées en mathématiques ?
Nicolas Gauvrit

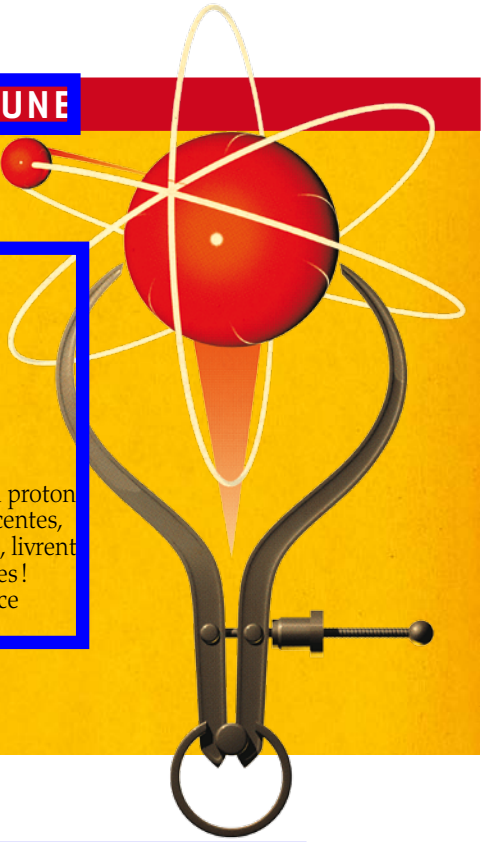
Ce numéro comporte un encart livre Pour la Science jeté à 40 000 ex dans diffusion France, ainsi que deux encarts d'abonnement à Pour la Science brochés sur la totalité du tirage en couverture : © Tavis Coburn

À LA UNE

28 PHYSIQUE DES PARTICULES
Le proton, un problème de taille
Jan Bernauer et Randolph Pohl
Quel volume la charge électrique du proton occupe-t-elle ? Deux expériences récentes, fondées sur des méthodes distinctes, livrent des valeurs précises... mais différentes ! Une anomalie intrigante, qui annonce peut-être de futures découvertes.

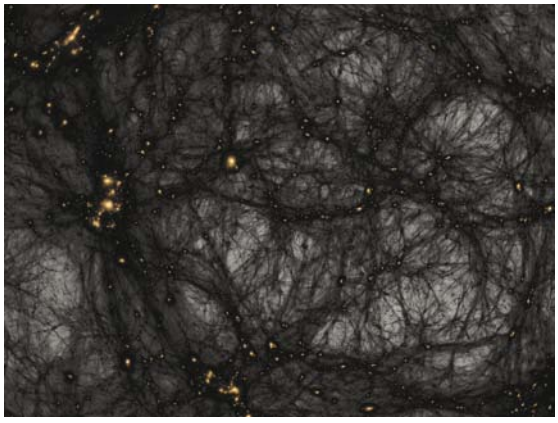
36 BOTANIQUE
Les pérégrinations du pommier domestique
H. Giraud, A. Cornille et T. Giraud
Issu d'un pommier sauvage des montagnes du Kazakhstan, le pommier domestique s'est répandu le long de la route de la soie jusqu'en Europe. Sa diversité est en partie due aux échanges de gènes avec les pommiers sauvages des régions traversées.

42 TECHNOLOGIE
Les drones menacés de piratage
Kyle Wesson et Todd Humphreys
Des flottilles d'avions sans pilote pourraient bientôt sillonner les airs pour surveiller les feux de forêt, livrer des colis, réaliser des opérations de sauvetage, etc. Mais ces drones civils ont des failles de sécurité qui les rendent faciles à pirater.



© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

48 ASTROPHYSIQUE
Les galaxies naines et la toile cosmique
Noam Libeskind
Le nombre et la répartition des petites galaxies en orbite autour de la Voie lactée étonnent les astrophysiciens. Ces galaxies naines ont peut-être gagné leur place actuelle en parcourant des filaments de matière noire qui traversent l'Univers entier.



54 GÉOPHYSIQUE
Les crises de la montagne Pelée
Caroline Martel
Grâce à des expériences de laboratoire reproduisant la décompression d'un magma, les géophysiciens expliquent la diversité des éruptions qu'a connues le volcan de la Martinique.

62 ÉVOLUTION
Spermatozoïdes et ovules : une étonnante diversité
Katrina Claw
Pourquoi les spermatozoïdes et les ovules sont-ils si variés ? Les biologistes commencent à décrypter les mécanismes qui favorisent cette diversité.

Rendez-vous

70 Histoire des sciences
Nos bons amis les sauvages : rencontre en terre de Diémen
Bertrand Daugeron
À la fin d'un séjour en Tasmanie, en 1793, les Français font la connaissance des Aborigènes de l'île. Récit du contact de deux cultures.

76 Logique & calcul
Les Spidrons, pliables à l'infini
Jean-Paul Delahaye
De nouvelles formes géométriques, conçues par un designer hongrois, sont faciles à construire et s'emboîtent miraculeusement

82 Science & fiction
Godzilla, le réveil d'un dinosaure ?
J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

84 Art & science
Les folles créatures de la plage
Loïc Mangin

86 Idées de physique
Charges en stock
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

89 Question aux experts
Boire un café dans l'après-midi empêche-t-il de dormir ?
Astrid Nehlig

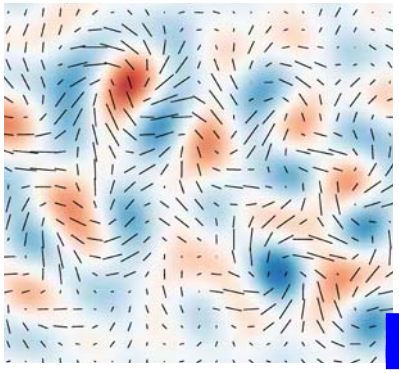
91 Science & gastronomie
La querelle du lait cru
Hervé This

92 À lire

96 Bloc-notes
Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA SCIENCE .fr
le site de référence de l'actualité scientifique internationale
Toutes les archives*
Pour la Science
Dossier Pour la Science
depuis 1996
maintenant sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014



Le télescope BICEP2 *(à gauche de l'observatoire ci-contre)* est dédié à la mesure du fond diffus cosmologique. Il a enregistré un « mode B » de polarisation de ce rayonnement. Dans la carte ci-dessous du fond diffus d'une partie du ciel, les couleurs indiquent l'écart à la température moyenne, les traits la direction de polarisation.

Cosmologie

L'empreinte des premières ondes gravitationnelles

L'expérience BICEP2, en Antarctique, a détecté pour la première fois la trace d'ondes gravitationnelles primordiales, produites pendant le Big Bang. L'inflation cosmique est-elle confirmée ?

Sur la base américaine Amundsen Scott, en Antarctique, des astrophysiciens ont observé, avec le télescope BICEP2, l'une des caractéristiques les plus attendues du rayonnement du fond diffus cosmologique. Il s'agit de motifs particuliers visibles dans la carte de la polarisation du rayonnement, nommés modes B (la polarisation caractérise la direction dans laquelle oscille le champ électrique d'une onde électromagnétique). Ce résultat confirme, de façon indirecte, la présence d'ondes gravitationnelles dans l'Univers primordial. C'est une découverte majeure pour la cosmologie et le modèle du Big Bang. Voyons pourquoi.

Le fond diffus cosmologique est la plus ancienne lumière de l'Univers. Issu du Big Bang, il est resté plus de 380 000 ans sous l'emprise de la matière avant de s'en libérer. Mais auparavant, le rayonnement avait « enregistré » la trace des conditions qui régnaient dans l'Univers primordial.

Le fond diffus cosmologique se présente sous la forme d'un rayonnement quasi isotrope (identique dans toutes les directions du ciel) et homogène, correspondant à une température moyenne d'environ 2,7 kelvins. Toutefois, de minuscules fluctuations de température, de l'ordre de 1 pour 100 000, ont été mesurées et cartographiées avec précision, notamment par le satellite *Planck*. Ces fluctuations montrent que l'Univers, initialement homogène, était parcouru d'ondes de densité qui ont créé des hétérogénéités dans la matière.

Mais en plus de ces ondes de densité, l'Univers primordial pourrait avoir été secoué par des ondes gravitationnelles, sortes d'ondulations de l'espace-temps prévues par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. Ces ondes gravitationnelles interagissent extrêmement peu avec la matière et sont, par conséquent, très difficiles à détecter. Cependant, elles sont susceptibles de laisser une empreinte ténue dans le fond diffus cosmologique, en polarisant sa lumière selon des motifs qui leur sont propres, les modes B de polarisation.

Le télescope BICEP2 a scruté trois ans durant une région correspondant à un pour cent du ciel. Par comparaison, le satellite *Planck* cartographie quasiment l'ensemble du ciel. En contrepartie, BICEP2 est 30 fois plus sensible.

L'équipe responsable de cet instrument a montré que le mode B de polarisation apparaît dans les données recueillies par le télescope, résultat qui confirme indirectement que des ondes gravitationnelles étaient présentes dans l'Univers primordial.

Il reste à déterminer par quel phénomène ces ondes ont été engendrées. Dans le modèle du Big Bang, l'Univers aurait connu une phase d'expansion très rapide dans ses premiers instants, l'« inflation ». Cette dilatation brutale explique de nombreuses propriétés de l'Univers et aurait aussi produit des ondes gravitationnelles. Cependant, il est trop tôt pour affirmer que les observations de BICEP2 confirment l'hypothèse de l'inflation, puisque d'autres phénomènes sont aussi susceptibles d'engendrer des ondes gravitationnelles.

Pour trancher, il faudra déterminer les propriétés de ces ondes, et notamment mesurer la façon dont leur amplitude varie avec leur fréquence. L'hypothèse de l'inflation cosmique conduit à une prédiction détaillée à ce sujet, que des expériences plus précises que BICEP2 pourront mesurer. Les astrophysiciens attendent aussi les résultats de *Planck*, qui porteront sur l'ensemble du ciel et qui seront présentés en octobre 2014.

Alain Riazuelo
IAP/UPMC/CNRS

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux

Éthologie

Le coucou geai, un parasite protecteur

Le coucou geai *(Clamator glandarius)*, un oiseau gris tacheté de blanc, a pour habitude de pondre ses œufs dans le nid d'autres espèces, et notamment celui des corneilles noires *(Corvus corone)*. Les jeunes coucous sont alors nourris et élevés par leur famille adoptive. Pourquoi la corneille noire ne chasse-t-elle de tels intrus ? Ces derniers ont un effet bénéfique pour leurs hôtes, suggère une étude menée par Daniela Canestrari, de l'Université d'Oviedo en Espagne.

Trois jeunes corneilles noires dans leur nid, parasité par un coucou geai *(poussin aux taches blanches)*.

Les observations sur 741 nids de corneilles révèlent en effet que les dernières sont plus nombreuses et atteignent plus souvent l'âge adulte dans les nids occupés par des coucous geais. Selon les chercheurs, c'est parce que les coucous geais protègent leurs hôtes des prédateurs. Lorsqu'ils se sentent en danger, ils sécrètent en effet une substance noirâtre corrosive (elle comporte de l'acide phénique) et malodorante (présence de composés sulfurés et d'indole) qui repousse les chats sauvages et les rapaces. L'interaction des coucous geais et des corneilles noires tiendrait ainsi plus du mutualisme que du parasitisme, du moins en période de forte prédation.

Sophie Martos

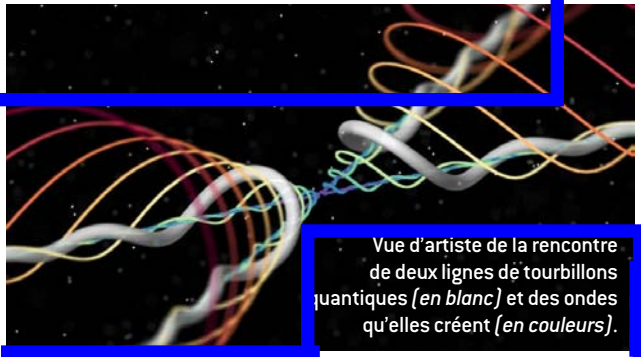
D. Canastrari et al., Science, en ligne le 27 mars 2014

Physique

Des ondes dans les tourbillons quantiques

Dans l'hélium superfluide à très basse température, il se forme des lignes autour desquelles la matière tourne comme dans les tourbillons ordinaires. Il s'agit de tourbillons quantiques, car ils tournent tous à la même vitesse, suivant des lois de la physique quantique. Lorsque deux tourbillons se rencontrent, les lignes se réorganisent, et de l'énergie est émise. Les spécialistes de la turbulence quantique supposaient que cette perte d'énergie était due à des oscillations des lignes de tourbillons et à leur propagation : des « ondes de Kelvin ». Daniel Lathrop, de l'Université du Maryland, aux États-Unis, et son équipe ont mis au point une expérience qui, malgré l'échelle nanométrique de ces ondes, a permis de les visualiser et ainsi de confirmer les prévisions théoriques.

La viscosité d'un superfluide étant nulle, la dissipation d'énergie ne s'effectue pas par les frottements visqueux. Sachant que les ondes de Kelvin engendrent des ondes sonores qui emportent de l'énergie, il restait à observer ces ondes en action dans l'hélium superfluide.



Vue d'artiste de la rencontre de deux lignes de tourbillons quantiques *(en blanc)* et des ondes qu'elles créent *(en couleurs)*.

En 2012, pour les visualiser, l'équipe de D. Lathrop avait introduit des particules micrométriques dans le fluide : les lignes de tourbillons étant des régions de basse pression, elles attirent les particules, qui les matérialisent. Ces chercheurs avaient ainsi observé que la reconnexion des lignes des tourbillons quantiques produit des ondulations.

Dans leur expérience la plus récente, les physiciens ont caractérisé le mouvement des particules micrométriques en suspension dans le superfluide. Ils ont pu établir que les lignes de tourbillons oscillent de la façon qui caractérise les ondes de Kelvin. Ce qui confirme la théorie et fait avancer la compréhension de la turbulence quantique !

Sean Bailly

PNAS, vol. 111, pp. 4707-4711, 2014

GIEC : un rapport pessimiste

Diminution des ressources océaniques, déplacement des zones de pêche, production de blé, de maïs et de riz affectée, réduction des eaux de surface et souterraines dans les régions subtropicales sèches, etc. : telles sont les menaces probables d'ici 2100 recensées dans le deuxième volet du cinquième rapport du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), publié le 31 mars. Ce rapport fait la synthèse de plus de 12 000 publications scientifiques. Les politiques en tiendront-ils compte ?

Un océan pour Encelade

Les geysers au pôle Sud d'Encelade – un satellite de Saturne – et d'autres observations de cette région suggéraient que, sous la couche de glace, se cache un océan d'eau liquide. Des mesures de la sonde Cassini apportent une nouvelle confirmation indirecte de la présence de cet océan. Luciano Iess, de l'Université Sapienza à Rome, et ses collègues ont étudié le champ gravitationnel d'Encelade. Les anomalies qu'il présente au pôle Sud peuvent s'expliquer par la présence d'un océan d'eau liquide à 30 kilomètres de profondeur.

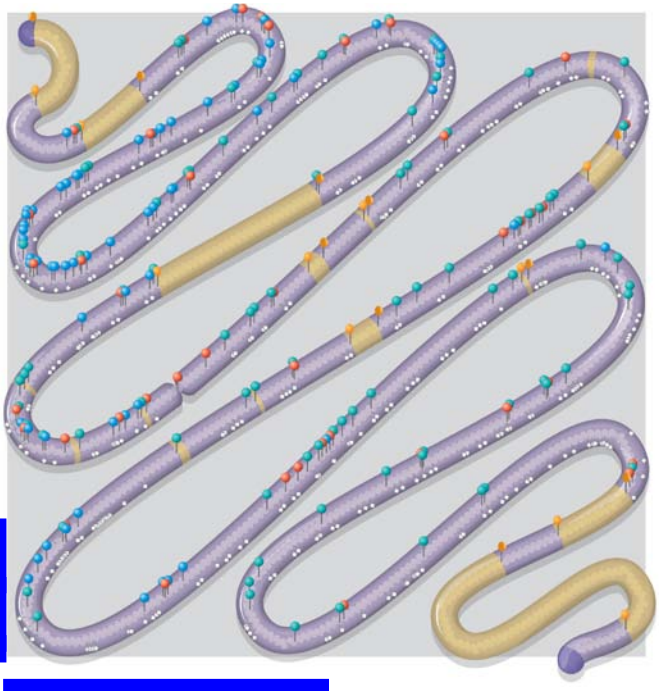
Éboulement et frottements

Les frottements avec le sol lors d'un glissement de terrain dissipent l'énergie et déterminent la distance parcourue par les roches. Mais les modèles les plus simples de frottement sous-estiment cette distance pour les éboulements les plus volumineux. Antoine Lucas, de l'Université Paris-Diderot, et ses collègues ont montré que les observations s'expliquent bien si le coefficient de frottement diminue avec la vitesse de déplacement des éboulis. Reste à déterminer le phénomène physique précis permettant d'expliquer cette relation entre le coefficient de frottement et la vitesse.

Biotechnologie

Le premier chromosome synthétique

Une équipe internationale a synthétisé un chromosome fonctionnel de la levure de bière. Une première étape vers la synthèse du génome entier d'une cellule eucaryote.



Le chromosome synthétisé *(ci-dessus, une vue d'artiste)* a été représenté comme un long ruban *(à gauche)*. Les modifications apportées sont indiquées par des épingles et des diamants blancs, et les séquences supprimées, par des bandes jaunes.

Quel est le génome minimal nécessaire pour qu'un organisme soit viable ? Quels gènes ou quelles combinaisons de gènes peut-on supprimer sans que ce soit létal ? Répondre à ces questions offrirait la possibilité de concevoir et construire à l'envi des sortes d'usines biologiques : des organismes – bactéries, levures – optimisés pour une fonction telle que produire une molécule d'intérêt thérapeutique à moindre coût, de nouvelles molécules d'intérêt biologique ou chimique, ou du biocarburant. Une équipe internationale dirigée par Srinivasan Chandrasegaran, Joel Bader et Jef Boeke, de l'Université Johns Hopkins, à Baltimore aux États-Unis, a franchi une étape importante dans cette quête du génome minimal.

Ces biologistes ont synthétisé un chromosome réduit (ils ont supprimé ses régions silencieuses et non codantes) de la levure de bière *Saccharomyces cerevisiae* et ont montré que, introduit dans la levure, il est fonctionnel : quelles que soient les conditions de culture, rien ne distingue le fonctionnement des levures équipées du chromosome synthétique de celui des levures naturelles. Surtout, ils ont introduit dans ce chromosome synthétique des séquences génétiques leur permettant d'agir sur chaque gène non essentiel du chromosome de façon indépendante.

Sur les quelque 6 000 gènes que compte le génome de la levure, environ 5 000 sont non essentiels : l'extinction de l'un d'eux n'est pas létale pour l'organisme. Toutefois, l'extinction simultanée de plusieurs de ces gènes peut lui être fatale. Combien ? Lesquels ? C'est ce que devrait permettre de déterminer de façon systématique ce nouveau dispositif, puisqu'il offre le moyen d'observer directement l'effet de l'extinction d'un ou plusieurs gènes non essentiels sur la viabilité de l'organisme et sa multiplication. Chaque gène non essentiel a été flanqué d'une séquence qui permet de déclencher son évolution accélérée ou de le supprimer. Une fois stimulée cette évolution accélérée, cette approche permet de sélectionner les variants les plus adaptés à un objectif donné. Les biologistes ont ainsi observé que certaines combinaisons de variants ralentissent la croissance des levures, tandis que d'autres l'accélèrent fortement.

Ce n'est pas la première fois que l'on synthétise un génome pour l'introduire dans un organisme. En 2010, l'équipe de l'Institut J. Craig Venter, à Rockville aux États-Unis, a reconstitué le génome complet d'une bactérie, *Mycoplasma mycoides*, et transféré cette copie synthétique dans une autre espèce bactérienne, *Mycoplasma capricolum*. Fonctionnelles, ces bactéries se sont transformées en *Mycoplasma mycoides*. Cette étude avait montré qu'il est possible, chez des organismes procaryotes (dont le matériel génétique n'est pas enfermé dans un noyau), de prendre les commandes d'une cellule par le biais d'un génome synthétique. S. Chandrasegaran et ses collègues vont plus loin. D'une part, ils montrent que cela est aussi possible chez des organismes eucaryotes (pourvus d'un noyau). D'autre part, ils offrent une méthode systématique pour optimiser le génome introduit.

Leur étude est la première étape d'un programme plus large, la reconstruction d'un génome synthétique entier de la levure de bière (projet Sc2.0). L'ensemble de ces recherches s'inscrit dans le mouvement de la biologie de synthèse, une discipline émergente qui vise à simplifier et clarifier, par une approche d'ingénierie, les processus à l'œuvre en biologie, afin de rationaliser et systématiser la transformation des organismes. Une démarche qui, bien que louable et prometteuse, soulève aussi de nombreuses questions éthiques.

Marie-Neige Cordonnier

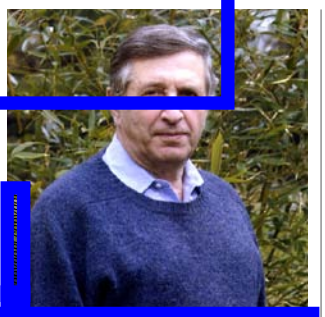
N. Annaluru et al., Science, vol. 344, pp. 55-58, 2014

Mathématiques

Yakov Sinaï, prix Abel 2014

Le prix Abel est un prix annuel pour les mathématiques créé par l'Académie norvégienne des sciences et des lettres en 2003. Son prestige équivaut à celui de la médaille Fields. La cuvée 2014 a été attribuée à Yakov Sinaï, mathématicien russe travaillant à l'Université de Princeton, aux États-Unis, et à l'Institut Landau de physique théorique de l'Académie russe des sciences. Il est récompensé pour ses contributions fondamentales à la théorie des systèmes dynamiques et à la physique mathématique.

Y. Sinaï s'est surtout intéressé aux systèmes dynamiques, qui évoluent dans le temps selon certaines règles. Il a, en particulier, développé des outils, telle l'entropie de Kolmogorov-Sinaï, pour classer les systèmes en fonction de leur imprévisibilité. Un système peut être déterministe – parfaitement prévisible, du moins en principe, quand on en connaît l'état initial – ou stochastique, quand son évolution est aléatoire et n'autorise que des prévisions probabilistes. Certains systèmes déterministes peuvent être imprévisibles en pratique. Dans cette situation dite de « chaos déterministe », deux états initiaux légèrement différents du même système conduisent rapidement à des évolutions très distinctes. Y. Sinaï a notamment étudié comment, pour de tels systèmes dynamiques, l'analyse statistique permet de faire des prévisions précises.



Yakov Sinaï, spécialiste de la théorie des systèmes dynamiques.

Il a par exemple étudié le billard qui porte son nom. Il s'agit d'un billard carré dont le centre est occupé par un disque. Une petite boule de masse négligeable est lancée dans le billard et rebondit contre les parois du carré et du disque, comme le ferait une vraie boule de billard. Y. Sinaï a montré qu'il s'agit d'un système chaotique (contrairement au billard rectangulaire ordinaire). Ce modèle lui a permis d'étudier la dynamique des gaz, où les molécules sont représentées par des petites billes qui entrent fréquemment en collision.

Y. Sinaï, âgé aujourd'hui de 78 ans, a eu un rôle important dans plusieurs domaines à la frontière des mathématiques et de la physique. De nombreux résultats en mathématiques ayant des applications en physique portent son nom : les marches aléatoires de Sinaï, les mesures de Sinaï-Ruelle-Bowen ou encore la théorie de Pirogov-Sinaï. Il a aussi exercé une grande influence sur les chercheurs qui l'ont côtoyé, notamment ses doctorants, dont il a formé plus d'une cinquantaine au cours de sa carrière.

S. B.

http://www.abelprize.no

Un hiver volcanique !

Les volcans projettent dans l'atmosphère de grandes quantités de particules, qui réfléchissent une partie de la lumière du Soleil vers l'espace et peuvent ainsi refroidir le climat. Or le réchauffement climatique s'est un peu ralenti lors de la dernière décennie. Benjamin Santer, du Laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, et ses collègues ont montré que les 17 éruptions relativement petites survenues depuis 1999 ont eu un effet cumulé significatif, qui a participé à ce ralentissement.

Thérapie génique de l'ataxie

L'ataxie de Friedreich est une maladie génétique rare, qui touche une protéine des mitochondries, les usines énergétiques de la cellule. Elle entraîne notamment des complications cardiaques, souvent mortelles. Hélène Puccio, de l'INSERM, et ses collègues ont mis au point une thérapie génique qui a neutralisé ces complications chez la souris. Un vecteur viral, introduit par injection intraveineuse, a livré un gène fonctionnel aux cellules cardiaques, afin de leur faire produire une protéine mitochondriale non défectueuse.

Paléontologie humaine

Little Foot, aussi vieux que Lucy ?

On ne dispose que d'un seul squelette presque complet d'Australopithèque : celui d'un individu nommé Little Foot. Dégagé de sa gangue rocheuse pendant 13 ans après sa mise au jour en 1997, en Afrique du Sud, il n'a pu être daté directement. À la demande de son découvreur – Ronald Clarke, de l'Université du Witwatersrand à Johannesburg –, Laurent Bruxelles, de l'INRAP, et des collègues viennent d'analyser de près le chaos sédimentaire souterrain dans lequel il a été retrouvé, et concluent à un âge compris entre 2,2 et 4 millions d'années.

Little Foot a été trouvé au bas d'un puits donnant dans l'une des grottes du Berceau de l'humanité, une zone d'à peine 25000 hectares, ainsi surnommée parce qu'elle a livré plus du tiers des fossiles humains anciens. Après sa mort, il avait été enseveli dans la roche formée par la chute de fragments que le ciment naturel, déposé par les eaux d'infiltration saturées de minéraux, a soudés. Ces dépôts ont souvent été dérangés, mais aussi complétés, par d'épais planchers de calcites venus remplir les vides ou s'intercaler entre les périodes de sédimentation détritique.

C'est ce puzzle sédimentaire qu'ont analysé les chercheurs. En montrant que le squelette avait été scindé en deux groupes d'ossements séparés par un plancher, ils ont reconstitué l'histoire de la strate dont il a autrefois fait intégralement partie. L'intervalle temporel ainsi déterminé encadre l'âge de 3,3 millions d'années auquel était parvenu R. Clarke en étudiant les détails des ossements de Little Foot et en les comparant à ceux des autres Australopithèques. Ainsi, la géologie ne contredit pas le résultat de R. Clarke qui, s'il est juste, apporte au genre *Homo* un ancêtre potentiel comparable à Lucy. Sud-africain celui-là.

François Savatier

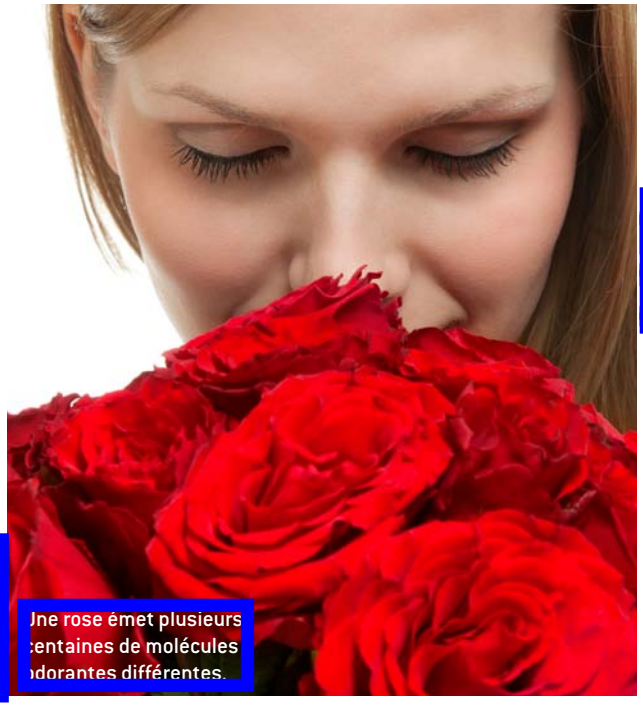
L. Bruxelles et al., J. of Human Evolution, en ligne le 31 mars 2014

Le crâne de Little Foot sur le point de sortir de sa gangue de pierre. Ce fossile d'Australopithèque est vieux de 2,2 à 4 millions d'années.

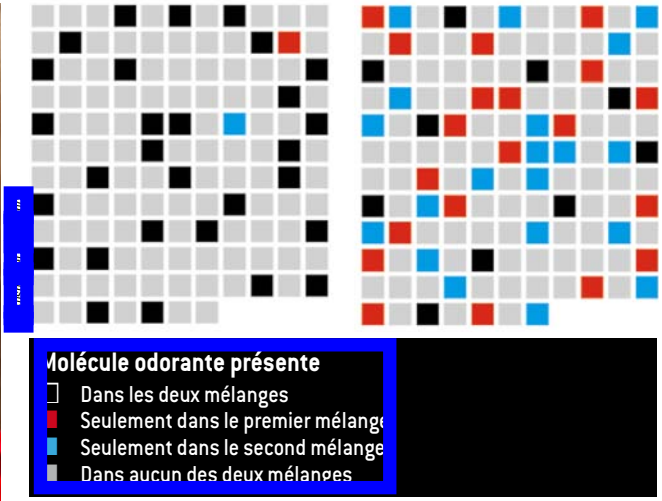
Neurophysiologie

Le nez humain, bien plus fin qu'on ne le pensait

Des tests réalisés avec des mélanges de molécules odorantes suggèrent que la plupart des personnes peuvent distinguer un nombre gigantesque d'odeurs différentes



Une rose émet plusieurs centaines de molécules odorantes différentes.



Des molécules odorantes de 128 types différents *(figurés par les petits carrés dans les diagrammes ci-dessus, ces derniers représentant chacun une paire de mélanges)* ont été mélangées de diverses façons. Lors de chaque test, un participant devait sentir deux mélanges partageant un nombre plus ou moins grand de types de molécules *(ils se recouvrent à 97 pour cent dans le diagramme ci-dessus à gauche, et à 33 pour cent dans celui de droite)*, puis annoncer s'il percevait des odeurs différentes.

Chez l'homme, on estime que 60 pour cent des gènes codant les récepteurs olfactifs ne sont plus fonctionnels. Avons-nous pour autant un piètre odorat ? Une étude réalisée à l'Université Rockefeller, à New York, par Andreas Keller et ses collègues suggère le contraire : la plupart d'entre nous seraient capables de discriminer plus de 1 000 milliards d'odeurs !

Une odeur naturelle résulte en général d'un cocktail de molécules (plusieurs centaines pour le parfum d'une rose, par exemple). Ces molécules se fixent sur des récepteurs membranaires présents sur les neurones des muqueuses olfactives, qui tapissent l'intérieur du nez. En réaction, les neurones des muqueuses envoient des influx nerveux vers le bulbe olfactif, puis vers diverses aires cérébrales.

Pour quantifier le pouvoir de résolution de notre système olfactif, les neurobiologistes ont sélectionné 128 molécules odorantes et ont effectué des mélanges de 10, 20 ou 30 molécules en quantités égales. Il existe un nombre faramineux de combinaisons possibles : plus de 10^{29} avec 30 molécules. Les mélanges élaborés se recouvraient partiellement, ayant un certain nombre de molécules en commun. Plusieurs centaines de ces mélanges ont été soumis, deux par deux, à 28 adultes, qui devaient les sentir et tenter de distinguer leurs odeurs. Les chercheurs ont ainsi pu déterminer le degré de différence nécessaire pour que deux mélanges soient reconnus comme distincts, et en déduire le nombre de mélanges suffisamment différents pour être distingués.

Les résultats dépendent des mélanges et des individus. Ainsi, la moitié des sujets testés distinguent au moins certains mélanges ayant moins de 75 pour cent de composés en commun. Au-delà de 90 pour cent de recouvrement, personne ne fait la différence. Par une analyse statistique et divers traitements mathématiques, A. Keller et ses collègues ont déduit de ces résultats que la plupart des personnes sont capables de discriminer plus de 1 000 milliards ($1{,}7 \times 10^{12}$) de mélanges différents. L'expérience confirme cependant que la sensibilité olfactive est très variable d'un individu à l'autre : l'estimation du nombre d'odeurs discriminables par chacun des volontaires varie d'un facteur 10^{20} (elle va de 10^{8} à 10^{28}) !

Cette nouvelle estimation du pouvoir de résolution olfactif est supérieure de plusieurs ordres de grandeur aux précédentes, qui évoquaient environ 10 000 odeurs distinguables. Et ce n'est qu'une borne inférieure : il existe bien plus de molécules odorantes que les 128 sélectionnées, et bien plus de mélanges possibles que ceux comportant 10, 20 ou 30 types de molécules. En outre, les mélanges comprenant des composés identiques, mais en concentrations différentes, produisent des odeurs différentes.

Cette estimation est aussi très supérieure à celle du pouvoir de résolution de nos systèmes visuel et auditif. En effet, nous ne sommes capables de discriminer « que » quelques millions de couleurs et environ 500 000 intervalles de tonalité sonore. Cependant, la comparaison est difficile : une couleur et un ton peuvent être associés à un paramètre simple, une fréquence (respectivement d'une onde électromagnétique et d'une onde acoustique), ce qui n'est pas le cas d'une odeur. Quoi qu'il en soit, l'odorat ne semble pas être le parent pauvre de notre système sensoriel, contrairement à ce que l'on a longtemps cru.

Guillaume Jacquemont

C. Bushdid et al., Science, en ligne le 20 mars 2014

Génétique

X fragile, un mécanisme inédit

Une étape importante a été franchie dans la compréhension du syndrome de l'X fragile, première cause de déficit mental héréditaire et forme atypique d'autisme. Dilek Colak, de l'Université Cornell, et ses collègues, ont montré qu'il repose sur l'extinction d'un gène… par son propre ARN messager.

Le syndrome, qui touche environ une personne sur 5 000, est causé par la mutation d'un gène sur le chromosome X, caractérisée par la répétition de triplets CGG en amont de la partie codante : au-delà de 200 triplets, le gène cesse de synthétiser une protéine impliquée dans la plasticité cérébrale. En travaillant sur des cellules souches d'embryons malades, les chercheurs sont parvenus à identifier le mécanisme en jeu. Surprise : il était jusque-là inconnu, et fait intervenir l'ARN messager du gène. Au cours de la transcription, la partie de l'ARN contenant les triplets répétés vient s'apparier au brin d'ADN complémentaire. Cet hybride ADN-ARN conduirait à l'extinction du gène d'une façon qui reste à déterminer.

Grâce à un produit ciblant la séquence d'ARN en cause, les biologistes sont parvenus à entraver le processus *in vitro*. Un début de piste pour un futur traitement ?

Yvan Pandelé

D. Colak et al., Science, vol. 343, pp. 1002-1005, 2014

Insolite

Le « poulet de l'enfer »

Imaginez un poulet d'environ 250 kilogrammes, haut de 1,5 mètre à la hanche et long de 3,5 mètres. Matthew Lamanna, du Muséum Carnegie d'histoire naturelle, à Pittsburgh aux États-Unis, et ses collègues ont annoncé la découverte d'un dinosaure qui y ressemble, sur la base de trois squelettes partiels mis au jour dans le Dakota. L'animal, qu'ils ont surnommé « poulet de l'enfer », vivait il y a 66 millions d'années et avait un régime omnivore.

Neurosciences

Un atlas cérébral de la drosophile

Marta Zlatic, du Campus de recherche Janelia Farm, près de Washington, et ses collègues ont établi une carte reliant neurones et comportements chez la drosophile à l'échelle du système nerveux entier. Le neurobiologiste Jean-René Martin nous commente ces travaux :

En quoi consiste cette étude ?

Jean-René Martin : Les chercheurs se sont intéressés aux circuits neuronaux impliqués dans l'activité locomotrice de la larve de drosophile. En jumelant des techniques d'enregistrement (suivi vidéo) et une méthode élaborée d'analyse statistique, ils ont suivi les déplacements d'un grand nombre d'individus : plus de 37 000 ! C'est impressionnant. En stimulant les neurones par une méthode optogénétique, ils ont alors établi un atlas de référence qui lie neurones et comportements locomoteurs.

Qu'est-ce que l'optogénétique ?

J.-R. M. : Cette grande avancée de la neurobiologie des dix dernières années consiste à utiliser la lumière pour activer des neurones ou suivre leur activité. Les chercheurs ont utilisé des lignées de larves transgéniques, modifiées pour synthétiser la channelrhodopsine, une protéine qui permet à une impulsion lumineuse d'exciter les neurones à distance. Par cette méthode, ils ont pu couvrir la quasi-totalité du système nerveux central de la larve, en activant sélectivement de petites populations de 2 à 15 neurones.

Qu'apportent ces résultats ?

J.-R. M. : Grâce au traitement algorithmique, les chercheurs ont pu étudier des séquences comportementales beaucoup plus fines que celle qu'on peut suivre à l'œil, et ce de manière quantitative. Leurs résultats montrent que l'activation de petites populations neuronales favorise certains comportements, mais ne les détermine pas nécessairement, même à l'échelle d'un seul individu. Cela suggère un degré de complexité supérieur : l'état somato-sensoriel et le stress de la larve – je n'ose dire sa psychologie – jouent aussi un rôle. Cet atlas neurones-comportements devrait aider à mieux comprendre l'intégration des circuits neuronaux de la drosophile d'un point de vue fonctionnel. Mais il reste beaucoup à faire.

J.-R. Martin est chercheur à l'Institut de neurobiologie Alfred Fessard.

Grand nombre d'animaux testés, masse importante de données… La neurobiologie est-elle entrée dans l'ère du haut débit et des données massives ?

J.-R. M. : C'est certainement un enjeu important. Pour mener cette étude, Janelia Farm a d'abord développé puis cartographié des milliers de lignées de drosophiles transgéniques. Cela a permis de couvrir l'ensemble du système nerveux de la larve, soit environ 10 000 neurones. Ce travail quasi industriel est très utile à la communauté. Pour autant, il me semble important de conserver une recherche plus « artisanale », propice à l'originalité et la créativité. Dans mon équipe où nous étudions la locomotion et son évolution en fonction de l'âge, nous avons ainsi récemment identifié un gène qui double la longévité de la drosophile. Ce gène de « jouvence » s'exprime aussi chez l'humain, et nous espérons que cette découverte, initialement fortuite, contribuera à lutter contre la vieillesse et la neurodégénérescence.

Y. P.

T. Volgenstein et al., Science, en ligne le 27 mars 2014

Neurobiologie

Insensibles au plaisir musical

Nous avons tous croisé des personnes qui s'intéressent peu à la musique. Mais peut-on y être physiologiquement insensible ? Une étude espagnole a répondu par l'affirmative.

Ernest Mas-Herrero, de l'Institut de recherche biomédicale Bellvitge, à Barcelone, et ses collègues ont choisi des sujets se déclarant peu touchés par la musique. Ils leur ont fait écouter des musiques reconnues comme émouvantes, tout en mesurant divers paramètres physiologiques caractéristiques de l'émotion, telle la vitesse des battements de cœur. Ces mesures n'ont pas trahi la moindre émotion.

En revanche, les sujets ont manifesté du plaisir en pratiquant un jeu d'argent. Leur insensibilité musicale n'est donc pas due à une incapacité générale à éprouver du plaisir. Elle résulterait plutôt d'une perturbation des interactions entre le circuit cérébral de la récompense et diverses autres régions du cerveau.

G. J.

E. Mas-Herrero et al., Current Biology, en ligne le 6 mars 2014

Géophysique

Des défauts dans la roche

Les roches du manteau terrestre sont loin d'être rigides et figées. Sous l'effet de la chaleur régnant au cœur de la planète et de la pression, elles subissent de lentes déformations lors des mouvements de convection. Cette dynamique est importante car elle est à l'origine de la tectonique des plaques. Mais une explication satisfaisante de la déformation des roches échappait encore aux géophysiciens. Avec des collègues de Montpellier et de Metz, Patrick Cordier, professeur à l'Université de Lille 1, a étudié un type de défauts cristallins peu connus, les désinclinaisons, et a révélé leur présence dans l'olivine – minéral qui constitue plus de 60 pour cent du manteau terrestre supérieur. Ces défauts cristallins, qui peuvent apparaître dans l'olivine plus facilement qu'on ne le pensait, pourraient expliquer comment la roche du manteau subit des déformations plastiques.

S. B.

P. Cordier et al., Nature, vol. 507, pp. 51-56, 2014

Biologie animale

Bébés tortues en mer chaude

La naissance des tortues est un véritable parcours du combattant. À peine sont-elles sorties de leur coquille sur la plage, qu'elles sont la proie des oiseaux et des crabes. Les rescapées foncent vers la mer, où ce sont les poissons qui s'en régalent. Que deviennent les rares survivantes ? Malgré quelques indices, les biologistes ignoraient ce que les jeunes tortues faisaient pendant leur première année, en pleine mer. Pour le déterminer, Katherine Mansfield, de l'Université de Floride centrale, et ses collègues ont suivi de jeunes tortues caouannes (*Caretta caretta*), qui naissent sur les plages de Floride.

Les biologistes ont équipé de balises 17 tortues caouannes, élevées en laboratoire pendant quelques mois, avant de les lâcher en mer. Ils ont découvert que les tortues commencent par traverser rapidement les plateaux continentaux – elles nagent et ne se laissent pas juste porter par les courants –, probablement pour s'exposer le moins possible aux prédateurs. Les tortues suivent ensuite le Gulf Stream, mais ne choisissent pas le chemin le plus rapide ni le plus direct pour traverser l'Atlantique. Elles restent dans les eaux les plus chaudes et nagent en surface pour profiter de la chaleur du soleil. Certaines s'aventurent dans la mer des Sargasses, riche en algues sombres qui permettent d'assurer une température de l'eau supérieure de six degrés à ce qu'elle serait en l'absence de ces végétaux.

S. B.

Proceedings of the Royal Society B, vol. 281, en ligne le 5 mars 2014

Les bébés des tortues caouannes sont trop petits pour porter des balises. Il faut attendre quelques mois avant de pouvoir les équiper et entamer leur suivi à travers l'océan Atlantique.

L'astéroïde qui se prend pour Saturne

Quatre planètes gazeuses du Système solaire sont entourées d'anneaux de débris. À cette liste s'ajoute désormais un astéroïde : Chariklo, un astéroïde de la classe des Centaures situé entre Saturne et Uranus, possède deux anneaux de 391 et 405 kilomètres de rayon. C'est en effectuant des observations de l'astre pour en mesurer précisément le diamètre qu'une équipe internationale d'astronomes a découvert que l'astéroïde est entouré de ces deux structures, composées de débris rocheux et de glace d'eau.

La personnalité trahie par un bonjour

Une expérience réalisée auprès de 320 sujets par Phil McAleer, de l'Université de Glasgow, et deux collègues montre que l'on juge la personnalité d'un interlocuteur en une demi-seconde – le temps de prononcer « bonjour » – grâce à l'intonation et au rythme de la voix. Pour les participants à l'expérience, un ton aigu chez les femmes ou grave chez les hommes évoquait ainsi un trait de caractère dominant, tandis qu'une intonation marquée (une montée entre les deux syllabes) suggérait la fiabilité.

Yoques de combat

Visières de casque, fenêtres de chars : pas si simple de concevoir des blindages transparents. Ling Li et Christine Ortiz, du MIT, envisagent de s'inspirer… du capiz, un coquillage philippin. Sa coquille, transparente à 80 pour cent, alterne minéral et minces couches organiques. Elle dissipe efficacement l'énergie de pénétration tout en limitant la propagation des déformations, ce qui préserve sa transparence.

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

PRESSES POLYTECHNIQUES ET UNIVERSITAIRES ROMANDES

Editeur scientifique de référence depuis 1980

PARUTIONS PRINTEMPS 2014

LA FACE CACHÉE DE LA LUNE : LA SCIENCE ET LES COÏNCIDENCES

François Rothen

Le nouvel ouvrage du physicien François Rothen dresse l'inventaire, dans un texte simple et accessible à tous, des surprenantes coïncidences, des hasards extraordinaires et des analogies parfois trompeuses qui ont marqué la recherche scientifique.
Où l'on y démystifie une fois pour toute l'astrologie, la numérologie et les autres pseudosciences.

288 pages, ISBN 9782889150410

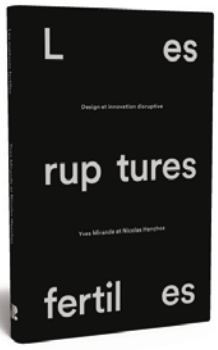
LES RUPTURES FERTILES

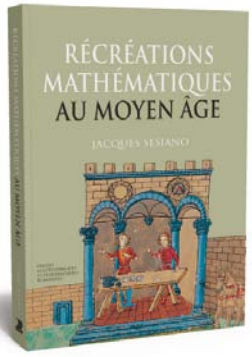
Design et innovation disruptive

Nicolas Henchoz, Yves Mirande

Le design joue un rôle essentiel dans l'appropriation par la société de toute technologie de rupture. Sa pratique peut transformer une performance technologique en innovation et, par conséquent, en usages inscrits dans le quotidien. Un livre évènement, richement illustré, qui montre que le design est bien différent du « gadget » marketing que l'on croit.

220 pages, ISBN 9782889150328





RÉCRÉATIONS MATHÉMATIQUES AU MOYEN ÂGE

Jacques Sesiano

A la croisée de l'histoire et des mathématiques, ce livre s'adresse à tous ceux, spécialistes (étudiants et enseignants en mathématiques, médiévistes) comme amateurs, tentés par le dépaysement d'une immersion dans la vie quotidienne et intellectuelle du Moyen Age.

300 pages, ISBN 9782880744984

TRACES D'ARMES À FEU

Expertise des armes et des éléments de munitions dans l'investigation criminelle

2e éd. revue et augmentée

Alain Gallusser éd.

Un désormais « classique » de la littérature en sciences criminelles. Cette nouvelle édition a été largement revue et augmentée par les meilleurs spécialistes francophones du domaine ; le chapitre consacré à la balistique est notamment entièrement nouveau, tout comme celui dédié à l'identification des armes par les traces laissées sur les éléments de munition lors du tir.

496 pages, ISBN 9782880748876

NOUVEAUTÉS

ET OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

www.ppur.org
www.epflpress.com

Ouvrages disponibles en librairie

POINT DE VUE

Tests génétiques : le défi n'est plus le séquençage, mais l'interprétation

Si le séquençage massif rend possible l'analyse du génome de tout un chacun, l'interprétation des résultats nécessite des études complémentaires. Une industrialisation aujourd'hui de tels tests génétiques serait à très haut risque.

Dominique STOPPA-LYONNET

En 2009, la société américaine *Illumina* proposait de séquencer le génome complet d'un individu pour 48 000 dollars. À présent, elle a les moyens techniques de le faire pour 1 000 dollars. Les entreprises proposant ce type de service à des tarifs de plus en plus compétitifs se sont multipliées aux États-Unis. Certaines passent au crible des gènes de prédisposition à diverses maladies (cancer du sein, de la prostate, mélanome, maladies cardiovasculaires, ...). En France, solliciter soi-même, en dehors d'un cadre médical, l'examen de ses caractéristiques génétiques ou de celles d'un tiers est interdit par la loi de bioéthique de 2011 et puni de 3 750 euros d'amende. Néanmoins, de tels tests sont accessibles sur internet, sans l'intermédiaire d'un médecin : il suffit d'envoyer à ces sociétés un peu de salive par la poste. Des diagnostics génétiques prénatals sont aussi développés : il sera bientôt possible de séquencer le génome du fœtus à partir de son ADN qui, dès la 10e semaine de grossesse, constitue 10 pour cent de l'ADN présent dans le plasma sanguin de la femme enceinte.

Le séquençage de nouvelle génération – la technique de séquençage massif qui a permis ces avancées – est un outil formidable, qui offre une meilleure connaissance du génome humain et des altérations associées aux maladies génétiques. Toutefois, le fossé se creuse entre la masse de séquences accumulées et leur interprétation, en particulier celle des séquences individuelles.

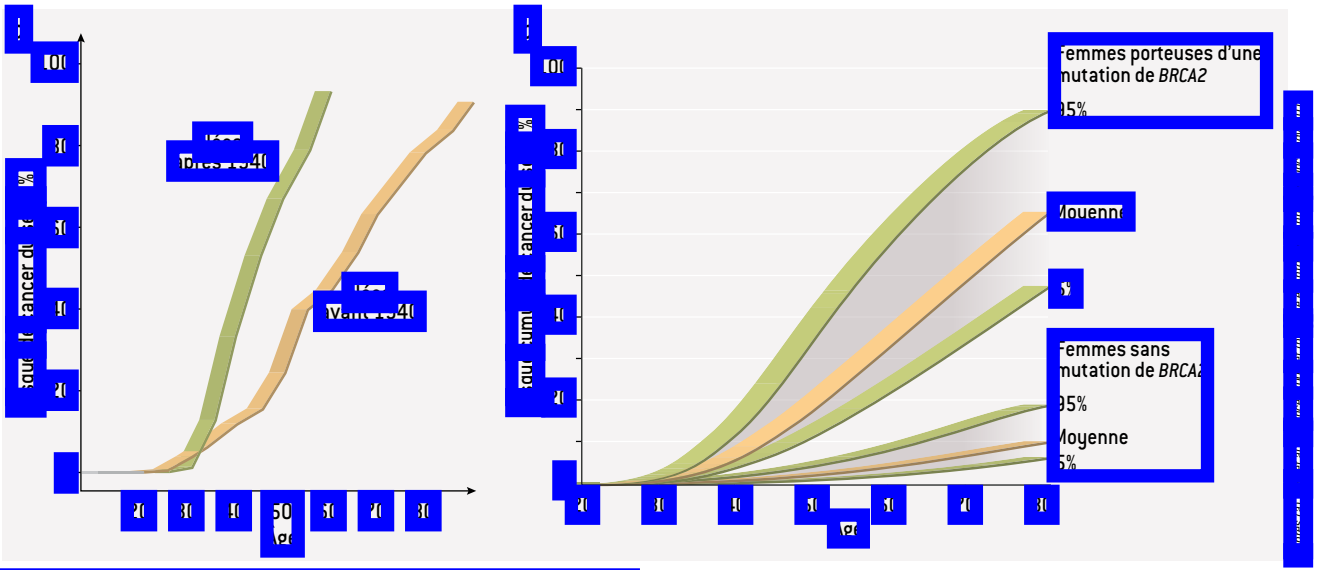
Fondé sur des méthodes permettant de séquencer simultanément plusieurs milliers de fragments de génome, le séquençage de nouvelle génération donne accès au génome complet ou à l'exome (ensemble des parties codantes des gènes) d'une personne ou permet l'analyse simultanée, pour une centaine de personnes, d'un panel de gènes impliqués dans une maladie génétique donnée. Ce progrès technique augmente considérablement les capacités d'analyse des laboratoires de génétique à visée médicale. Il autorise, pour des maladies fréquentes, l'exploration de nouveaux gènes associés à une maladie donnée, jusque-là peu analysés, car sièges de mutations rares. Il permet d'élargir les critères de prescription des tests génétiques. Enfin, une application majeure du séquençage massif est l'identification dans les tumeurs de mutations qui constituent des cibles thérapeutiques.

Toutefois, la médaille a son revers. Dans quelques années, le séquençage du génome sera plus simple et moins coûteux que l'analyse de quelques gènes. En offrant la possibilité d'une lecture exhaustive du génome et ce, au plus grand nombre, cette nouvelle technique modifie en profondeur la démarche de la génétique à visée médicale. Aujourd'hui encore, les études génétiques classiques sont fondées sur des histoires personnelles : à partir des caractéristiques observées (le phénotype) de la maladie d'un patient, on recherche son génotype – les mutations d'un gène ou d'un groupe de gènes qui expliquent ce phénotype. L'étude se limite en général aux gènes majeurs impliqués dans les maladies génétiques classiques.

PASSER DE TESTS CONDUITS dans un contexte clinique spécifique à des tests dans la population générale est associé à des risques d'erreurs de prédiction majeurs.

Le séquençage de nouvelle génération invite à une démarche inverse : d'un génotype à un phénotype, d'un génotype à la prédiction d'une maladie. La réponse est plus complexe puisque l'on ne part plus d'une maladie, mais du génome entier d'une personne, sans *a priori*. Passer de tests conduits dans un contexte clinique spécifique à des tests dans la population générale est associé à des risques d'erreurs de prédiction majeurs.

Les généticiens sont déjà confrontés aux difficultés de l'interprétation de la signification biologique et, par là, de l'interprétation clinique de nombreux variants de gènes déjà associés à une maladie donnée. Le séquençage de nouvelle génération allongera considérablement la liste de variants pour lesquels il n'y a pas ou peu d'expertise. Des études complémentaires seront



DIVERS FACTEURS peuvent moduler le risque de maladie associé à une mutation génétique. Par exemple, le risque de cancer du sein chez les femmes porteuses d'une mutation des gènes *BRCA1* ou *BRCA2* varie en fonction de l'année de naissance, ce qui signifie qu'il est modulé par le mode de vie ou l'environnement *(a)*. De même, une étude épidémiologique de 2011 a montré que 18 variations ponctuelles du génome, fréquentes dans la population, augmentent le risque de cancer du sein chez les femmes porteuses d'une mutation du gène *BRCA2 (b)*.

nécessaires : analyse des produits de la lecture du génome (le transcriptome), tests fonctionnels…

De plus, des études d'épidémiologie génétique sont indispensables pour développer des tests de prédiction individuelle précis. La majorité des maladies génétiques classiques (mendéliennes) ont une expression modulée par les effets conjugués de l'environnement et de variations génétiques. La variation du risque de cancer du sein associé à une mutation du gène *BRCA2* l'illustre bien. Le risque moyen, de 50 pour cent à l'âge de 70 ans, varie entre 30 et 80 pour cent si l'on prend en compte 18 autres variations du génome *(voir la figure ci-dessus)*. Sans une connaissance, à l'échelle de la population, de l'effet de telles modulations sur le risque associé à une maladie, le risque de se tromper dans le diagnostic de cette maladie sera important, et la prise en charge des personnes à risque, mal adaptée.

Le transfert industriel des tests génétiques n'est pas prêt. Certains industriels en ont déjà pris conscience et demandent conseil aux laboratoires académiques pour interpréter les variations sur tel ou tel gène. De fait, l'interprétation des données ne pourra se faire sans la création et l'exploitation, par la communauté scientifique et médicale internationale, de banques de données génotype-phénotype de qualité. Plusieurs consortiums se sont ainsi constitués ces dernières années, tel le *Human Variome Project*, fondé en 2010, qui collecte les variations génétiques humaines affectant la santé humaine, ou la *Global Alliance*, une organisation internationale lancée en juin 2013 pour faciliter la circulation des informations en médecine génomique. De telles banques de données devraient peu à peu aider à préciser l'importance de telle ou telle mutation dans la survenue de maladies, leur variabilité d'expression, et à développer des mesures de prévention et de soin adaptées.

On le voit, le chemin est encore long, et il serait navrant que l'industrie des tests génétiques s'empare maintenant du marché des diagnostics génétiques. De surcroît, le fossé entre progrès techniques et capacité d'interprétation rend encore plus préoccupants les problèmes éthiques suscités par la connaissance de notre génome. Voudrons-nous « tout voir », au risque d'identifier des données fortuites, sans lien avec la maladie étudiée ? Et dans le cas contraire, quelles mutations tester ? Quels résultats communiquer à la personne et comment les présenter ? Comment préserver la dignité des personnes, leur assurer une offre de tests de qualité, une information claire et loyale, la confidentialité et l'autonomie dans leur choix de réaliser ou non une étude génétique ?

La loi de bioéthique de 2011 a donné à l'Agence de la biomédecine pour mission « de mettre à disposition du public une information sur l'utilisation des tests génétiques en accès libre et d'élaborer un référentiel permettant d'en évaluer la qualité ». Cette mission est primordiale. L'information des personnes et l'éducation à la génétique sont en effet la seule réelle protection que l'on puisse apporter aujourd'hui. ■

Dominique STOPPA-LYONNET dirige le Service de génétique de l'Institut Curie et est professeur à l'Université Paris Descartes.

Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Expertise scientifique : l'indépendance n'est pas tout

Entretien avec **Marie-Angèle HERMITTE**

Au cours des dernières décennies, les controverses mêlant des aspects scientifiques ou techniques à des questions de société se sont multipliées : scandales de santé publique – l'affaire du Mediator ou celle du sang contaminé par le VIH –, réchauffement climatique, OGM, énergie nucléaire, gaz de schiste, pesticides, etc.

Les controverses ont entre autres, mis en exergue le rôle des experts dans les processus de prise de décision par les autorités. La probité de certains de ces scientifiques a été mise en question, en raison notamment de l'existence de conflits d'intérêt.

L'indépendance des experts vis-à-vis des acteurs en présence est ainsi apparue comme une condition indispensable à une expertise digne de ce nom, et diverses procédures ont été mises en place pour la garantir. Ont-elles atteint leur objectif ? Peut-on les améliorer ? L'indépendance des experts suffit-elle à assurer la qualité de l'expertise ?

Pour la Science fait ici un point sur ces questions avec M.-A. Hermitte, spécialiste du droit et dont les travaux ont notamment porté sur l'expertise*. Un colloque international se tiendra d'ailleurs sur ce thème les 15 et 16 mai 2014 à Strasbourg (*L'indépendance des experts en question*, http://independance-experts.fr/).

M.-A. HERMITTE est directeur de recherche au CNRS et directeur d'études honoraire à l'EHESS

Le droit saisi au vif. Sciences, technologies, formes de vie. Entretiens avec Francis Chateauraynaud, Petra, 2013

POUR LA SCIENCE

Qu'est-ce qu'un expert ? En existe-t-il une définition juridique ?

MARIE-ANGÈLE HERMITTE : La plupart des textes évitent de définir l'expert. Si l'on synthétise tout ce qui est disponible, on peut dire que l'expert intervient dans l'instruction d'un dossier pour éclairer sur des faits techniques ou scientifiques celui qui doit prendre une décision (un juge, un ministre, une compagnie d'assurance, une personne privée, une agence sanitaire nationale ou internationale, etc.). Idéalement, cette personne est choisie et nommée par le commanditaire de l'expertise pour son savoir, reconnu par ses pairs, mais aussi pour son expérience du problème considéré et son expérience de la fonction d'expert.

Dans le domaine sanitaire et environnemental, les experts sont souvent des chercheurs ou des enseignants-chercheurs. Leur mission d'expertise, qui court en général sur plusieurs mois, voire plusieurs années, est effectuée en plus de leur charge de travail habituelle. Ce qui soulève des difficultés : le travail d'expertise peut perturber la carrière scientifique et cette activité supplémentaire n'est pas rémunérée, ou très peu.

L'actualité des dernières années a donné de nombreux exemples d'une telle situation, notamment dans l'affaire du Mediator, médicament commercialisé par les Laboratoires *Servier* pouvant avoir des effets cardiaques délétères ; dans le cadre de cette affaire, huit des personnes mises en examen sont des experts ou des dirigeants de l'Agence du médicament, accusés d'avoir eu des activités de conseil pour *Servier*.

PLS

L'expert doit être compétent, expérimenté… Doit-il aussi avoir des qualités morales ?

M.-A. H. : On attend bien sûr d'un expert qu'il soit impartial et, pour cela, qu'il fasse preuve d'indépendance. Il s'agit tout d'abord d'indépendance matérielle. « L'expert doit refuser toute mission dans laquelle il aurait un intérêt économique », comme l'indique par exemple la charte de déontologie de la Compagnie des experts agréés (d'assureurs). On rejoint ici la notion importante de conflit d'intérêts, situation où un expert a un intérêt personnel, autre qu'intellectuel, susceptible d'influer sur l'exercice de sa fonction.

PLS

Mais il n'y a pas que le conflit d'intérêts matériels qui peut fausser le travail d'un expert…

M.-A. H. : Non, en effet. L'indépendance inclut aussi l'indépendance d'esprit, qui doit conduire l'expert à faire abstraction de ses cadres de pensée pour être ouvert aux faits et aux connaissances scientifiques nouvelles. Cette exigence est sans doute impossible à satisfaire complètement, les experts étant des êtres humains. Par ailleurs, en

dehors de tout intéressement matériel, certains d'entre eux ont des convictions sincères qui les poussent, inconsciemment, à écarter certaines informations parce qu'elles contredisent leurs convictions. On pourrait appeler cela un conflit d'intérêts intellectuel. Prenez l'exemple de Pasteur : combien de temps lui fallut-il pour venir à bout de l'école de pensée dominante qui croyait à la génération spontanée ? Combien de temps fallut-il pour que les idées de l'Américaine Barbara Mac Clintock sur les gènes sauteurs lui valent le prix Nobel ?

PLS

Avec l'évolution récente des systèmes académiques, où les chercheurs sont de plus en plus contraints de trouver des financements extérieurs, notamment privés, les experts dépourvus de conflits d'intérêts ne sont-ils pas de plus en plus rares ?

M.-A. H. : Effectivement, le chercheur est soumis à des injonctions contradictoires. D'un côté, on lui demande d'être un expert indépendant de tout intérêt pour rendre des expertises impartiales ; de l'autre, on lui demande de trouver des financements extérieurs et de déposer des brevets. Beaucoup de ces financements sont publics, mais le chercheur est malgré tout soumis à la pression de faire de la recherche et du développement, ce qui implique une coopération avec l'industrie. C'est surtout dans les secteurs impliquant des évaluations de risque avant toute mise sur le marché d'un produit (pesticides, médicaments, etc.) que les financements industriels sont massifs. De plus, ils sont parfois assortis de procédés destinés à favoriser les intérêts des industriels concernés…

PLS

À quels procédés pensez-vous ?

M.-A. H. : Ils ont été abondamment décrits par différentes études et de nombreux articles de presse. On peut citer l'enrôlement de grands scientifiques, les « leaders d'opinion » : des articles présentant des recherches réalisées par des industriels sont signés par de grands universitaires (rétribués alors par l'industriel),

lesquels vont influencer par leur notoriété toute une série d'autres chercheurs du domaine.

D'autres biais sont introduits par la publication d'articles fondés sur des résultats partiels, voire falsifiés, par la non-publication des résultats négatifs, etc. La course à la publication en est pour partie responsable. Les recherches ne vont pas jusqu'au fond des choses, les résultats ne sont pas toujours vérifiés, ce qui relève aussi de la dégradation générale des conditions de travail des scientifiques : raréfaction des techniciens de laboratoire, chercheurs seniors trop occupés par leurs tâches administratives, etc.

PLS

Le choix des experts consultés par les autorités obéit-il à des critères bien définis ? Lesquels ?

M.-A. H. : Prenons le cas d'une agence d'évaluation de risques (comme l'Agence du médicament, l'ANSES, la Haute Autorité de santé, etc.). Elle cherche en premier lieu à se constituer un vivier

d'experts compétents dans tous ses domaines d'activité. Cela peut se faire par appel d'offres ou par réputation, réseau et cooptation. Un premier filtre est fondé sur la déclaration publique d'intérêts que tout expert doit rédiger avant d'être nommé. Un expert qui aurait des conflits d'intérêts majeurs dans tous ses domaines de compétence sera écarté du vivier, car il ne pourrait jamais siéger.

Dans un second temps, l'agence devra désigner ceux des experts qui vont évaluer tel ou tel dossier. Un deuxième filtre sera utilisé, consistant à voir si tel lien d'intérêts, mineur en règle générale, justifie ou non qu'il soit écarté du dossier en question. Ensuite, pour composer une commission, l'expertise étant collective, l'agence devra encore diversifier les compétences scientifiques, au nom du principe de pluralité posé par la loi de 2011 relative au renforcement de la sécurité sanitaire du médicament et des produits de santé. Et, en cas de controverses, elle devra diversifier les écoles de pensée au nom du « principe du contradictoire » posé par la même loi. Ce point est beaucoup plus nouveau et discuté. Mais chacune de ces étapes comporte le risque de ne pas voir ce qui posera problème quelques années plus tard.

PLS

Quels autres principes cette loi de 2011 a-t-elle instaurés ou rappelés ?

M.-A. H. : Un article de cette loi de 2011 stipule : « L'expertise sanitaire répond aux principes d'impartialité, de transparence, de pluralité et du contradictoire ». Les principes d'impartialité (ou d'indépendance) et de transparence étaient déjà présents, mais de façon dissémine. Désormais, ces principes figurent explicitement dans un article de loi unique et concis, ce qui leur confère un statut juridique privilégié.

PLS

Comment la transparence est-elle assurée ?

M.-A. H. : Cela dépend des agences, certaines étant plus avancées que d'autres dans ce domaine. Diverses procédures sont mises en œuvre : publication des déclarations d'intérêts des experts nommés, affichage de la composition des collectifs d'expertise, publication de leurs ordres du jour, accessibilité des procès-verbaux et enregistrements des délibérations. Les disparités entre sites internet des différentes agences donnent une bonne idée de la transparence offerte. On peut souligner que les nouvelles règles de transparence ont provoqué la démission d'un certain nombre d'experts « traditionnels », qui y voyaient l'instauration d'un régime de

suspicion. Les experts de la nouvelle génération les acceptent plus facilement.

PLS

Des spécialistes reconnus par leurs pairs pour leur compétence, mais qui ont des conflits d'intérêt, doivent-ils être disqualifiés en tant qu'experts ?

M.-A. H. : On a longtemps pensé que non. Il était admis que toute personne compétente avait des liens d'intérêts, à l'origine même de sa compétence (ce qui est excessif, mais en partie vrai). On pensait que, du moment que le lien n'était pas caché et que la délibération des experts était collective, cela n'avait pas d'impact négatif. Or c'est inexact, car un collectif d'experts ne fonctionne pas de manière égalitaire. Il se compose notamment d'un président, d'un rapporteur du dossier (celui qui est réputé connaître le mieux la question), du leader (d'opinion ou du groupe), qui ont des poids différents. Il en résulte des biais. Si le leader est aussi rapporteur, alors le reste de la commission discutera, fera changer telle appréciation à la marge, mais le lien d'intérêts du leader interviendra. Les textes imposent donc aujourd'hui d'écarter un tel expert (mais rien n'empêche de le consulter). Une autre proposition consiste à le flanquer d'un contradicteur. C'est une bonne piste, le problème étant que, généralement, le leader appartient à une école de pensée dominante, ce qui réduit le contradicteur à une position seconde.

PLS

Comment pourrait-on renforcer l'indépendance des experts ?

M.-A. H. : Il faut évidemment continuer dans la voie suivie depuis quelques années – la surveillance des déclarations publiques d'intérêts – et rendre banale la présence d'experts appartenant à des écoles de pensée différentes. Mais c'est insuffisant. Il faut aussi changer la façon dont on finance les évaluations de risques. Certes, il est bon qu'elles soient organisées et menées à bien par des agences et des experts les plus indépendants possibles. Cependant, elles doivent être payées exactement comme une prestation de services.

Pour l'heure, une partie des coûts est financée par un montant fixe facturé à l'entreprise, mais qui est loin de couvrir tous les coûts de l'opération. Il n'y a aucune raison à cela : une entreprise paie ses avocats ou ses communicants, elle doit aussi payer le coût des opérations nécessaires à la mise sur le marché de ses produits. La seule différence est qu'elle ne paiera pas directement les experts évidemment, mais l'agence qui, elle, rémunérera correctement les experts. Et dans le cas d'évaluations plus globales, par exemple sur les effets à long terme des particules fines, il serait normal que l'État ne soit pas le seul payeur et que les industriels financent partiellement ces évaluations – dont les résultats permettront de réorienter leurs productions.

PLS

L'indépendance des experts constitue-t-elle le principal problème soulevé par l'expertise aujourd'hui ?

M.-A. H. : Non, et je dirais même que plus les experts des agences sont indépendants, plus c'est en amont que le problème se pose, à savoir dans la fiabilité des résultats publiés dans les grandes revues scientifiques. Cela fait longtemps que certaines revues tirent la sonnette d'alarme : résultats non reproductibles, résultats rétractés, non-publication des résultats négatifs, résultats différents selon qu'ils sont le fait d'équipes liées à l'industrie ou d'équipes universitaires sans liens d'intérêt. Les experts rendent leurs évaluations à partir de résultats publiés, ils n'inventent pas, ils ne font pas de recherches. Certes, ils peuvent écarter des articles scientifiques dont la méthodologie leur paraît insuffisante, mais un tel examen des publications constitue une tâche immense, qui ne peut prétendre à la perfection.

PLS

La compromission de certains experts auprès de lobbies diminue-t-elle le prestige de la science et des scientifiques auprès de la société civile ?

M.-A. H. : Je ne crois pas du tout que le prestige de la science diminue. Les gens attendent beaucoup, espèrent beaucoup de la science et de la technique, même s'ils sont plus conscients qu'autrefois qu'une technique a toujours ses revers. En revanche, les experts, qui sont des scientifiques, mais placés dans une position particulière, font effectivement l'objet d'une suspicion. Ce qui n'est plus admis aujourd'hui, c'est l'affirmation selon laquelle un expert ayant des liens d'intérêts est suffisamment honnête et objectif sur le plan scientifique pour que l'on n'ait pas à tenir compte de ces liens.

PLS

Quelle place les « lanceurs d'alerte » ont-ils dans les dispositifs d'expertise ?

M.-A. H. : Le terme de lanceurs d'alerte recouvre des situations diverses. Les autorités de santé lancent régulièrement des alertes, les instruisent et aboutissent ainsi au retrait de certains produits. C'est alors un collectif d'experts mandaté à cet effet qui a fait le travail. On a aussi des scientifiques qui, de leur laboratoire, isolés ou en groupe, alertent sur un point de leur compétence qui leur paraît mal pris en charge par les autorités publiques (par exemple l'excès de sucre ou de sel dans l'alimentation). On connaît ensuite des scientifiques reniés par leur communauté d'origine qui lancent des alertes dont la majorité récuse la validité : c'est le cas pour la toxicité alimentaire des OGM. Au-delà, il y a toutes les alertes lancées par des professionnels ayant une connaissance pratique d'un métier, tels les apiculteurs, ou des citoyens qui constatent la dérive d'une décharge, etc.

Ainsi, il n'existe pas de profil type pour les lanceurs d'alerte. Comment les intégrer convenablement aux dispositifs d'expertise ? Cela reste une question ouverte, au même titre que l'association de la société civile à une place précise dans le processus d'expertise. ■

Propos recueillis par Maurice MASHAAL

Notre métier facilite le vôtre

DISTRIBUTEUR EXPERT EN LOGICIELS SCIENTIFIQUES

PLANS D'EXPÉRIENCES

PUBLICATION D'ARTICLES

STATISTIQUES DÉCISIONNELLES

SUPPORT TECHNIQUE

CARTOGRAPHIE STATISTIQUE

SOURCING UNIQUE

CALCUL DE L'INGÉNIEUR

ACTUALITÉ PRODUITS

CALCUL ET SIMULATION

SUIVI DES LICENCES

ÉPIDÉMIOLOGIE

NEWSLETTER

ÉCONOMÉTRIE

ACCOMPAGNEMENT

ANALYSE DE RISQUES

RÉSEAUX SOCIAUX

RITME

NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

E-DÉMO

RENCONTRES D'EXPERTS

RÉACTIVITÉ

WEBINARS

TRAVAIL COLLABORATIF

ENJEUX MULTI-CULTURELS

UNIVERS MÉTIERS

PETITS DÉJEUNERS THÉMATIQUES

ÉCHANGES

E-LEARNING

FORMATIONS INTER - INTRA

RITME
NOTRE MÉTIER : FACILITER LE VÔTRE

www.ritme.com

Votre partenaire pour tous vos logiciels scientifiques et techniques

HOMO SAPIENS INFORMATICUS par Gilles Dowek

L'enseignement en ligne et la bombe démographique

Plutôt que des « fossoyeurs de l'université », les cours en ligne sont une adaptation de l'enseignement supérieur

Il est devenu rare d'assister à un débat sur le développement de l'enseignement en ligne – les MOOC *(Massive Open Online Course)* – sans que cet enseignement soit, à un moment ou un autre, accusé d'être le « fossoyeur de l'université ». En 2013, le philosophe Pascal Engel, de l'EHESS, a choisi une autre métaphore : les cours en ligne, massifs et ouverts seraient « des armes de destruction massive du savoir et de l'université » (http://tinyurl.com/o2hjwxu). Pourquoi ? Parce que les principes de base de l'enseignement supérieur – le droit pour les étudiants d'avoir accès au professeur, le droit pour les enseignants d'être les auteurs de leurs cours, la liberté académique, etc. – seraient menacés par le développement des cours en ligne.

Concédons pour les besoins du débat – car c'est loin d'être évident – que cela soit le cas : que l'enseignement en ligne prive, par exemple, les enseignants de leur liberté académique. Cela serait-il à déplorer ? Sans doute, si l'on postule que le rôle de l'université est de garantir la liberté académique des enseignants. Mais le rôle de l'université est davantage celui de donner, à chacun, accès à une part de cet héritage commun de l'humanité qu'est la connaissance. Ainsi, c'est uniquement à l'aune de cet objectif – et non du respect des principes de base de l'enseignement supérieur – qu'il convient d'évaluer les avantages et les inconvénients de différents systèmes académiques.

De ce point de vue, on peut noter que l'université a fait des progrès au fil du XX^{e} siècle, mais qu'elle dispose encore d'une importante marge de progression : par exemple, seuls 40 pour cent des jeunes Français achèvent leurs études avec un diplôme de l'enseignement supérieur. Certes, on peut se féliciter que le nombre d'étudiants ait doublé tous les 10 ou 15 ans durant la seconde moitié du XX^{e} siècle (en 2001, l'université française accueillait 1,5 million d'étudiants, contre 50 000 en 1938), mais on voit mal aujourd'hui comment accueillir l'ensemble de la population mondiale à l'université et accompagner ensuite son besoin de formation et sa soif de connaissance tout au long de la vie, sans mutualiser quelques cours. Or c'est précisément ce que permet l'enseignement en ligne.

Dans quelques siècles, les démographes analyseront peut-être notre époque comme celle d'une transition démographique du système académique.

Il est certain que son adoption transforme le métier d'enseignant, et peut-être aussi quelques principes de base de l'enseignement supérieur. Mais il faut noter que ce métier fait partie des rares qui étaient restés à l'écart de la révolution informatique. Les ouvriers ont appris, parfois douloureusement, à utiliser des machines à commande numérique, les comptables à utiliser des tableurs, mais les enseignants ont continué à faire cours de façon artisanale devant les mêmes amphithéâtres d'étudiants attentifs et dociles. Il n'est donc pas si surprenant que les enseignants finissent, eux aussi, par se demander comment les progrès de l'informatique peuvent les aider à mieux enseigner.

Quand la mortalité et la natalité baissent avec un décalage dans le temps, il se crée une période de transition démographique, caractérisée par une forte augmentation de la population. Dans quelques siècles, les démographes analyseront peut-être notre époque comme celle d'une transition démographique du système académique, au cours de laquelle la population étudiante avait déjà fortement augmenté, mais où les techniques permettant d'enseigner à de telles hordes d'étudiants n'existaient pas encore.

L'effet de cette transition démographique, diront-ils peut-être, était une dégradation des conditions de travail des enseignants (ainsi, en 1984, la charge horaire des enseignants français a augmenté du jour au lendemain de 50 pour cent). Peut-être diront-ils aussi que cette dégradation des conditions de travail des enseignants n'a pris fin qu'avec le développement de techniques leur permettant d'enseigner à davantage d'étudiants, sans être accablés d'heures de cours.

Comment mettre en œuvre de tels enseignements, selon quelle modalités précises, et pour quels étudiants ? Voilà les questions auxquelles nous devons aujourd'hui collectivement trouver des réponses. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du Conseil scientifique de la Société informatique de France.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

Avec plus d'1 million de Sociétaires, on peut déplacer des montagnes

Quand une banque tire sa force de l'esprit coopératif, elle s'appuie sur des valeurs de solidarité, d'écoute et de confiance. *Créée par des enseignants, la CASDEN s'engage ainsi auprès de plus d'un million de Sociétaires à réinvestir leur épargne dans le financement des projets de chacun.*

Rejoignez-nous sur **casden.fr** *ou contactez-nous au* **0826 824 400***

Accueil téléphonique ouvert de 8h30 à 18h30 du lundi au vendredi (0,15€ TTC/min en France métropolitaine)

BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible en Délégations Départementales et également dans le Réseau Banque Populaire

casden
BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronne

Comment faire un miracle ?

Les statistiques sont contre les miracles : il suffit de rassembler un grand nombre de personnes pour que l'une d'elles guérisse… spontanément !

Produire un miracle n'est pas chose facile. Cela devient même de plus en plus dur. Si l'on prend l'exemple de Lourdes, on constate qu'il y a près de quatre fois moins de guérisons miraculeuses reconnues par an depuis les années 1960. La raison en est que la rigueur de la commission scientifique de Lourdes s'est accrue. Tout individu postulant au statut de miraculé doit désormais passer une série de contrôles exigeants. Il faut d'abord s'entretenir avec le président de l'Association médicale internationale de Lourdes. C'est lui qui opère un premier tri parmi les quelque 50 personnes postulant en moyenne chaque année au titre de miraculé. Pas même un pour cent de ces dossiers aboutira à une reconnaissance officielle de l'Église. Ensuite, le dossier est examiné par une commission de médecins qui, si elle le juge suffisamment intéressant, avertit l'évêque de son diocèse. Dès lors, le dossier est entre les mains du Comité médical international de Lourdes. Un spécialiste de la pathologie considérée examine le dossier, puis recherche si cette guérison, supposée miraculeuse, ne peut pas s'expliquer par la science, ce qui nécessite de se familiariser avec les recherches les plus pointues.

Les critères que retient cette commission de médecins pour donner un avis favorable aux guérisons inexpliquées sont drastiques : la maladie doit être avérée et très grave avec un pronostic fatal, elle doit être organique ou lésionnelle (ce qui exclut les psychopathologies), et un traitement ne doit pas avoir été à l'origine de la guérison (ce qui exclut les guérisons de cancer), laquelle doit être soudaine et durable. Malgré cela, quelques dossiers résistent, ces cas ne pouvant être expliqués en l'état actuel de la connaissance médicale. Le problème est que Lourdes n'a pas le monopole des guérisons inexplicables : les milieux hospitaliers connaissent, eux aussi, le bonheur de voir certains de leurs patients, manifestement condamnés, guérir sans que leur médecin puisse l'expliquer.

Les cas de rémissions spontanées dans les milieux hospitaliers donnent lieu à une vingtaine de publications annuelles dans le monde. Les Américains Brendan O'Regan et Caryle Hirshberg ont analysé de façon exhaustive les publications portant sur ce genre de guérisons de 1864 à 1992. Ils ont recensé 1 574 cas. On notera d'abord que 70 pour cent de ces guérisons concernent un cancer. Mais, nous l'avons évoqué, la Commission médicale internationale de Lourdes ne considère pas les cas de rémissions de cancer.

Sur ces 1 574, seuls 30 pour cent donnent lieu à des guérisons qui pourraient être considérées comme miraculeuses par la commission de Lourdes. Parmi ces 30 pour cent, on observe des guérisons de maladies très diverses. Mais B. O'Regan et C. Hirshberg constatent que ces cas de guérisons surviennent à une fréquence estimée à 1 cas pour 100 000. Si l'on exclut de ces résultats les guérisons de cancer, on obtient 1 cas pour 333 333. Il existe quelques hypothèses pour rendre compte de ces guérisons inexplicables en milieu hospitalier, mais l'on peut admettre globalement que la médecine n'est pas compétente, pour le moment, pour expliquer les guérisons miraculeuses, qu'elles aient lieu à Lourdes ou en milieu hospitalier.

NOTRE DAME DU ROSAIRE, à Lourdes

La question est donc de savoir si Lourdes, de ce point de vue est, en effet, une terre d'élection du miracle. Avec à peu près 0,2 guérison par an à partir des années 1960 et en moyenne six millions de pèlerins visiteurs, on peut estimer qu'il y a une guérison pour 30 millions de personnes. Il suffit donc qu'une personne sur 100 parmi les visiteurs de Lourdes soit atteinte d'une maladie éligible au miracle pour qu'on en déduise que si Dieu pointe son doigt pour guérir, il ne le fait pas plus à Lourdes que dans les hôpitaux.

La conclusion un peu cynique de tout cela est que pour faire des miracles, il suffit de réunir un très grand nombre de personnes. Mais dans ces conditions, personne ne s'étonnera que les papes réunissent facilement les conditions de leur canonisation (l'une étant la production de miracles). En effet, ce serait bien le diable, si l'on me permet l'expression, que parmi les centaines de millions de rencontres auxquelles contraint la vie de pape, il ne se trouve pas quelques malades sauvés par la providence du hasard ! ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

SCIENCE & DÉVELOPPEMENT DURABLE ENFIN RÉCONCILIÉS !

Actuellement en vente en kiosque

www.green-magazine.fr

LISEZ GRATUITEMENT NOS DEUX DERNIERS NUMÉROS !

QUESTIONS OUVERTES

Comment améliorer l'acceptation des vaccins

Il est indispensable d'accroître la couverture vaccinale de la population générale. Pour ce faire, il faut expliquer pourquoi la santé de tous passe par la prévention individuelle.

Pierre BÉGUÉ

Inoculer une forme de la variole issue des vaches pour immuniser contre la maladie remonte au XVIII[e] siècle en Occident, avec les travaux de l'Anglais Edward Jenner. Mais ce sont les travaux de Louis Pasteur, à la fin du XIX[e] siècle, qui ont apporté des explications scientifiques à l'efficacité de l'inoculation : l'injection d'un microbe peu virulent ou atténué active le système de défense de l'organisme, qui est ainsi préparé à riposter efficacement en cas de rencontre avec l'agent pathogène virulent. Progressivement, la panoplie des vaccins disponibles pour prévenir diverses maladies s'est étoffée : après la vaccine, sont venus les vaccins contre la rage, la typhoïde, la peste, la tuberculose, la diphtérie, le tétanos, etc. Depuis une trentaine d'années, les vaccins se sont multipliés et ont été améliorés. Peu à peu, l'usage de vaccins plus élaborés s'est répandu, y compris dans les pays en développement. Les différentes campagnes vaccinales ont, par exemple, eu pour conséquence la disparition de la variole, dont le dernier cas a été enregistré en 1977.

Pourtant, malgré ces améliorations et ces succès, on assiste dans tous les pays à une perte de confiance envers les vaccins. Au fil des décennies, à mesure que le souvenir des épidémies passées s'estompait, que les accidents de vaccination étaient médiatisés, que s'installait une méfiance envers la science et l'industrie pharmaceutique, le refus de la vaccination systématique a pris de l'ampleur. Ces comportements conduisent à une insuffisance de la couverture vaccinale, à la persistance d'épidémies, telles que l'épidémie de rougeole en Europe, ou encore à la réapparition de maladies, telle la coqueluche. Quelles sont les causes – le plus souvent irrationnelles – d'une telle attitude qui nuit tant à la santé individuelle qu'à la santé publique ? Après avoir examiné les raisons du refus croissant de la vaccination, nous évoquerons quelques pistes pour lutter contre cette attitude délétère à court et à long termes.

Les débats autour des vaccins sont apparus il y a longtemps. Ainsi, les détracteurs de la « variolisation » en France, au XVIII[e] siècle, s'opposaient aux Encyclopédistes, tenants de l'inoculation. Arguments politiques ou religieux le disputent aujourd'hui encore aux arguments philosophiques, et une meilleure connaissance de l'immunologie accroît la peur des réactions auto-immunes, argument fréquent des mouvements antivaccinaux. Le phénomène s'amplifie, et il faut trouver comment inverser la tendance au risque de voir resurgir des maladies quasi oubliées. Un pour cent environ de la population générale est opposé à toute vaccination. Ces personnes sont souvent affiliées à des associations ou à des ligues antivaccinales. Et, à côté des oppositions nettes et déclarées, de nombreuses formes de refus existent, notamment hésitations, omissions, réticences.

MALGRÉ LES AMÉLIORATIONS, on assiste dans tous les pays à une perte de confiance envers les vaccins

Une enquête portant sur des mères refusant les vaccinations systématiques a été réalisée en 1992-1993. Elle a mis en évidence quatre types de mères : celles qui recherchent une médecine alternative, celles qui revendiquent de choisir librement leur vaccin, celles qui évaluent avec leur médecin les bénéfices et les risques d'une vaccination, et celles qui font confiance au médecin, mais veulent être rassurées.

Plusieurs travaux ont porté sur les causes du refus de vaccination aux États-Unis. En 2003, le Centre américain de contrôle et de prévention des maladies, CDC, a étudié la signification des retards à la vaccination chez 2 921 parents d'enfants âgés de 19 à 35 mois. Les parents qui retardent la vaccination de leur enfant parce qu'il est souffrant ont un profil différent de ceux qui la diffèrent parce qu'ils doutent de l'efficacité ou de la sécurité des vaccins. La couverture vaccinale complète des enfants âgés de 24 mois est de 70 pour cent pour le premier groupe, contre seulement 46 pour cent pour le second. Les parents réticents consultent davantage Internet que leur médecin, ont un niveau d'instruction supérieur et un niveau économique plus élevé que celui des autres parents. Les études montrent que les parents des enfants n'ayant reçu aucune vaccination s'y étaient opposés intentionnellement, alors que les parents des enfants insuffisamment vaccinés avaient surtout fait preuve de négligence ou avaient oublié vaccins ou rappels. Le refus vaccinal au cours de l'adolescence est bien connu grâce à des investigations récentes

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

sur l'application de la vaccination contre les papillomavirus, agents infectieux sexuellement transmissibles et dont certains sont responsables de cancers du col de l'utérus. Des campagnes de vaccination ont été lancées à partir de 2006, mais avec des succès inégaux. La vaccination doit respecter un calendrier très précis, les jeunes filles ne doivent pas être ou avoir été infectées. En outre, le vaccin ne protège pas contre tous les papillomavirus. En France, on estime à 30 pour cent les jeunes filles âgées de 15 ans qui ont été correctement vaccinées contre les papillomavirus depuis 2006. Mais ce vaccin n'est pas à l'abri des polémiques, que ce soit en France ou dans d'autres pays. Ainsi, en septembre 2011, un débat s'est engagé aux États-Unis sur la vaccination des jeunes filles contre les papillomavirus, suite aux déclarations d'une députée qui accusait ce vaccin d'avoir provoqué un retard mental chez une fille âgée de 12 ans.

La peur des maladies supplantée par la peur des vaccins

La crainte de maladies souvent disparues et méconnues (tétanos, diphtérie, poliomyélite, etc.) a été peu à peu supplantée par la crainte des effets secondaires des vaccins, et l'évaluation des bénéfices par rapport aux risques a totalement changé. Les peurs vaccinales sont alimentées par les crises qui surviennent de temps à autre à propos d'un vaccin particulier. Une des difficultés tient à ce qu'elles persistent longtemps, même quand la sécurité du vaccin est avérée.

Rappelons quelques-unes de ces crises : la crainte des lésions neurologiques provoquées par les vaccins contre la coqueluche à germes entiers a provoqué l'arrêt du vaccin dans beaucoup de pays et un état endémique de la coqueluche en Europe de 1978 à 1996. Cela a conduit à la mise au point de nouveaux vaccins bien tolérés. En Grande-Bretagne, le vaccin contre la rougeole fut accusé en 1998 de provoquer l'autisme et la maladie de Crohn. Il fallut attendre 2010 pour que le vaccin soit réhabilité. Ce rejet s'est propagé aux États-Unis, où l'on constatait encore en 2010 que certains États avaient une couverture insuffisante contre la rougeole. En France, le vaccin contre l'hépatite B a été accusé de déclencher la sclérose en plaques. Cette vaccination continue à être redoutée malgré les études qui, depuis 1995, ont montré qu'il n'existe pas de lien entre le vaccin et cette maladie. La peur des adjuvants, notamment de l'aluminium, a relayé cette polémique à la suite de la vaccination contre la grippe en 2009.

D'où viennent ces croyances ? Leurs sources sont nombreuses : on trouve beaucoup plus de critiques alarmistes sur les sites internet et sur les blogs que de recommandations en faveur des vaccins ou d'informations avérées. Les réseaux sociaux contribuent à disséminer des informations fausses. Les médias – journaux, radio, télévision – entretiennent plus les peurs diverses qu'ils ne fournissent d'informations. Les débats télévisés sont très déséquilibrés entre anti- et provaccins, semant le doute dans le public.

De surcroît, les sociétés contemporaines ne font plus confiance aux experts. Ce phénomène est général et les vaccins n'y échappent pas. La validité des connaissances scientifiques est remise en question et la bonne foi des experts est suspecte en raison de conflits potentiels d'intérêt avec l'industrie des vaccins.

Quelles sont les conséquences d'un refus des vaccins et d'une couverture vaccinale insuffisante ? Cela conduit à la persistance des maladies et à de possibles épidémies. Une couverture vaccinale insuffisante entraîna la persistance de la coqueluche en Europe et la réapparition de la diphtérie en 1990 en Russie. Depuis 2008, la rougeole sévit en Europe, car certains pays, dont la France, après de longues années de stagnation de leur couverture vaccinale, sont le siège de foyers épidémiques, des complications graves touchant les nourrissons, mais aussi des adolescents et des adultes. La poliomyélite aurait pu être éliminée, car on dispose d'un vaccin très efficace. Malheureusement, le refus du vaccin dans certaines régions du monde a permis la survenue d'épidémies, ce qui indique que la vaccination sera encore nécessaire pour très longtemps dans le monde entier.

Comment améliorer l'acceptabilité des vaccins ? Trois grands axes sont à privilégier : l'information, la formation et les mesures de santé publique. Pour restaurer la confiance perdue, on doit raviver l'intérêt de la population pour les disciplines scientifiques. Une formation claire à la biologie et aux sciences exactes des collégiens et des lycéens permettrait au public de mieux comprendre les notions d'épidémiologie qui sous-tendent la

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

Les adjuvants

Pour améliorer l'efficacité des vaccins, on utilise des substances nommées adjuvants, qui renforcent la réponse immunitaire. On a montré qui stimulent les mécanismes de l'immunité.

Des travaux réalisés au début des années 2000 ont montré qu'un vaccin contenant des adjuvants aluminiques injectés par voie intramusculaire déclenche une réaction inflammatoire locale permettant le recrutement spécifique des cellules de l'immunité et la libération de médiateurs qui, avec l'hydroxyde d'aluminium, favorisent la production d'anticorps.

Mais l'aluminium n'est pas présent naturellement dans l'organisme. C'est un produit neurotoxique en cas de forte ingestion ou d'une consommation chronique de doses élevées. Un seuil de concentration maximale a été adopté en 2010 : il est égal à un milligramme d'aluminium par kilogramme de poids corporel.

Diverses études ont montré que les adjuvants restent indispensables à la plupart des vaccins. Des adjuvants non aluminiques sont à l'étude. Ils ne sont pas destinés à remplacer les sels d'aluminium, mais à permettre d'élaborer de nouveaux vaccins contre des maladies telles que le paludisme, l'infection à VIH ou certains cancers.

De surcroît, les sels d'aluminium ont été accusés de déclencher des maladies auto-immunes. Toutefois, l'analyse détaillée des conditions nécessaires au déclenchement d'une telle maladie n'a révélé aucun rôle éventuel des vaccins ou des adjuvants.

Divers travaux réalisés chez l'animal montrent que les vaccins injectés aux nourrissons et prévus par le calendrier vaccinal exposent à un risque très inférieur à celui qui a servi à définir la dose de sécurité pour l'alimentation des tout petits.

justification de la vaccination. Ces notions sont nécessaires pour comprendre comment fonctionne un vaccin, l'intérêt d'une vaccination systématique, quels en sont le coût et les éventuels effets secondaires. Comme tout médicament, un vaccin s'évalue à l'aune de l'intérêt qu'il présente pour l'individu (et pour la société) par rapport aux risques potentiels.

En France, seuls les vaccins contre le tétanos, la diphtérie et la poliomyélite sont obligatoires, les autres vaccins étant seulement recommandés. Cette dualité fait croire au public qu'un vaccin recommandé peut être facultatif, ce qui entrave la compréhension de la politique vaccinale. Une enquête française de l'Institut de veille sanitaire et de l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé datant de 2005 a montré que 56,5 pour cent de la population et 42 pour cent des médecins sont favorables à l'obligation, mais ni l'obligation ni la recommandation vaccinale ne sont des solutions idéales face au refus vaccinal. Les non-vaccinations sont dues à la crainte des effets secondaires et au manque d'information, notamment sur les notions de bénéfice et de risque individuels et collectifs. Un vaccin bénéficie à l'individu concerné, mais aussi à la collectivité. En effet, un vaccin peut prévenir une maladie sans agir sur sa transmission, l'agent pathogène pouvant se propager indépendamment de l'homme ; c'est le cas du vaccin contre le tétanos ou contre la tuberculose. Mais généralement, le bénéfice est à la fois individuel et collectif : un individu vacciné n'est plus malade et ne transmet plus l'agent pathogène aux personnes qu'il côtoie. Ce « bénéfice collectif » est perçu positivement par certains – la vaccination améliore la santé publique – ou négativement par d'autres qui considèrent que la vaccination est un choix personnel.

Toutefois, pour parvenir à contrôler ou à éliminer une maladie infectieuse par un vaccin, il est indispensable qu'au moins 80 pour cent de la population soit vaccinée, proportion qui dépend de l'agent infectieux, de son mode de propagation, de sa virulence. Le bénéfice individuel de la vaccination doit être associé à la recherche du bénéfice collectif. Si beaucoup considèrent que la vaccination est un droit, faisant partie du droit à la santé, certains considèrent que le refus de vaccination est également un droit. Et la vaccination systématique, telle qu'elle est définie par les calendriers vaccinaux, est de plus en plus souvent discutée à mesure que progressent les conceptions individualistes dans les sociétés occidentales. Dès lors, il faudrait expliquer longuement à ceux qui revendiquent la possibilité de ne pas privilégier le bénéfice collectif les conséquences épidémiologiques et écologiques néfastes de leur réticence.

Si ces réticences se retrouvent dans de nombreux pays, la France est en outre confrontée à une dispersion des moyens et des acteurs : État, conseils généraux et agences concernées par la politique vaccinale – Haute Autorité de santé, Haut Conseil de santé publique, Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé, ANSM, Institut national de prévention et d'éducation pour la santé, INPES, Assurance-maladie, Éducation nationale, ministère de la Santé, auxquels s'ajoutent les communes et les associations. Cette multitude d'acteurs réduit l'efficacité des stratégies vaccinales.

Les oppositions vaccinales représentent un obstacle à la prévention des maladies infectieuses et leur développement est préoccupant dans tous les pays occidentaux. Toutes les enquêtes montrent que le manque d'information des parents est un des facteurs essentiels de la mauvaise couverture vaccinale. L'influence croissante des médias et d'Internet rend urgente une réflexion internationale pour lutter contre les informations non scientifiques et fausses. Une meilleure organisation des structures responsables de la vaccination est souhaitable en France pour que le public soit mieux informé et que l'on trouve comment faire renaître la confiance vis-à-vis des vaccins, la meilleure façon de prévenir les épidémies qui pourraient déjà, pour beaucoup, appartenir définitivement au passé. ■

Pierre BÉGUÉ, professeur de pédiatrie et infectiologue, est ancien Président du Comité technique de vaccination. Il est membre de l'Académie nationale de Médecine.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

puf

POUR LA SCIENCE

Éditions Le Pommier

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

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

17e édition

PRIX Le Monde DE LA RECHERCHE UNIVERSITAIRE

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

Doctorats de sciences humaines et sociales (toutes disciplines) soutenus entre le 31 octobre 2012 et le 31 décembre 2013.
Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 9 mai 2014 inclus.

Doctorats de sciences mathématiques, mécaniques, informatiques, physiques, chimiques, sciences de la Terre et de l'univers, sciences du vivant, neurosciences, médecine (doctorats de recherche uniquement), etc., ainsi que dans les technologies correspondantes soutenus entre le 31 octobre 2012 et le 31 décembre 2013.
Les inscriptions seront enregistrées jusqu'au 9 mai 2014 inclus.

Prolongation des inscriptions jusqu'au 16 mai 2014

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

Le Monde

FONDATION CREDIT COOPERATIF
FONDATION D'ENTREPRISE

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

france info

Lu sur SciLogs
Les blogs scientifiques de Pour la Science

Les filles, sous-notées en mathématiques ?

par Nicolas Gauvrit

Nous avons tous des stéréotypes en tête. Par exemple, que les femmes « sont faites » pour les lettres, et les hommes pour les sciences. Certaines de ces idées reçues sont fausses, ou du moins liées à un contexte : les femmes sont aujourd'hui majoritaires parmi les étudiants en médecine. Les stéréotypes de genre ont parfois une influence négative sur l'égalité homme-femme. Les parents traitent par exemple leurs enfants différemment, en parlant notamment d'une voix plus douce à un bébé fille qu'à un bébé garçon.

Pourtant, s'il ne fait aucun doute que des stéréotypes de genre existent et qu'ils peuvent avoir une influence sur les comportements, accentuer ou créer des inégalités, ces faits sont souvent surinterprétés.

Précisons d'abord que les stéréotypes ne sont pas tous faux et irrationnels. Au contraire, nos idées reçues ont souvent un fondement statistique réel. Les hommes prennent plus de risques que les femmes ? Les petits garçons préfèrent plutôt les voitures et les petites filles, les poupées ? Ce sont des stéréotypes, mais ils sont vérifiés. Ces différences sont peut-être d'origine culturelle et accompagnées d'un effet autoréalisateur, mais elles sont bien réelles.

Précisons ensuite que les stéréotypes sont souvent faux si on les applique à des individus en particulier. Que les garçons aient une préférence moindre pour les poupées ne signifie pas que tout garçon préfère les petites voitures, et un garçon qui préfère les poupées n'est évidemment pas moins « garçon » (et inversement pour les filles).

Cela étant, les stéréotypes ont-ils des effets partout où ils sont susceptibles de s'exprimer ? C'est souvent le cas, mais il y a des exceptions. Prenons l'exemple des évaluations en mathématiques à l'école. Annette Jarlégan, de l'Université de Lorraine, a récemment évoqué des travaux qui montreraient que le stéréotype des filles moins bonnes en mathématiques se traduit par une notation plus sévère des filles par les enseignants. Les filles seraient ainsi sous-notées en mathématiques par rapport aux garçons. Pour le démontrer, des chercheurs ont utilisé la méthode de la double copie : la même copie est donnée à corriger à plusieurs enseignants, mais on indique tantôt qu'elle vient d'une fille et tantôt d'un garçon.

Mais A. Jarlégan ne donne aucune référence. Je l'ai donc contactée, ainsi que Marie Duru-Bellat, spécialiste des discriminations à l'école et auteure notamment du livre *L'école des filles*. Leurs réponses furent hélas décevantes : une thèse non publiée sur l'évaluation en sciences physiques, le livre de M. Duru-Bellat en question, une conférence introuvable datant de 1983... et aucun article publié dans une revue scientifique à comité de lecture.

Me voilà donc parti à la pêche aux articles scientifiques. Première surprise : il n'y a presque rien sur le sujet ! Un article de M. Duru-Bellat de 1995 fait le point sur des questions proches. On y apprend par exemple que les comportements des enseignants sont différents selon qu'ils s'adressent aux garçons ou aux filles, notamment le niveau d'encouragement. Mais rien ne vient corroborer l'idée que les filles seraient moins bien notées en mathématiques. Bien au contraire, les filles sont mieux notées que les garçons en moyenne et à niveau égal ! Cela s'expliquerait, selon M. Duru-Bellat, par leur comportement plus conforme aux attentes des enseignants.

Les quelques publications sur le sujet donnent une image différente de ce qu'on attendrait. Dans les études qui considèrent les évaluations des enseignants en classe, on contrôle le niveau réel des élèves, puis on le compare aux notes fournies par l'enseignant. On retrouve alors généralement que les filles sont en moyenne surnotées par rapport aux garçons.

Dans les quelques études en double aveugle où des enseignants doivent noter des copies attribuées à des garçons ou des filles, on ne constate en général aucune différence. Par exemple, en 2001, Robert Helwig, Lisbeth Anderson et Gerald Tindal ont étudié l'évaluation par les enseignants des performances en mathématiques de plus de 500 élèves. Ils ne trouvent aucun effet du sexe sur cette évaluation. Globalement, on peut donc dire qu'il n'y a pas de discrimination sexiste dans les notations à l'école, du moins en mathématiques.

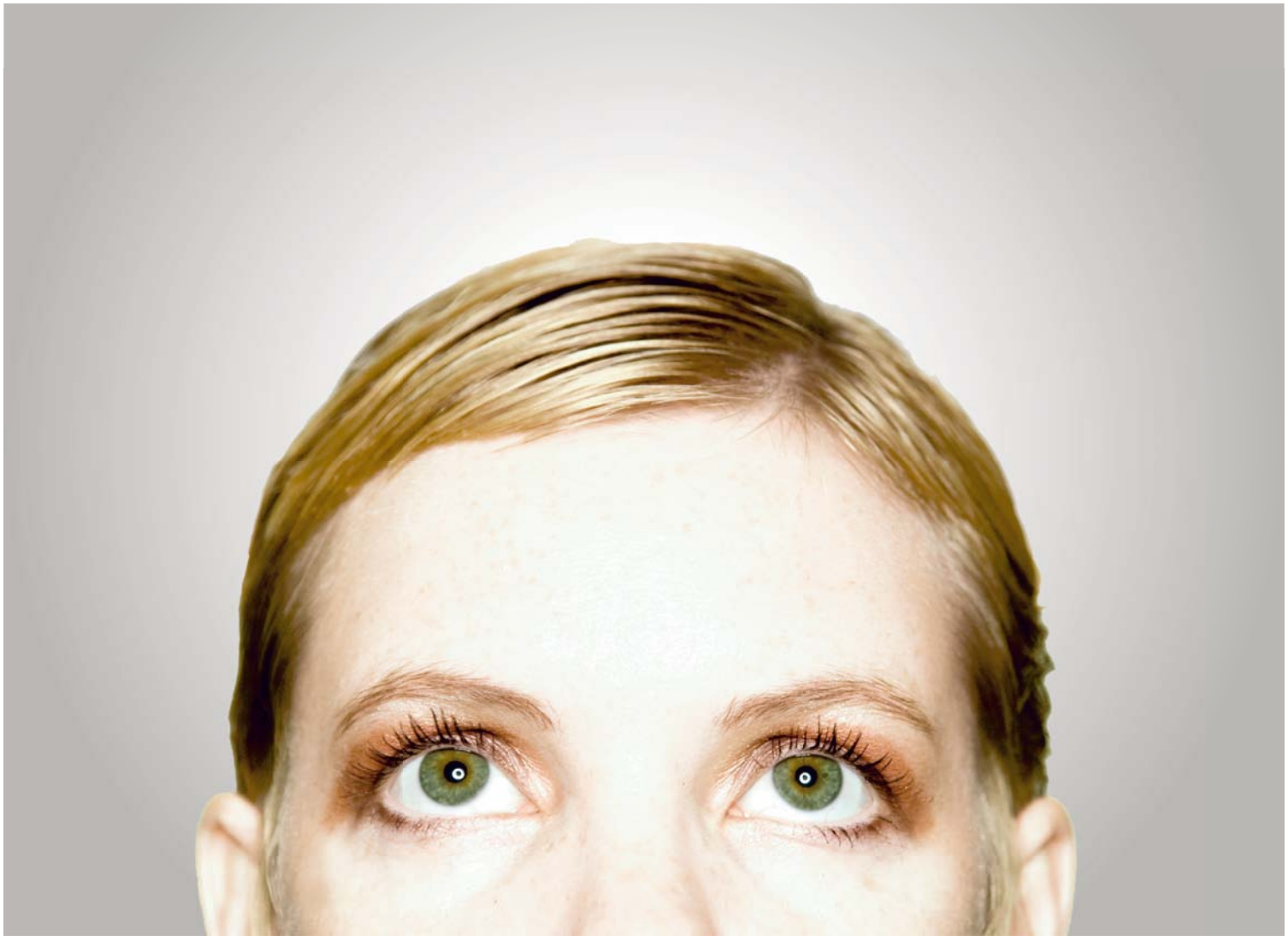
Tout cela, bien sûr, ne remet pas en cause l'existence bien réelle de stéréotypes. Dans de nombreux domaines, tel celui du recrutement des chercheurs, des expériences ont prouvé des discriminations sexistes. À l'école même, elles sont établies en ce qui concerne les encouragements, le temps passé avec chaque élève, etc. Mais pour les notes, cela n'est pas le cas. ■

Nicolas GAUVRIT est maître de conférences en mathématiques à l'Université d'Artois et psychologue du développement. Il est l'auteur du blog Raison et Psychologie : http://www.scilogs.fr/raisonetpsychologie

Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux

AcademiaNet

La base de données qui rassemble toutes les femmes scientifiques de renommée internationale



AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème »Women in Science«

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

nature

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

Le **proton**, un problème de taille

Jan Bernauer et Randolph Poh

Quel volume la charge électrique du proton occupe-t-elle ? Deux expériences récentes, fondées sur des méthodes distinctes, livrent des valeurs précises... mais différentes ! Une anomalie intrigante, qui annonce peut-être de futures découvertes

Le proton est si familier qu'il pourrait sembler dépourvu de tout mystère. Cette particule est le principal constituant de l'Univers observable et alimente les fournaises que sont les étoiles. Par son étude, ou du moins par celle de l'atome d'hydrogène, où le proton, de charge positive, est lié à un électron de charge négative, les physiciens sont parvenus à la révolution quantique, au début du XX^{e} siècle. Et aujourd'hui, au CERN près de Genève, les chercheurs utilisent d'intenses faisceaux de protons fortement accélérés pour faire naître, par le biais de collisions frontales, des particules exotiques telles que le boson de Higgs.

La familiarité du proton est trompeuse. Des études récentes portant sur cette particule ont donné lieu à des résultats surprenants. Dans le cadre de deux expériences complémentaires, nos équipes respectives ont effectué les mesures les plus précises à ce jour du rayon du proton. Lorsque ces travaux ont débuté, nous anticipions que nos résultats permettraient d'ajouter quelques degrés de précision à la taille connue du proton. Nous avions tort : un grand fossé sépare les résultats des deux expériences *(voir l'encadré page 31)*. La différence entre les deux valeurs obtenues pour le rayon du proton est égale à plus de cinq fois l'incertitude sur l'une ou l'autre valeur ; cela signifie que la probabilité que ce désaccord soit le fruit du hasard est inférieure à un sur un million.

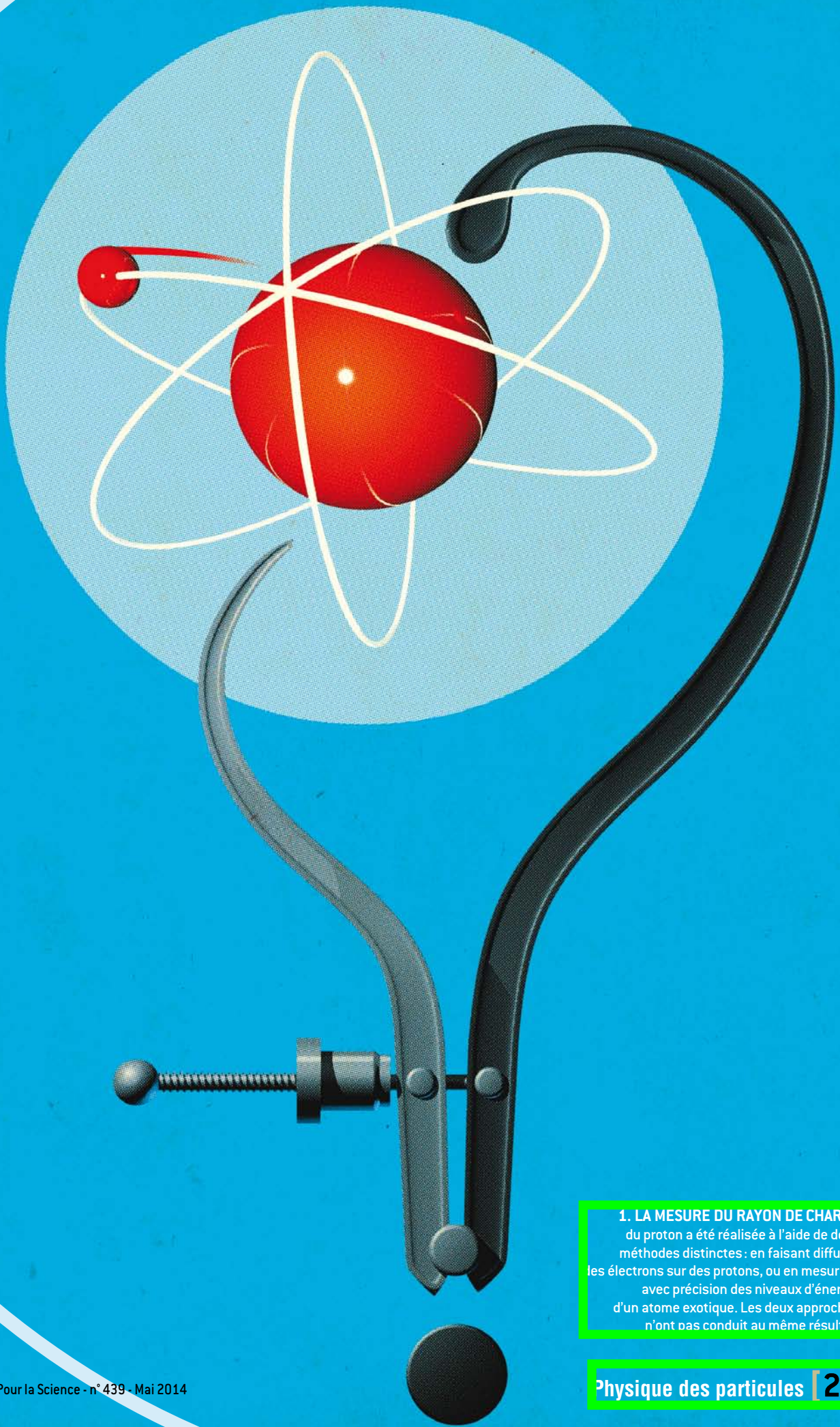
L'ESSENTIEL

- Récemment, deux mesures précises du rayon du proton ont livré des valeurs bien différentes.
- Cette différence n'a pas pu être attribuée à des erreurs.
- Elle résulte peut-être d'une compréhension imparfaite du proton ou de l'électrodynamique quantique, une théorie pourtant bien établie.
- L'anomalie pourrait être une porte d'entrée à de nouvelles découvertes fondamentales en physique.

Erreur ou physique mal comprise ?

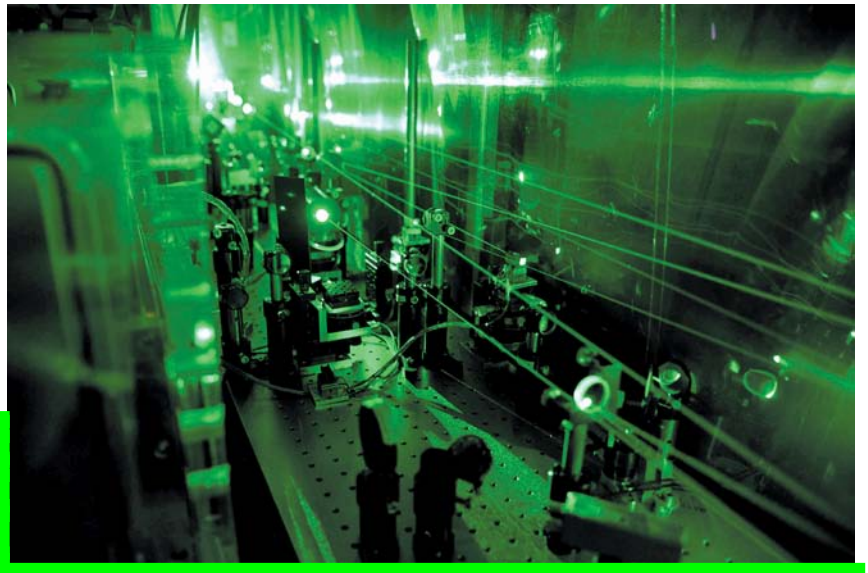
Il est donc clair que nous sommes confrontés à une anomalie. Soit nous ne comprenons pas complètement le proton, soit nous ne comprenons pas la physique qui intervient dans les mesures de précision du proton. Autrement dit, le problème de la taille du proton nous offre peut-être l'occasion d'apprendre quelque chose de nouveau en physique fondamentale.

Notre histoire débute sur l'île italienne de San Servolo, à dix minutes de la place



1. LA MESURE DU RAYON DE CHARGE du proton a été réalisée à l'aide de deux méthodes distinctes : en faisant diffuser des électrons sur des protons, ou en mesurant avec précision des niveaux d'énergie d'un atome exotique. Les deux approches n'ont pas conduit au même résultat.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014



2. L'UNE DES METHODES pour mesurer le rayon du proton utilise ce laser, dont la longueur d'onde est précisément réglée et que l'on dirige sur un échantillon d'hydrogène dit muonique (ses atomes sont formés d'un proton et d'un muon, un cousin lourd de l'électron).

Saint-Marc de Venise par vedette rapide. L'île abritait un hôpital psychiatrique jusqu'à la fin des années 1970. Trois décennies après sa fermeture et sa transformation en un centre à caractère culturel, quelques dizaines de physiciens ont commencé à s'y rencontrer pour discuter de tests encore plus contraignants de la théorie la mieux comprise de toute la physique, si ce n'est de toute la science : l'électrodynamique quantique, ou QED en abrégé (pour *Quantum ElectroDynamics*).

Les débuts de l'électrodynamique quantique remontent à 1928, époque où le théoricien britannique Paul Dirac parvint, pour la première fois, à combiner la mécanique quantique et la théorie de la relativité restreinte, obtenant une équation qui porte depuis son nom et qui représente correctement une particule telle que l'électron. L'électrodynamique quantique, la théorie qui a été depuis développée sur cette base, décrit très bien l'interaction électromagnétique, qui met en jeu les photons (la lumière) et les particules chargées telles que l'électron.

Cette théorie explique, entre bien d'autres choses, la structure détaillée des niveaux d'énergie électronique de l'atome, c'est-à-dire les énergies que peuvent avoir les électrons de l'atome. C'est pourquoi les physiciens font appel à des atomes simples comme l'hydrogène pour tester l'électrodynamique quantique. Dans le domaine d'application de cette théorie, ils sont capables de prédire les résultats des expériences avec une incertitude de 0,000 000 000 1 pour cent (soit 10^{-10} pour cent). Et les résultats expérimentaux sont en accord avec cette précision phénoménale.

C'est sur San Servolo que nous nous sommes rencontrés tous les deux pour la première fois. À ce moment, nous nous lancions l'un comme l'autre dans des mesures du proton censées contribuer à affiner notre connaissance de l'électrodynamique quantique.

L'expérience de l'un d'entre nous (J. Bernauer) et ses collègues, à l'Institut de physique nucléaire de l'Université de Mayence, en Allemagne, avait pour objectif d'explorer la structure interne du proton en utilisant une version améliorée d'une technique qui avait déjà produit les mesures les plus précises de l'époque.

À l'Institut Paul Scherrer (PSI), à Villigen en Suisse, l'équipe de R. Pohl adoptait, elle, une nouvelle approche. Elle portait sur de subtils décalages des niveaux d'énergie d'une forme exotique d'hydrogène, où l'électron est remplacé par une particule analogue, nommée muon.

Du déplacement de Lamb au rayon du proton

Or ces décalages par rapport à ce que prévoient les descriptions atomiques plus simples, ne faisant pas appel à l'électrodynamique quantique, dépendent de la taille du proton (l'électron, lui, semble être une particule ponctuelle, de taille nulle). Ils ont été détectés pour la première fois pour l'atome d'hydrogène ordinaire en 1947 par l'Américain Willis Lamb Jr. *(voir l'encart page 35).*

Même si les physiciens désignent ce phénomène sous le nom unique de « déplacement de Lamb », ils ont fini par comprendre qu'il met en jeu deux effets distincts. La première contribution au déplacement de Lamb est due aux particules dites virtuelles, des particules fantômes qui naissent spontanément et retournent au néant très rapidement. Les physiciens savent manier les équations de l'électrodynamique quantique pour calculer avec une grande précision la modification que les particules virtuelles apportent aux niveaux d'énergie atomiques.

Mais depuis quelques années, les incertitudes relatives à la seconde contribution au déplacement de Lamb ont commencé à limiter le pouvoir prédictif des physiciens. Ce second facteur est lié à la taille non nulle du proton et à la nature quantique de l'électron.

LES AUTEURS

Jan BERNAUER est chercheur postdoctorant au Laboratoire de science nucléaire du MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis.

Randolf POHL travaille sur la spectroscopie laser de l'hydrogène et des atomes exotiques de type hydrogène à l'Institut Max Planck d'optique quantique de Garching, en Allemagne.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

De quoi s'agit-il ? En mécanique quantique, l'électron est décrit par une fonction d'onde, une fonction de la position et du temps que l'on peut représenter par un nuage dont la taille correspond à celle de l'atome. La fonction d'onde (plus exactement, le carré de son module) détermine la probabilité de trouver l'électron en un endroit donné, et elle ne peut prendre qu'un certain nombre de formes, qu'on appelle les états atomiques.

Certains des états atomiques, étiquetés « S » pour des raisons historiques, ont une fonction d'onde qui atteint son maximum au centre de l'atome, là où se trouve le noyau atomique. En d'autres termes, il existe une probabilité non nulle de trouver l'électron à l'intérieur du proton lui-même, probabilité qui croît avec le rayon du proton (il s'agit plus précisément du « rayon de charge », le rayon qui mesure la répartition volumique de la charge électrique du proton). Or quand l'électron se trouve à l'intérieur du proton, il est moins soumis à l'influence de la charge électrique de cette particule. La présence partielle de l'électron au centre de l'atome diminue ainsi la force globale de liaison entre le proton et l'électron.

Cette réduction de la force de liaison modifie de 0,02 pour cent le déplacement de Lamb de l'état de plus basse énergie, l'état noté 1S. Cette fraction peut sembler insignifiante. Mais l'écart d'énergie entre l'état fondamental 1S et le premier état excité, l'état 2S, a été mesuré avec une incroyable précision de quelques unités sur 10^{15}. Par conséquent, même s'il est minuscule, l'effet de la taille du proton doit être inclus si l'on veut confronter l'électrodynamique quantique à des mesures expérimentales précises.

L'équipe de R. Pohl tentait depuis huit ans de déterminer la taille précise du proton. Mais à l'époque de cette première conférence sur l'île de San Servolo, son expérience ne semblait pas fonctionner, ce qui laissait tout le monde perplexe.

Entre-temps, J. Bernauer et ses collègues étaient sur le point d'entamer une étude complémentaire du rayon du proton. Il ne s'agissait pas ici de s'appuyer sur les niveaux d'énergie de l'hydrogène. L'expérience consistait plutôt à envoyer des électrons sur une cible d'hydrogène et à étudier leur diffusion pour en déduire la taille du proton *(voir l'encadré page 32)*.

Des électrons diffusés

L'hydrogène gazeux constitue, pour l'essentiel, un essaim de protons. Si l'on dirige sur lui un faisceau d'électrons, particules de charge négative, certains des électrons seront diffusés par des protons, c'est-à-dire déviés de la direction initiale du faisceau. De plus, cette diffusion dépend fortement de la structure interne du proton, particule qui est formée de composants plus élémentaires (trois quarks, liés entre eux par une force véhiculée par des gluons).

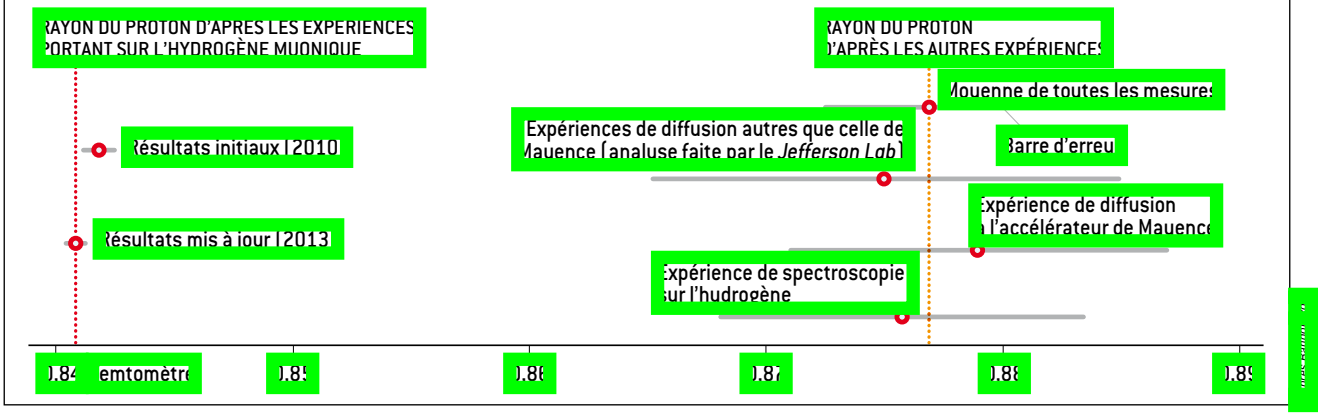
Examinons de plus près comment un électron et un proton interagissent quand le premier est diffusé par le second. Lorsque l'électron est diffusé, il transmet une partie de sa quantité de mouvement au proton. En électrodynamique quantique, cette interaction se décrit en première approximation par l'échange d'un photon virtuel entre l'électron et le proton. Si l'électron n'est dévié que légèrement, il ne transfère qu'une petite partie de sa quantité de mouvement. S'il est dévié de près de 180 degrés, on peut imaginer que l'électron a heurté le proton de plein fouet, transférant ainsi une bonne fraction de sa quantité de mouvement.

Le transfert d'une quantité de mouvement plus élevée signifie que le photon virtuel échangé a une longueur d'onde plus courte. Or, comme avec un microscope optique, si l'on veut sonder les structures les plus petites, on doit utiliser les longueurs d'onde les plus courtes possibles (ce qui nécessite des électrons incidents d'énergie maximale). Les travaux de J. Bernauer et de ses collègues consistaient en partie à faire appel aux très courtes longueurs d'onde afin d'étudier la répartition des charges électriques (celles portées par les quarks) au sein du proton.

Toutefois, quand J. Bernauer s'est rendu à la conférence de San Servolo, les autres scientifiques présents lui ont suggéré d'étendre son expérience. Les courtes longueurs d'onde conviennent bien pour sonder la structure interne du proton, mais si l'on veut examiner le proton dans sa globalité, on doit faire appel à de grandes longueurs d'onde. En fait, si l'on veut mesurer l'étendue

DES MESURES AUX RÉSULTATS INCOMPATIBLES

La taille du proton devrait être la même, quelle que soit la façon de la mesurer. Plusieurs équipes ont déduit le rayon du proton à partir d'expériences de diffusion *(voir l'encadré page 32)* ou en mesurant certains niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène dans des expériences de spectroscopie. Les résultats étaient tous cohérents, compte tenu des marges d'erreur expérimentales. Cependant, en 2010, à l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, une mesure des niveaux d'énergie de l'hydrogène dit muonique *(voir l'encadré page 34)* a livré une valeur du rayon du proton notablement inférieure. Les tentatives d'explication de cette anomalie ont jusqu'à présent toutes échoué.



complète du proton (donc sa taille), il faut utiliser une longueur d'onde infinie, qui permet aux photons virtuels de « voir » le proton dans son intégralité : c'est la limite à laquelle les électrons incidents ne subissent aucune diffusion.

Techniquement, bien sûr, ce n'est pas possible ; les électrons doivent être déflé-chis au moins un peu pour que l'on puisse mesurer quelque chose. C'est pourquoi le groupe de J. Bernauer a effectué des mesures correspondant au plus faible transfert de quantité de mouvement que lui permet-tait son dispositif expérimental, puis il a extrapolé les résultats pour obtenir ceux correspondant à une quantité de mouve-ment transférée nulle.

Par rapport aux expériences anté-rieures, cette équipe a réussi à diviser par presque deux l'écart entre la plus petite quantité de mouvement transférée précé-demment mesurée et la valeur nulle, d'où une extrapolation beaucoup plus fiable. Finalement, l'expérience a recueilli à peu près deux fois plus de mesures que toutes les mesures précédentes combinées. Après avoir réalisé l'expérience en 2006 et 2007, J. Bernauer a eu besoin de trois années pour analyser toutes les données, travail qui lui valut son doctorat. Le rayon du proton, conclu-ait-il, valait environ 0,879 femtomètre ($0{,}879 \times 10^{-15}$ mètre), soit environ un dix milliardième de la taille d'une gouttelette de brouillard, un résultat en accord avec les mesures précédentes.

Entre-temps, R. Pohl et son équipe continuaient à rencontrer des difficultés. Dans leur expérience, ils remplaçaient l'électron de l'atome d'hydrogène par un cousin plus lourd, le muon. Les muons sont pratiquement identiques aux électrons, si ce n'est que leur masse est environ 200 fois supérieure. En raison de cette différence, le muon de l'hydrogène muonique s'approche environ 200 fois plus près du proton que ne le fait un électron.

Un muon dans le proton

Or si le muon est 200 fois plus proche du proton, il devrait également passer consi-dérablement plus de temps à l'intérieur de ce dernier (en effet, la probabilité de présence est augmentée d'un facteur 200^3, soit 8 000 000). Par suite, l'effet de la taille du proton modifie de deux pour cent le déplacement de Lamb du niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène muonique, ce qui est suffisant pour être facilement repéré.

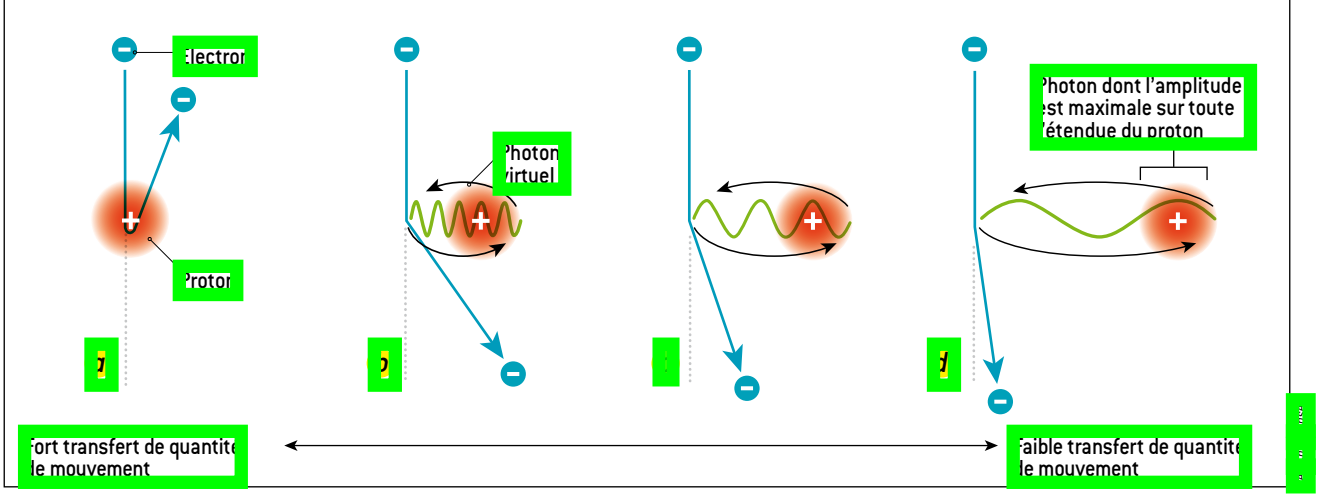
Dans l'expérience de l'équipe de R. Pohl, des muons produits par un accélérateur de l'Institut Paul Scherrer sont dirigés sur une cible d'hydrogène gazeux (des molécules H_2). De temps en temps, un muon déloge un électron, ce qui dissocie la molécule H_2, et le muon est capturé par le proton resté sans électron ; se forme ainsi un atome d'hydrogène muonique dans un état très excité. En quelques nanosecondes, cet atome muonique excité dégringole dans des états d'énergie de plus en plus basse. L'expérience a porté sur les atomes d'hydrogène muonique qui se retrouvaient dans le premier état excité, l'état 2S.

À son entrée dans la cible d'hydrogène, chaque muon déclenche un signal de mise en route d'un laser, qui émet une impul-sion environ une microseconde plus tard. Si les photons de cette impulsion laser ont exactement la bonne énergie (l'énergie des photons est inversement proportionnelle à la longueur d'onde lumineuse), des atomes muoniques peuvent absorber un photon et passer de l'état 2S à l'état 2P.

La forme de la fonction d'onde cor-respondant à l'état 2P est telle que la pro-babilité que le muon soit à l'intérieur du proton est négligeable si l'atome est dans cet état *(voir l'encadré page 34)*. Par consé-quent, en mesurant l'écart d'énergie entre les états 2S et 2P, le premier étant sensible à la taille du proton mais pas le second, on peut déduire quel pourcentage du temps

MESURER LE RAYON DU PROTON PAR DIFFUSION D'ÉLECTRONS

Dans les expériences de diffusion d'électrons, on dirige un faisceau d'électrons sur de l'hydrogène gazeux, qui est pour l'essentiel constitué de protons. Parfois, un électron passe près d'un proton et est dévié. L'électrodynamique quantique décrit ces interactions en termes d'échange de photons « vir-tuels » qui véhiculent la force électromagnétique. Un électron qui heurte de plein fouet un proton échange un photon de très courte longueur d'onde *(a)*. Les courtes longueurs d'onde équivalent à des énergies élevées, qui modifient fortement la trajectoire de l'électron. Lorsque l'électron incident et le pro-ton sont plus éloignés, un photon de plus grande longueur d'onde est échangé et la déviation est moins marquée *(b, c)*. L'information sur le rayon du proton est codée dans les diffu-sions où le photon virtuel a les longueurs d'onde les plus grandes, situations où l'onde du photon virtuel est d'ampli-tude à peu près constante sur toute l'étendue du proton *(d)*.



© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

e muon passe à l'intérieur du proton, et ainsi déterminer le rayon de cette particule.

Mais la difficulté est d'ajuster le laser pour qu'il ait exactement la bonne longueur d'onde. L'atome ne grimpe dans l'état 2P que si l'énergie des photons est égale à l'écart d'énergie entre les états 2S et 2P. Si l'énergie des photons, donc leur longueur d'onde, est légèrement différente, il ne se passe rien. Comment savoir si les atomes effectuent bien ce saut d'énergie ? Tout atome porté dans l'état 2P se désexcite rapidement vers l'état fondamental 1S en émettant un photon X de basse énergie. La détection de ces rayons X signifierait donc que l'énergie des photons du laser est la bonne.

Cette étude paraît simple en théorie, mais elle ne l'est pas du tout en pratique. Des expériences de ce type avaient déjà été proposées dans les années 1960 pour tester avec précision l'électrodynamique quantique, qui était encore une théorie assez jeune. Mais cette expérience sur l'hydrogène muonique était plus difficile que les expériences complémentaires portant sur des atomes classiques, notamment parce que le muon est une particule instable, dont la durée de vie moyenne est de 2,2 microsecondes. Aussi, l'intérêt envers les expériences sur l'hydrogène muonique était retombé jusque dans les années 1990, quand on s'est aperçu que les autres tests sont limités par les incertitudes liées à la taille non nulle du proton.

C'est en 1997 que l'équipe de R. Pohl a proposé aux administrateurs de l'Institut Paul Scherrer de mesurer le déplacement de Lamb de l'hydrogène muonique. L'institut a approuvé le projet au début de 1999. Puis, trois années ont passé à la construction et à la mise au point d'un système laser, d'un faisceau de muons de basse énergie et des détecteurs de rayons X de faible énergie.

Une fois l'expérience assemblée, en 2002, l'équipe a dû faire face à plusieurs problèmes techniques. Le temps nécessaire pour les régler n'a laissé que quelques heures pour bombarder de photons l'hydrogène muonique, avant que la durée allouée à l'accélérateur pour cette expérience soit écoulée. Certains membres de l'équipe étaient très déçus, parce qu'ils avaient réellement cru que l'on déterminerait du premier coup l'écart d'énergie 2S-2P avec la précision nécessaire. Mais les physiciens plus aguerris avaient des attentes plus réalistes. Ils étaient déjà satisfaits que tout fonctionne et que seuls quelques problèmes techniques mineurs se soient présentés. Ces derniers pouvaient être réglés avant le démarrage de l'expérience, prévu pour 2003, phase durant laquelle on verrait sûrement le signal du déplacement de Lamb.

3. LES RECENTES EXPERIENCES DE DIFFUSION d'électrons ont été réalisées à l'Université Johannes Gutenberg de Mayence, en Allemagne, au moyen de l'accélérateur MAMI (Mainz Microtron). Cet accélérateur *(ci-dessus, l'une des salles qu'il occupe)* a fourni aux expérimentateurs des électrons d'énergie allant jusqu'à 855 mégaélectronvolts.

Le moment venu, après de nombreux mois de préparation et trois semaines de collecte réussie de données, l'analyse... n'a rien révélé. Pas le moindre indice de signal, même si le laser a balayé toute la plage de longueurs d'onde correspondant aux valeurs expérimentales connues du rayon du proton. Absolument rien.

UN SIGNAL NET EST APPARU, indiquant que le proton mesuré dans l'hydrogène muonique est notablement plus petit que tout ce que les physiciens avaient supposé jusque-là

Il fallait se rendre à l'évidence : quelque chose n'allait pas dans le dispositif. L'équipe de R. Pohl conclut à l'époque qu'il fallait améliorer le système laser. Elle s'est lancée dans une révision majeure de sa conception, une tâche achevée à la fin de 2006. Elle a recueilli des données pendant une nouvelle campagne de trois semaines en 2007, et là encore elle n'a rien détecté. Une dernière chance s'est présentée au premier semestre 2009. Et une fois de plus, après une semaine de collecte de données d'excellente qualité, aucune trace de signal n'a été obtenue.

Il ne restait qu'une semaine d'observations. Les chercheurs craignaient que si ces dernières échouaient, les administrateurs en concluent que l'équipe n'était pas à la hauteur. Au bout de plus d'une décennie, l'expérience serait définitivement interrompue et considérée comme un échec. Les physiciens commençaient à se demander s'il ne se passait pas quelque chose de plus profond. Et s'ils ne cherchaient pas le rayon du proton au bon endroit ? Ils ont décidé d'étendre la plage de longueurs d'onde recherchées.

L'équipe prit la décision collective de rechercher un rayon du proton plus grand. Cependant, tard le soir, Aldo Antognini, un collègue de R. Pohl, entra dans la salle de contrôle pour dire qu'il avait l'intuition qu'il fallait chercher un proton plus petit. Le temps pressant, R. Pohl et A. Antognini ont réorienté l'expérience pour rechercher un rayon plus petit que tout ce que l'on était en droit de supposer. Très rapidement, on détecta un soupçon de signal. Mais le jour suivant, l'accélérateur était fermé pour une opération de maintenance de quatre jours, prévue de longue date. Il fallut attendre.

Enfin, le soir du 4 juillet 2009, 12 ans après le lancement du projet, un signal net est apparu, indiquant que le proton mesuré dans l'hydrogène muonique est notablement plus petit que tout ce que les physiciens avaient supposé jusque-là. L'équipe de R. Pohl a passé quelques

semaines de plus à effectuer des mesures et calibrations complémentaires, et quelques mois à analyser les données. Le résultat final, qu'elle a depuis confirmé au moyen de mesures supplémentaires, est un rayon de charge du proton égal à 0,8409 femtomètre, à 0,0004 femtomètre près. Cette mesure est dix fois plus précise que toutes les mesures précédentes. Cependant, son résultat diffère de 4 pour cent des résultats de ces dernières... Une divergence énorme!

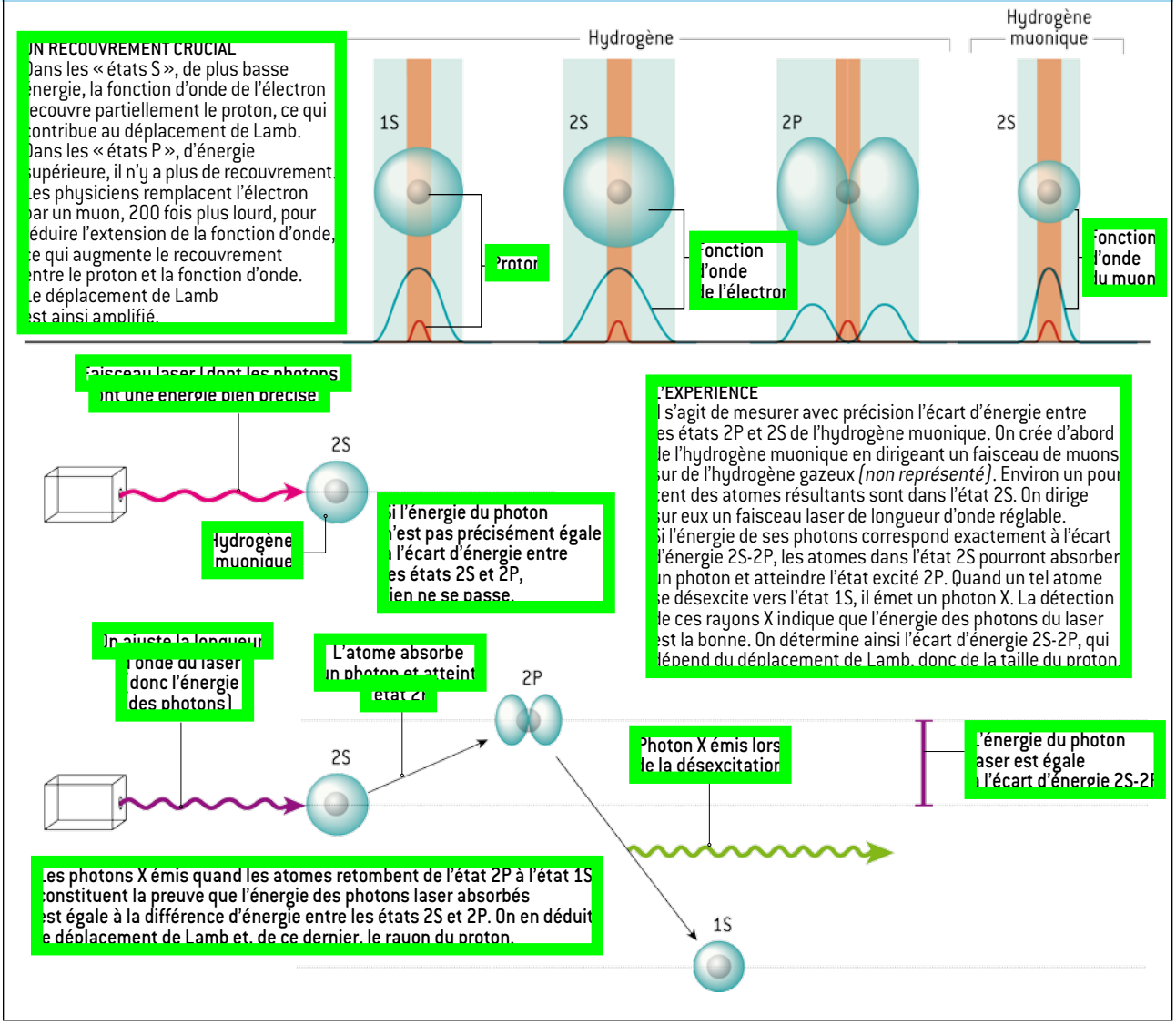
En 2010, nos deux équipes ont fait état de leurs résultats lors d'une conférence aux Houches, en Haute-Savoie. R. Pohl présenta pour la première fois les résultats des expériences sur l'hydrogène muonique. L'après-midi, c'était au tour des résultats de l'expérience de J. Bernauer. L'équipe de R. Pohl s'attendait à ce que l'analyse de J. Bernauer conforte la nouvelle valeur, plus petite, du rayon du proton. Mais à la grande surprise des physiciens, les résultats de Mayence allaient dans le sens de l'ancienne valeur du rayon : 0,879 femtomètre.

Cette divergence a suscité l'émoi dans la communauté des spécialistes. Au début, la plupart pensaient qu'il devait y avoir une simple erreur. Peut-être y avait-il quelque chose de mal réglé dans les expériences, ou bien peut-être les calculs théoriques pour extraire le rayon de charge du proton étaient-ils faux. Peu de temps après la conférence, divers physiciens ont ainsi proposé une multitude d'erreurs simples qui auraient pu se glisser.

Par exemple, avant l'expérience de R. Pohl, seules trois personnes avaient effectué les calculs complexes nécessaires pour passer de la valeur expérimentale

MESURER LE RAYON DU PROTON AVEC L'HYDROGÈNE MUONIQUE

Dans un atome d'hydrogène, la probabilité de présence de l'électron, décrite par une fonction d'onde, peut se représenter par un nuage. Parfois, la fonction d'onde électronique empiète sur le proton, ce qui signifie que l'électron passe une partie du temps à l'intérieur du proton, où il est moins sensible à la charge électrique de ce dernier. Cela modifie l'énergie de l'atome, par rapport à un atome où le proton serait ponctuel. On peut déduire la taille du proton de ce « déplacement de Lamb » de l'énergie. L'effet est amplifié lorsque l'électron de l'atome est remplacé par un muon. En effet, en raison de sa plus grande masse, le muon a une fonction d'onde moins étendue ; comparé à l'électron, il passe donc plus de temps à l'intérieur du proton.



© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

de la longueur d'onde du laser au rayon du proton. Beaucoup de physiciens ont spéculé sur les erreurs ou omissions dans ces calculs. De nombreux théoriciens ont donc refait ces derniers et les ont étendus, mais n'ont pu y déceler d'erreur.

D'autres ont reconsidéré la façon dont . Bernauer extrapolait le rayon à partir de ses données de diffusion d'électrons par les atomes d'hydrogène. Serait-il possible de concilier les données brutes avec le rayon plus faible donné par l'hydrogène muonique ? Il semble que cette solution ait également dû être écartée.

Pas d'explications..

À chaque échec d'une nouvelle explication, l'impact de la divergence se renforçait. Quatre ans après l'émergence de l'énigme du rayon du proton, les physiciens ont épuisé les explications simples, telles qu'erreurs de mesure ou de calcul. Nous nous prenons maintenant à rêver à des possibilités plus passionnantes.

Par exemple, comprenons-nous vraiment comment le proton réagit quand le muon l'attire ? La force électrostatique du muon déforme le proton, un peu comme la gravité de la Lune ou du Soleil entraîne les marées sur Terre. La déformation du proton modifie légèrement l'état 2S de l'hydrogène muonique. La plupart des physiciens pensent que cet effet est bien compris, mais le proton est un système tellement complexe qu'il se peut que nous soyons passés à côté de quelque phénomène.

La possibilité la plus intéressante est que les mesures discordantes du rayon du proton soient le signe d'une nouvelle physique, allant au-delà du Modèle standard de la physique des particules. Peut-être l'Univers contient-il une particule ayant jusqu'ici échappé à la détection et qui, pour une raison ou une autre, confère aux muons un comportement différent de celui des électrons ? Les scientifiques explorent cette option, mais ils ont bien du mal à modéliser une nouvelle particule qui ne produise pas, par ailleurs, des effets observables en désaccord avec les résultats d'autres expériences.

En outre, les physiciens ont déjà une autre énigme à résoudre concernant les muons. Les particules élémentaires telles que les muons et les électrons ont un « moment magnétique », grandeur qui caractérise leur comportement dans un champ magnétique. Or ce qui est aussi curieux qu'intéressant, c'est que la valeur expérimentale du moment magnétique du muon ne correspond pas tout à fait à celle calculée avec l'électrodynamique quantique. Peut-être de nouveaux phénomènes physiques expliqueront-ils tant les deux valeurs obtenues pour le rayon du proton que le moment magnétique anormal du muon.

Pour mettre fin à ces spéculations, plusieurs nouvelles expériences ont été proposées. Au moins deux d'entre elles (l'une à l'Accélérateur américain Thomas Jefferson de Newport News, en Virginie, et l'autre à l'accélérateur Mainz Microtron, ou MAMI, de l'Université Johannes Gutenberg de Mayence) visent à améliorer la précision des précédentes expériences de diffusion. Ces mesures fourniront une vérification indépendante, et testeront certaines des explications proposées.

L'équipe de R. Pohl comme celle de Mayence explorent l'idée de mesurer le rayon du deutéron (le noyau de deutérium, formé d'un proton et d'un neutron) pour voir si une différence apparaît là aussi. R. Pohl effectuera également des mesures sur l'hydrogène ordinaire avec une meilleure précision.

Diffusion de muons ?

En outre, de nombreux physiciens ont fait observer que l'on a effectué des mesures atomiques en utilisant à la fois des muons et des électrons, mais que les expériences de diffusion n'ont été réalisées qu'avec des électrons. Il manque donc des expériences de diffusion de muons par des protons. . Bernauer est impliqué dans un projet visant à combler cette lacune. En utilisant un des faisceaux de muons de l'Institut Paul Scherrer (où l'équipe de R. Pohl a effectué son expérience), l'expérience MUSE (*Muon-Proton Scattering Experiment*, expérience de diffusion muon-proton) consistera à faire diffuser à la fois des électrons et des muons sur des protons, afin d'effectuer une comparaison directe. Avec les résultats de MUSE, les physiciens seront en mesure de vérifier certaines des explications les plus viables parmi celles proposées.

Le temps nous dira si l'énigme du rayon du proton est élucidée par la simple détection d'une erreur improbable, ou si elle ouvre la voie à une compréhension plus profonde du monde des particules. C'est peut-être juste le fil à tirer pour démêler le chapitre suivant du livre de la nature. Tirons-le. ■

Le déplacement de Lamb

En 1947, à l'Université Columbia, Willis Lamb Jr. (prix Nobel en 1955) et son étudiant Robert Retherford ont mesuré que l'énergie de l'état électronique noté $2S_{1/2}$ de l'atome d'hydrogène est légèrement supérieure à celle de l'état $2P_{1/2}$ (pour l'hydrogène muonique, c'est l'inverse, et l'écart est plus grand). Or d'après l'équation de Dirac de la mécanique quantique relativiste, ces deux états devaient avoir strictement la même énergie.

Cet effet, le *Lamb shift* ou « déplacement de Lamb » du niveau $2S_{1/2}$, a été expliqué dans le cadre de l'électrodynamique quantique, où les calculs mettent en jeu des particules virtuelles échangées lors des interactions. Une contribution au déplacement de Lamb, identifiée plus tardivement, est due à la taille non nulle du proton.

BIBLIOGRAPHIE

R. Pohl *et al.*, **Muonic hydrogen and the proton radius puzzle,** *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 63, pp. 175-204, octobre 2013.

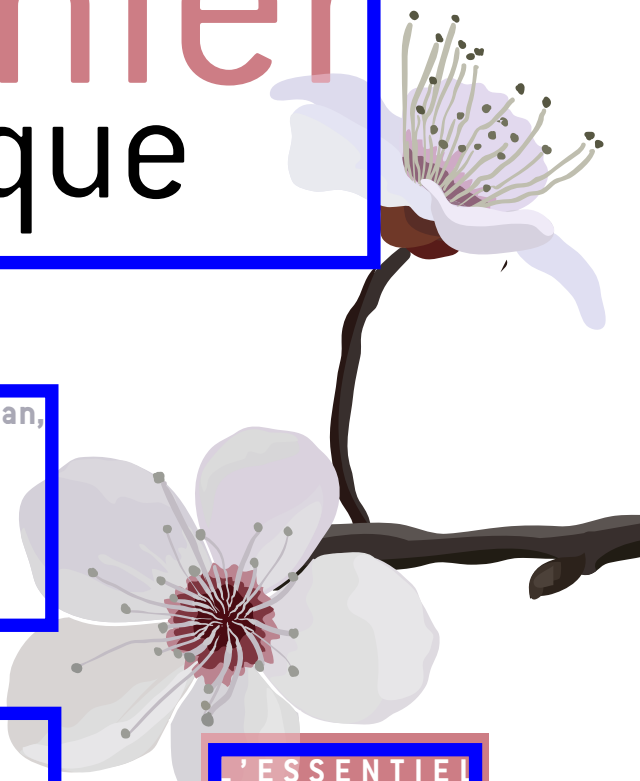
J. C. Bernauer *et al.*, **High-precision determination of the electric and magnetic form factors of the proton,** *Physical Review Letters*, vol. 105, article 242001, 2010.

R. Pohl *et al.*, **The size of the proton,** *Nature*, vol. 466, pp. 213-216, 2010.

Les pérégrinations du pommier domestique

Héloïse Giraud, Amandine Cornille et Tatiana Giraud

Issu d'un pommier sauvage des montagnes du Kazakhstan, le pommier domestique s'est répandu le long de la route de la soie jusqu'en Europe. Sa diversité est en partie due aux échanges de gènes avec les pommiers sauvages des régions traversées.



Reinette étoilée, Chantecler, Antarès, Belle de Pontoise, Richard, Choupette, Cabassou, Pomme d'api… Rien qu'en France, plus de 300 variétés de pommes sont autorisées à la culture. Elles sont plus de 11 000 à être cultivées dans le monde.

Malgré l'immense diversité des variétés domestiques, ou « cultivars », disponibles, la production de pommes à l'échelle industrielle dans le monde n'est plus fondée que sur la culture de quelques dizaines de cultivars d'ornement ou comestibles. Cette perte de diversité est d'autant plus inquiétante que, simultanément, la consommation de ces fruits augmente (la pomme est le troisième fruit le plus consommé au monde, après les agrumes et les bananes) et, avec elle, le nombre de leurs exploitations agricoles, avec une conséquence préoccupante : on a récemment découvert des gènes de pommiers domestiques dans le génome de pommiers sauvages. Or ces derniers sont une source de diversité importante pour l'amélioration variétale du pommier domestique, car ils sont naturellement résistants à nombre de maladies. Cette hybridation pourrait faire disparaître ce réservoir naturel de gènes.

Pour mieux comprendre comment favoriser la diversité des pommiers domestiques et maintenir celle des pommiers sauvages, les biologistes étudient l'histoire de la domestication du pommier. En décryptant, *via* la comparaison des génomes des pommiers domestiques et sauvages, les différentes étapes de cette domestication, ils espèrent mieux saisir leurs liens et en déduire des méthodes pour améliorer les variétés cultivées tout en protégeant le réservoir génétique sauvage.

Domestiqué dans les montagnes du Kazakhstan

De façon plus générale, l'histoire de la domestication du pommier constitue un modèle intéressant pour comprendre la domestication des plantes ligneuses et pérennes, c'est-à-dire des plantes qui, tels les arbres fruitiers, synthétisent du bois et vivent plusieurs années. Jusqu'à présent, les études sur la domestication ont surtout porté sur les plantes herbacées annuelles

L'ESSENTIEL

- La diversité des pommiers domestiques est menacée.
- Pour comprendre comment contrer cette tendance, les biologistes étudient l'histoire de la domestication du pommier.
- En comparant le génome de différentes variétés de pommiers cultivés et de pommiers sauvages, ils établissent leur histoire évolutive.
- Domestiqué en Asie il y a plus de 4 000 ans, le pommier se serait hybridé plusieurs fois avec des pommiers sauvages au gré de son périple jusqu'en Europe

sans bois et se reproduisant sur une année), elles que le maïs, le blé ou l'orge.

Or la domestication des plantes ligneuses n'a rien à voir avec celle des plantes herbacées. Les arbres présentent de longs temps moyens entre deux générations : la période juvénile (qui précède la première floraison) est par exemple de dix ans en moyenne au sein du genre *Malus*, qui regroupe les espèces de pommiers dans la classification des plantes. De plus, une grande partie des plantes ligneuses doivent s'interféconder : des mécanismes empêchent l'autopollinisation d'un arbre ou favorisent la fécondation croisée – et par là même le brassage génétique.

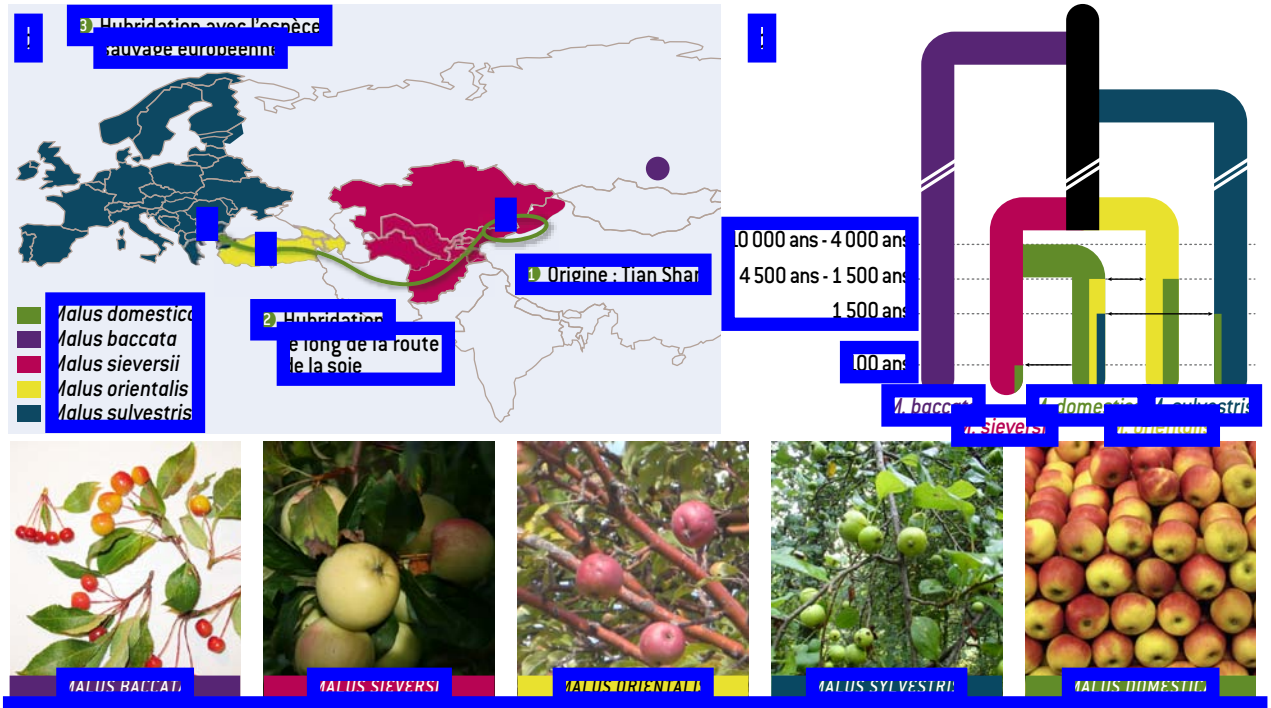
En raison de ces caractéristiques, il est difficile de sélectionner des caractères intéressants pour l'homme. Le développement des techniques de greffage, bouturage ou drageonnage (reproduction à partir de pousses nées sur une plante) a eu un rôle critique dans la propagation du pommier cultivé à travers le monde, en permettant de répliquer à l'identique l'information génétique (le génotype) de certains pommiers individuels. Mieux comprendre les mécanismes mis en œuvre lors de ces pratiques devrait aider à améliorer la culture d'autres plantes ligneuses telles que la vigne ou l'olivier.

Le genre *Malus* comprend entre 10 et 100 espèces dont la plupart ne sont pas consommées. Leur nombre est incertain, car, jusque récemment, les espèces étaient identifiées à partir de leurs seuls caractères morphologiques. Aujourd'hui, ces critères sont de plus en plus complétés par des considérations génétiques. Une seule espèce du genre *Malus* est domestiquée, nommée *Malus domestica*. Absente du milieu naturel, elle est produite partout dans le monde, notamment en Europe, en Russie, au Japon, au Maghreb et au Canada.

D'où provient-elle ? La domestication est un processus continu et dynamique : on commence par exploiter des individus sauvages, puis on cultive des individus sélectionnés en environnement naturel, mais non encore différenciés des sauvages. Ce processus s'achève par la fixation, sous l'action de la sélection par l'homme, d'un « syndrome de domestication » – des changements génétiques, physiologiques, morphologiques et développementaux pérennes par rapport aux formes sauvages. Les caractères sélectionnés par l'homme sont souvent liés aux conditions de récolte, à la production des graines ou de fruits plus gros ou plus nombreux.

Malgré l'intérêt économique et culturel du pommier, l'histoire de sa domestication a longtemps été mal connue. Et pour cause : son lieu d'origine supposé a été inaccessible jusqu'à la fin de la guerre froide. Dès 1929, Nikolaï Vavilov, botaniste et généticien russe, avait émis l'hypothèse que les formes domestiquées du pommier étaient toutes issues d'une même espèce sauvage des montagnes du Tian Shan, au Kazakhstan en Asie centrale, le pommier *Malus sieversii*. Il avait observé que, dans cette région, les fruits de cette espèce présentent une impressionnante diversité morphologique et gustative, allant de grosses pommes juteuses (type Golden Delicious) à de petites pommes vertes amères. Or, selon une idée qu'il avait exposée trois ans plus tôt, une telle diversité au sein d'une même espèce sauvage dans une région est souvent un indice que cette région est le lieu où la domestication de la plante

L'HISTOIRE EVOLUTIVE DU POMMIER DOMESTIQUE



L'histoire évolutive du pommier cultivé se précise *(a)*. Domestiqué dans les montagnes du Tian Shan, au Kazakhstan *(1)* à partir de l'espèce sauvage *Malus sieversii*, il s'est dispersé d'Asie jusqu'en Europe le long de la route de la soie, s'hybridant au passage avec l'espèce sauvage caucasienne *M. orientalis (2)* et le pommier sauvage européen *M. sylvestris (3)*. L'arbre phylogénétique *b* résume les transferts génétiques *(flèches)* entre le pommier domestique *(en vert)* et les pommiers sauvages. Tous sont issus d'un même ancêtre commun *(en noir)*.

LES AUTEURS

Héloïse GIRAUD est doctorante au Laboratoire de Génétique végétale du Moulon (INRA/Université Paris-Sud/CNRS), à Gif-sur-Yvette, en mission doctorale au Laboratoire ESE, à Orsay.

Amandine CORNILLE est postdoctorante au Département d'écologie et de génétique de l'Université d'Uppsala, en Suède.

Tatiana GIRAUD est directrice de recherche du CNRS et directrice adjointe du Laboratoire écologie, systématique et évolution (ESE, CNRS/Université Paris-Sud/AgroParisTech), à Orsay.

a commencé – le « centre d'origine » des espèces domestiquées.

Emprisonné peu après par le régime soviétique qui condamnait ses recherches (à cette époque, l'agronomie soviétique était sous la houlette de Trophim Lyssenko, qui niait toute influence génétique dans l'agriculture), Vavilov n'a pas pu achever son étude. Les Occidentaux n'ont accédé à ses travaux et poursuivi les recherches qu'à la chute du mur de Berlin, en 1989. En 2001, une première étude génétique, menée par Barrie Juniper, de l'Université d'Oxford, et ses collègues, suggère que *Malus domestica* est plus proche génétiquement de *Malus sieversii* que de toute autre espèce sauvage testée. Les montagnes du Tian Shan pouvaient donc bien être le centre d'origine des pommes domestiques. L'hypothèse est corroborée par le fait que les différences de forme et de goût des pommes sont plus marquées entre *Malus domestica* et les autres pommiers sauvages connus. La confirmation définitive sera donnée en 2010 par le séquençage du génome de la pomme domestique et la comparaison de certains de ses gènes avec ceux d'espèces sauvages : *Malus sieversii* apparaît bien comme l'espèce sauvage la plus proche génétiquement du pommier domestique.

Cette découverte ne révélait cependant que le début de l'histoire. Domestiqué en Asie centrale, le pommier s'est répandu jusqu'en Europe. Sur le chemin, d'autres espèces sauvages, telles que *Malus baccata* (Sibérie et Asie de l'Est), *Malus orientalis* (Turquie et Caucase) et *Malus sylvestris* (Europe) ont-elles contribué à son génome au gré d'interfécondations et de sélections par l'homme ? Et quelle est l'histoire de ces pommiers sauvages ? Par ailleurs, existe-t-il des différences génétiques notables entre les pommiers domestiqués, par exemple entre ceux produisant des pommes à cidre et ceux donnant des pommes à couteau ?

Pour répondre à ces questions, nous avons analysé et comparé 839 échantillons de feuilles d'arbres appartenant au genre *Malus*. Ces échantillons proviennent de collections publiques et privées et de forêts. Les cinq espèces citées plus haut étaient représentées : *Malus domestica*, *M. sieversii*, *M. orientalis*, *M. baccata* et *M. sylvestris*. Nous avons recherché les variations entre ces

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

échantillons sur 26 régions choisies de leur génome, puis recherché, par simulation, le scénario évolutif correspondant le mieux aux données obtenues *(voir l'encadré ci-dessous)*.

Nous avons ainsi confirmé que le pommier a bien été domestiqué en Asie, mais que d'autres pommiers sauvages ont contribué au patrimoine génétique du pommier domestique. Le pommier sauvage européen *M. sylvestris*, notamment, est un contributeur secondaire majeur au génome du pommier domestique : des séquences de son génome auraient été transférées récemment (il y a 1 500 ans) au pommier cultivé, par un mécanisme de mélange génétique nommé introgression (une hybridation suivie de plusieurs croisements avec le parent hôte). De nombreux pommiers domestiques comportent ainsi des parties génomiques du pommier sauvage européen. Voici le scénario le plus plausible déduit de nos données.

Un mélange génétique récent avec le pommier sauvage européen

Le pommier aurait été domestiqué en Asie il y a entre 10 000 et 4 000 ans à partir de l'espèce sauvage *M. sieversii*. Le greffage, dont les premières traces archéologiques (textes, dessins sur des poteries) datent de 4 000 ans, aurait ensuite joué un rôle clé dans la production et la diffusion du pommier cultivé à travers l'Eurasie. Une forme de pommier correspondant à un pommier domestique a été retrouvée au Proche-Orient et datée de cette époque.

Par la suite, le pommier domestiqué a été introduit en Europe et en Afrique du Nord par les Romains et les Grecs. Mais, il y a 1 500 ans, peu après l'introduction des pommes domestiquées en Europe, le pommier cultivé se serait hybridé avec le pommier sauvage européen, *M. sylvestris*.

D'autres pommiers sauvages présents le long de la route de la soie ont pu aussi contribuer au génome des pommiers domestiques. Ainsi, trois pour cent des pommiers domestiques étudiés présentent des introgressions de *M. orientalis*, pommier sauvage caucasien. Ces introgressions plus récentes ont pu être faites sciemment ou non par l'homme, par pollinisation contrôlée ou naturelle. Le pommier sauvage de Sibérie et de l'Est asiatique, *M. baccata*, n'a pas contribué aux échantillons testés.

En chiffres

3e fruit le plus consommé au monde.

69 millions de tonnes de pommes produites chaque année dans le monde.

1,65 million de tonnes produites en 2011 en France, dont 40 % de Golden, 15 % de Gala et 10 % de Granny Smith. 43 % ont été consommées en France, 33 % exportées et 24 % transformées.

18 kg de pommes sont consommés par an et par ménage en France (premier fruit consommé en France en parts de marché).

Plus de 11 000 variétés cultivées dans le monde, 376 autorisées en France, dont une vingtaine couramment consommées.

La comparaison des deux groupes de pommiers domestiqués – à pommes à couteau et à pommes à cidre – avec les pommiers sauvages a aussi permis de préciser leur origine. De par la fréquente amertume de leurs fruits, on aurait pu croire que les pommiers à cidre présenteraient de plus fortes introgressions par le pommier sauvage européen *M. sylvestris*, dont les fruits, petits et acides, ne sont pas consommables. En fait, on observe très peu de différenciation génétique entre les deux types de pommiers domestiques. On peut donc supposer que le goût amer des pommes à cidre est issu de leur ancêtre d'Asie centrale, qui présente une forte diversité de fruits en termes de forme et de goût. L'existence d'une production traditionnelle de cidre dans certaines régions de Turquie, bien plus à l'Est que la répartition géographique de *M. sylvestris*, appuie cette hypothèse.

Ainsi, les différents types de pommes que l'on connaît proviennent tous d'une domestication en Asie qui a ensuite gagné l'Europe il y a environ 1 500 ans. Durant ce trajet, il y a eu des apports de divers pommiers sauvages, en particulier du pommier sauvage européen. Malgré ces apports, les

Du génotype à l'histoire évolutive

Pour mieux comprendre les différentes étapes de la domestication du pommier, les auteurs ont recherché les variations génétiques en [illegible], c'est-à-dire établi leurs caractéristiques génétiques (leurs génotypes), et les ont comparés.

Cette caractérisation a été effectuée sur 26 séquences choisies, nommées microsatellites. Constitués d'unités répétées de un à cinq nucléotides (les briques de la molécule d'ADN qui porte l'information génétique), les microsatellites sont des motifs présents dans des zones du génome qui ne codent pas de protéines – et donc sur lesquelles la sélection par l'homme ne s'exerce pas.

Le nombre de répétitions dans chaque microsatellite permet de caractériser les individus, comme dans les tests de paternité. Par ailleurs, les microsatellites présentent une forte probabilité de mutation par rapport à d'autres régions non codantes de l'ADN. Cette variabilité en fait des marqueurs de choix pour déterminer les proximités génétiques d'individus.

Les génotypes déterminés, des analyses ont été effectuées à l'aide de méthodes statistiques dites d'inférence (bayésienne) afin d'étudier le degré de différenciation génétique des échantillons et de rechercher le transfert de séquences d'une population à une autre (l'introgression entre populations).

Ces données ont permis de comparer différents scénarios historiques et démographiques (tels que des scénarios de domestication). Des millions de données ont été simulées sous chacun des scénarios de domestication testés. Le scénario dont les données simulées sont les plus proches des données observées dans l'échantillonnage est considéré comme le modèle le plus probable. Ces analyses permettent une meilleure compréhension du processus de domestication et, plus généralement, des mécanismes de diversification.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

Quel pommier sauvage réintroduire ?

Le pommier sauvage est en constante évolution, que ce soit du fait de l'homme ou d'une cause naturelle, telle la dernière glaciation qui s'est produite au Sud de l'Europe, européen. Cette évolution est à prendre en compte dans les programmes de réintroduction du pommier sauvage.

Pour éviter de planter des arbres « mal adaptés », il est souhaitable de réintroduire des pommiers sauvages qui correspondent au groupe génétique de la région de réintroduction. Cependant, est-il préférable de réintroduire des pommiers sauvages ayant reçu des portions du génome de pommiers cultivés ou des pommiers sauvages sans introgression par les pommiers cultivés ? Deux écoles s'affrontent.

Selon la première, les introgressions par le pommier cultivé sont un processus naturel dans l'évolution du pommier sauvage européen, et des individus sauvages hybridés avec le pommier domestique peuvent donc être réimplantés. L'autre école, au contraire, argumente que le pommier cultivé a été introduit en Europe par l'homme il y a environ 1500 ans. Les hybrides sauvages-domestiques ne découleraient donc pas d'un processus naturel et ne devraient pas être réintroduits. Comment trancher ?

La question est plus ici du ressort de l'éthique que de la science. À l'heure actuelle, on préfère réintégrer des pommiers sauvages non hybrides, car on ne connaît pas encore les conséquences de ces hybridations sur la viabilité à long terme du pommier sauvage, tant sur le plan de la diversité génétique que sur celui de l'adaptation à long terme de ces hybrides. De plus, le pommier sauvage a largement contribué aux variétés actuellement commercialisées.

Le programme de réimplantation vise ainsi pour l'instant à maintenir cette diversité génétique historique au service de l'amélioration variétale. Cependant, cette vision est discutable et la question de la réintroduction de pommiers sauvages hybridés est d'autant plus d'actualité qu'il est aujourd'hui possible de caractériser génétiquement les arbres réintroduits.

pommiers domestiqués constituent bien un seul groupe génétique, issu d'un même processus initial de domestication.

L'histoire du pommier sauvage européen, *M. sylvestris*, reconstituée selon la même méthode, est elle aussi riche d'enseignements. L'analyse à l'échelle de sa répartition en Europe a révélé trois groupes génétiques : un en Europe de l'Ouest, de la péninsule Ibérique à la Suède, et deux en Europe de l'Est – l'un au niveau des Carpates, l'autre de la péninsule balkanique. Par ailleurs, on constate une diversité génétique plus grande au Sud qu'au Nord.

Comment la dernière glaciation a divisé le pommier européen

Ce gradient Sud-Nord et la présence de trois groupes distincts suggèrent que le pommier sauvage européen, à l'instar de nombreuses espèces tempérées, a survécu à la dernière grande glaciation du Quaternaire (18 000 à 23 000 ans) dans trois zones géographiques distinctes ou « refuges glaciaires » : les Carpates, les Balkans et l'Espagne. Les trois groupes génétiques se seraient formés lors de la période glaciaire. Isolés les uns des autres par la glaciation, les pommiers de ces groupes auraient évolué séparément, puis seraient venus recoloniser l'Europe à la suite du réchauffement de l'Holocène, il y a 10 000 ans, principalement à partir des refuges espagnol et carpatien. La population originaire d'Espagne a, selon ce scénario, plus largement colonisé l'Europe de l'Ouest, jusqu'en Suède.

Nous avons récemment précisé ce scénario en augmentant la densité de l'échantillonnage en France et en Italie. Nous avons ainsi détecté non plus trois, mais cinq groupes génétiques distincts : Italie, Nord de l'Europe, Ouest de la France, Est de la France et Europe de l'Est (Balkans et Carpates). Cette distinction supplémentaire suggère qu'une différenciation a eu lieu selon que le pommier sauvage du refuge espagnol recolonisait la France par l'Ouest ou par l'Est des Pyrénées. Une autre hypothèse pour le groupe de l'Est de la France serait un refuge glaciaire supplémentaire dans les Alpes. Quant au groupe d'Europe du Nord, il proviendrait bien du Sud, et pourrait s'être différencié au fil de la recolonisation du Nord.

Cette étude de la diversité du pommier sauvage européen souligne l'importance du climat dans la différenciation des populations d'une même espèce d'arbre – un facteur à prendre en compte, dans le contexte actuel du réchauffement climatique, pour les recherches sur le devenir des espèces sauvages et cultivées et de leur répartition géographique.

Les études sur le pommier domestique *Malus domestica* et son apparenté sauvage

BIBLIOGRAPHIE

A. Cornille *et al.*, **The domestication and evolutionary ecology of apples**, *Trends in Genetics*, vol. 30, pp. 57-65, 2014.

A. Cornille *et al.*, **Postglacial recolonization history of the European crabapple *(Malus sylvestris Mill.)*, a wild contributor to the domesticated apple**, *Mol. Ecol.*, vol. 22, pp. 2249-2263, 2013.

A. Cornille *et al.*, **New insight into the history of domesticated apple : Secondary contribution of the European wild apple to the genome of cultivated varieties**, *PLoS Genetics*, vol. 8, e1002703, 2012.

B. Juniper, **Le voyage des pommes**, *Pour la Science*, n° 355, pp. 78-83, 2007.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

européen *M. sylvestris* se poursuivent. L'objectif est notamment de caractériser la différenciation génétique du pommier sauvage européen à l'échelle de la France et d'évaluer ses capacités de dispersion (*via* le pollen ou les graines). Par ailleurs, une introgression importante du pommier domestique vers les différents pommiers sauvages a été mise au jour, ce qui suggère que l'intégrité génétique du pommier sauvage européen est menacée par des flux de gènes issus du pommier cultivé.

Lutter contre la perte de diversité des pommiers sauvages

Ces flux de gènes semblent influencés par des facteurs anthropiques qui favorisent les échanges entre espèces sauvages et domestique, tels que le nombre d'exploitations agricoles de pommiers domestiques et l'intensité des cultures autour des populations de pommiers sauvages. Les mécanismes exacts sont à préciser. La présence du pommier cultivé est une cause certaine, mais il semble que le nombre d'espèces qui diffusent le pollen joue un rôle crucial dans le degré d'hybridation entre pommiers cultivés et sauvages.

L'ensemble de ces résultats a conduit à la mise en place de plans de conservation du pommier sauvage européen face à ses deux menaces potentielles : la fragmentation de l'habitat (forêts plus petites et plus morcelées) et les hybridations. Notre laboratoire travaille ainsi avec l'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) et avec l'Association française d'agroforesterie à la mise au point d'une stratégie de conservation du pommier sauvage en France, et sur la réintégration des pommiers sauvages dans les agrosystèmes, dans des zones où il avait disparu de par l'action humaine.

Cette réimplantation bénéficierait à d'autres espèces. La réintégration du pommier sauvage dans les haies ou les systèmes agroforestiers pourrait avoir un impact positif sur la biodiversité de ces écosystèmes, c'est-à-dire favoriser le développement d'une faune et d'une flore plus diversifiées. Il est cependant nécessaire de réintégrer des pommiers sauvages représentatifs de leur région d'implantation et de préférence non pollués génétiquement par les pommiers domestiques, c'est-à-dire non issus de croisements avec des variétés domestiques *(voir l'encadré page ci-contre)*. À l'avenir, une identification des individus sans introgression (par exemple parmi ceux vendus actuellement en pépinière) et des recommandations sur le choix des arbres à réimplanter seront développées.

À plus long terme, les connaissances acquises sur la diversité du pommier sauvage et les liens entre pommiers sauvages et domestiques devraient aider à améliorer le pommier cultivé. Une bonne caractérisation des pommiers sauvages permettra de les utiliser comme matériel génétique dans les schémas de sélection et ainsi d'introgresser progressivement certains caractères spécifiques des espèces sauvages absents des variétés domestiques, tels que des résistances à des maladies.

Les DRONES menacés de piratage

Kyle Wesson et Todd Humphreys

Des flottilles d'avions sans pilote pourraient bientôt sillonner les airs, pour surveiller les feux de forêt, livrer des colis, réaliser des opérations de sauvetage, etc. Mais ces drones civils ont des failles de sécurité qui les rendent faciles à pirater

Le 2 août 2010, un hélicoptère de reconnaissance de la marine américaine a pénétré dans l'espace aérien étroitement contrôlé qui s'étend autour de Washington. L'événement n'aurait mérité que quelques lignes dans le registre des contrôleurs aériens de l'aéroport voisin s'il n'y avait eu un détail troublant : l'hélicoptère n'avait pas de pilote. C'était un drone.

Le MQ-8B Fire Scout, un appareil de 1 429 kilogrammes et 9,7 mètres de long, a été victime d'un « problème de logiciel », selon les termes des enquêteurs. Il en a résulté une perte des communications avec les opérateurs qui le contrôlaient depuis une base aéronavale, éloignée de plusieurs dizaines de kilomètres. Et pour ne rien arranger, l'appareil n'a pas exécuté le programme censé le forcer à rentrer à la base dans ce cas de figure. Le drone s'est égaré dans le même espace aérien que celui utilisé par Air Force One, l'avion présidentiel, pour décoller et atterrir à la base militaire Andrews.

Après 30 minutes de tension, les opérateurs ont rétabli le contact et repris le contrôle. Par la suite, un représentant de la marine a tenté de rester positif, en soulignant les bonnes performances du drone : ainsi, le système de pilotage automatique a maintenu l'appareil sur une trajectoire droite et horizontale.

Cette escapade imprévue doit nous alerter sur les immenses défis de sécurité que posent les drones. Ces systèmes de reconnaissance et de frappe commencent à être dédiés à toutes sortes de tâches civiles et plusieurs milliers d'entre eux pourraient survoler les États-Unis d'ici quelques années. Ils participeront peut-être bientôt aux opérations de recherche et de sauvetage, à la pulvérisation de pesticides, à la surveillance des lignes électriques, aux études scientifiques et à une multitude d'autres tâches.

En se passant de pilote – et de cockpit –, les compagnies qui déploient des drones espèrent faire des économies considérables. Par exemple, louer un avion piloté par un humain pour une campagne d'inspection des lignes électriques coûterait le même prix qu'acheter un véhicule aérien automatique susceptible de répéter ce travail un grand

L'ESSENTIEL

- Des milliers d'avions sans pilote, ou drones, devraient bientôt effectuer des missions variées à des coûts réduits : sauvetage, surveillance des lignes électriques, recherche scientifique…
- Leur déploiement dans l'espace aérien pose des problèmes de sécurité complexes et parfois sans réponse aujourd'hui.
- Les signaux radio guidant et commandant les drones peuvent ainsi être falsifiés ou brouillés par des malfaiteurs souhaitant prendre le contrôle des appareils

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

nombre de fois. Les drones ont retenu l'attention des plus grosses entreprises. Frederick Smith, le fondateur et PDG de l'entreprise FedEx, spécialisée dans le transport international de fret, a évoqué le remplacement de sa flotte d'avions par des drones. En France, ERDF , le gestionnaire du réseau de distribution électrique, envisage d'en employer pour la surveillance des lignes.

Même le Congrès des États-Unis commence à admettre que les drones commerciaux vont se répandre. Dans une loi de 2012, il ordonnait l'établissement d'un « plan complet pour accélérer en toute sécurité l'intégration des systèmes civils d'aéronefs automatiques dans l'espace aérien national » d'ici 2015.

Malheureusement, les outils nécessaires à la gestion de ces robots télécommandés ont peu de chances d'être prêts à temps. Les drones étendent les responsabilités de l'Administration américaine de l'aviation au-delà de son rôle traditionnel, qui consiste à s'assurer que les avions restent à une distance respectable les uns des autres et résistent aux vicissitudes de la météo. À la suite des attaques du 11 septembre 2001, le rôle de cet organisme a été élargi aux problèmes de sécurité des avions, que l'arrivée d'essaims de drones dans le ciel multipliera.

Trois types de liaisons nécessaires

Le plus grand défi est la sécurisation des liaisons sans fil des drones. Pour manœuvrer un appareil, trois liaisons principales sont nécessaires : la première avec les satellites de géolocalisation (le système GPS), la deuxième avec les autres aéronefs (qui doivent être avertis des déplacements du drone), et la troisième avec le sol (pour le pilotage de l'engin). La perturbation de l'une de ces trois liaisons peut avoir des conséquences catastrophiques. Dans certains cas, on ne dispose pas de solution technique pour les sécuriser.

Le GPS est le pilier du système de navigation d'un drone, qui comprend aussi des capteurs de guidage inertiel, des magnétomètres, des altimètres et des caméras. Parmi ces dispositifs, seul le récepteur GPS permet une navigation de précision constante. En outre, il n'est pas touché par les conditions météorologiques, à l'inverse des caméras.

Contrairement au GPS militaire, la version civile est librement accessible et non chiffrée. Disponible sur les téléphones portables ou les montres de sport, elle est très populaire, mais dépourvue de toute forme d'authentification, ce qui constitue une faiblesse dangereuse. On peut facilement remplacer le vrai signal par un faux (on parle de *spoofing*, ou de leurrage en français).

En juin 2012, dans la zone de tir de White Sands, au Nouveau-Mexique, notre équipe a montré que cela entraîne une menace pour les aéronefs sans pilote. Nous avons construit un dispositif de leurrage artisanal, qui a pris le contrôle d'un drone éloigné de 500 mètres. Notre dispositif émettait une imitation presque parfaite des signaux satellitaires qui relaient les coordonnées du drone jusqu'à lui. Incapable de distinguer entre le vrai et le faux signal, le drone s'est laissé guider par le plus intense, c'est-à-dire le nôtre.

Quand notre signal indiquait à tort au drone qu'il s'élevait verticalement, l'appareil descendait pour se maintenir à l'altitude programmée dans son système de pilotage automatique. Dès lors, il s'est rapproché dangereusement du sol. S'il ne s'est pas écrasé, c'est uniquement parce qu'un opérateur a fini par prendre le contrôle manuel de l'engin.

Le danger du leurrage est connu depuis plus d'une décennie. Le Département américain des transports l'a signalé dans un rapport de 2001, mais les décideurs et les fabricants d'appareils GPS n'en ont tenu compte que très récemment, pensant peut-être qu'une attaque était improbable. Les solutions techniques envisagées sont loin d'être prêtes. Certaines consistent à protéger les signaux GPS par crypto-tatouage (une signature numérique sécurisée qui identifie l'origine d'un signal et garantit le contenu de son message), mais elles ne pourront pas être implémentées avant plusieurs années. D'autres techniques se fondent sur des systèmes embarqués de supervision des mesures et de la navigation : ainsi, quand l'indication d'altitude donnée par le signal GPS n'est pas en accord avec les autres données (telle celles fournies par les altimètres et les caméras), ce signal n'est plus pris en compte. Cependant, ces techniques doivent encore faire leurs preuves.

Le leurrage n'est pas la seule menace qui pèse sur les drones dépendant des signaux GPS. Près de la surface de la Terre, ces signaux sont faibles et leur réception facile à bloquer : leur densité de flux (une mesure de la puissance du signal) équivaut à celle de la lumière émise par une ampoule

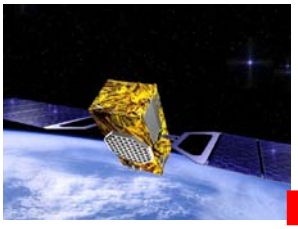
LES AUTEURS

Kyle WESSON est doctorant en génie électrique et informatique à l'Université du Texas à Austin (États-Unis).

Todd HUMPHREYS est professeur de mécanique orbitale et directeur du Laboratoire de radio-navigation à l'Université du Texas.

Le guidage des drones par satellite

La géolocalisation par satellites *(ci-dessous, un satellite du système européen Galileo, qui devrait être opérationnel d'ici un ou deux ans)* est essentielle au pilotage des drones hors de la vue des opérateurs. En effet, lors d'un vol, la précision de la navigation fondée sur des cartes et des capteurs embarqués se dégrade au cours du temps. Un recalage périodique de la position est alors nécessaire. Toutes les procédures de sécurité, y compris celle qui force un drone à rentrer à sa base en cas de perte du signal de commande, utilisent un tel recalage, aujourd'hui par GPS.



© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

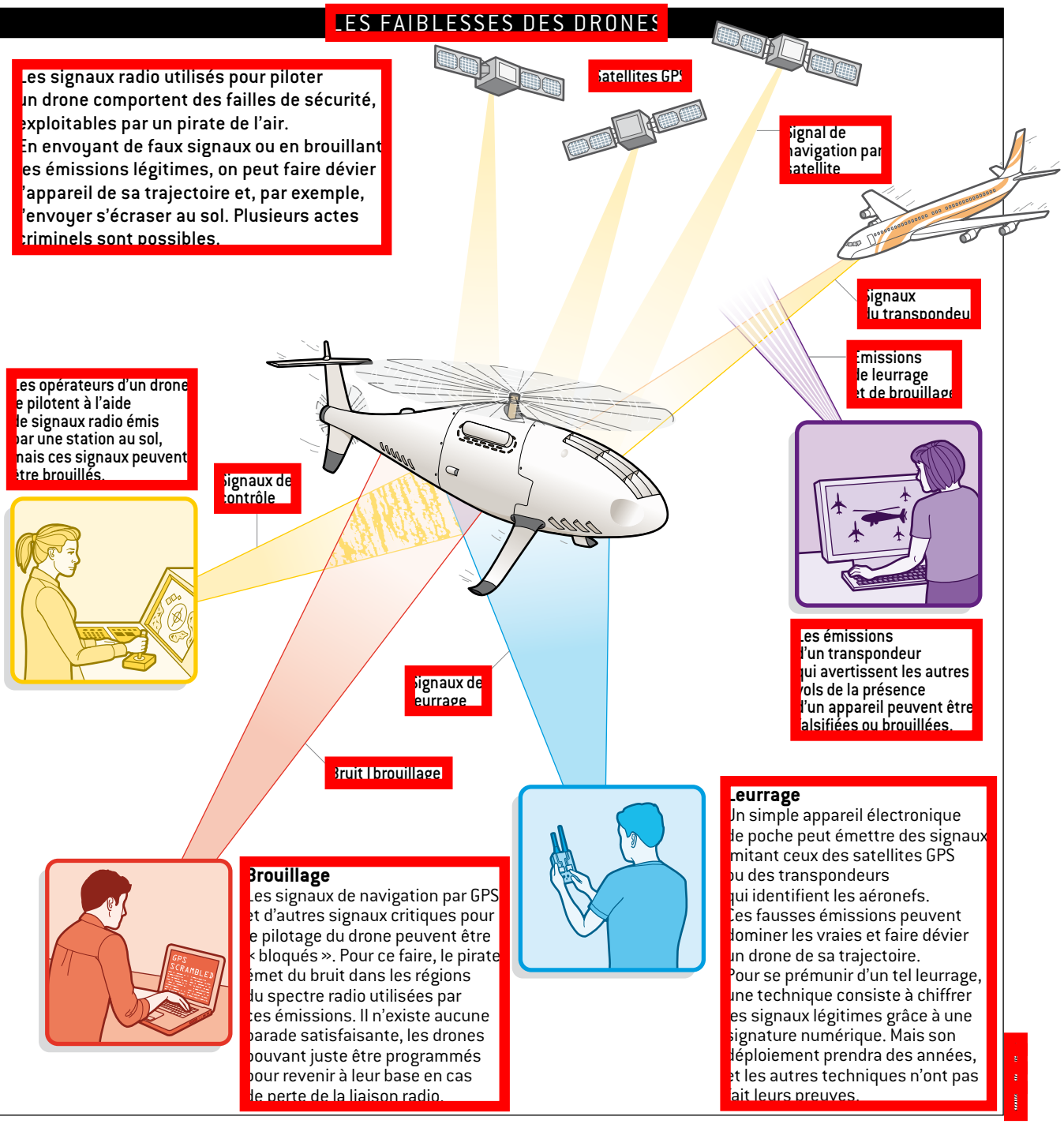
de 50 watts distante de 22 000 kilomètres ! Un dispositif de brouillage peut alors couvrir les signaux GPS en diffusant du bruit aux mêmes fréquences. Presque tous les systèmes électroniques modernes, y compris un simple ordinateur portable, sont susceptibles de brouiller ces signaux par inadvertance, en émettant des parasites reçus par un récepteur GPS proche.

Dans le cas d'un brouillage intentionnel, on peut concevoir un dispositif bien plus efficace pour perturber le système de navigation du drone. En mai 2012, des opérateurs sud-coréens ont perdu le contrôle d'un drone de reconnaissance de 150 kilogrammes, qui s'est écrasé sur sa station de contrôle au sol, tuant un ingénieur et blessant deux opérateurs. Si ces derniers ont sans doute commis un certain nombre d'erreurs, il est probable qu'un brouillage nord-coréen visant la Corée du Sud a déclenché la suite d'événements ayant conduit au crash. Comme cet incident et notre démonstration de leurrage l'illustrent, des systèmes de navigation sécurisés seront essentiels pour que les aéronefs sans pilote puissent voler sans danger.

Le risque de collision avec un autre appareil compliquera encore l'accueil des drones dans l'espace aérien. Les pilotes classiques utilisent des données visuelles et radar pour détecter la présence d'autres aéronefs et éviter les collisions. Les drones n'en sont pas encore capables. Selon un

LES FAIBLESSES DES DRONES

Les signaux radio utilisés pour piloter un drone comportent des failles de sécurité, exploitables par un pirate de l'air. En envoyant de faux signaux ou en brouillant les émissions légitimes, on peut faire dévier l'appareil de sa trajectoire et, par exemple, l'envoyer s'écraser au sol. Plusieurs actes criminels sont possibles.



Brouillage
Les signaux de navigation par GPS et d'autres signaux critiques pour le pilotage du drone peuvent être « bloqués ». Pour ce faire, le pirate émet du bruit dans les régions du spectre radio utilisées par ces émissions. Il n'existe aucune parade satisfaisante, les drones pouvant juste être programmés pour revenir à leur base en cas de perte de la liaison radio.

Leurrage
Un simple appareil électronique de poche peut émettre des signaux imitant ceux des satellites GPS ou des transpondeurs qui identifient les aéronefs. Ces fausses émissions peuvent dominer les vraies et faire dévier un drone de sa trajectoire. Pour se prémunir d'un tel leurrage, une technique consiste à chiffrer les signaux légitimes grâce à une signature numérique. Mais son déploiement prendra des années, et les autres techniques n'ont pas fait leurs preuves.

rapport de 2012 de la Cour des comptes américaine, « Aucune technologie déployée ne confère [aux aéronefs sans pilote] la capacité de détecter et d'éviter les aéronefs et les autres objets dans les airs » tout en satisfaisant aux règlementations aériennes.

Éviter les autres appareils est particulièrement difficile pour les petits drones, car ils ne peuvent pas embarquer les systèmes de radar existants, trop encombrants et gourmands en électricité. Les caméras en lumière visible et infrarouge offrent une alternative efficace, mais elles ne voient pas à travers les nuages.

À terme, une solution pourrait venir de l'ADS-B *(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)*, un système développé à partir des années 1990. Il se fonde sur des « transpondeurs » embarqués, qui signalent toutes les secondes la position et la vitesse de l'appareil, et reçoivent des informations équivalentes des aéronefs évoluant dans la même zone. D'ici 2020, tous les appareils volant dans l'espace aérien américain, petits ou gros, avec ou sans pilote, devront être équipés de transpondeurs ADS-B. Ainsi, les collisions pourront être évitées.

Comme le GPS civil, l'ADS-B a un talon d'Achille : ses émissions ne sont pas authentifiées et peuvent donc être contrefaites. Au début de son développement, la sécurité était une préoccupation mineure, car personne n'imaginait que l'on puisse diffuser de faux signaux. Aujourd'hui, il est facile et peu coûteux de leurrer ce système. En 2012, des chercheurs de l'Institut de technologie de l'Armée de l'air américaine, dans l'Ohio, ont montré que des attaques variées, fondées sur de faux signaux, peuvent être lancées depuis le sol ou les airs avec une antenne bon marché. De telles attaques, dites de « fausse injection », feraient par exemple croire à un appareil qu'une collision est imminente.

On peut ainsi émettre des centaines de faux signaux ou empêcher la réception de messages légitimes. De faux signaux ADS-B seraient plus problématiques pour les petits drones que pour un avion doté d'un pilote embarqué. En effet, grâce au radar de bord, un pilote peut rapidement vérifier si la trajectoire de son appareil entraîne un risque de collision.

Une solution envisagée pour authentifier les sources des émissions est la multilatération, une technique consistant à localiser ces sources en mesurant les instants relatifs d'arrivée des signaux sur des récepteurs au sol, puis à relayer cette information jusqu'aux avions en vol. Mais cela suppose de mettre en place un système de géolocalisation différent du GPS (avec des récepteurs au sol au lieu de satellites

Les drones en Europe

Les États-Unis et Israël sont en avance en matière de drones militaires, grâce à leur retour d'expérience en opérations ou lors d'entraînements. Un marché s'y est développé dans ce type (seuls quelques-uns ont servi à des observations au Kosovo, en Iraq et en Afghanistan) et son industrie aéronautique n'a pas bénéficié du marché militaire.

Cependant, les performances européennes sont comparables à celles des États-Unis et d'Israël dans le domaine des drones civils, pour lesquels les priorités sont différentes. Du côté militaire, l'efficacité prime, tandis que le risque d'accident est un paramètre essentiel dans les espaces aériens civils.

On sait aujourd'hui proposer des solutions individuelles à chaque problème identifié : perte de signal GPS pendant quelques minutes, perte de communications, risque de collision, pannes simples, etc. Mais les vols réels impliquent souvent de multiples combinaisons et enchaînements de ces éléments simples, face auxquels les systèmes actuels peinent à remplacer la réactivité de pilotes entraînés et présents à bord. Il faut alors développer un système global et sécurisé de supervision du vol, où pourraient être programmés les paramètres propres à chaque mission et qui gèrerait les aléas et les défaillances.

C'est le sens des recherches menées par le réseau *Micro Air Vehicle Research Center* (Centre de recherche sur les micro-drones), à Toulouse, coordonné par l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE) et regroupant un certain nombre d'autres organismes (ENAC, Onera, LAAS-CNRS, etc.). Y sont développés des systèmes de navigation combinant les données du GPS, d'accéléromètres, de caméras, de cartes, de détecteurs d'obstacle, de localisation relative, etc. De tels systèmes devraient pouvoir détecter les incohérences entre les données introduites par les piratages décrits dans cet article. Diverses applications sont visées, telle l'inspection de grottes archéologiques ou le recueil de données météorologiques.

En attendant l'arrivée de ces systèmes sur le marché, les usages autorisés doivent être restreints, afin de simplifier les problèmes de sécurité rencontrés. En France, une réglementation pour les drones civils a été publiée en 2012. Elle interdit par exemple le survol des zones peuplées sans dépôt d'un dossier de sécurité – un lycéen a d'ailleurs été poursuivi par la justice en février 2014 pour avoir filmé la ville de Nancy avec un drone sans autorisation. Les usages permis se répartissent en quatre scénarios et doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation spécifique. L'un de ces scénarios, par exemple, décrit le survol de zones inhabitées, à moins de 50 mètres du sol, dans un rayon d'un kilomètre et hors de la vue de l'opérateur ; il concerne typiquement des applications agricoles.

Pour améliorer la fiabilité des drones, on devra aussi adapter la formation des opérateurs qui les dirigent. Ces appareils ont introduit une nouvelle façon de piloter, qui modifie en profondeur le partage des tâches entre hommes et systèmes, et donc le partage de responsabilité entre pilotes et concepteurs.

Ainsi, la technologie et la réglementation doivent évoluer de concert pour définir des applications des drones adaptées à leurs caractéristiques propres. Malgré leur manque de fiabilité, ces appareils ont de nombreux atouts : gamme de pannes variée, émissions sonores réduites pour les petits drones, pas de mise en danger de la vie des pilotes... Plus que leur coût et le retour d'expérience sur les drones militaires a montré que le coût d'exploitation reste élevé malgré l'absence de pilote à bord), ce sont ces atouts qui favoriseront leur déploiement.

– Patrick Fabiani
Directeur adjoint de la recherche, ISAE (SupAero & Ensica)

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

émetteurs), aussi fiable et précis que lui, système dont le coût reste à déterminer.

Enfin, la liaison radio dite de commandement et de contrôle, entre l'opérateur et l'appareil, qui permet de piloter ce dernier, semble *a priori* moins problématique pour la sécurité que le GPS ou l'ADS-B. Des protocoles de communication sécurisés sont définis pour ces signaux, ce qui devrait les protéger des falsifications.

Cependant, les signaux peuvent tout de même être bloqués, d'où une perte de contrôle du drone. Une telle perte de liaison peut résulter d'un brouillage ou d'une autre forme de malfaisance. Aucune solution satisfaisante n'a encore émergé. En général, les opérateurs configurent leurs drones avec un protocole de perte de liaison, qui déclenche par exemple le retour vers la base si la liaison radio est perdue pendant plus de 30 secondes. Mais un tel protocole suppose que le système de navigation du drone (lui-même cible potentielle de piratage) fonctionne et que l'appareil n'ait pas été victime d'un problème logiciel, à l'instar de l'hélicoptère Fire Scout ayant approché Washington en 2010.

Une autre difficulté consiste à identifier les régions du spectre radio susceptibles d'être dédiées à la transmission des signaux de commandement et de contrôle. Sans cela, de nombreux drones devront émettre dans des bandes radio non protégées, utilisées pour d'autres types de transmissions. Des interférences involontaires risquent alors de se produire avec les signaux émis par les multiples systèmes électroniques qui occupent déjà ces bandes.

Outre cette complexité technique, la sécurisation de l'espace aérien pour les drones se heurte aux lenteurs bureaucratiques et à l'hostilité des législateurs. Un changement fondamental de la façon de piloter doit être pris en compte. L'opérateur de drone, basé au sol, n'a plus les mains sur le manche et les yeux rivés sur le pare-brise du cockpit. Il entre un itinéraire dans un ordinateur, contrôle le drone avec un dispositif de type joystick et surveille une série de liaisons sans fil grâce auxquelles l'appareil communique avec sa base. Le drone peut alterner des moments où il est piloté comme un jouet télécommandé – mais un jouet pesant parfois plusieurs tonnes ! – et des phases où il vole de façon autonome.

Il faudra développer un système de régulation adéquat du trafic aérien, afin que les drones partagent le ciel en toute sécurité avec les autres aéronefs, petits et gros. En particulier, il faudra garantir qu'ils ne deviennent pas un danger en cas de perte de liaison.

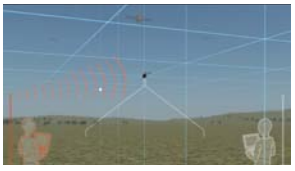
Pour l'Administration américaine de l'aviation, cette mission s'ajoute au développement d'un nouveau système de gestion du trafic aérien, le NextGen (*Next Generation Air Transportation System*). Les nouvelles réglementations devront instaurer un équilibre délicat entre les considérations de sécurité publique et les avantages économiques des drones. En imposant aux aéronefs sans pilote de rester dans la ligne de vision d'un opérateur, on empêcherait sans doute leur détournement, mais on les rendrait inutilisables pour de nombreuses tâches. Les drones soulèvent aussi des questions relatives au respect de la vie privée, et des voix s'élèvent pour demander un encadrement sévère de ces engins capables de survoler un jardin de banlieue avec des caméras haute définition.

Les drones, objets de méfiance

De nombreux législateurs voient d'un mauvais œil l'arrivée des drones, qu'ils ont découverts *via* leur rôle dans des conflits armés. Au moins 42 États américains ont mis en place des lois limitant leur utilisation. Ainsi, au Texas, un drone ne peut filmer une propriété privée sans le consentement du propriétaire – c'est aussi le cas en France, où la CNIL (Commission nationale de l'informatique et des libertés) régit l'usage d'images et d'informations acquises par des drones. Au niveau fédéral, le *Preserving American Privacy Act*, une loi de préservation de la vie privée proposée en 2013, rendrait nécessaire l'obtention d'un mandat pour effectuer une surveillance avec des drones, et illégale l'utilisation de drones armés au-dessus des États-Unis.

Les difficultés techniques et les inquiétudes exprimées par les législateurs devraient ralentir l'adoption des drones, sans toutefois l'arrêter. La sécurité de ces appareils doit être considérée avec un certain recul. Les avions classiques sont aussi vulnérables : ils peuvent être détournés, les pilotes forcés à agir sous la contrainte, les communications coupées. Et pourtant nous continuons à voler, non par ignorance des risques, mais parce que les avantages l'emportent. Les bénéfices des drones nous pousseront aux mêmes concessions.

EN VIDÉO



Vidéo montrant le piratage d'un drone : http://tinyurl.com/hwa5atf

SUR LE WEB

Autorisations nécessaires pour faire voler un drone en France : www.developpement-durable.gouv.fr/Demarches-pour-effectuer-le.html

Site de l'ISAE : www.isae.fr

BIBLIOGRAPHIE

Les drones aériens : passé, présent et avenir, Documentation française, 2013

Unmanned aircraft systems : Measuring progress and addressing potential privacy concerns would facilitate integration into the national Airspace System, U.S. Government Accountability Office, 2012. www.gao.gov/products/GAO-12-981

W. C. Bennett, **Unmanned at any speed : Bringing drones into our national airspace,** *Issues in Governance Studies series*, n° 55, Brookings Institution, 2012. www.brookings.edu/research/papers/2012/12/14-drones-bennett

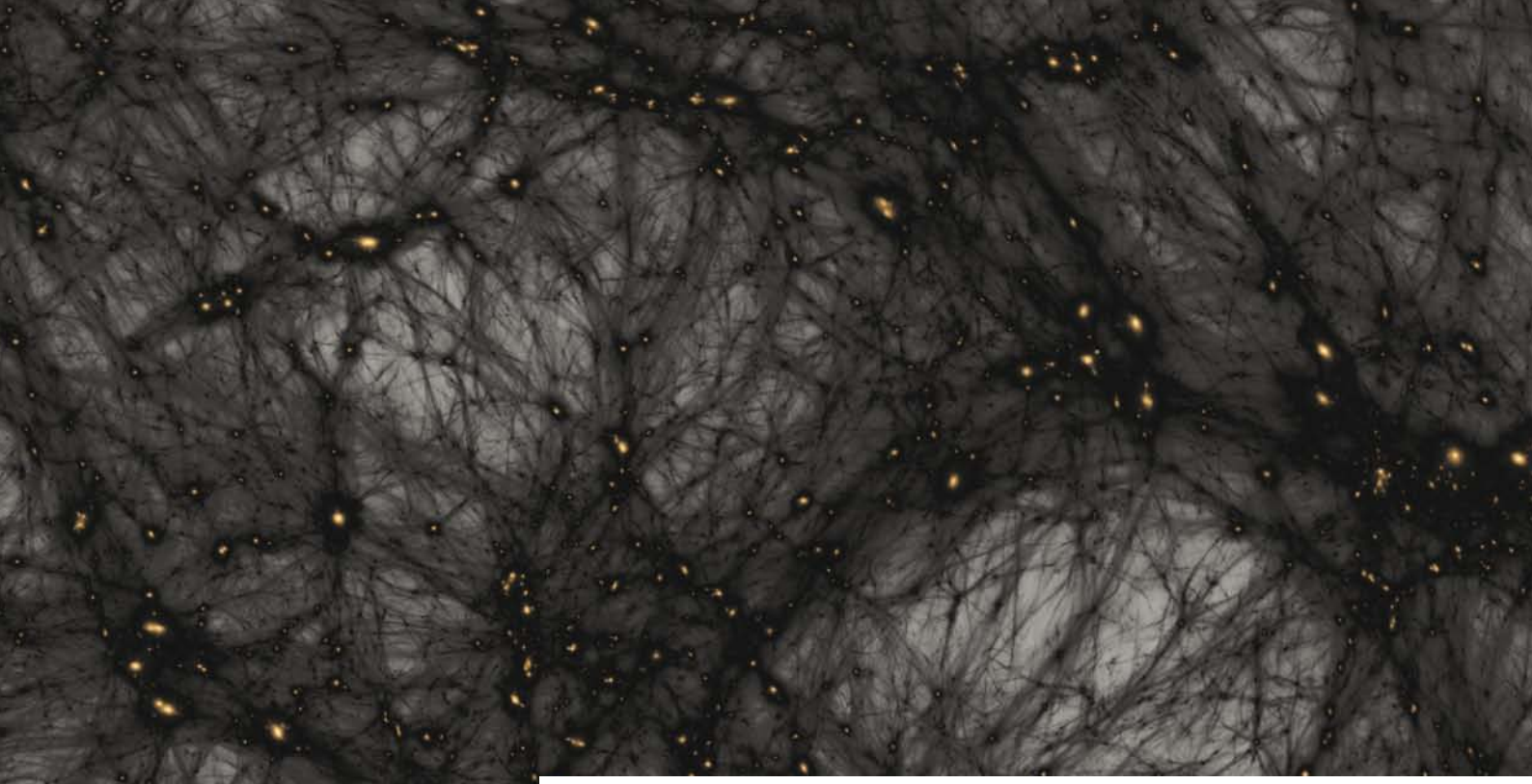
D. Zubeldia, **Histoire des drones**, Perrin, 2012

Les galaxies naines et la toile cosmique

Noam Libeskind

L'ESSENTIEL

- D'après les théories de formation galactique, la Voie lactée devrait être entourée d'un halo sphérique de petites galaxies satellites.
- Les astronomes ont trouvé moins de satellites que prévu. Pire, les galaxies satellites observées se répartissent dans un plan qui coupe la Voie lactée.
- Certains chercheurs ont, pour cette raison, mis en doute l'existence de la matière noire.
- De nouvelles simulations expliquent ce déficit de galaxies naines et leur alignement en invoquant une immense toile cosmique de matière noire.



LA MATIERE NOIRE *(en noir sur cette simulation)* se concentre en filaments qui s'étendent à travers tout l'Univers. Les galaxies *(en jaune)* tendent à se trouver au croisement de ces filaments. Cette simulation a été effectuée sur les superordinateurs de l'Institut Kavli d'astrophysique des particules et de cosmologie de l'Université Stanford.

Le nombre et la répartition des petites galaxies en orbite autour de la Voie lactée étonnent les astrophysiciens. Ces galaxies naines ont peut-être gagné leur place actuelle en parcourant des filaments de matière noire qui traversent l'Univers entier.

Parfois, présenter son travail de recherche aux autres spécialistes de son domaine peut être difficile… « N'importe quoi ! Foutaises ! Balivernes ! » s'est exclamé Pavel Kroupa, astrophysicien à l'Université de Bonn, en Allemagne, alors que j'étais sur l'estrade de l'amphithéâtre. Ce genre de situation est d'autant plus difficile à gérer lorsqu'on est étudiant en thèse et candidat à un poste de chercheur postdoctorant. J'étais venu à Bonn pour exposer en 45 minutes mes travaux sur les petites galaxies satellites qui entourent la Voie lactée. J'avais contribué à développer une théorie expliquant pourquoi ces mystérieux objets sont situés sur ce qui apparaît comme une ligne droite traversant le ciel, un alignement inattendu et très curieux. P. Kroupa, manifestement, n'était pas convaincu par mes arguments.

La plupart des galaxies semblables à la Voie lactée seraient entourées de dizaines de petites galaxies satellites en orbite autour d'elles. Ces galaxies sont extrêmement pâles et difficiles à observer. Seules les plus brillantes et les plus proches ont été détectées autour de la Voie lactée et autour de sa voisine, la galaxie d'Andromède. Mais ces galaxies satellites naines n'évoluent pas sur des orbites aléatoires. Au contraire, elles se trouvent toutes dans un même plan, que nous voyons par la tranche *(voir l'encadré page 51)*.

Cet alignement est inattendu. Les simulations informatiques de l'évolution des galaxies prévoient que les galaxies satellites se répartissent de façon sphérique autour de la galaxie centrale. On a longtemps pensé qu'un tel arrangement résultait de la distribution sphérique, autour de la galaxie, de la matière noire. Cette substance hypothétique, qui n'interagit avec la matière ordinaire que par la force gravitationnelle, est censée être omniprésente dans l'Univers, et jouerait un rôle clef dans la formation des galaxies et l'expansion du cosmos.

Cependant, l'énigme de l'alignement des galaxies naines est telle qu'elle a conduit certains astronomes, dont P. Kroupa, à contester l'existence même de la matière noire. « L'idée de la matière noire est en échec, dit-il en interrompant ma présentation, puisque la distribution sphérique des satellites autour de la Voie lactée, une prédiction déduite

de cette idée, est clairement en contradiction avec ce que nous observons. »

J'exposais une vision différente qui repose sur la matière noire. J'expliquais l'alignement très particulier des satellites galactiques en invoquant des structures cosmiques de matière noire qui s'étendraient bien au-delà du voisinage immédiat de la Voie lactée. Bien que certains, tel P. Kroupa, soient sceptiques et n'adhèrent pas à cette explication, des travaux récents, et notamment les miens, montrent que l'existence d'un réseau d'énormes filaments de matière noire expliquerait l'alignement surprenant des galaxies satellites dans le ciel.

L'existence de la matière noire au centre de ce débat a d'abord été postulée pour expliquer d'autres caractéristiques étonnantes des galaxies. Dans les années 1930, l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky a voulu « peser » l'amas de la Chevelure de Bérénice, qui regroupe un millier de galaxies. Il a commencé par mesurer la vitesse des galaxies de l'amas. À sa grande surprise, il a trouvé des vitesses énormes : des milliers de kilomètres par seconde, assez pour que l'amas se disloque. Or la masse visible de l'amas ne pouvait pas assurer la cohésion de l'ensemble par sa force gravitationnelle. Zwicky en a conclu que l'amas devait être rempli d'une matière invisible qui contribue à la force gravitationnelle. Cette substance manquante a depuis été nommée « matière noire ».

Matière manquante

Dans les décennies suivantes, les astronomes ont trouvé des indices de la présence de matière noire partout dans l'Univers, dans presque toutes les galaxies observées. Dans la Voie lactée, le mouvement des étoiles à la périphérie de la galaxie a été étudié. Comme les galaxies de l'amas de la Chevelure de Bérénice, ces étoiles sont en déplacement trop rapide pour être retenues par la matière que nous voyons. Le même type d'analyse réalisé sur la dizaine de galaxies naines de la Voie lactée indique que leur abondance en matière noire serait encore plus grande.

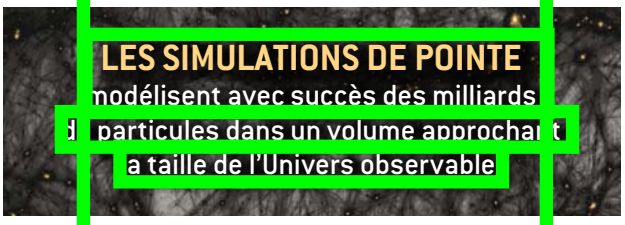
L'ubiquité de ces indices a renforcé la conviction que la matière noire existe bien. En fait, la plupart des chercheurs en cosmologie estiment que la matière noire constituerait environ 80 pour cent de toute la matière présente dans l'Univers.

Cette abondance de la matière noire implique qu'elle joue un rôle crucial dans la façon dont l'Univers a évolué et s'est structuré au cours du temps. À partir des années 1970, les cosmologistes ont simulé l'histoire de l'Univers à partir de modèles numériques. L'idée est simple : l'ordinateur doit se représenter un volume imaginaire, placer des particules ponctuelles imaginaires (qui représentent des grumeaux de matière noire) sur un réseau pratiquement parfait à l'intérieur de ce volume, calculer l'attraction gravitationnelle exercée sur chaque particule par toutes les autres, déplacer chaque particule en fonction de la gravité exercée par les autres, et itérer ce processus sur 13 milliards d'années.

Ces approches se sont enrichies et ont gagné en complexité depuis les années 1970, mais le principe reste le même. Il y a 40 ans, les programmes informatiques ne pouvaient gérer que quelques centaines de particules. Aujourd'hui, les simulations de pointe modélisent avec succès des milliards de particules dans un volume approchant la taille de l'Univers observable.

Les simulations numériques du cosmos ont été très utiles pour étudier les galaxies isolément, mais elles ont révélé quelques énigmes. Par exemple, les modèles informatiques concluent que la matière noire du « halo » qui entoure la Voie lactée devrait attirer le gaz et la poussière et les agréger en grumeaux. Ces derniers devraient se contracter sous l'effet de la gravité, formant à terme des étoiles et des galaxies naines. Dans le cas de la Voie lactée, l'abondance de la matière noire implique que des galaxies naines devraient se former par milliers. Et pourtant, quand on observe le ciel nocturne, on n'en voit que quelques dizaines. Ce déficit, mis en évidence dès les années 1990, constitue le « problème des galaxies satellites manquantes ».

Les astronomes ont avancé quelques solutions possibles à ce problème. Première hypothèse : il se peut que tous les satellites observés dans les simulations ne correspondent pas vraiment à des galaxies satellites réelles. Les plus petits grumeaux de matière noire pourraient ne pas avoir une masse suffisante (et donc ne pas exercer une attraction gravitationnelle



LES SIMULATIONS DE POINTE modélisent avec succès des milliards de particules dans un volume approchant la taille de l'Univers observable

L'AUTEUR

Noam LIBESKIND est astrophysicien. Il crée des modèles informatiques de l'Univers à l'Institut Leibniz d'astrophysique de Potsdam, en Allemagne.

Un MOND sans matière noire ?

Pour Pavel Kroupa, la matière noire échoue à expliquer la distribution des galaxies naines. Il en déduit qu'elle n'existe pas. Selon le chercheur, les galaxies naines se forment dans un plan suite à la collision de deux galaxies. Par ailleurs, pour expliquer le profil des vitesses des galaxies, c'est-à-dire la vitesse des objets galactiques par rapport à leur distance au centre de la galaxie, P. Kroupa fait appel à la théorie MOND *(MOdified Newtonian Dynamics)* proposée par Mordehai Milgrom. Cette théorie qui permet de se passer de matière noire.

Mais le modèle de P. Kroupa rencontre aussi des difficultés : par exemple, les galaxies naines devraient contenir du gaz, ce qui n'est pas confirmé par les observations.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

assez importante) pour capturer le gaz et former des étoiles. Ainsi, les galaxies satellites observées sont la partie visible d'un iceberg sombre : des centaines, voire des milliers, de satellites noirs, dépourvus d'étoiles, se cacheraient dans notre voisinage. Mais nous ne les voyons tout simplement pas.

Deuxième possibilité : même si de petits grumeaux de matière noire créent des étoiles, ces astres pourraient ne pas être assez brillants pour être détectés par les télescopes. Dans ce scénario, avec les progrès des techniques et la sensibilité croissante des télescopes, les astronomes espèrent trouver davantage de satellites. Et effectivement, ces sept dernières années, le nombre de galaxies satellites identifiées autour de la Voie lactée a doublé.

Par ailleurs, le disque de la Voie lactée nous empêche de voir certaines galaxies satellites. Le disque galactique est essentiellement un plan dense d'étoiles tellement brillantes qu'à l'œil nu, on a l'impression d'un fluide blanc continu (d'où l'adjectif « lactée »). Il serait difficile de trouver une éventuelle galaxie satellite située derrière le disque : la lumière du disque noierait sa faible lueur.

Réunis, ces arguments ont, dans une large mesure, réglé le problème des satellites manquants pour la plupart des astrophysiciens. L'idée de la matière noire avait ainsi surmonté l'une de ses objections observationnelles les plus sérieuses. Mais l'alignement particulier des galaxies satellites pose une tout autre difficulté, qui laisse les chercheurs perplexes.

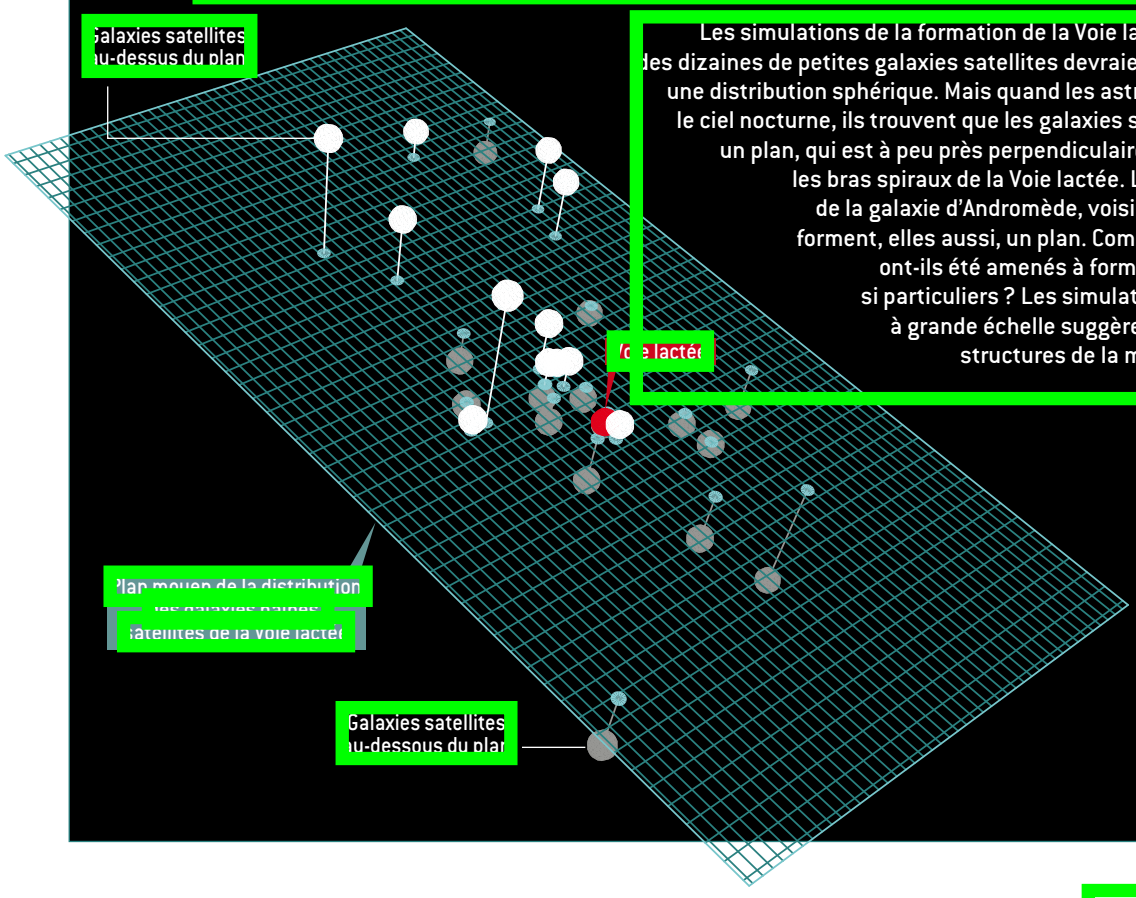
Les galaxies naines sèment le doute

Dans plusieurs articles de la fin des années 1970 et du début des années 1980, Donald Lynden-Bell, astrophysicien à l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, a remarqué que de nombreuses galaxies satellites de la Voie lactée semblent se trouver dans un seul et même plan. Comment expliquer cette étrange répartition ? En 2005, P. Kroupa et son équipe ont convaincu le monde entier que cet alignement ne pouvait pas être aléatoire. Si l'on suppose que les satellites suivent bien une distribution sphérique et qu'environ une seule galaxie naine sur 100 est assez grosse et lumineuse pour être détectée, quelle est la probabilité que ces galaxies se retrouvent par hasard sur un même plan autour de la Voie lactée ? La réponse a créé un séisme en cosmologie : la probabilité était inférieure à 1/1 000 000.

Si la matière noire guidait la formation des galaxies, affirmait P. Kroupa, les galaxies naines ne se trouveraient jamais toutes dans ce plan unique. La seule issue était d'admettre que les galaxies satellites de la Voie lactée ne se sont pas formées à la suite de l'agglomération de matière noire. La matière noire, disait-il, n'existe pas.

P. Kroupa proposait une alternative. Il suggérait que les satellites étaient des débris galactiques, les restes d'une ancienne galaxie qui serait passée il y a longtemps à proximité de la Voie lactée. De même qu'un astéroïde se disloque en laissant derrière lui un sillage de débris quand il entre dans l'atmosphère de la Terre, les satellites de la Voie lactée ont peut-être pour origine du matériau arraché à une galaxie plus grosse.

LE PLAN IMPOSSIBLE DES GALAXIES NAINES AUTOUR DE LA VOIE LACTÉE



Les simulations de la formation de la Voie lactée prévoient que des dizaines de petites galaxies satellites devraient l'entourer, selon une distribution sphérique. Mais quand les astronomes observent le ciel nocturne, ils trouvent que les galaxies satellites dessinent un plan, qui est à peu près perpendiculaire au plan formé par les bras spiraux de la Voie lactée. Les galaxies naines de la galaxie d'Andromède, voisine de la Voie lactée, forment, elles aussi, un plan. Comment ces satellites ont-ils été amenés à former ces alignements si particuliers ? Les simulations informatiques à grande échelle suggèrent que les grandes structures de la matière noire jouent un rôle crucial.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

Pour étayer son hypothèse, P. Kroupa s'est appuyé sur certaines observations de galaxies en collision. Nombreuses dans l'Univers, elles présentent de longs ponts de matière, les « bras de marée ». Souvent, ces bras de marée contiennent de petites galaxies naines qui se condensent à partir du flot de matière. Dans les bonnes conditions, la nature du déchirement garantit que le matériau arraché se retrouvera dans un plan mince, comme les satellites de la Voie lactée.

L'explication de P. Kroupa était élégante, simple, et surtout... controversée. Elle a vite été contestée. Tout d'abord, les étoiles des satellites de la Voie lactée se déplacent trop vite pour que leur cohésion soit assurée par la seule matière ordinaire. Il doit y avoir de la matière noire pour les retenir, de même qu'elle assure la cohésion de la Voie lactée (en fait, les observations suggèrent que les galaxies satellites naines de la Voie lactée sont parmi les galaxies les plus riches en matière noire de l'Univers). Le scénario de P. Kroupa, où ces galaxies naines sont dépourvues de matière noire, n'explique pas pourquoi elles gardent leur cohésion (une piste possible est cependant proposée par la théorie MOND).

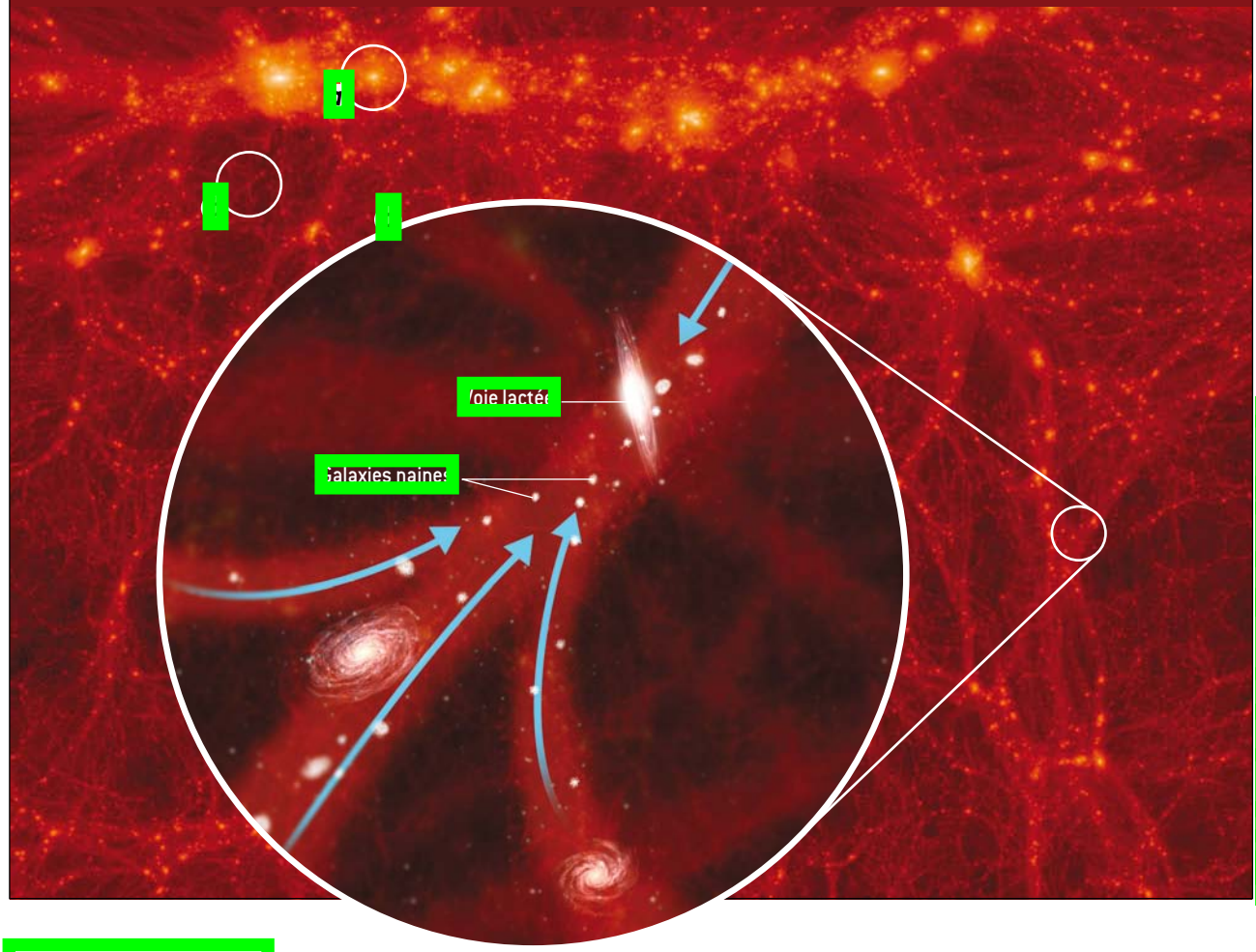
Ensuite, tout comme les automobiles sont abîmées lors d'un carambolage, les collisions entre galaxies à disques détruisent leur structure. Le résultat d'une collision galactique est presque toujours un ramassis d'étoiles flou et informe. Or la Voie lactée a une structure bien nette et un disque assez mince. Nous ne voyons aucune indication qu'elle ait subi une fusion ou une collision dans un passé récent.

La toile cosmique sombre

Il existe une autre explication de l'alignement inhabituel des galaxies naines. Cette solution nous oblige à regarder plus loin dans le cosmos. Dans les simulations informatiques dont les premières datent des

DES AUTOROUTES COSMIQUES DE MATIERE NOIRE

Dans les quelque 13,7 milliards d'années qui se sont écoulées depuis le Big Bang, la matière noire qui imprègne l'Univers s'est condensée pour former une « toile cosmique », une énorme structure de filaments se croisant en des nœuds. La matière noire attire le gaz et la poussière avoisinants, et des galaxies massives telles que la Voie lactée se forment aux nœuds où la densité de matière noire est la plus grande *(a)*. Dans les filaments, la densité de la matière noire est plus faible, et seules des galaxies naines plus petites s'y forment *(b)*. À mesure que le temps passe, l'intense force gravitationnelle exercée par les nœuds tend à attirer du matériau des filaments, telles les galaxies naines qui convergent vers de grandes galaxies *(c)*. Pour un observateur situé à l'intérieur de la Voie lactée, les galaxies naines apparaissent situées dans un plan perpendiculaire au disque galactique.



© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

années 1970, on ne calcule pas seulement l'évolution des galaxies individuelles. On modélise des volumes énormes d'univers. Quand nous explorons ces simulations aux plus grandes échelles, nous constatons que les galaxies ne sont pas distribuées de façon aléatoire. Au contraire, elles ont tendance à se concentrer dans un réseau de filaments qu'on nomme la toile cosmique. Nous voyons clairement la structure prévue quand nous scrutons le ciel avec les relevés astronomiques à grande échelle.

La toile cosmique est constituée de matière noire et de magnifiques ensembles de millions de galaxies, s'étalant sur des centaines de millions d'années-lumière. Des filaments en forme de cigares relient ces ensembles. Entre les filaments, on observe d'immenses vides dépourvus de galaxies. Les grandes, telles que la Voie lactée, ont tendance à se situer aux nœuds de la toile où se rejoignent plusieurs filaments *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Quand j'étais doctorant à l'Université de Durham en Angleterre, j'élaborais des simulations informatiques de ces régions denses. Je travaillais en particulier sur un modèle qui retraçait la formation de la Voie lactée et de son voisinage au fil des 13 milliards d'années de son histoire cosmique. Lorsque j'ai apporté un tracé des résultats à mon directeur de thèse, Carlos Frenk, il a examiné les figures pendant un moment, a secoué les papiers, et s'est exclamé : « Laisse tomber tout le reste ! Les galaxies satellites que tu étudies sont toutes situées sur le plan impossible de Kroupa ! »

Notre modèle ne reproduisait pas les prédictions antérieures des simulations informatiques, qui se résumaient à un halo uniformément peuplé de galaxies satellites autour de la Voie lactée. L'ordinateur prédisait plutôt la formation d'un plan de satellites qui ressemblait beaucoup à celui observé par les astronomes. Nous sentions que nos simulations commençaient à percer le mystère du mécanisme par lequel les galaxies naines ont adopté une configuration plane.

« Pourquoi ne fais-tu pas remonter tes simulations dans le temps pour voir d'où viennent les galaxies naines ? », m'a suggéré C. Frenk. Nous disposions du résultat final ; maintenant, il était temps d'examiner les étapes intermédiaires de la simulation.

En inversant le déroulement de la simulation, nous avons constaté que les galaxies naines ne provenaient pas de la région entourant directement la Voie lactée. Elles ne se formaient pas dans le voisinage de la galaxie, mais plus loin dans les filaments de la toile cosmique. Ces régions, plus denses que les zones vides environnantes, attirent la poussière et le gaz voisins et les amalgament pour former des galaxies naissantes.

Une fois ces galaxies naines formées, la gravité les attire en direction de la région voisine la plus massive – dans notre cas la Voie lactée. Parce que notre galaxie se trouve en un nœud où se rencontrent plusieurs filaments, les galaxies naines se déplacent le long du filament qui leur a donné naissance et accélèrent dans notre direction. En d'autres termes, les filaments de matière noire servent d'autoroutes cosmiques pour les galaxies naines. Quand nous regardons le ciel et que nous voyons les galaxies dans un même plan et allant dans la même direction, ce que nous observons n'est en fait que la circulation galactique qui arrive en face de nous.

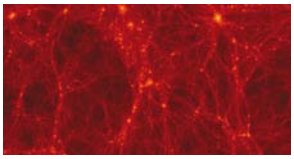
Un nouveau test

Certains scientifiques, comme P. Kroupa, restent sceptiques. Les modèles informatiques semblent reproduire les conditions observées autour de la Voie lactée avec suffisamment de précision, mais la théorie générale devrait aussi être capable de décrire le voisinage d'autres galaxies.

En janvier 2013, les astronomes cartographiant les environs de notre galaxie voisine, celle d'Andromède, ont trouvé un plan de galaxies naines satellites encore plus mince : ce plan a un diamètre d'un million d'années-lumière, pour une épaisseur de seulement 40 000 années-lumière. Cette nappe semble tourner exactement de la façon prévue par le scénario de P. Kroupa. Les simulations informatiques telles que la mienne, cependant, n'ont pas encore été capables de reproduire l'alignement des galaxies que nous voyons autour d'Andromède.

Mais les problèmes de la théorie de P. Kroupa demeurent : elle aussi est en désaccord avec certaines observations. L'histoire a montré que quand on se retrouve dans une telle impasse, les solutions définitives ne viennent qu'avec des données supplémentaires. Comme le faisait un jour remarquer Albert Einstein, « La nature n'a pas jugé devoir nous faciliter la découverte de ses lois. »

EN VIDEO



Une simulation de la toile cosmique : www.Scientificamerican.com/mar2014/cosmic-web

BIBLIOGRAPHIE

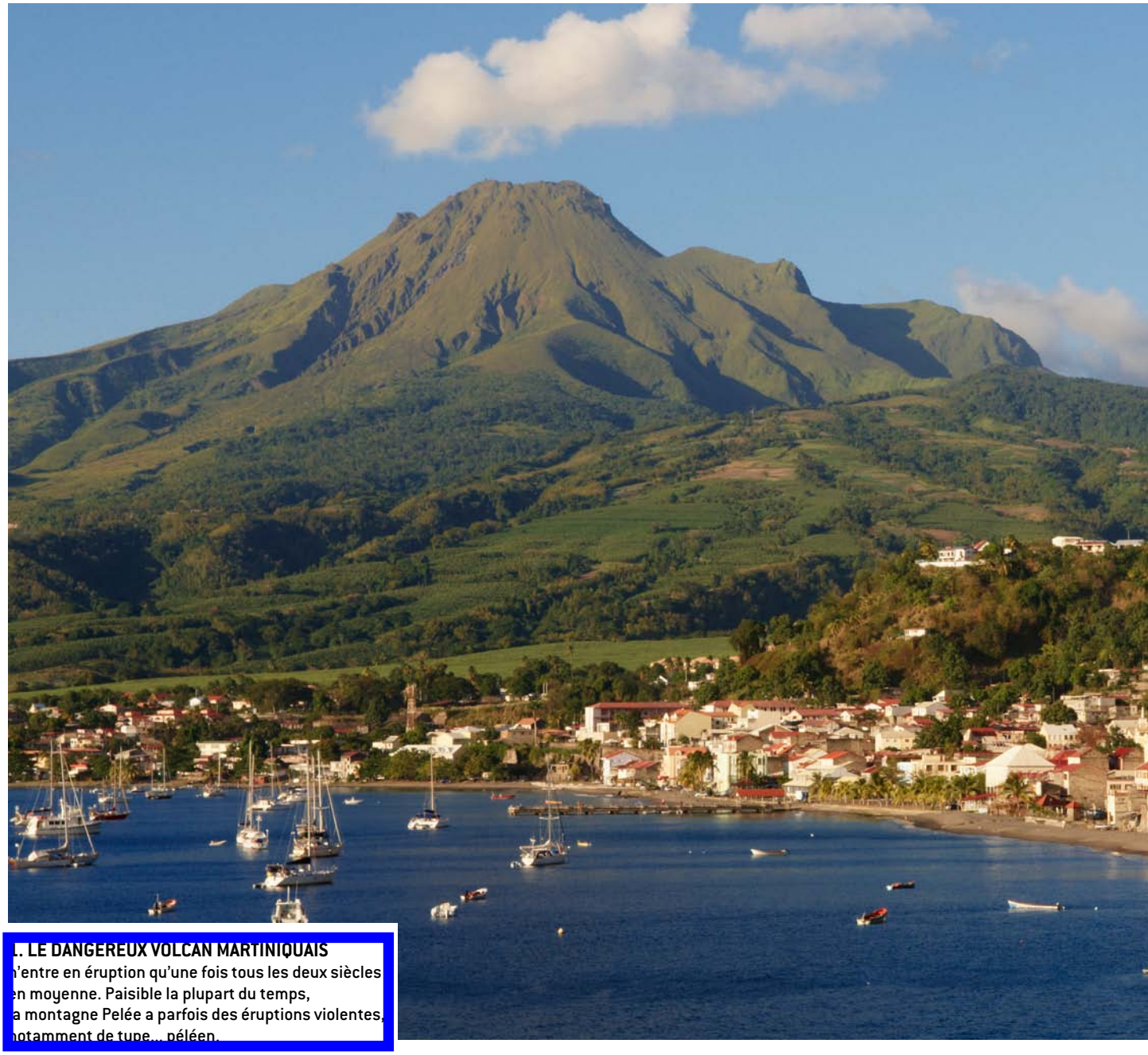
M. S. Pawlowski *et al.*, **Dwarf galaxy planes : the discovery of symmetric structures in the Local Group**, *MNRAS*, vol. 435(3), pp. 1928-1957, 2013.

N. I. Libeskind *et al.*, **The preferred direction of infalling satellite galaxies in the Local Group**, *MNRAS*, vol. 411(3), pp. 1525-1535, 2011.

N. I. Libeskind *et al.*, **The distribution of satellite galaxies : the great pancake**, *MNRAS*, vol. 363(1), pp. 146-152, 2005.

Les crises de la montagne Pelée

Caroline MARTEL



1. LE DANGEREUX VOLCAN MARTINIQUAIS
n'entre en éruption qu'une fois tous les deux siècles en moyenne. Paisible la plupart du temps, la montagne Pelée a parfois des éruptions violentes, notamment de type... péléen.

Le volcan actif le plus dangereux de France est la montagne Pelée, sur l'île de la Martinique. Le 8 mai 1902, il a anéanti en deux minutes la ville de Saint-Pierre, située au pied du volcan, et près de 30 000 vies. Aujourd'hui, ce volcan est surmonté par le dôme de lave grise construit par l'éruption de 1929-1932.

Son apparente tranquillité est trompeuse : dans le cas non improbable d'une nouvelle arrivée de magma dans le réservoir sous-jacent au volcan, son dôme pourrait se volatiliser, comme cela s'est produit en 1902. À l'époque, il a littéralement explosé et libéré une déferlante de gaz, de cendres et de blocs incandescents qui, dévalant les pentes du volcan à une vitesse de quelque 200 kilomètres par heure, ont tout ravagé sur leur passage. De telles nuées ardentes sont non seulement très turbulentes, mais aussi très riches en particules fines, donc hautement abrasives ; elles débordent aussi largement des vallées qu'elles empruntent, ce qui augmente la surface détruite. Paradoxalement, le volume de matériau qu'elles transportent est relativement limité : en 1902, la ville de Saint-Pierre s'est retrouvée couverte de seulement quelques décimètres de cendre *(voir la figure 3)*.

Grâce à des expériences de laboratoire reproduisant la décompression d'un magma, les géophysiciens expliquent la diversité des éruptions qu'a connues le volcan de la Martinique

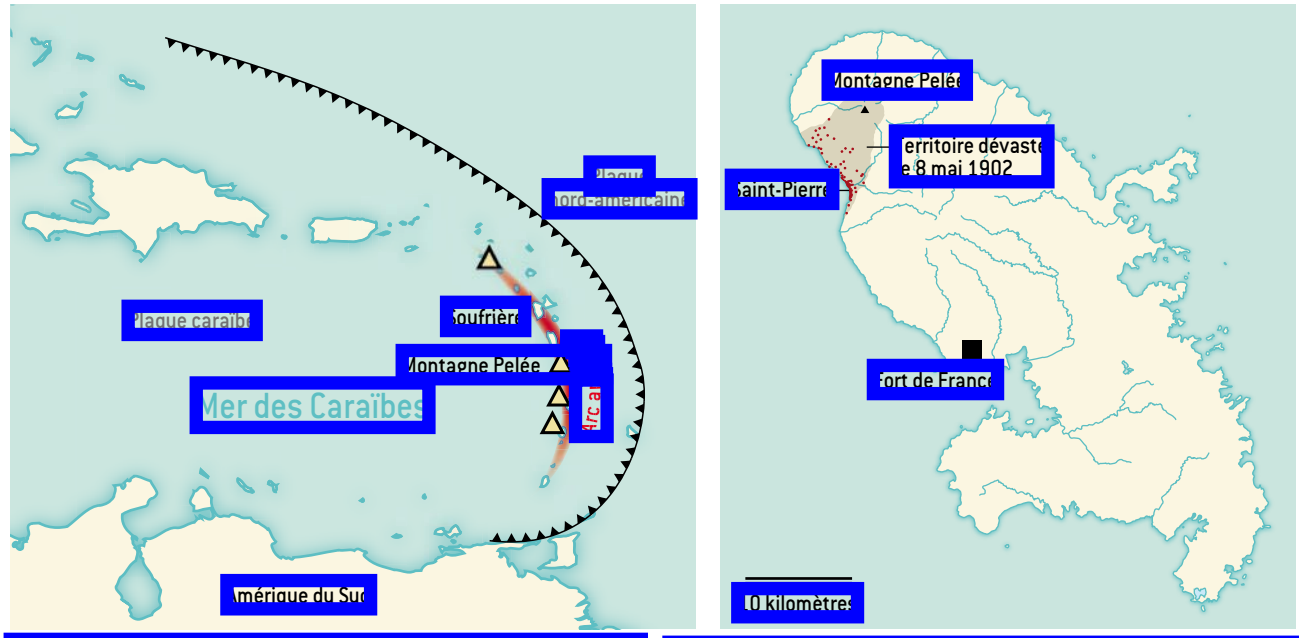
Or la montagne Pelée ne fait pas qu'émettre des nuées ardentes : elle peut aussi avoir des éruptions quasi inoffensives ou au contraire cataclysmiques. Les raisons de cette diversité de styles éruptifs sont longtemps restées mal identifiées. Ce n'est plus le cas depuis que l'on commence à simuler en autoclave, c'est-à-dire dans des enceintes à pression et à température contrôlées par des dispositifs régulateurs, la décompression subie par le magma au cours de son ascension dans la cheminée volcanique. Comme nous allons l'expliquer, ces expériences révèlent les mécanismes différents menant à l'un ou à l'autre des styles éruptifs de la montagne Pelée.

La déferlante du 8 mai 1902, et les six qui suivirent jusqu'en août 1902, ont été décrites par le géologue français Alfred Lacroix (1863-1948). Elles sont devenues le cas de référence mondiale pour ce type d'éruption, sous l'appellation de « nuées ardentes péléennes ». Quant aux éruptions à l'origine de ces nuées, les volcanologues les nomment des éruptions péléennes. Elles sont précédées par l'accumulation dans le cratère de trains successifs de lave visqueuse qui produisent un dôme. Au cours d'un épisode éruptif,

L'ESSENTIEL

- La nuée ardente émise par la montagne Pelée le 8 mai 1902 a tué près de 30 000 personnes en deux minutes.
- Le même volcan a aussi eu des éruptions plus violentes ou au contraire quasi inoffensives.
- Pour comprendre l'origine de ces différences, les géophysiciens ont reproduit en laboratoire la décompression des magmas correspondant aux trois types d'éruption répertoriés.
- Le régime d'éruption de la montagne Pelée est contrôlé par la vitesse d'ascension du magma dans sa cheminée.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014



2. L'ARC INSULAIRE DES PETITES ANTILLES est un chapelet de volcans créés par la subduction de la plaque nord-américaine sous la plaque caraïbe. Ce mouvement tectonique entraîne de la croûte océanique saturée d'eau en profondeur, ce qui provoque la fusion partielle de roches, et un volcanisme, dont la montagne Pelée est un exemple. Situé à l'extrémité Nord de l'île de la Martinique, ce volcan est surtout dangereux pour la zone déjà dévastée par la nuée ardente de 1902, indiquée en gris ci-dessus.

une nuée ardente jaillit quand la pression des gaz dépasse la résistance de ce bouchon.

Toutefois, la montagne Pelée peut faire pire : elle présente aussi des émissions pliniennes. Nommées ainsi en raison du témoignage de Pline le Jeune (61-115) sur l'éruption du Vésuve en 79, ces éruptions s'accompagnent de l'émission pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours, de panaches de cendres et de pierres ponces de plusieurs kilomètres de haut. L'amplitude et la violence du phénomène produisent des effets destructeurs sur de vastes zones. À proximité du volcan, les dépôts de pierres ponces atteignent souvent plusieurs mètres de haut, et l'on en retrouve sur les îles et dans les contrées voisines.

À la montagne Pelée, une dizaine d'éruptions pliniennes ont été répertoriées. La dernière en date, celle de 1300, est particulièrement intéressante. En effet, elle a commencé par une éruption de type péléen accompagnée par une nuée ardente de même extension que celle de 1902, qui fut immédiatement suivie par un événement plinien. Imaginons un instant que se produise à la montagne Pelée une catastrophe comparable à celle du 8 mai 1902, suivie par plusieurs Pompéis martiniquais… L'éruption de 1300 montre qu'il s'agit là d'un scénario à ne pas négliger.

À l'inverse, la montagne Pelée peut aussi avoir des éruptions moins dangereuses que

L'AUTEUR

Caroline MARTEL est volcanologue et chargée de recherche au CNRS. Elle travaille à l'Institut des sciences de la Terre d'Orléans (ISTO).

BIBLIOGRAPHIE

C. Martel, **Eruption dynamics inferred from microlite crystallization experiments : Application to Plinian and dome-forming eruptions of Mt. Pelée (Martinique, Lesser Antilles)**, *J. Petrol.*, vol. 53, pp. 699-725, 2012.

J.-C. Tanguy, **Rapid dome growth at Montagne Pelée during the early stages of the 1902-1905 eruption : A reconstruction from Lacroix's data**, *Bull. Volcanol.*, vol. 66, pp. 615-621, 2004.

C. Martel *et al.*, **Magma storage conditions and control of eruption regime in silicic volcanoes : Experimental evidence from Mt. Pelée**, *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 156, pp. 89-99, 1998.

A. Lacroix, **La Montagne Pelée et ses éruptions**, Masson, 1904.

les éruptions péléennes ou pliniennes : les éruptions de type Merapi, nommées d'après le volcan indonésien du même nom. Ainsi, lors de l'éruption qui s'est déclarée en 1929, par exemple, le dôme de la montagne Pelée n'a pas explosé, mais s'est juste déstabilisé à mesure que le magma remontant des profondeurs repoussait le magma plus ancien ; des écoulements peu turbulents de cendres et de blocs incandescents se sont formés, qui ont emprunté les vallées autour du volcan sans dépasser quelques kilomètres d'extension. Peu dangereuses, les lourdes avalanches qui ont accompagné les éruptions de 1929-1932 avaient cependant la particularité de laisser des dépôts atteignant plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur à proximité de leur point d'émission.

Des éruptions inoffensives aussi

Enfin, la montagne Pelée peut aussi avoir des éruptions plus inoffensives encore : les éruptions phréatiques. Elles se produisent quand assez de magma arrive près de la surface pour vaporiser de façon explosive les eaux souterraines superficielles. Très peu dangereuses, les éruptions phréatiques n'impliquent pas d'émissions de magma, mais seulement d'importantes quantités d'eau vaporisée qui forment de

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

grands panaches de vapeur mêlés de gaz volcaniques et de roches pulvérisées. Des éruptions de ce type se sont produites sur la montagne Pelée en 1792, en 1851, et le 23 avril 1902, juste avant l'éruption du 8 mai.

Comment déterminer le mécanisme à l'origine de cette diversité de styles éruptifs ? Commençons par caractériser la géologie de la montagne Pelée. Comme tous les autres, ce volcan résulte de l'ascension et de la fusion partielle de roches terrestres profondes. Dans le cas des volcans dit de subduction que sont les volcans antillais (*voir la figure 2*), cette fusion est provoquée par le réchauffement d'une plaque tectonique (la plaque nord-américaine), qui s'enfonce sous une autre (la plaque caraïbe) à une vitesse d'environ deux centimètres par an.

Le magma des volcans de subduction monte et s'accumule dans une chambre magmatique située à une profondeur de cinq à dix kilomètres sous l'édifice volcanique, où il mature, c'est-à-dire qu'il y subit des cristallisations partielles. Lorsque la pression, due à l'arrivée de quantités successives de magma profond, est suffisante, le contenu de la chambre magmatique s'engouffre dans les conduits volcaniques.

Où se trouve la chambre magmatique de la montagne Pelée ? Jusqu'à présent, aucune des méthodes géophysiques (sismiques, gravimétriques, magnétiques, électriques ou de déformation) n'a permis de localiser sans équivoque de réservoir magmatique sous la montagne Pelée. Il est possible que les mouvements du magma ou les contrastes de composition entre le magma et les roches entourant la chambre magmatique ne sont pas suffisants pour créer des signaux détectables par ces méthodes.

Les preuves de l'existence d'une zone profonde de stockage sous la montagne Pelée proviennent de la composition intrinsèque de son magma. En effet, les processus de formation de certains phénocristaux, c'est-à-dire des minéraux visibles à l'œil nu dans les magmas (*images 1c, 2c, 3c, page suivante*), sont particulièrement sensibles aux conditions de température ou de pression prévalant lors de leur cristallisation dans la chambre magmatique.

C'est pourquoi la reproduction expérimentale des compositions chimiques des phénocristaux et de verres volcaniques constatés dans un magma indique la température, la pression et la teneur en eau qui étaient en vigueur avant l'éruption.

Expériences en autoclave

Pour mener ces expériences, on utilise des autoclaves, qui permettent de replonger les roches éruptives dans les conditions présumées de la chambre magmatique. Par tâtonnements, on s'approche ensuite du jeu unique des valeurs de la pression, de la température et de la teneur en eau qui reproduit les compositions des phénocristaux et des verres naturels observés dans les roches. Ce jeu de paramètres est considéré comme représentatif des conditions pré-éruptives du magma dans le réservoir.

Les expériences que nous avons menées à partir des ponces pliniennes de 1300, et des matériaux laissés par les nuées d'avalanches de 1929 et par la nuée ardente de 1902 indiquent ainsi que le magma pré-éruptif péléen est stocké entre 850 et 900 °C sous une pression de 2000 atmosphères. On tire de ce résultat deux conclusions. D'une part, compte tenu de la densité (de l'ordre de 3) de la croûte océanique à l'origine du magma, le réservoir magmatique de la montagne Pelée se situe entre six et sept kilomètres de profondeur. D'autre part, le caractère effusif ou explosif des éruptions de la montagne Pelée ne saurait provenir de différences pré-éruptives, les matériaux produits par trois styles éruptifs différents ayant été reproduits en laboratoire avec les mêmes conditions de température et de pression.

Dès lors, d'où provient le caractère plus ou moins explosif du magma de la montagne Pelée ? Les différences découlent du dégazage du magma au cours de son ascension. Le magma liquide contenu dans le réservoir contient en effet d'énormes quantités de gaz en solution. Au cours de l'ascension, lorsque la pression baisse, ces gaz tendent à se séparer du reste du magma en formant des bulles. Ainsi, les ponces des éruptions pliniennes résultent d'une décompression rapide d'un magma très riche en bulles de gaz. Par opposition, un dôme de lave se construit généralement à partir d'un magma qui, ayant progressé lentement vers la surface a eu le temps de se débarrasser de ses gaz.

Cas intermédiaire, le magma de 1902 a semble-t-il eu un comportement paradoxal. La veille de la catastrophe du 8 mai, il a été vu au sommet de la montagne Pelée. Le fait qu'il soit parvenu calmement en surface suggère qu'il avait eu le temps de dégazer. Alors, pourquoi a-t-il brusquement explosé le lendemain, provoquant la nuée ardente que l'on sait ?

Pour le comprendre, revenons au moment où le magma sort de la chambre magmatique. Sa vitesse d'ascension vers la surface conditionne le temps imparti au dégazage, c'est-à-dire à l'évacuation à travers les conduits volcaniques des bulles formées à partir des gaz dissous dans le magma profond. Si rien ne le contrecarre, ce processus dure moins de quelques heures et prive vite le magma de son potentiel explosif.

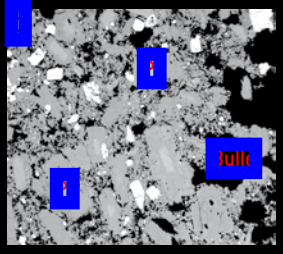
Cependant, au cours de l'ascension, il existe un phénomène qui peut empêcher le dégazage : la cristallisation de microlithes. Ce terme désigne non pas les phénocristaux qui se forment dans la chambre magmatique, mais les cristaux mesurant moins de 50 micromètres qui se forment pendant l'ascension. Processus lent s'opérant sur plusieurs jours, cette cristallisation a deux

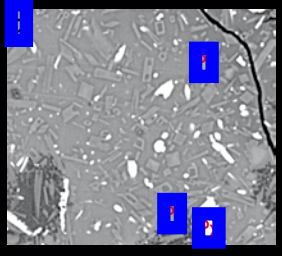
3. LA VILLE DE SAINT PIERRE A ETE ANEANTIE le 8 mai 1902 par une nuée ardente qui a brusquement dévalé les pentes du volcan. Cette nuée ardente a fait 26 000 victimes. Seuls deux habitants présents sur les lieux ont survécu, par extraordinaire.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

LES TROIS TYPES DE MAGMA DES ÉRUPTIONS DE LA MONTAGNE PELÉE

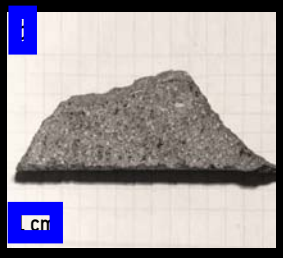
1. Le magma des éruptions de type péléen

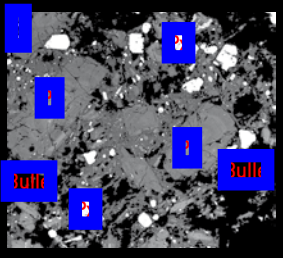


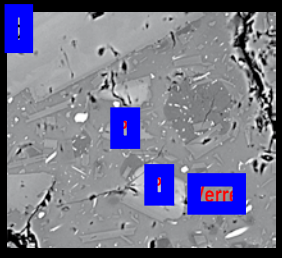


À gauche, l'une des nuées ardentes de 1902 *(a)*. Très destructrices, ces nuées ont laissé des dépôts de plusieurs dizaines de centimètres de cendres grisâtres. Les volcanologues ont retrouvé des éjecta de cette éruption *(b)* et en ont examiné les constituants à plusieurs échelles au microscope électronique à balayage. Au grossissement 25 *(c)*, on distingue des phénocristaux de plagioclases *(Pl)* et des bulles du gaz volcanique dont la détente est à l'origine de la nuée. Au grossissement 2 000 *(d)*, on distingue, en plus des microlithes de plagioclases et de pyroxènes *(Px)*, le verre volcanique qui constitue la gangue de cette roche. La présence de nombreuses bulles montre que ce magma n'a pas eu le temps de dégazer complètement avant d'être expulsé violemment du volcan.

2. Le magma des éruptions de type Merapi

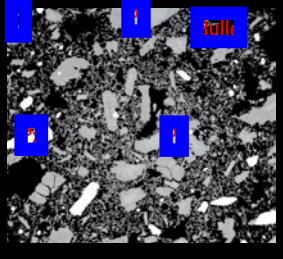


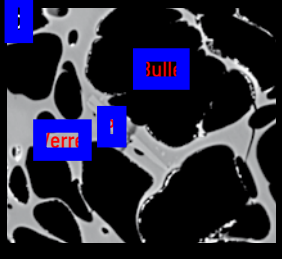




À gauche, le dôme de 310 mètres de haut édifié par l'éruption de 1902 *(a)*. L'écroulement de cet édifice fragile est à l'origine des nuées d'avalanche de 1929-1930, dites de type Merapi. Les volcanologues ont retrouvé l'un des blocs de lave dégazée produit par cette dernière éruption *(b)* et l'ont étudié au microscope électronique à balayage. Au grossissement 40 *(c)*, apparaissent des phénocristaux de plagioclases *(Pl)* et des phénocristaux de pyroxène *(Px)* ainsi que des bulles de gaz. Ces bulles, mais pas les microlithes de pyroxène, sont complètement absentes au grossissement 1 000 *(d)*, qui montre aussi que la gangue de verre volcanique de ce magma bien dégazé est très compacte.

3. Le magma des éruptions de type plinien





À gauche, l'éruption plinienne d'un volcan d'Alaska en 1990 : le Mont Redoubt *(a)*. Ce type d'éruption très violente est caractérisé par un panache atmosphérique de plusieurs kilomètres de haut, par des nuées ardentes et par des pluies de pierres ponces. À la montagne Pelée, l'éruption plinienne de 1300 a laissé d'épais dépôts de ces pierres. L'une d'elles *(b)* a été examinée au microscope électronique à balayage. Au grossissement 25 *(c)*, on distingue des phénocristaux de plagioclases *(Pl)* et de pyroxène *(Px)*, mais surtout de très nombreuses bulles. Au grossissement 2 000 *(d)*, on remarque que les bulles de gaz volcanique dans le verre volcanique sont très nombreuses. En raison de cette structure ultraporeuse, la densité de cette roche est assez faible pour lui permettre de flotter.

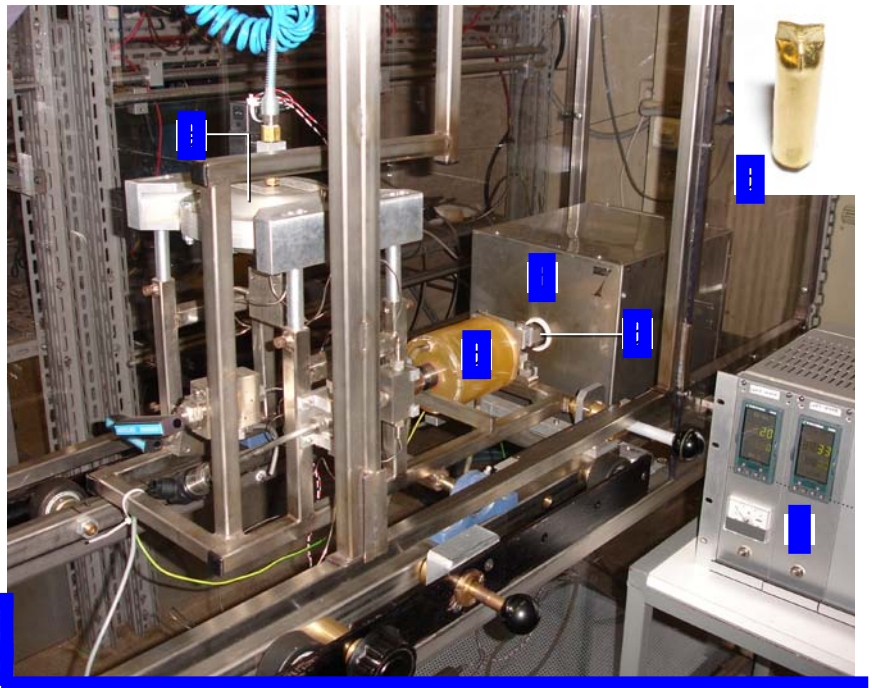
conséquences dangereuses : d'une part, elle favorise la séparation de la fraction gazeuse du mélange magmatique sous forme de bulles ; d'autre part, elle tend à entourer ces bulles de réseaux de microlithes *(voir l'encadré page ci-contre)*. La charpente cristalline qui en résulte augmente la viscosité magmatique et empêche le gaz volcanique de s'échapper à travers les conduits volcaniques. En cas de décompression brutale, la libération de ces gaz piégés sous forte pression provoque une explosion.

La cristallisation des microlithes peut donc être à l'origine de la violence des nuées de 1902 de la montagne Pelée. Pour que nous en soyons certains, il faut étudier les conditions de la cristallisation pendant l'ascension du magma péléen, en particulier le temps de séjour du magma dans la cheminée. Cependant, comme la montagne Pelée entre en éruption moins d'une fois par siècle en moyenne, il n'est pas facile de mesurer cela directement. Du reste, les données sismiques que l'on pourrait recueillir si la montagne Pelée était plus souvent active seraient difficiles à interpréter, car les ondes sismiques sont réfléchies non seulement par les mouvements magmatiques (ceux qui nous intéressent), mais aussi par ceux des gaz, et plus généralement par les fractures et autres ruptures de densité qui parsèment l'édifice volcanique. Il faut dès lors recourir à une mesure indirecte. Ce sont les microlithes qui rendent possible une telle mesure.

Selon le style éruptif, ces microcristaux varient en effet par leur nombre par unité de volume (densité en nombre), par le volume total qu'ils occupent et par leurs formes. Dans le cas de la montagne Pelée, les microlithes sont faits de plagioclase, un silicate d'alumine, de calcium et de sodium de la famille des tectosilicates (minéraux formés par association de motifs élémentaires tétraédriques constitués de groupes SiO_4). Les microlithes des nuées péléennes de 1902 sont par exemple très denses (100 000 à 250 000 microlithes par millimètre carré), en proportion volumique relativement importante (20 à 30 pour cent du volume), de très petite taille (moins de 20 micromètres) et dotés de formes squelettiques à dendritiques (en forme d'arbre).

Par comparaison, les microlithes des nuées ardentes des avalanches de 1929-1932 sont caractérisés par de plus faibles densités en nombre et proportions volumiques, sont plus grands et ont des formes plutôt tabulaires. Quant aux ponces pliniennes, elles sont dépourvues de microlithes.

Le nombre et la taille des microlithes résultent des vitesses de nucléation et de croissance des cristaux. Or les lois qui régissent ces phénomènes dépendent directement de la pression, de la température et du temps disponible pour la cristallisation. Comme les caractéristiques des microlithes nous renseignent sur ces conditions, elles permettent de déduire la vitesse de décompression propre à chaque type éruptif.



4. POUR SIMULER LA DÉCOMPRESSION DU MAGMA, les chercheurs placent de l'eau et un échantillon de roche (éjectée par le volcan) réduite en poudre dans une capsule d'or *(a)* qu'ils soudent aux deux extrémités. Le tout est ensuite placé dans un autoclave pouvant être mis sous 2 000 atmosphères *(b)* et dans un four *(c)* capable d'atteindre 1 000 °C ; grâce à un système de refroidissement à l'eau *(d)*, une vanne pneumatique de décompression automatisée *(e)* et des régulateurs de pression et de température *(f)*, on contrôle les conditions de décompression.

À 850 °C et sous 2 000 atmosphères

Comme lorsqu'il s'est agi de déterminer la profondeur de la chambre magmatique de la montagne Pelée, nous avons placé un échantillon de roche éruptive dans l'autoclave à 850 °C et sous 2 000 atmosphères – conditions sous lesquelles ce matériau entre en fusion –, puis nous avons reproduit la cristallisation du magma pendant son ascension. Pour ce faire, une vanne pneumatique pilotée par l'ordinateur équipant nos autoclaves autorise des décompressions contrôlées pouvant durer quelques minutes ou plusieurs mois.

Les phénocristaux produits dans la chambre magmatique n'évoluant plus pendant l'ascension du magma, c'est la déshydratation du liquide silicaté et hydraté où ils baignent qui provoque la cristallisation des microlithes au cours de la décompression. Ce liquide silicaté, à l'origine du verre volcanique dont est en partie composée la roche éruptive, est nettement plus riche en silice que le liquide contenu dans la chambre magmatique. Cela a deux conséquences. D'une part, le magma en ascension est notablement plus visqueux que celui de la chambre magmatique ; d'autre part, les microlithes sont d'une composition chimique différente de celle des phénocristaux.

Que révèlent nos expériences sur les conditions de cristallisation des microlithes dans les magmas péléens en cours d'ascension ? Pour commencer, les résultats suggèrent que les magmas dépourvus de microlithes de plagioclases, à l'origine des ponces pliniennes, sont montés en quelques heures, ce qui implique des vitesses d'ascension de plusieurs mètres par seconde.

Ensuite, l'ascension des magmas à l'origine du dôme, dont l'effondrement

STYLE ERUPTIF PELEEN

L'ascension du magma se produit en un à quatre jours sans cristallisation, mais elle est suivie d'un long palier durant lequel une cristallisation massive empêche le magma de dégazer. Le volcan monte en pression puis explose.

STYLE ERUPTIF PLINIEN

L'ascension du magma se déroule en moins d'un jour sans cristallisation. La décompression rapide du gaz volcanique provoque la fragmentation explosive du magma et une éruption cataclysmique du volcan.

STYLE ERUPTIF MERAPI

L'ascension du magma se produit en plus de sept jours, et s'accompagne d'une cristallisation qui rend visqueuses les laves produites. Cela entraîne la croissance lente d'un dôme dont le gaz s'est échappé.

5. LA MONTAGNE PELEE A CONNU trois types d'éruptions magmatiques : des éruptions péléennes, pliniennes et de type Merapi. Ces régimes différents sont liés à la vitesse d'ascension du magma dans le conduit volcanique et au temps qu'il y passe. Ces deux paramètres jouent un rôle clef dans le dégazage du magma et déterminent ainsi le potentiel explosif du volcan martiniquais.

a produit les avalanches de 1929-1932, a dû durer entre quatre et sept jours, ce qui signifie que le magma est monté à des vitesses de l'ordre du centimètre par seconde.

Finalement, la reproduction des caractéristiques des microlithes des magmas à l'origine des nuées ardentes de 1902 suggère que le magma est monté en moins de quatre jours, avant de stationner entre 4 et 15 jours à moins de 300 mètres sous le dôme. L'essentiel de la cristallisation s'est accompli pendant ce palier.

Une vision plus claire des scénarios éruptifs possibles à la montagne Pelée se dégage de tout cela. Quand l'ascension du magma dure plusieurs jours, le dégazage a le temps de se faire et le volcan ne monte pas en pression. Dans une telle situation, la présence au sommet du volcan d'un dôme imposant réduit encore les risques : en s'opposant de par son poids à l'ascension du magma, il allonge le temps de dégazage. Le potentiel explosif de la montagne Pelée est alors faible : le risque le plus grand est celui d'un écroulement du dôme, qui entraînerait des nuées ardentes d'avalanches, du type de celles de 1929-1932.

Si, en revanche, le magma accomplit son ascension en moins de quatre jours sans avoir le temps de cristalliser, et qu'il stationne ensuite assez longtemps sous le dôme, les microlithes ont le temps de nucléer massivement près de la surface. Le volume nécessaire à la croissance de ces cristaux n'étant plus disponible pour l'expansion des gaz, ces derniers restent fortement comprimés sous le bouchon cristallin. Tout dépend alors de la masse du dôme qui les surmonte.

Si cette masse est telle qu'il peut résister à la pression, la colonne magmatique a le temps de dégazer ; le seuil de résistance du magma et du bouchon cristallin, puis de la lave durcie qui obstrue le haut de la cheminée du volcan, ne sera pas atteint. Si, en revanche, le dôme est petit et jeune, ce seuil sera atteint, et une brusque détente des gaz pulvérisera le haut de la colonne magmatique. Le volcan éjectera alors brutalement un mélange de gaz et de cendres chauds, et les pentes du volcan seront dévastées par une nuée ardente abrasive et turbulente. C'est ce qui s'est produit le 8 mai 1902.

Nous ne sommes pas les seuls à relier les nuées ardentes dangereuses de la montagne Pelée à l'ascension du magma. Réexploitant des informations glanées dans diverses parties des deux livres publiés par Lacroix sur la montagne Pelée, Jean-Claude Tanguy, de l'Institut de physique du Globe de Paris, a reconstitué la taille du cratère, le volume du dôme qui le recouvrait, celui de matériel volatilisé… Il a en particulier établi qu'au cours des semaines ayant précédé la catastrophe, le dôme grossissait de 28 à 38 mètres cubes par seconde, ce qui a produit un volume pulvérisable de 17 à 20 millions de mètres cubes le jour de la catastrophe. Mais cette croissance indique surtout un flux considérable de magma, manifestement bloqué par la présence (insuffisante) du dôme.

De quel style sera la prochaine éruption ?

En l'an 1300, il est probable qu'aucun dôme important n'était présent, de sorte que quand la partie superficielle de la cheminée volcanique a cédé, une vidange complète du réservoir magmatique a pu se faire en quelques heures, sous la forme d'une éruption plinienne. *A priori*, le même phénomène aurait pu se produire après le 8 mai 1902, puisque l'éruption a encore duré jusqu'en octobre après être passée par une nouvelle phase paroxystique accompagnée de nouvelles nuée ardentes péléennes en août 1902.

Si l'on résume les résultats de ces études, l'origine des violentes nuées ardentes péléennes tient en trois principaux points :

– une ascension du magma trop rapide pour que la cristallisation dans le conduit volcanique ait le temps de se produire ;

– un stationnement du magma sous le dôme, où se produit alors une cristallisation massive qui piège les gaz volcaniques ;

– le poids du dôme ne suffisant pas à contenir la pression accumulée des gaz, le système se détend brutalement.

La validation de ce scénario par nos expériences en autoclave représente une avancée décisive dans la compréhension des processus magmatiques responsables des éruptions volcaniques. De quel style sera la prochaine éruption de la montagne Pelée ? Pour le déterminer, il faudra trouver le moyen d'estimer les vitesses d'ascension du magma dans la cheminée. À l'aide de capteurs sismiques détectant des signaux liés aux mouvements du magma, ou encore de capteurs géochimiques percevant les évolutions du dégazage ?

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

Avec la nouvelle formule Pour la Science faites le plein de nouvelles expériences

→ Le hors-série trimestriel

→ Le mensuel de référence

...ABONNEZ-VOUS !

16 nos • 76 €

au lieu de 102,70 € (prix de vente au numéro)

+ 2 numéros spéciaux de Pour la Science offerts

OFFRE EXCEPTIONNELLE « NOUVELLE FORMULE »

Bulletin à retourner accompagné de votre règlement à : Pour la Science • Service abonnements • 8, rue Férou • 75278 Paris Cedex 06

❑ **Oui, je m'abonne 1 an** et reçois 12 nos de *Pour la Science* + 4 nos de *Dossier Pour la Science* au prix de 76 €* (au lieu de ~~102,70 €~~, prix de vente au numéro).
Je bénéficie également des versions numériques des numéros compris dans cet abonnement sur www.pourlascience.fr

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

+ En cadeau, à l'occasion de la sortie de la nouvelle formule de *Pour la Science*, je choisis 2 numéros spéciaux parmi les titres suivants :

❑ N° 338 - M077033
éc. 2005

❑ N° 350 - M077035
éc. 2006

❑ N° 361 - M077036
ov. 2007

❑ N° 373 - M077037
ov. 2008

❑ N° 385 - M077038
ov. 2009

❑ N° 397 - M077039
ov. 2010

❑ N° 409 - M077040
ov. 2011

❑ N° 422 - M077042
éc. 2012

❑ N° 433 - M077043
ov. 2013

J'indique mes coordonnées

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Nom de l'abonné (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement

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

❑ Par carte bancaire

Numéro

Date d'expiration _____ Signature obligatoire

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

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

@

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

PLS433

Pourquoi les spermatozoïdes et les ovules sont-ils si variés ? Les biologistes commencent à décrypter les mécanismes qui favorisent cette diversité.

Spermatozoïdes
une étonnante diversité

Œufs au petit déjeuner, promenade dans un parc floral où butinent des abeilles, baignade dans l'océan où [illegible] externe, tels les oursins et les ormeaux… Que nous le voulions ou non, nous sommes cernés de spermatozoïdes et d'ovules. Et pour cause : la reproduction sexuée est omniprésente dans le monde animal ou végétal. En particulier, plus de 90 pour cent des vertébrés se reproduisent par voie sexuée. En fait, ce type de reproduction est un moteur essentiel de la diversification des organismes au fil de leur évolution. Les pressions de sélection sexuelle favorisent l'émergence de multiples stratégies reproductives qui, aux côtés de la sélection naturelle, augmentent la biodiversité. Cela se traduit notamment par une grande variabilité des gamètes – les cellules reproductrices – d'une espèce à l'autre ou au sein d'une même espèce.

Depuis longtemps, les biologistes s'intéressent à la diversité des systèmes de reproduction et à l'influence de la sélection sexuelle sur l'évolution des espèces. En particulier, avec les progrès de la génomique (l'étude des génomes) et de la protéomique (l'analyse de l'ensemble des protéines d'une cellule, d'un tissu ou d'un organisme), ils étudient depuis une dizaine d'années l'évolution du génome et des protéines produites par les gamètes, ainsi que la composition protéique du liquide séminal dans lequel se déplacent les spermatozoïdes. Ils ont ainsi observé que les gènes de la reproduction sont ceux qui évoluent et se diversifient le plus vite. Ils espèrent aussi, en repérant des protéines impliquées dans les interactions spermatozoïde-ovule et qui auraient coévolué, et en étudiant leur rôle dans la reproduction, préciser les mécanismes par lesquels la sélection sexuelle influe sur l'évolution.

Les questions sont nombreuses : pourquoi les caractéristiques de la reproduction sexuée évoluent-elles ? Pourquoi y a-t-il plus de spermatozoïdes que d'ovules ? Comment la multiplicité des partenaires sexuels agit-elle sur l'évolution des spermatozoïdes et des ovules ? Pourquoi une

L'ESSENTIEL

- Les cellules sexuelles – les gamètes – varient d'une espèce à l'autre ou au sein d'une espèce.
- Les gènes liés à la reproduction sont parmi les plus rapides à évoluer.
- Ces changements ont contribué à la formation de nouvelles espèces.
- L'étude des gamètes à l'aide des techniques de la génomique et de la protéomique aide à comprendre par quels mécanismes ils se sont diversifiés.

elle diversité des gamètes ? Si l'on est encore loin de comprendre l'ensemble des mécanismes par lesquels la reproduction sexuée agit sur l'évolution, plusieurs pistes se dessinent. Ces recherches sont vastes et s'intéressent tant à l'anatomie et à la physiologie qu'aux comportements. Nous examinerons ici les hypothèses concernant la diversité des gamètes et de leurs modes d'interaction.

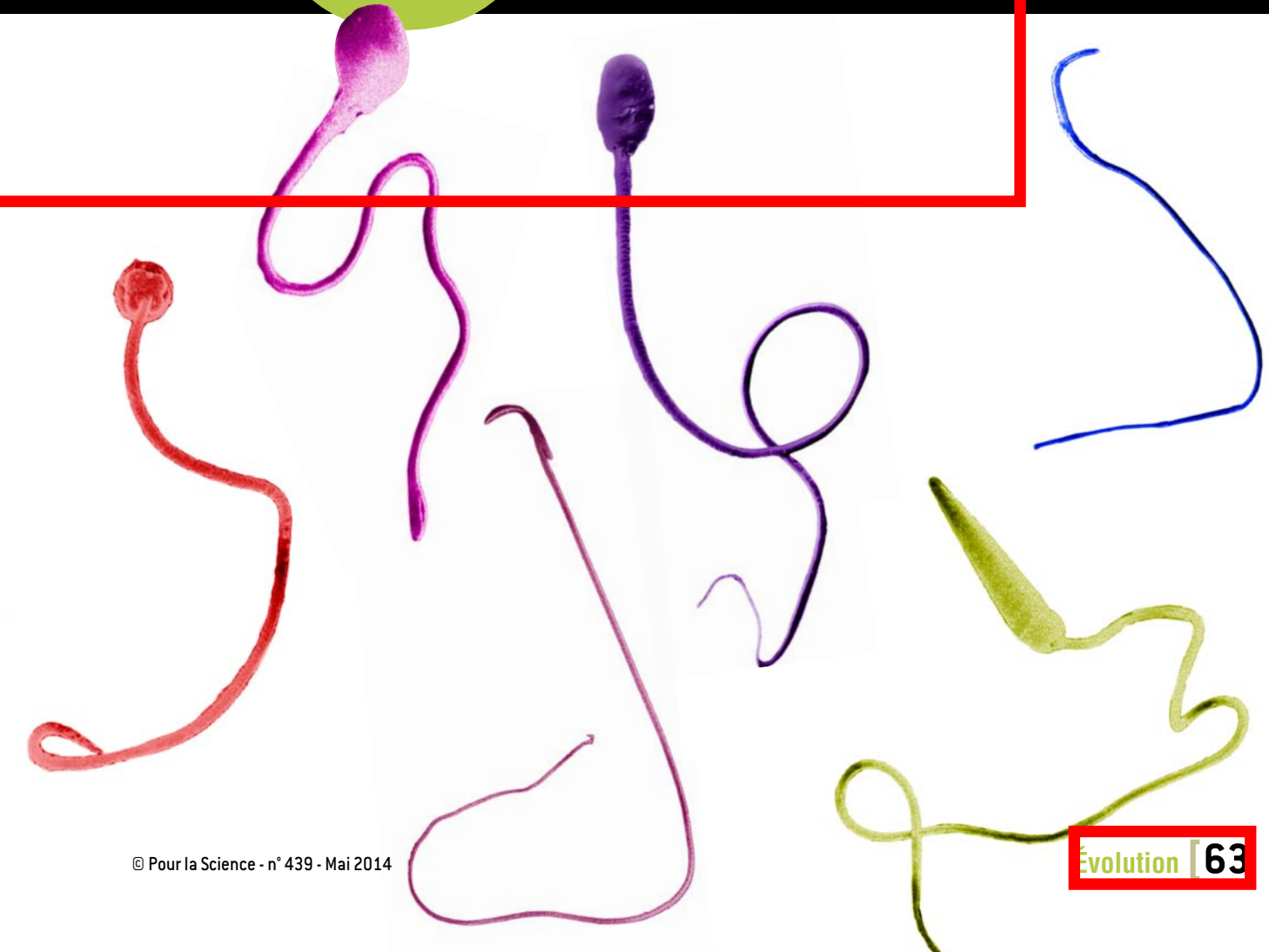
Chaque gamète contient la moitié de l'information génétique nécessaire pour engendrer un individu. Chez l'homme, un gamète comporte 23 chromosomes, dont l'un est le chromosome sexuel (chromosome X dans les ovules et chromosome X ou Y dans les spermatozoïdes). Chez la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*, les spermatozoïdes et les ovules contiennent trois chromosomes non sexuels (dits autosomes) et un chromosome sexuel X ou Y, et c'est la proportion de chromosomes X par rapport aux chromosomes autosomes qui détermine le sexe de la progéniture. Spermatozoïdes et ovules ont donc, du point de vue de la transmission de l'information génétique, un rôle assez similaire. Néanmoins, ils diffèrent considérablement les uns des autres.

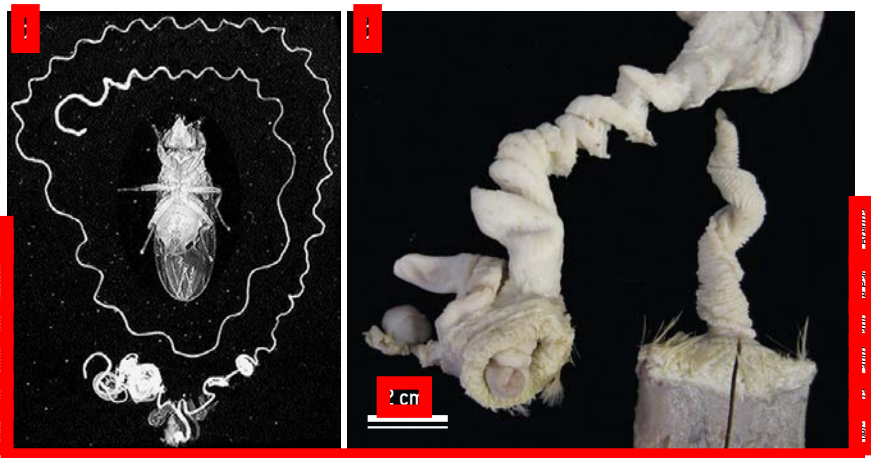
Un facteur pouvant influer sur la dynamique d'une telle diversité est le milieu où l'ovule est fécondé – à l'intérieur ou à l'extérieur du corps de la femelle. La fécondation interne, courante chez les mammifères, nécessite un moyen d'insémination par le mâle. En revanche, lors de la fécondation externe (ou frai chez les animaux), propre à de nombreux invertébrés marins et à

1. LES SPERMATOZOÏDES, comme les ovules, peuvent être très différents d'une espèce à une autre. De gauche à droite, observés en microscopie électronique à balayage (et en fausses couleurs), des spermatozoïdes de rhinocéros, d'ours, d'humain, de rat, de panthère des neiges, d'étoile de mer et de rhéa, un oiseau proche de l'autruche.

et Ovules :

Katrina Clav



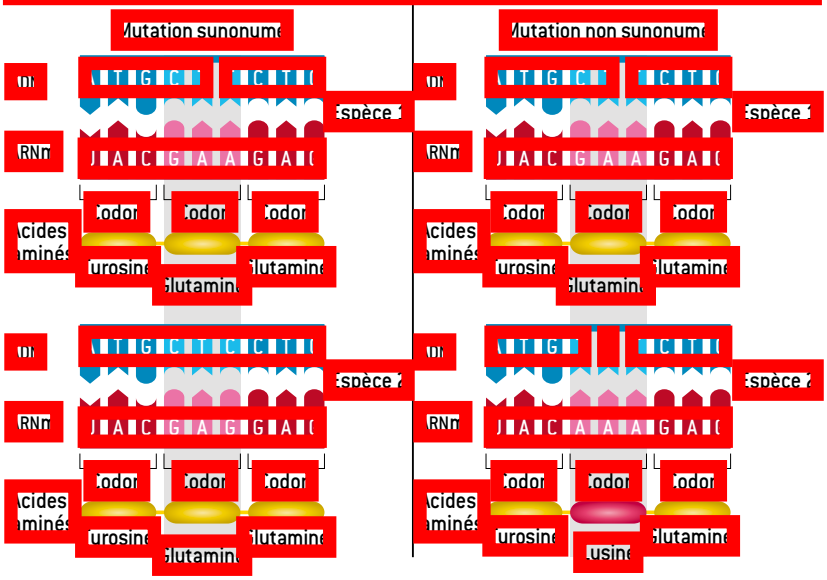


2. DEUX CARACTÈRES REPRODUCTEURS sélectionnés au fil de l'évolution. Le plus grand spermatozoïde connu (58 millimètres de longueur) est produit par la mouche des fruits *Drosophila bifurca* (*a*, une mouche *D. bifurca* mâle entourée de son testicule). Les voies génitales de la cane de Pékin *(b, à gauche)* ont une forme en hélice orientée dans le sens opposé de celui du pénis du mâle *(b, à droite)*. La fécondation n'a lieu que si la femelle facilite la pénétration.

COMMENT ON MESURE L'ÉVOLUTION RAPIDE DES GÈNES

L'évolution rapide des gènes est détectée par l'analyse du nombre de mutations qui modifient la séquence des protéines codées. Les protéines sont constituées d'acides aminés, chacun codé dans les gènes par un ensemble de trois nucléotides (représentés ici par les lettres A, C, G, T) nommé codon. Copiée sous forme d'ARN messager (une molécule elle aussi constituée de nucléotides, notés A, C, G, U), l'information contenue dans les gènes est transportée jusqu'à la machinerie de production des protéines. Chaque codon de l'ARN messager impose l'acide aminé qui sera ajouté pour fabriquer la protéine correspondante.

Plusieurs codons peuvent coder un même acide aminé. Ainsi, si une erreur de copie modifie un nucléotide, elle n'entraîne pas toujours un changement de l'acide aminé (et donc de la protéine produite). Une mutation qui n'entraîne pas de modification de la protéine est dite synonyme *(ci-dessous à gauche)* : ici, le codon de l'ARN messager a été modifié de GAA en GAG, mais ces codons codent tous deux l'acide aminé glutamine, et la protéine reste inchangée. À l'inverse, une mutation qui entraîne une modification de la protéine est dite non synonyme *(ci-dessous à droite)* : ici, le codon GAA a été modifié en AAA, ce qui change l'acide aminé glutamine en lysine, et donc la protéine. L'évolution rapide est détectée en comparant, entre deux espèces, les nombres de modifications synonymes et non synonymes. Si leur rapport est inférieur à un, la protéine évolue rapidement.



certaines plantes, les ovules et les spermatozoïdes sont libérés dans l'environnement. Dans ce mode de fécondation, les gamètes développent des caractéristiques uniques pour leur protection et leur dispersion.

Que la fécondation soit interne ou externe, les différences observées sont de divers types. La plus flagrante concerne la taille et le nombre des gamètes. De façon générale, les femelles ne libèrent que quelques centaines d'ovules au cours de leur vie, tandis que les mâles produisent des spermatozoïdes en abondance. Un homme éjacule 200 à 500 millions de spermatozoïdes – un nombre modeste à côté des 3 milliards produits par le porc d'élevage en une seule émission ! L'ovule, en revanche, est plus volumineux que le spermatozoïde (8000 fois plus chez l'homme) : non seulement il présente plusieurs barrières le protégeant de la polyspermie (l'entrée de plusieurs spermatozoïdes dans l'ovule), mais il contient aussi des ressources nutritives pour la cellule née de la fusion des deux gamètes (le zygote).

Des gènes qui évoluent plus vite que les autres

D'une espèce à l'autre, on observe aussi une grande diversité de tailles et de formes des spermatozoïdes *(voir la figure 1)* et des ovules. Par exemple, l'un des plus grands spermatozoïdes (deux millimètres) est produit par… la mouche du vinaigre. Le record est détenu par une espèce apparentée, *Drosophila bifurca*, dont le spermatozoïde mesure 58 millimètres *(voir la figure 2a)*. Le spermatozoïde de *D. bifurca* est 1000 fois plus long que celui de l'homme. Comment des spermatozoïdes et des ovules, impliqués dans la réalisation d'une fonction bien établie – la fécondation – ont-ils acquis une telle disparité de formes au cours de l'évolution ?

Les gamètes sont constitués de différentes molécules, dont les protéines codées par les gènes qui s'y expriment. Des modifications de ces protéines au fil du temps peuvent conduire à la séparation d'une population unique en deux espèces distinctes. Les protéines sont constituées d'acides aminés, chacun étant codé par une combinaison de trois nucléotides, les constituants des gènes. La modification d'un nucléotide peut suffire à changer l'acide aminé recruté et, par là même, la protéine synthétisée. Les gènes qui évoluent vite sont associés à des fréquences élevées de modification des acides aminés.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

En 2002, une méta-analyse de Willie Swanson, de l'Université de Washington, et de Victor Vacquier, de l'Institut d'océanographie Scripps, aux États-Unis, a montré que les gènes de la reproduction figurent parmi ceux qui évoluent le plus vite dans le génome humain, avec ceux impliqués dans la réponse immunitaire. Avec les progrès du séquençage génomique, cette tendance a été observée dans une grande variété d'autres espèces, notamment des primates, des rongeurs, des mouches des fruits et des papillons.

Le laboratoire de W. Swanson, où je travaille depuis 2009, a ainsi montré que les gènes codant des protéines de la surface des spermatozoïdes et des ovules (des protéines qui pourraient être impliquées dans les interactions des gamètes) évoluent vite chez les ormeaux, des invertébrés marins du genre *Haliotis*.

Nous utilisons cet organisme pour étudier la spécificité de la fixation des spermatozoïdes sur les ovules. Il est particulièrement adapté pour cette problématique, car depuis longtemps, diverses espèces d'ormeaux vivent sur la côte Ouest des États-Unis, dans des zones qui se chevauchent. Or malgré cette promiscuité et des périodes de frai communes, très peu d'hybridations entre ces espèces ont été observées, ce qui suggère que l'interaction spermatozoïde-ovule est spécifique à chaque espèce d'ormeau.

Grâce à un test visant à détecter l'évolution rapide des gènes *(voir l'encadré page ci-contre)*, nous avons observé que des mutations rapides ont conduit à la diversification extrême des gènes de la reproduction, même au sein d'espèces d'ormeaux étroitement apparentées. Nous avons aussi découvert qu'une protéine importante dans la formation du revêtement de l'ovule chez les primates évolue vite. Et d'autres études ont montré que nombre de protéines impliquées dans l'interaction des gamètes évoluent rapidement chez différentes espèces.

Pourquoi les gènes de la reproduction sont-ils si divers et évoluent-ils parfois beaucoup plus vite que ceux de l'immunité, pourtant soumis à une pression évolutive constante à cause des attaques microbiennes ? La réponse tient en partie à la multiplicité des stratégies d'accouplement mises en œuvre. Tout organisme qui se multiplie par reproduction sexuée a sa propre stratégie pour attirer le partenaire de sexe opposé. Les stratégies d'accouplement peuvent faire intervenir des substances chimiques attractives émises par l'un des deux sexes, une coloration visible, une taille extrême, des vocalisations attirantes et de nombreuses autres spécificités. Chez les oiseaux jardiniers, le mâle construit un nid coloré décoré de cailloux, de fleurs et de brindilles ; l'araignée paon d'Australie, comme son homonyme, hérisse les extensions colorées de son abdomen et exécute une danse pour attirer des admiratrices ; la femelle porc-épic reçoit un jet d'urine de ses prétendants avant de choisir un partenaire... Ces stratégies ont évolué au fil du temps en un équilibre complexe qui inclut la survie jusqu'à l'âge adulte (l'âge de l'accouplement) et la capacité d'attirer un ou plusieurs partenaires.

De fait, un trait bénéfique pour l'attirance du mâle peut ne pas l'être pour sa survie. Par exemple, le paon mâle exhibe des plumes colorées qui attirent la femelle paon, mais aussi… les prédateurs. Sa queue encombrante peut causer sa mort.

De plus, mâles et femelles n'ont pas toujours les mêmes intérêts. La femelle choisit les mâles pour engendrer les « meilleurs » descendants, tandis que le mâle tente d'avoir le plus grand nombre de descendants en inséminant le plus possible de femelles.

Plus de partenaires, plus d'évolution

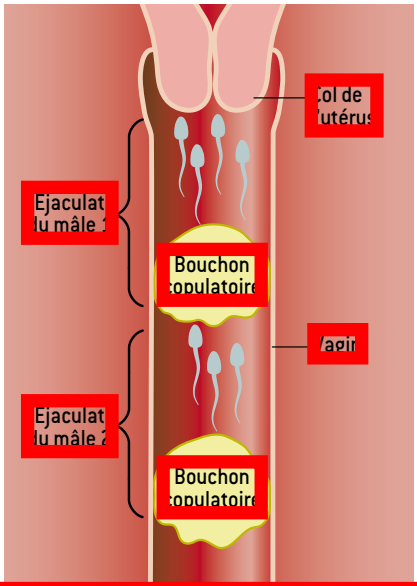
Les gènes des deux sexes étant transmis sans distinction aux descendants, ces divergences d'intérêt pourraient conduire à une situation de conflit entre les gènes de reproduction mâles et femelles. Par exemple, chez les mâles, l'évolution peut favoriser une fusion plus efficace et plus rapide du spermatozoïde avec l'ovule, tandis que chez les femelles, elle peut contrebalancer ce gain d'efficacité des spermatozoïdes en développant une plus grande résistance des ovules à la fécondation rapide, ce qui éviterait la polyspermie. Le conflit sexuel est une des hypothèses envisagées pour expliquer l'évolution rapide des gamètes (nous y reviendrons).

Le nombre de partenaires pourrait aussi influer sur le cours de l'évolution. Chez certaines espèces, les femelles s'accouplent avec des partenaires multiples pendant la période d'ovulation. Chez d'autres, elles s'accouplent avec un seul mâle pendant cette période. En fonction de divers facteurs extérieurs, tels que la disponibilité

L'AUTEUR

Katrina CLAW vient de soutenir sa thèse de doctorat dans le Département de sciences du génome de l'Université de Washington, aux États-Unis

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



3. DANS LA SÉLECTION SEXUELLE postcopulatoire, la sélection intervient après l'accouplement. Par exemple, des bouchons copulatoires se forment à partir de protéines présentes dans le sperme et empêchent les spermatozoïdes d'un autre mâle de progresser vers l'ovule.

des ressources, ces comportements ont pu constituer un avantage adaptatif au fil de l'évolution.

Les primates, qui ont développé différents systèmes d'accouplement, offrent un bon modèle pour étudier la façon dont ces différences ont influé sur l'évolution des caractéristiques reproductives et des protéines impliquées. Même entre des espèces proches, telles que l'homme et le bonobo, les systèmes d'accouplement diffèrent notablement. L'homme est en général monogame et le bonobo est l'un des primates ayant le plus de partenaires sexuels : une femelle bonobo peut s'accoupler jusqu'à 50 fois avec différents mâles pendant une période d'ovulation. De nombreuses études ont montré que les espèces ayant de telles pratiques présentent des caractéristiques remarquables, telles qu'une grande variabilité de la taille des sexes, de plus gros testicules, une morphologie génitale complexe et d'autres particularités morphologiques, comportementales et moléculaires.

Le cas des oiseaux aquatiques sauvages est lui aussi emblématique. Patricia Brennan, des Universités de Sheffield, en Angleterre, et Yale, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que, chez plusieurs espèces, l'évolution aurait favorisé une forme complexe du vagin qui empêche la fécondation lors d'une copulation forcée. Le vagin du canard de Pékin femelle, par exemple, en forme d'hélice droite (qui monte dans le sens anti-horaire), empêche la détente complète du pénis du mâle, en forme d'hélice gauche, tant que la femelle ne facilite pas elle-même son entrée *(voir la figure 2b)*. Le sperme n'atteint alors pas le site de fécondation. Ainsi, les accouplements multiples et la concurrence entre les mâles ont fait apparaître des structures sexuelles complexes au cours de l'évolution.

Si les stratégies d'accouplement sont aussi nombreuses et variées, c'est à cause des pressions de sélection sexuelle auxquelles les espèces sont soumises. La sélection sexuelle favorise les gènes qui confèrent un avantage reproductif. Dans une population donnée, ces gènes finissent parfois par s'imposer au fil des générations. Ainsi,

QUELLE SÉLECTION SEXUELLE LORS DE L'INTERACTION DES GAMÈTES ?

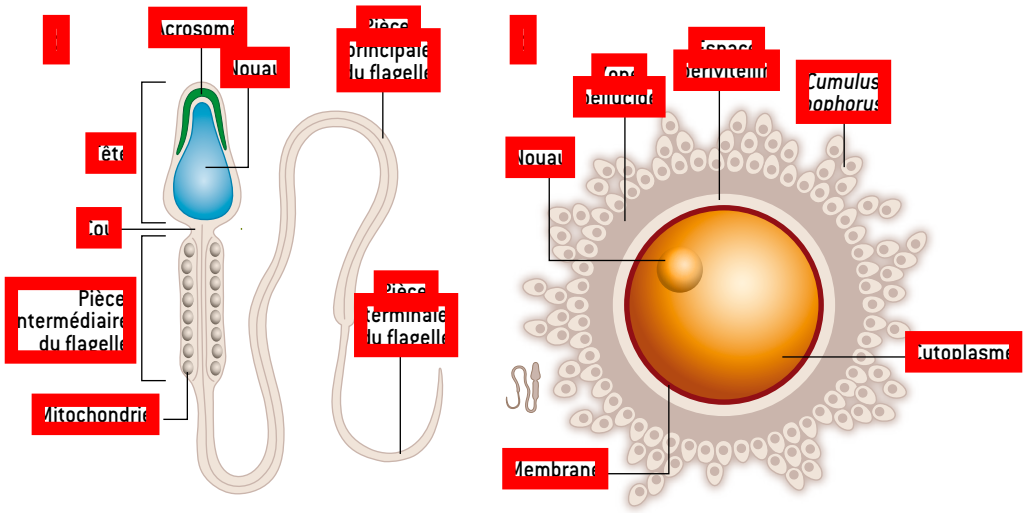
La sélection sexuelle et les multiples stratégies d'accouplement qu'elle crée favorisent l'évolution rapide de nombreux gènes impliqués dans la reproduction. Pour mieux comprendre les rouages de cette évolution rapide, les biologistes se concentrent sur des gènes candidats qui changent rapidement et dont les modifications peuvent être importantes pour le succès reproductif ou l'apparition de nouvelles espèces, en particulier les gènes impliqués dans l'interaction spermatozoïde-ovule.

On est encore loin de connaître toutes les molécules en jeu dans cette interaction. Mais le scénario se précise et fournit de nouvelles pistes de gènes à évolution rapide qui interviendraient dans des fonctions reproductives directes, telles la fixation des spermatozoïdes sur les ovules, la coagulation du sperme et la fécondation.

Quel que soit le type de fécondation, l'ovule libère des molécules qui attirent les spermatozoïdes. Les myriades de spermatozoïdes suivent alors cette piste jusqu'à l'ovule. Chez un homme, le nombre de spermatozoïdes morts ou anormaux dans l'éjaculat est surprenant. Joueraient-ils un rôle dans la fécondation ? C'est ce qu'ont proposé plusieurs biologistes : selon eux, des spermatozoïdes kamikazes réduiraient les chances que des spermatozoïdes rivaux fécondent l'ovule, en les bloquant et en les détruisant à l'aide d'enzymes. L'hypothèse n'a pas été confirmée chez l'homme, mais elle pourrait être pertinente chez d'autres espèces. Simone Immler, de l'Université d'Uppsala, en Suède, et ses collègues ont montré que la forme en crochet des spermatozoïdes de rongeurs augmente leur vitesse de nage : ils s'accrochent les uns aux autres *via* leur crochet, formant des groupes plus rapides qu'un spermatozoïde isolé. Ainsi, des spermatozoïdes s'associaient pour le bien du groupe.

Les structures élémentaires des spermatozoïdes et des ovules sont similaires chez les mammifères et les invertébrés *(voir la figure ci-dessous)*. Durant leur périple, les spermatozoïdes baignent dans un liquide séminal riche en fructose qui leur procure un environnement protecteur et nutritif dans les voies génitales de la femelle. Le liquide séminal neutralise l'acidité de l'environnement vaginal, le rendant viable pour les spermatozoïdes. Les protéines du liquide séminal ont aussi des fonctions antimicrobiennes.

Chez les mouches des fruits, des protéines du liquide séminal modifient le comportement de la femelle après l'accouplement. Lors d'expériences menées par Mariana Wolfner et ses collègues à l'Université Cornell, aux États-Unis, certaines protéines du liquide séminal ont été inactivées dans un groupe de femelles pendant l'accouplement. Les femelles qui avaient reçu le sperme non altéré ne cherchaient plus à s'accoupler avec d'autres mâles et avaient tendance à pondre davantage d'œufs que celles qui avaient reçu du sperme modifié. Il existerait ainsi, dans le sperme, des protéines



LA STRUCTURE ÉLÉMENTAIRE DES SPERMATOZOÏDES ET DES OVULES est conservée chez tous les animaux. L'acrosome du spermatozoïde est un compartiment contenant des enzymes qui facilitent la liaison à l'ovule *(a)*. Le spermatozoïde se déplace vers l'ovule à l'aide de son flagelle. L'ovule est entouré de plusieurs couches protectrices *(b)*.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

a sélection sexuelle agit en parallèle de la sélection naturelle, qui favorise quant à elle la survie du plus apte. Chez le paon, par exemple, la sélection naturelle seule n'aurait pas favorisé la queue visible du mâle, qui diminue ses chances de survie.

Un moteur : la sélection sexuelle

On distingue deux types de sélection sexuelle : la sélection sexuelle précopulatoire (avant l'accouplement) et la sélection sexuelle postcopulatoire (après l'accouplement). La sélection sexuelle précopulatoire peut s'exercer entre mâles ou entre mâles et femelles. Dans le premier cas, les mâles se combattent pour l'accès aux femelles. La concurrence entre mâles peut conduire au développement, *via* la sélection de modifications de gènes, d'un « armement » tel que les bois, les cornes, la force ou la taille. La sélection sexuelle précopulatoire entre mâles et femelles se produit lorsque les femelles choisissent leur partenaire sexuel en fonction de certaines qualités comportementales ou décoratives : danses et chants nuptiaux, changements de coloration et de forme. Par exemple, le coq de bruyère mâle présente sur sa poitrine des sacs qu'il gonfle à la saison des amours pour attirer les femelles.

De même, la sélection sexuelle influe sur la diversité des spermatozoïdes et des ovules, ainsi que sur l'évolution des protéines de la reproduction *(voir l'encadré ci-dessous)*. Les deux principaux scénarios invoqués pour expliquer le rôle de la sélection sexuelle dans l'évolution rapide des gènes sont la compétition spermatique et le conflit sexuel.

Les spermatozoïdes sont en concurrence les uns avec les autres. Parce qu'ils sont plusieurs millions, d'infimes changements de leur forme ou de leurs réserves énergétiques suffisent à modifier leur probabilité de féconder l'ovule. Il en est ainsi, en particulier, chez les espèces à partenaires multiples. Dans certains cas, plus un mâle produit de spermatozoïdes et a de gros testicules, meilleures sont ses chances de féconder plusieurs femelles.

favorisant la ponte des œufs et modifiant le comportement des femelles après l'accouplement.

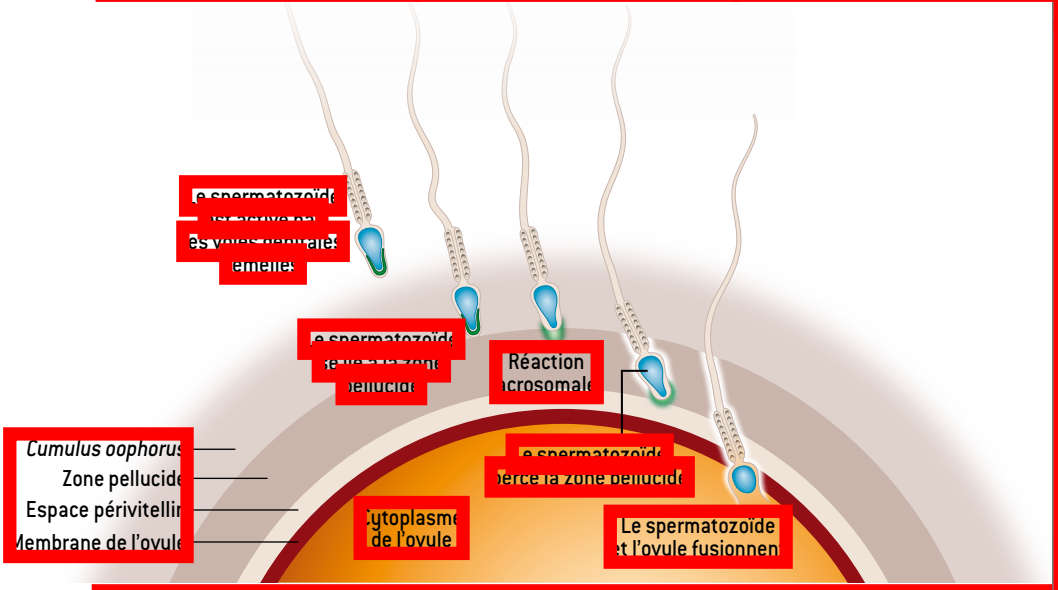
L'ovule, lui, s'entoure de nombreuses barrières, dont un amas de cellules folliculaires *(cumulus oophorus)*, une enveloppe riche en glycogène (ou zone pellucide chez les mammifères) et une membrane. Ces barrières protègent les contenus de l'ovule et ralentissent tout spermatozoïde essayant d'y pénétrer. La fusion de plus de deux spermatozoïdes avec un ovule entraîne la mort de la cellule. La polyspermie, fusion de plusieurs spermatozoïdes avec un ovule, produit un nombre déséquilibré de chromosomes qui entraîne la destruction des corps cellulaires. Certaines espèces à fécondation externe présentent des barrières externes supplémentaires.

La première étape de la fécondation est la fixation du spermatozoïde sur l'ovule et son passage à travers son enveloppe *(voir la figure ci-dessous)*. De nombreuses molécules présentes sur la tête du spermatozoïde et à la surface de l'ovule facilitent la fixation, mais peu ont été identifiées. Chez l'oursin, espèce à fécondation externe, deux protéines d'interaction ont été identifiées sur le spermatozoïde et sur l'ovule, respectivement la lysine et son récepteur sur l'enveloppe de l'ovule, VERL. Portée dans l'acrosome, un compartiment du spermatozoïde, la lysine est libérée lorsque le contenu de l'acrosome est répandu, après la fixation du spermatozoïde sur l'ovule. La lysine libérée se fixe au récepteur VERL et perce un trou dans l'enveloppe de l'ovule, à travers lequel le spermatozoïde se faufile.

Un mécanisme similaire semble à l'œuvre chez les autres organismes, et nombre de protéines pourraient y participer. Toutefois, il n'a été confirmé que chez l'oursin et l'ormeau. Même chez l'homme, dont la zone pellucide est pourtant bien caractérisée, aucune protéine d'interaction n'a été identifiée de façon concluante. Les protéines ZP3 et ZP2 joueraient un rôle important dans la fixation des spermatozoïdes et leur sélection. La protéine ZP3R/sp56 des spermatozoïdes se lierait à la protéine ZP3, mais cela reste à confirmer.

Dans la seconde étape de la fécondation, le spermatozoïde fusionne avec la membrane de l'ovule. Cette phase ne semble pas présenter une spécificité aussi élevée que la première : des spermatozoïdes de souris peuvent se fixer sur des ovules humains et fusionner avec eux lorsque leur zone pellucide a été retirée (la cellule obtenue n'est pas viable). Chez l'humain, l'interaction de la protéine CD9 de l'ovule avec la protéine Izumo des spermatozoïdes serait impliquée dans cette étape. Le mécanisme en jeu nous échappe encore, mais les protéines CD9 et Izumo présentent des signes d'évolution rapide. De façon générale, les gènes qui interviennent dans la fusion du spermatozoïde et de l'ovule peuvent varier beaucoup d'une espèce à l'autre.

Avec la fusion se termine la fécondation. La cellule obtenue, le zygote, commence alors son développement.



CHAQUE ETAPE DE LA FECONDATION nécessite l'interaction de protéines du spermatozoïde et de l'ovule. Des protéines à la surface du spermatozoïde se lient à celles du *cumulus oophorus* de l'ovule ; les enzymes de l'acrosome permettent au spermatozoïde de traverser l'enveloppe de l'ovule (zone pellucide chez les mammifères), puis le spermatozoïde et l'ovule fusionnent.

Diversité des spermatozoïdes et interactions mâles-femelles

La sexualité est un mécanisme de brassage génétique. La coexistence, au sein des espèces, d'individus mâles et femelles engendre, *via* leurs caractéristiques reproductives, des différences comportementales et physiologiques qui constituent un puissant moteur d'évolution. Katrina Claw aborde quelques-uns des mécanismes de diversification qui touchent en particulier les gamètes. Même à l'échelle de ces cellules uniques, ces mécanismes sont en fait bien plus nombreux et imbriqués : notamment, les pressions de sélection au stade postcopulatoire agissent aussi intensément que celles s'exerçant entre individus au stade précopulatoire.

A elle seule, l'ultrastructure des spermatozoïdes est riche d'informations : les caractères morphologiques du gamète mâle, supposés fixés au sein d'une espèce, peuvent varier considérablement d'un groupe taxonomique à un autre. Ces contraintes limitent les fécondations entre espèces distinctes tout en favorisant celles entre individus de la même espèce. L'évolution des outils d'observation microscopique des dernières décennies a été propice à la description quasi atomique du spermatozoïde. La symétrie, l'ornementation, le positionnement des structures externes et internes du spermatozoïde sont autant d'indications fonctionnelles sur le mode de reproduction des espèces et leur évolution.

Le spermatozoïde est soumis à la sélection naturelle en fonction de l'environnement dans lequel il évolue (selon que la fécondation est interne ou externe), mais aussi à la sélection sexuelle, d'une part *via* ses interactions avec les innombrables autres spermatozoïdes issus du même mâle ou de mâles différents et, d'autre part, *via* ses interactions avec l'environnement femelle dans lequel il doit évoluer (pour les espèces à fécondation interne) et avec les gamètes femelles. Lors du processus de fécondation, des adaptations aussi diverses que complexes ont évolué pour répondre à ces pressions de sélection.

K. Claw souligne les variations de taille des spermatozoïdes, le record de longueur et de diversité étant détenu par les drosophiles. Chez ces organismes ont aussi évolué des structures spéciales qui produisent, transmettent et utilisent les spermatozoïdes. Chez les mâles, un nouvel organe entre le testicule et la vésicule séminale a été découvert, le « roller ». Les spermatozoïdes y sont individualisés sous la forme de pelotes. Conservés en ordre serré dans la vésicule séminale du mâle, ces « bouquets spermatiques » sont expulsés un à un par celle-ci, transformée en « sarbacane », lors de l'accouplement. Chez la femelle, le principal organe de stockage des spermatozoïdes, le réceptacle séminal, sorte de chaussette longue et étroite, est aussi dimensionné en fonction de la taille des spermatozoïdes. L'ensemble de ces adaptations et coévolutions morphologiques entre sexes est un processus de sélection sexuelle nommé « course aux armements », similaire à celui qui a conduit, dans la phase précopulatoire, à l'évolution de caractères sexuels exagérés tels que la queue du paon, les bois des cervidés, les pinces des crabes ou les cornes des coléoptères.

Moins connus, mais tout aussi extraordinaires, des cas d'hétéromorphisme gamétique ont été décrits tant chez les animaux (des invertébrés tels les mollusques, les arthropodes ou les insectes) que chez les plantes (des angiospermes, dont les fleurs sont pollinisées par le vent ou par les insectes, ainsi que certains eudicotylédones et magnolias). Il s'agit d'une spécialisation des spermatozoïdes : certains, les parazoospermatozoïdes, perdent leur fonction première de fécondation du gamète femelle au profit des spermatozoïdes fécondants du même mâle, les euspermatozoïdes. Cette spécialisation conduit à des modifications morphologiques et structurelles spectaculaires des spermatozoïdes : chez l'escargot marin ou des coléoptères du genre *Dineutus*, des spermatozoïdes non fécondants, devenus énormes et difformes, sont transformés en transporteurs de spermatozoïdes fécondants petits et filiformes.

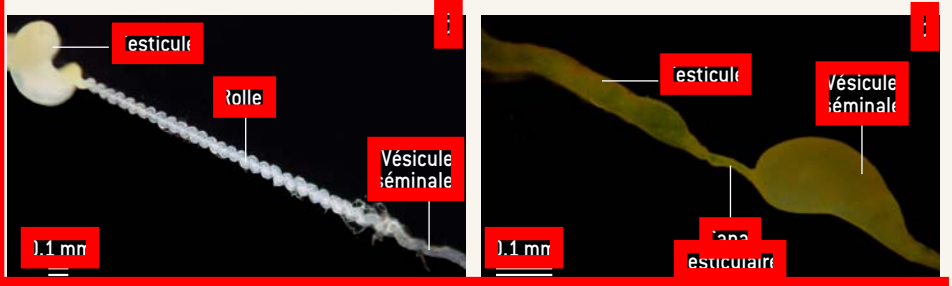
Dans certains cas, l'évolution de cet hétéromorphisme gamétique peut être explicitée par des processus de sélection intrasexuelle, tels qu'une facilitation de l'usage de spermatozoïdes frères ou un blocage des spermatozoïdes compétiteurs dans les voies génitales femelles en cas d'accouplements multiples.

Si les interactions spermatozoïdes-ovocytes sont cruciales pour la reproduction, celles des spermatozoïdes et de l'environnement femelle sont tout aussi déterminantes pour la paternité des descendants. Le succès du mâle à l'accouplement ne garantit pas l'utilisation de ses propres spermatozoïdes par la femelle. De nombreux processus de choix cryptique ont été mis en évidence depuis près de 20 ans, après une longue période où l'on pensait que seule la compétition spermatique, c'est-à-dire les interactions des gamètes mâles, prévalait.

Les femelles bénéficient de la mise en concurrence des partenaires sexuels et de leurs spermatozoïdes et favorisent cette compétition. La polyandrie (le fait qu'une femelle s'accouple avec plusieurs mâles) est bien plus répandue dans la nature que ne le laisserait supposer la seule nécessité pour les femelles d'acquérir un stock de spermatozoïdes suffisant à garantir la fécondation de tous les ovocytes. Les bénéfices pour les femelles peuvent être directs, grâce à l'apport par les mâles, lors de l'accouplement, de nouvelles ressources (nutritives ou territoriales), mais aussi indirects : limitation des incompatibilités génétiques, augmentation de la valeur génétique des descendants, ou diminution du harcèlement des mâles.

Les mécanismes de choix cryptique au stade postcopulatoire sont très variés : éjection totale ou partielle des spermatozoïdes, déplacement des spermatozoïdes vers des sites où ils pourront être manipulés par les mâles suivants, arrêt de l'accouplement et empêchement de l'éjaculation, absence de transport vers les voies de stockage, réduction du nombre de descendants produits par rapport à la quantité de spermatozoïdes acquis, échec de la maturation des ovocytes ou de l'ovulation, voire même suppression des bouchons copulatoires et des autres processus mâles de blocage des voies génitales femelles ou préparation incomplète de l'utérus pour la nidification chez les espèces placentaires.

Ainsi, les mécanismes de reconnaissance spermatozoïdes-ovocytes illustrés par K. Claw font partie d'une cascade complexe d'adaptations morphologiques, anatomiques, physiologiques et comportementales par lesquelles mâles et femelles, à l'échelle de l'individu ou des gamètes, manipulent et contrôlent la paternité des descendants.

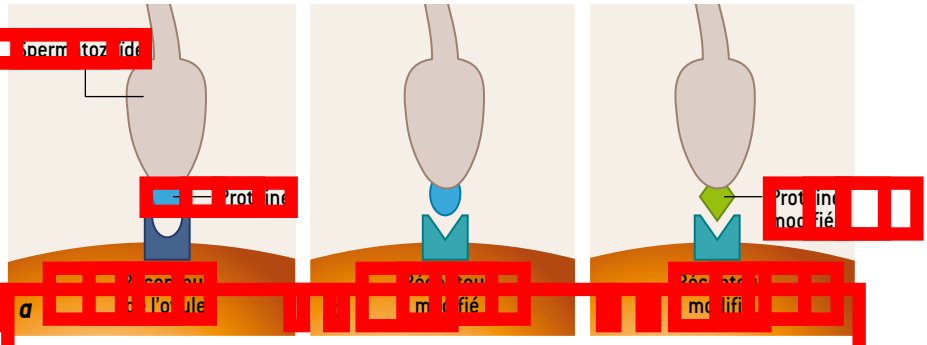


CHEZ *DROSOPHILA BIFURCA*, espèce à spermatozoïdes géants (58 millimètres), la jonction entre le testicule et la vésicule séminale, le canal testiculaire, s'est transformée en « roller » *(a)*, ce qui n'est pas le cas chez *D. melanogaster (b)*, espèce dont les spermatozoïdes ne font que 2 millimètres.

Dominique Joly
Laboratoire Évolution, génomes et spéciation (CNRS UPR9034/Université Paris-Sud), Gif-sur-Yvette

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

Par ailleurs, l'évolution a fait apparaître chez les mâles diverses tactiques pour réduire les chances des spermatozoïdes d'un autre mâle de féconder l'ovule, tels les bouchons copulatoires *(voir la figure 3)*. Ainsi, le mâle bonobo est pourvu de gros testicules et ses liquides séminaux forment un épais bouchon dans les voies génitales de la femelle après l'accouplement. En revanche, le gorille, pour qui la compétition spermatique est quasi nulle, a de minuscules testicules qui produisent peu de spermatozoïdes : après avoir défendu son territoire et son harem de femelles, le gorille mâle s'accouple avec toutes les femelles, sans aucune pression des autres mâles.



4. LE CONFLIT SEXUEL peut conduire à l'évolution rapide des gènes de la reproduction. Considérons un système où les spermatozoïdes ne peuvent se fixer sur l'ovule que si leurs protéines sont compatibles *(a)*. S'il existe une pression de sélection pour que l'ovule ne soit pas fécondé par plusieurs spermatozoïdes, des modifications des protéines de l'ovule réduisant le nombre de spermatozoïdes compatibles seront sélectionnées au fil des générations *(b)*. Mais les spermatozoïdes, eux, subissent une pression de sélection en faveur de leur pouvoir fécondant. Aussi les protéines spermatiques compatibles se développent-elles dans la population au fil des générations *(c)*.

Des systèmes clé-serrure qui évoluent vite

De son côté, nous l'avons vu, la femelle peut rechercher d'autres qualités qu'un spermatozoïde compétitif chez un partenaire sexuel ou vouloir éviter la polyspermie. Ces divergences peuvent conduire à un conflit sexuel. Par exemple, une mutation modifiant une protéine de l'enveloppe de l'ovule peut améliorer la protection de ce gamète en réduisant le nombre de spermatozoïdes qui pourront y entrer : seul un spermatozoïde présentant une protéine de forme compatible pourra se fixer sur l'enveloppe de l'ovule et la traverser. De leur côté, au fil des générations, les spermatozoïdes augmentent leur compatibilité avec cette nouvelle protéine, devenant ainsi plus compétitifs *(voir la figure 4)*.

De telles protéines interagissant à la façon d'une serrure et d'une clé sans cesse perfectionnées changent vite, et les biologistes retrouvent l'empreinte de ces modifications rapides sur les gènes de la reproduction. Des recherches ont ainsi montré qu'un tel système clé-serrure mis en évidence chez l'ormeau – la lysine du spermatozoïde et son récepteur VERL sur l'ovule – évolue vite dans les populations, selon un schéma qui suggère que cette évolution est bien influencée par un conflit sexuel.

Diverses autres hypothèses sont envisagées pour expliquer l'évolution des caractéristiques et des gènes sexuels. Chez les plantes, comme l'autofécondation donne des descendants moins diversifiés que la fécondation par du pollen d'un autre individu, la capacité de distinguer le soi du non-soi jouerait un rôle important. La capacité des spermatozoïdes et des ovules à se protéger contre une attaque microbienne pourrait aussi intervenir : de nombreux gènes impliqués dans la reproduction ont des fonctions antibactériennes et immunitaires.

Les avancées de la génomique et de la protéomique ont ouvert de nouvelles perspectives pour tester ces hypothèses. La génomique permet de séquencer la totalité du génome d'un organisme, qu'il s'agisse d'une bactérie, d'un virus, d'un ornithorynque ou d'un homme. Grâce au nombre croissant de génomes désormais accessibles, les hypothèses sur l'évolution rapide des traits et gènes sexuels sont testées sur divers organismes. La protéomique, elle, fournit des outils pour identifier des protéines dans des tissus ou cellules spécifiques et confirme les types d'interactions qui s'y produisent. De nouvelles protéines ont ainsi été identifiées dans les spermatozoïdes, l'ovule, le liquide séminal et le liquide folliculaire.

Nous utilisons les deux approches pour étudier l'évolution des protéines de la reproduction chez les ormeaux, les plantes et les primates. Mes recherches sur la reproduction des primates visent à élucider comment l'accouplement avec des partenaires multiples et la compétition spermatique influent sur l'évolution des protéines du liquide séminal. Ces approches devraient aussi permettre d'identifier des protéines d'interaction des spermatozoïdes et des ovules et de caractériser les protéines de la reproduction. Une chose est sûre : la reproduction sexuée est bien plus complexe que la simple rencontre de deux cellules… ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Dennenmoser et J. H. Christy, **The design of a beautiful weapon : compensation for opposing sexual selection on a trait with two functions**, *Evolution*, vol. 67, pp. 1181-1188, 2013.

K. G. Claw et W. J. Swanson, **Evolution of the egg : new findings and challenges**, *Ann. Rev. of Gen. and Hum. Genetics*, vol. 13, pp. 109-125, 2012.

M. R. Palmer et W. J. Swanson, **Evolution of sperm-egg interaction**, dans R. S. Singh *et al.* (éd.), *Rapidly Evolving Genes & Genetic Systems*, Oxford Univ. Press, 2012.

D. J. Emlen *et al.*, **A mechanism of extreme growth and reliable signaling in sexually selected ornaments and weapons**, *Science*, vol. 337, pp. 860-864, 2012.

D. Joly *et al.*, **Diversité morphologique et fonctionnelle des spermatozoïdes chez les drosophiles**, *J. de la Soc. de Biologie*, vol. 202, pp. 103-112, 2008.

W. J. Swanson et V. D. Vacquier, **Reproductive protein evolution**, *Ann. Rev. of Ecology and Systematics*, vol. 33, pp. 161-179, 2002.

HISTOIRE DES SCIENCES

Nos bons amis les sauvages : rencontre en terre de Diémen

À la fin d'un séjour en Tasmanie, en 1793, les Français font la connaissance des Aborigènes de l'île. Derrière l'histoire de l'expansion européenne dans le Pacifique se cache aussi celle des rencontres de deux cultures.

Bertrand DAUGERON

Nous avons levé l'ancre le 13 de fé- […] amis les sauvages sans leur dire adieu.

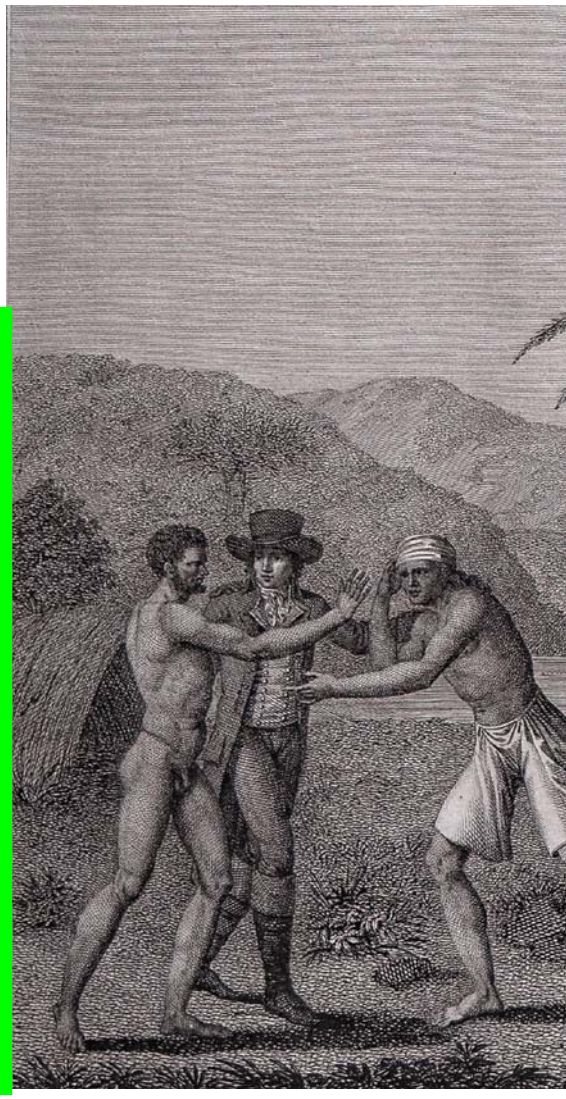
Ainsi Louis Ventenat décrit-il la fin des rencontres avec les Aborigènes de Tasmanie, lors du second séjour de l'expédition d'Entrecasteaux dans la baie de la Recherche, du 7 au 12 février 1793. Durant la première escale, en avril-mai 1792, les Aborigènes n'avaient été vus qu'à distance et avaient refusé tout contact en s'enfuyant. Ventenat, botaniste de l'expédition partie au secours du comte de Lapérouse, a conscience, comme d'autres, d'avoir vécu un épisode particulier.

Aujourd'hui, sa phrase surprend. Le regret exprimé rappelle que le passé a eu lieu et que les mots renvoient à de vrais hommes et femmes. Les « voyages de découverte » ne relèveraient pas de la seule histoire des beaux bateaux et de leurs illustres capitaines, mais aussi, à une échelle plus humaine, des interactions entre non-Européens et Européens.

Depuis les années 1980, un courant historien sud-asiatique, les *subaltern studies*, renouvelle l'historiographie en contrebalançant le point de vue des dominants, celui d'une Europe blanche qui écrivait seule l'histoire mondiale. Avec l'aide de l'ethno-histoire – une branche de l'ethnologie cherchant à reconstruire l'histoire des peuples –, ce courant réinterprète les récits et documents de ces explorations du Pacifique dans une histoire « par le bas », telle que les hommes ont pu la vivre, en donnant une place aux acteurs indigènes. La démarche n'est pas simple, car les sources aborigènes sont rares. Néanmoins, les documents européens recèlent de nombreux indices de la façon dont ces voyages et rencontres ont été vécus de part et d'autre. C'est ce que nous allons voir avec l'expédition d'Entrecasteaux.

Dans cette seconde moitié du XVIII[e] siècle, les expéditions marquent la reconnaissance et la conquête des « Nouveaux nouveaux mondes » du Pacifique. Le déclin des puissances portugaise puis hollandaise en Asie a laissé ouvertes les portes des mers du Sud. Français et Anglais relancent l'exploration de ce qui deviendra le Pacifique à la recherche d'un supposé continent austral, afin de reconstituer un nouveau domaine colonial qui compensera les pertes des Amériques. Par ces logiques impériales, l'essentiel du Pacifique sera cartographié en un demi-siècle. La lutte entre puissances s'exprime alors par les sciences et les techniques. Les circumnavigations font du monde une expérience directe qu'il faut inventorier et classer par le biais de l'astronomie, de l'hydrographie, de l'histoire naturelle.

Plusieurs expéditions françaises ont touché les côtes de la Nouvelle-Hollande (l'Australie) dès 1772, dans les mêmes années que les Britanniques. Dans ce contexte, la terre de Diémen (la Tasmanie, île au Sud de l'Australie) est le passage obligé vers les mers du Sud. Depuis sa reconnaissance

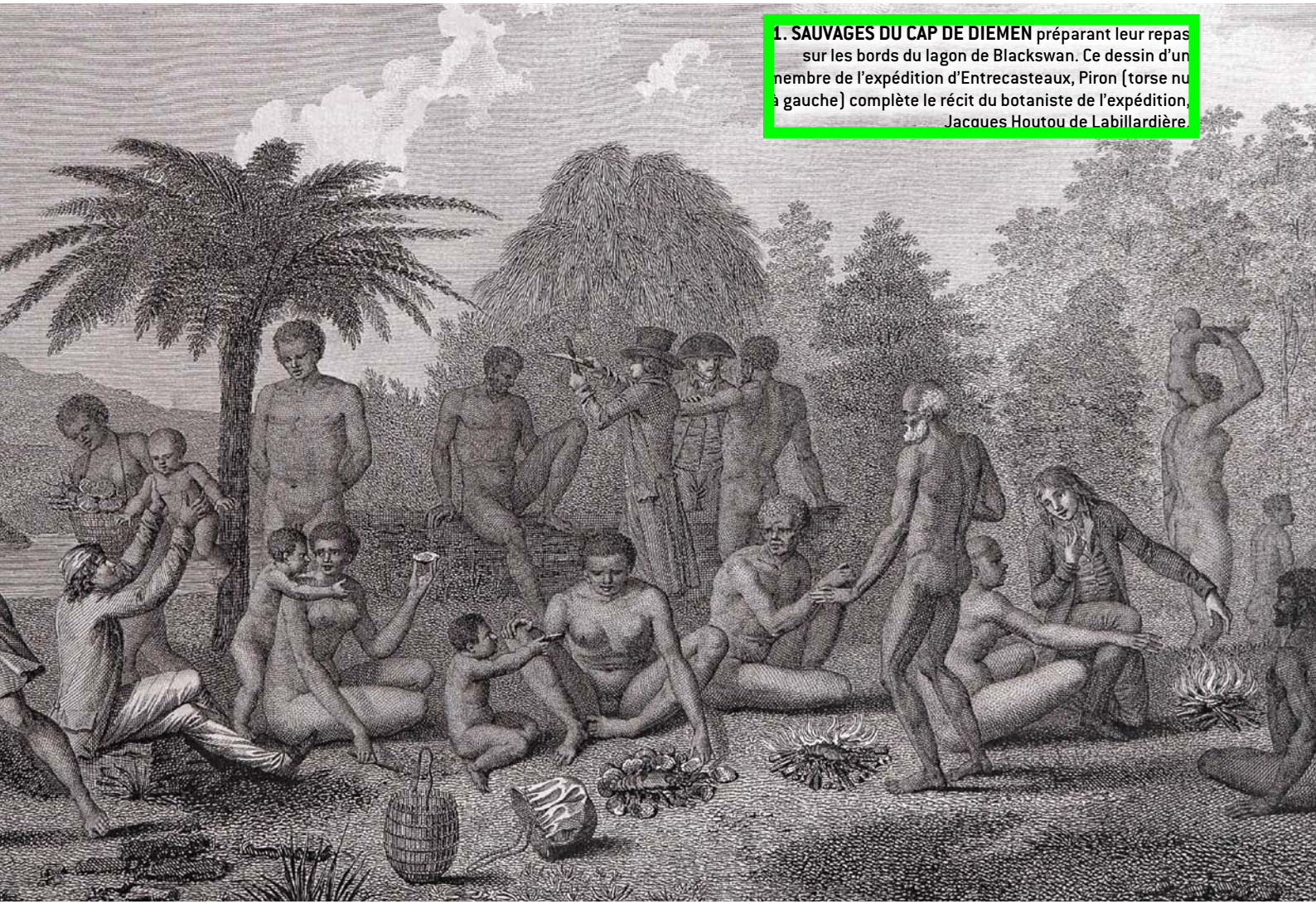


par le Hollandais Abel Tasman en 1642, aucun voyage ne s'y est dirigé. La position géographique de ce qui n'est pas encore compris comme une île forme un cap sur la route de la Nouvelle-Zélande. En suivant cette route, le contre-amiral Bruni d'Entrecasteaux découvre un détroit sur la côte sud-orientale de la terre de Diémen, que n'avaient pas vu les Anglais Furneaux et Cook en 1773 et en 1777. La découverte revêt une importance stratégique : au bout du monde se trouve un port naturel avec de l'eau douce et du bois. L'expédition Baudin, envoyée dix ans plus tard, en 1802, complétera l'exploration du détroit de d'Entrecasteaux dans un projet d'installation des Français. Cependant, le projet n'aboutira pas. Les Anglais déjà installés à Port Jackson (Sudney) les devanceront de peu en 1803.

Un fort intérêt pour l'autre

À la fin du XVIII[e] siècle, le sauvage des philosophes est une théorie, l'histoire naturelle de l'homme un savoir en formation. Le mot sauvage n'a rien de péjoratif, pas plus qu'Indien ou Naturel, aussi utilisés. Les instructions des voyages et les sociétés savantes qui les accompagnent témoignent d'un fort intérêt pour les sociétés extra-européennes. Vues parfois comme un moment fondateur d'une anthropologie de terrain, ces expéditions ont organisé les premières collectes systématiques d'objets à destination de musées. Les dessins et observations recueillis sont des témoignages irremplaçables et nous renvoient aux rencontres. Un portrait est le fruit d'une relation, d'un échange entre un dessinateur et un modèle qui, lui aussi, est un acteur de l'interaction.

En Tasmanie, la situation est inédite pour la population locale, coupée du continent depuis plus de 10000 ans par la montée des eaux et la formation du détroit de Bass.



1. SAUVAGES DU CAP DE DIEMEN préparant leur repas sur les bords du lagon de Blackswan. Ce dessin d'un membre de l'expédition d'Entrecasteaux, Piron (torse nu à gauche) complète le récit du botaniste de l'expédition, Jacques Houtou de Labillardière.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

2. LE LAGON DE BLACKSWAN, au Sud de la Tasmanie. C'est là que se sont déroulées les rencontres des Aborigènes et des marins de l'expédition d'Entrecasteaux.

En découvrant les Européens sur leurs terres, les Aborigènes mettent fin au plus long isolement de l'histoire de l'humanité. Leur mode de vie est unique. Leur culture matérielle alors décrite consiste en un nombre limité d'outils. Ils ne connaissent ni le boomerang ni le propulseur et n'ont pas de chien. Mais les outils ne disent pas tout d'une culture. Aussi historiens et ethnologues recherchent-ils d'autres indices dans les documents d'époque.

Derrière les récits

À Port Jackson, par exemple, l'historienne australienne Inga Clendinnen a reconstitué, à partir des écrits des officiers et des savants, les relations des habitants des rivages avec le contingent et les condamnés, lors de l'installation des Britanniques en janvier 1788. Loin du récit des seules actions européennes, elle décrit une cohabitation enthousiaste qui s'installe dès l'arrivée, avant de passer à l'hostilité à partir de décembre 1790 (sans doute en représailles d'un comportement anglais inadapté).

La démarche de l'historien s'apparente à une enquête. Tout écrit adopte des stratégies narratives qu'il faut décoder. Par exemple, dans son *Nouveau voyage autour du monde*, l'Anglais William Dampier décrit pour la première fois les Aborigènes de la côte occidentale de la Nouvelle-Hollande, rencontrés en 1688, comme « misérables ». Un siècle plus tard, ces termes sont repris par Cook lors de son séjour à Botany Bay. Pourtant, les brouillons de Dampier conservés à la *British Library* ne contiennent pas ces mots. Ils ont été probablement ajoutés par l'éditeur pour donner du sensationnel à la publication. Les textes et leurs mots circulent et se reprennent en rigidifiant certaines perceptions.

Les récits dépendent aussi de la qualité de l'accueil reçu. Par exemple, lors de l'expédition Baudin en Tasmanie, en 1802, le naturaliste François Péron change son discours en quelques jours. Invité à un repas avec la belle Ourê-Ourê, il parle d'un « succulent repas » avec les « bons Diéménois ». Mais apprenant à son retour de mission que l'un des lieutenants a été blessé par une lance, il s'indigne de « cette perfidie lâche et féroce » des sauvages et change son discours sur leur prétendue bonté.

Dans le cas de la Tasmanie, en l'absence d'une tradition orale du côté aborigène, les sources disponibles, fragmentaires, sont principalement celles écrites et produites par des Européens. Aux journaux de bord des officiers s'ajoutent les manuscrits des savants et parfois des matelots. Il s'agit de reconstituer ce qui a eu lieu en guettant la parole indigène à travers ces quelques auteurs européens.

Les récits retrouvés sont pleins de vie et de surprises. Aborigènes et Français font face à des situations extraordinaires et à un peuple d'une culture radicalement différente. Leurs réactions aux événements varient de l'engagement à la confrontation. La sensibilité est à fleur de peau. La rencontre est une expérience que l'on appréhende, car on y risque sa vie. Certains passages sont écrits dans une langue sans artifice car, pour beaucoup de témoins, l'expédition sera sans retour : risques de la mer, mauvaise conservation des aliments, maladies. La mort du navigateur Marion-Dufresne en 1772, en Nouvelle-Zélande, est encore dans les mémoires.

Les textes et les « reliques » de voyage – objets ethnographiques collectés, herbiers – ne sont pas les seuls matériaux disponibles pour interpréter la rencontre. La toponymie du détroit et de la côte orientale de la Tasmanie porte la trace des expéditions françaises. L'histoire est écrite dans les lieux, elle devient alors géographie. Les planches des atlas qui accompagnent les relations de voyage, les cartes anciennes du Service hydrographique de la Marine ou quelques dessins de première main sont des sources visuelles inscrites dans le territoire d'hier. Un profil de montagne, une découpe de côtes se retrouvent dans les paysages d'aujourd'hui. Ces comparaisons ont permis de découvrir, en 2003, les vestiges supposés du jardin laissé par l'expédition d'Entrecasteaux sur les rivages de la baie de la Recherche. Remis en contexte, les textes entrent en perspective. La configuration des lieux accueille la polyphonie des témoignages et permet de reconstituer une scène avec sa pluralité de points de vue.

Puisque dans une rencontre, il faut être deux, l'asymétrie des sources peut être compensée en réinterprétant les actions des uns par rapport à celles des autres. Quatre rencontres avec l'expédition d'Entrecasteaux ont lieu dans la baie de la Recherche, du 8 au 12 février 1793. Les Aborigènes prennent l'initiative de la première en suivant les botanistes et en les surprenant au petit matin. Lors de la deuxième, les hôtes des lieux attendent leurs invités sur les hauteurs de la baie. De cette journée nous est parvenue une image *(voir la figure 1)*. Le « Repas des

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

sauvages » est une des planches de l'atlas qui accompagne le récit de voyage du botaniste Jacques Houtou de Labillardière. De son dessinateur Piron, on sait peu, il n'est jamais rentré.

Le « Repas des sauvages »

Au premier abord, nombre de détails bloquent la lecture. Les Européens endimanchés parmi des sauvages dénudés sonnent faux. Le dessin trop sculptural des Aborigènes laisse planer un eurocentrisme. Le palmier est étranger à la flore de la Tasmanie. Tout semble aller contre cette scène au point que sa valeur documentaire s'efface. Toutefois, à mieux considérer le dessin, les objections se lèvent. Il ne s'agit pas d'un palmier, mais d'une fougère arborescente. La nudité emprunte aux statues gréco-romaines dans le contexte de la Révolution. Ce qui semblait faux s'éclaire dans une mise en contexte. On reconnaît au loin les contours du mont Leillateah, au bord du lagon de Blackswan. Les détails sur les paniers sont d'une grande acuité, montrent des esquisses. On distingue le contenu du repas – des oreilles de mer et des coquillages cuits sur le brasier. La façon dont les femmes croisent leurs jambes autour des feux est documentée.

Et pour comprendre les couples de personnages aborigènes et français, il faut lire les récits de Labillardière et du lieutenant Rossel, qui a mis au propre les notes d'Entrecasteaux. « Il existait entre eux et nous une telle familiarité, qu'ils assistaient à nos repas avec le même plaisir que nous marquions à être témoins des leurs », écrit d'Entrecasteaux. La conversation autour du feu est l'occasion de recueillir du vocabulaire par des gestes. L'Aborigène bras pendu semble se prêter au jeu de Dauribeau qui prend des mesures du corps pour les rapporter dans son journal. La démonstration du couteau rappelle l'échange d'objets métalliques (hache, scie, hameçons) qui seront dès le lendemain abandonnés. Le fait qu'une femme confie son enfant est interprété comme un signe de confiance : « La confiance était cependant établie au

L'AUTEUR

Bertrand DAUGERON est docteur de l'EHESS (École des hautes études en sciences sociales) en histoire et civilisations et chercheur associé au centre Alexandre Koyré, à Paris.

9 février 1793 : une deuxième entrevue

« Le lendemain [de la première entrevue], Mrs Labillardière, Riche, et moi avec un officier de l'Espérance fûmes les visiter avec de présents. nes en suivant a côte, les sauvages, qui nous virent venir de loin et qui nous attendirent sur une butte.

Nous leur fîmes toutes sortes de présents ; des boucles de verre leur faisaient plaisir. Notre ménestrier joua du violon ; cet instrument ne les amusa point. [illisible] des cravates, des rubans des morceaux d'étoffes, attaches aux jambes, au bras [illisible], en firent bientôt des mascarades. Nous voulons les faire danser en rond avec nous, ils ne voulurent pas ; je jouai de la flûte, alors ils prêtèrent une oreille attentive, ils voulaient l'avoir à toute force, mais lorsque je l'eus serrée, ils n'y songèrent plus ; nous les amenâmes ensuite ou était notre [canot]. Chaque Français avait au moins un sauvage sous le bras, j'avais 2 vieillards dont un était boiteux [...]. Mr Piron avait 2 femmes dont une était extrêmement babillarde. Cette promenade avait quelque chose d'extrêmement intéressant, la confiance innée [illisible].

Quand nous sommes arrivés à notre canot, nous mangeâmes ; du poisson du homard, des huîtres ; ils ne voulurent jamais en manger ; quoique ce soit leurs mets ordinaires, pas même de pain et de vin. Un prit un peu d'eau de vie mais il la rejeta aussitôt, en faisant beaucoup de grimaces. Je parvins pourtant à faire manger à un un peu de homard [...].

Celui-ci avait de la confiance en moi. Un ou 2 matelots ayant voulu caresser une femme, il le vit, il se fâcha et me le fit apercevoir. Je priais les matelots de cesser, ce qu'ils firent, et je l'apaisais tout à fait en lui passant doucement la main sur les épaules. Ce fut alors que les femmes nous quittèrent pour aller apprêter le dîner de leurs maris et de leurs enfants. Après notre déjeuner, ils nous conduisirent à l'endroit ou ils devaient dîner [...].

Celle qui aimait tout à parler était jolie, le regard doux et attrayant ; elle voulut jouer de la flûte, mais n'en pouvant tirer de son, elle l'abandonne ; elle voit mon violon, elle veut en jouer, puis les laisse aussi, elle demande des vestes, on lui en donne, cela la gêne ; elle l'ôte enfin. Les jolies femmes de la nouvelle hollande sont du même caractère, ont la même trempe d'âme, la même légèreté, et sont d'un goût aussi frivoles que nos jolies, nos agréables, nos caillettes de France, d'Angleterre qu'on lui donnait toutes sortes de petits habillements et cela plutôt que pour la toucher que pour couvrir la nudité car elles le sont complètement nus. »

Louis Ventenat
Journal de bord

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

BIBLIOGRAPHIE

B. Daugeron, **À la recherche de l'Espérance. Revisiter la rencontre des Aborigènes tasmaniens avec les Français 1772-1802**, Ars Apodemica, 2014.

M. Langton et R. Perkins (dir.), **Aborigènes et peuples insulaires**, Au vent des îles, 2012.

M. Jolly *et al.*, **Oceanic Encounters : Exchange, Desire, Violence**, ANU Press, 2009.

J.-Ph. Beaulieu *et al.*, **Un potager au bout du monde**, *Les Génies de la Science*, n° 26, pp. 18-23, 2006.

I. Clendinnen, **Dancing with Strangers**, Cambridge University Press, 2005.

point qu'une des femmes qui allaitait un enfant ne craignait pas de le confier à plusieurs d'entre eux », rapporte Labillardière. Dans le trio à gauche, selon un usage local, un Aborigène couvre de poudre de charbon le peintre Piron à sa demande.

Tout n'est pas dans l'image. Les armes sont absentes : les Aborigènes les ont laissées dans la forêt et les Français n'en ont pas pris. L'idée que chacun se fait de l'autre est donc pacifique. Les journaux de bord parlent de caresses échangées. Les uns donnent leurs habits, tandis que les autres dénudent leurs hôtes et découvrent à cette occasion que Louis est en fait une Louise. Il y a aussi les chants et les danses partagés. La confiance a aussi ses limites : les Aborigènes refusent de venir à bord ou de goûter les repas des marins.

Ainsi, une même humanité se découvre et s'explore à la veille d'une tragédie. La colonisation britannique de l'île de Diémen en 1803 a transformé ces sociétés aborigènes de façon radicale. La Guerre noire de 1824-1831, ajoutée au choc microbien puis à la déportation de 210 survivants dans l'île Flinders, aurait voué les Aborigènes de Tasmanie à disparaître. Au cours du XIX[e] siècle, la représentation du « sauvage » bascule vers celle, péjorative, du « primitif » – le degré zéro de la civilisation.

Le déroulement tragique de l'histoire n'est en rien annoncé dans l'expression de l'entente « nos bons amis les sauvages ». Les Européens impliqués dans ces premières rencontres ont laissé des aperçus d'une société effondrée depuis. Ce sont parmi les quelques traces dont dispose l'actuelle communauté aborigène, issue d'une dizaine de femmes et d'Anglais et coupée en partie de la tradition et de la langue, pour se réapproprier son héritage. ■

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

Actuellement en kiosque

www.pourlascience.fr
Le site de référence de l'actualité scientifique internationale
Disponible sur App Store
DISPONIBLE SUR Google play

LOGIQUE & CALCUL

Les Spidrons, pliables à l'infini

Il est étonnant que l'on invente encore de nouvelles formes géométriques simples. Pourtant, les Spidrons conçus par le designer hongrois Dániel Erdély sont faciles à construire et s'emboîtent miraculeusement.

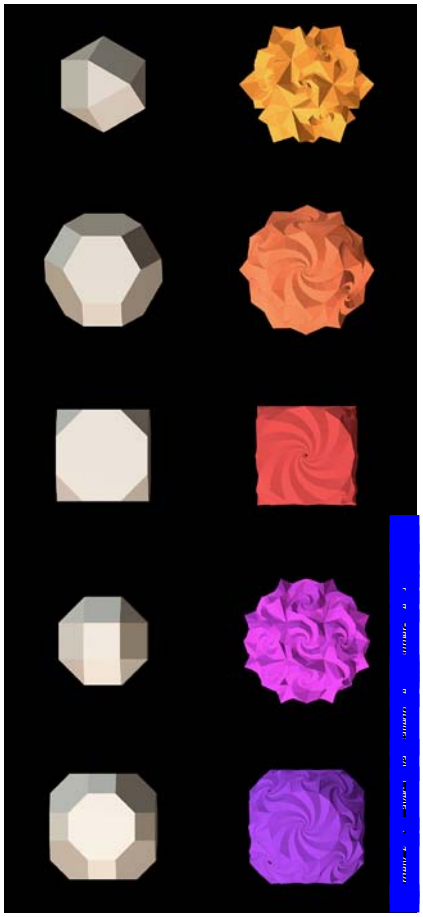
Jean-Paul DELAHAYE

Au cours des années 1970, Dániel Erdély, un artiste hongrois spécialisé dans le design industriel, a imaginé, perfectionné et étudié une catégorie nouvelle de formes géométriques. Celles-ci ont depuis suscité une multitude de travaux et de créations artistiques où se mêlent de délicates considérations de géométrie et la volonté de créer de belles figures et de beaux objets.

D. Erdély les a nommés Spidrons, terme qui résulte d'un mélange des mots « spider » (araignée en anglais) et spirale. La figure d'où est issue cette forme est en effet un hexagone où une infinité de tracés ont été dessinés, le tout ressemblant à une toile d'araignée *(voir l'encadré page ci-contre)*. Soigneusement colorié, on y voit un crochet, décomposé à l'infini, répété six fois et ressemblant à la queue d'un hippocampe : le demi-Spidron.

Cette structure est composée d'une succession illimitée de triangles de deux types : le triangle équilatéral et le triangle isocèle d'angles égaux à 120°, 30° et 30°. Ces triangles, reproduits selon des tailles décroissantes, sont accolés les uns aux autres de manière à ce que leur jonction fasse coïncider deux côtés exactement. Le crochet alterne les deux types de triangles qui s'enroulent en une spirale logarithmique. Accolée à elle-même, cette spirale donne le Spidron à deux branches, ou Spidron complet *(voir l'encadré, c)*.

La première propriété remarquable du Spidron complet est qu'il pave le plan par-



1. DES VERSIONS « SPIDRONISÉES » *(à droite)* de cinq des 13 polyèdres archimédiens. Les polyèdres archimédiens sont les polyèdres ayant une seule sorte de sommets, et qui ne sont ni réguliers (mêmes sommets, mêmes faces) ni des prismes.

faitement, ce qui donne de jolis tableaux *(voir l'encadré, d)*.

Comme c'est le cas pour de nombreuses molécules du monde vivant, on remarque qu'il existe deux versions du double crochet, selon que l'on fait tourner ses spirales dans un sens ou dans un autre : on passe de l'une à l'autre en regardant à travers une glace.

Tout tient dans un triangle

D. Erdély remarqua que si l'on considère un triangle équilatéral E dans l'une des spirales, son aire est égale à la somme des aires des triangles qui le suivent dans l'enroulement. Autrement dit, tous les triangles succédant à un triangle équilatéral peuvent s'entasser en lui (pour réaliser ce remplissage, un découpage adéquat est nécessaire).

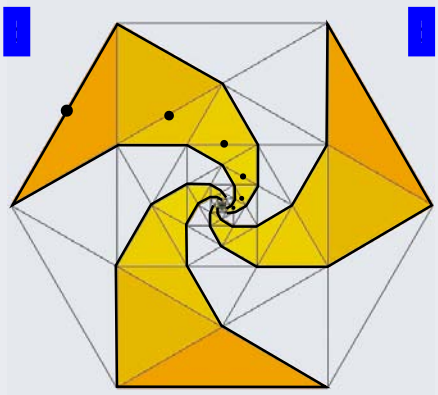
Voici le petit raisonnement qui établit la propriété des aires *(voir l'encadré, b)* :

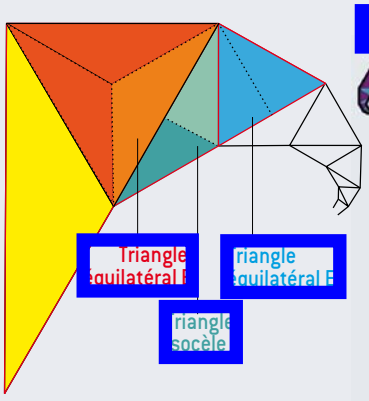
– Le triangle isocèle I d'angles 120°, 30°, et 30° accolé à un triangle équilatéral E a une aire égale au tiers de l'aire de E, car le triangle I s'obtient par un découpage en trois de E.

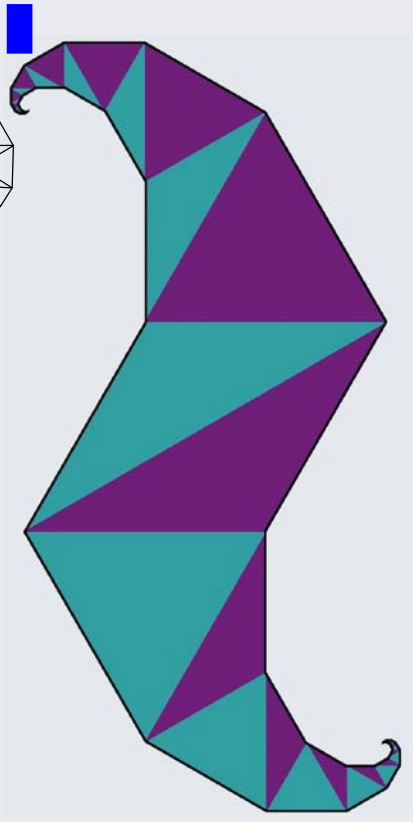
– Ce triangle isocèle I a la même aire que le triangle équilatéral E' suivant de la spirale décroissante. En effet, en le coupant en deux par la hauteur issue du sommet d'angle 120°, on obtient deux triangles qui, accolés, reconstituent E'.

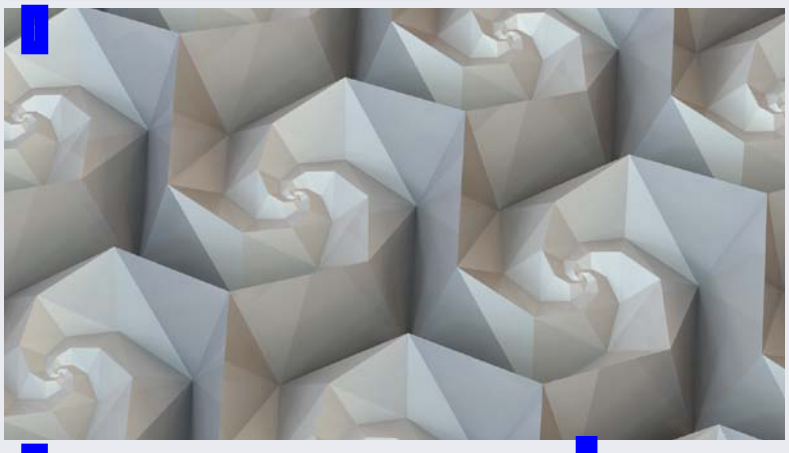
– Il en résulte que d'un triangle équilatéral E au suivant, E', l'aire est divisée par 3 (le côté est donc divisé par $\sqrt{3}$).

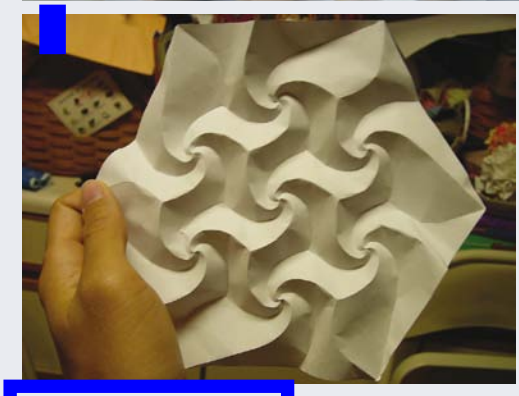
Les Spidrons déployés et pliés

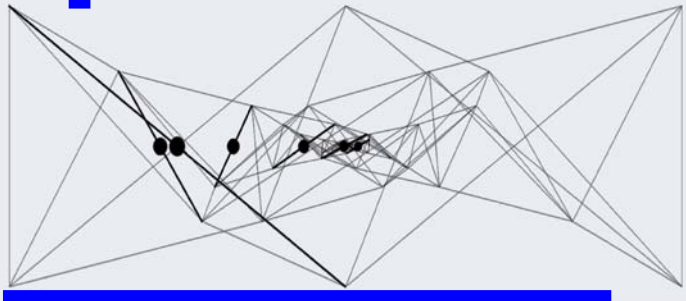












LE SPIDRON REPLIE vu de côté. Les milieux des côtés du « nid » *(voir figure a)* restent dans le plan de base.

La figure *a* montre le découpage d'un hexagone en six formes identiques obtenues par un réseau en toile d'araignée (*spider* en anglais). Chacune de ces formes constitue un demi-Spidron et est un assemblage de deux sortes de triangles : des triangles équilatéraux et des triangles isocèles d'angles 120°, 30° et 30°. La propriété des aires du demi-Spidron est illustrée en *b*. Accolée à elle-même, cette forme donne le Spidron (*c*). Le plan peut être pavé avec des Spidrons (voir www.flickr.com/photos/eskimoblood/2754529838/in/photostream/).

Plus généralement, on nomme Spidron toute forme obtenue en alternant deux sortes de triangles isocèles de taille décroissante et formant une spirale logarithmique.

Le plan pavé par des Spidrons où chaque triangle est rigide et attaché à ses voisins par des charnières) peut se plier (*d*, *e*, *f*). Sans qu'aucune torsion ne s'exerce sur les triangles et sans qu'aucune déchirure ne soit nécessaire, l'ensemble de la surface se contracte comme un accordéon infini étendu dans toutes les directions (voir www.youtube.com/watch?v=rdwts5iSimo).

– La somme des aires des triangles qui suivent un triangle équilatéral (supposé d'aire unité) est donc 2/3 + 2/9 + 2/27 + 2/81 + ..., qui vaut 1. En effet, si l'on note *s* cette somme infinie, elle vérifie $s - s/3 = 2/3$ (tous les termes se simplifient, sauf le premier), ce qui donne $2s/3 = 2/3$, donc $s = 1$.

Un miraculeux pliage en accordéon infini

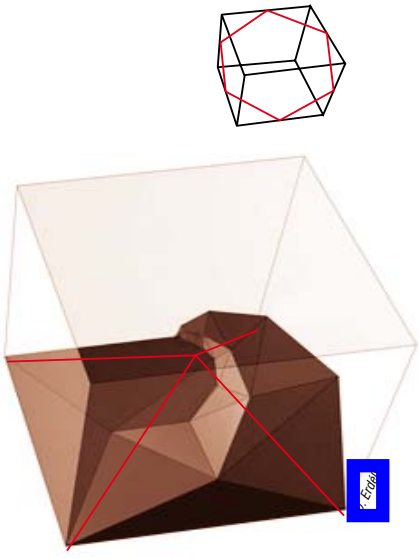
Cette remarque sur les aires est amusante, mais la propriété la plus étonnante du Spidron est qu'il est pliable. En effet, si l'on pave le plan avec des exemplaires du double crochet en carton léger dont on s'est arrangé pour qu'il se plie suivant les dessins des triangles, alors le pavage du plan se contracte continûment en une forme régulièrement bosselée. Chaque triangle pivote et s'écarte du plan de départ, tout en restant attaché à ses voisins. Cette contraction, semblable à celle d'un accordéon infini, est mathématiquement parfaite : les triangles restent plats et solidaires, sans aucune déchirure ou torsion. Ce mouvement continu de contraction s'étend à toute la surface, ce qui bien sûr rapproche les centres des hexagones, un peu comme dans le mouvement inverse de celui de l'expansion de l'Univers chère aux physiciens *(voir l'encadré, e et f, et l'animation www.youtube.com/watch?v=rvCB09xChGA&NR=1)*.

En 1979, D. Erdély présenta sa découverte à Ernö Rubik, son professeur d'art appliqué, célèbre inventeur du cube de Rubik et d'une multitude d'autres fascinants casse-tête. D. Erdély fit la démonstration de sa surface contractile avec un pliage en carton. E. Rubik, émerveillé par cette forme dont il n'avait jamais rien vu d'équivalent, l'encouragea à en poursuivre l'étude et à en étudier les variantes et les applications.

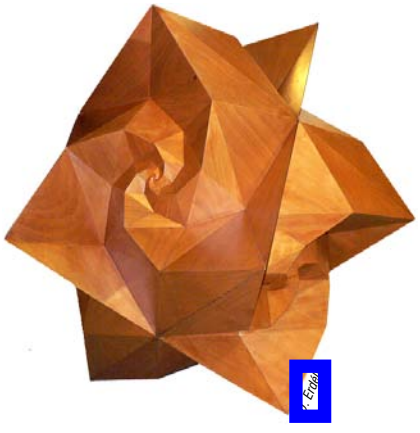
Informé de l'existence de ce pavage pliable, le mathématicien Lajos Szilassi, à l'Université de Szeged, en Hongrie, fut pris d'un doute : est-il vrai que, lors du mouvement de contraction, les triangles du découpage restent plats et solidaires ? En supposant que chaque triangle est attaché à ses voisins rigidement par une charnière, est-il possible à l'ensemble des éléments du pavage de pivoter de façon coordonnée en produisant la contraction en accordéon observée avec les modèles en carton souple ?

D. Erdély, qui n'est pas mathématicien, ne pouvait résoudre ce délicat problème de géométrie. L. Szilassi s'y attela. Posant le problème en termes rigoureux et s'aidant du logiciel de calcul formel *Maple*, il réussit à mener un raisonnement et des calculs établissant que le mouvement de la surface en contraction est continu et n'entraîne ni déchirure, ni torsion de ses éléments triangulaires. Le pliage miraculeux de l'artiste D. Erdély est bien la découverte mathématique d'une structure dynamique, pliable, infinie... et jusque-là ignorée !

Certes, la trouvaille est le fruit du hasard, sans que le découvreur ne produise la démonstration de la propriété principale du pavage des triangles. Mais il s'agit bien d'un type totalement inattendu de mouvement coordonné d'une structure géométrique doublement infinie : chaque centre de spirale est la limite d'une infinité de triangles, et les spirales se répètent indéfiniment pour recouvrir le plan mathématique.



2. UN CUBE SE DÉCOUPE en deux parties ayant un hexagone comme surface de contact (les sommets de l'hexagone sont sur le milieu de six arêtes du cube). Ce découpage en suggère un autre, en six parties pyramidales où le contact est une surface bosselée composée d'un Spidron.

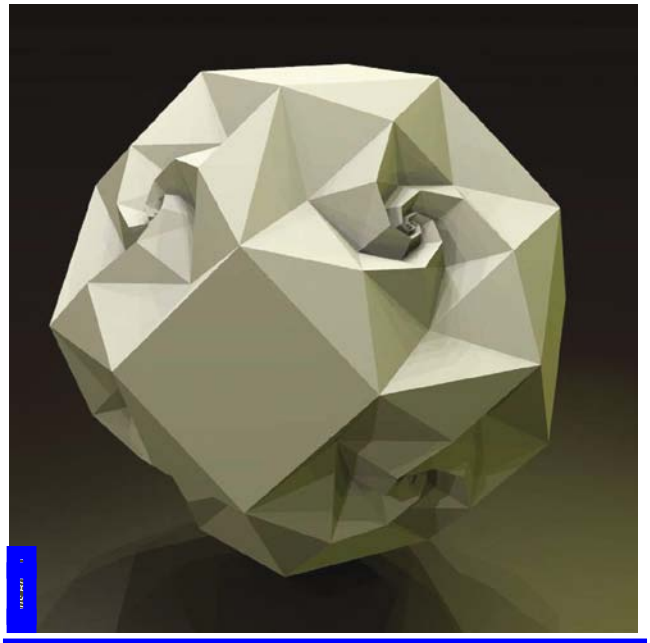


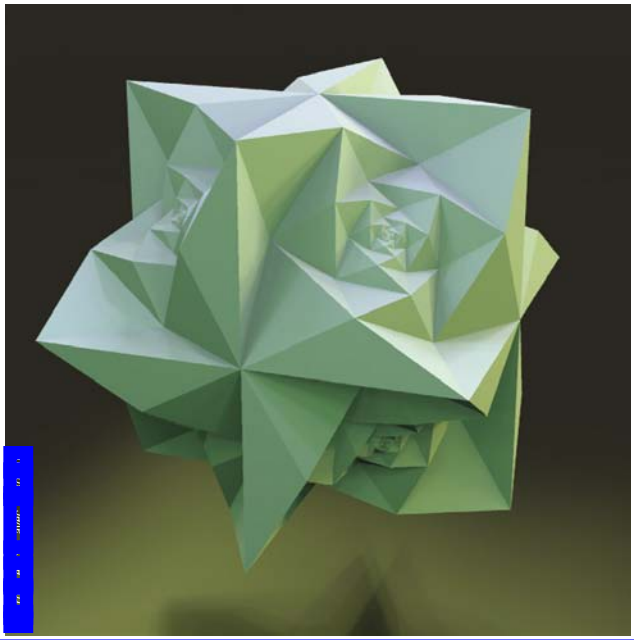
3. L'OCTASPIDRON : cette sculpture de polyèdre spidronisé, conçue par Dániel Erdély et Walt van Ballegooijen, a été réalisée par l'ébéniste Istvan Sagi. D. Erdély indique : « L'Octaspiridon est fait de huit morceaux séparés. Quatre sont identiques et les quatre autres en sont les symétriques. C'est la première forme remplissant l'espace que j'ai trouvée. »

Art, mathématiques, applications...

Cette aventure montre une fois encore que l'univers mathématique, malgré son apparente difficulté, est ouvert à tous et que même des amateurs peuvent y dénicher de petites merveilles que les professionnels ne voient pas ! L'article de Lajos Szilassi donnant le détail de sa preuve n'a été publié qu'en 2004, plus de 20 ans après la découverte expérimentale du pliage en accordéon du plan.

L'étude du double crochet et des hexagones contractiles a donné lieu à de nombreux travaux que nous allons présenter et qui se poursuivent. En 2009, un brevet d'antenne utilisant le demi-Spidron a été déposé par le Coréen Keum-Cheol. D. Erdély a évoqué d'autres applications possibles : plusieurs épaisseurs de surfaces pliables à base d'hexagones feraient d'intéressants amortisseurs de chocs ou donneraient de jolies zones de déformation dans les carrosseries automobiles. Les structures remplis-





4. DEUX POLYEDRES ARCHIMEDIENS SPIDRONISES, l'octaèdre tronqué *(à gauche)* et le polyèdre formé de huit faces semblables *(à droite)*. Ces polyèdres peuvent s'assembler pour remplir l'espace : on distingue bien les parties rentrantes et les parties saillantes, qui permettent à un second exemplaire symétrique de s'ajuster dans le premier (voir aussi http://edan.szinhaz.org/SpidroNew/poluhedra.htm).

sant l'espace *(voir la figure 4)* suggèrent des jouets de construction ou, pourquoi pas, des meubles. La surface pliable en accordéon rend possible des murs acoustiques réglables, des bâtiments pliants ou même des éléments de stations spatiales.

Cherchant à approfondir et à généraliser son invention, D. Erdély s'est associé à d'autres mathématiciens ou artistes. Avec Walt Ballegooijen de Hollande, Paul Gailiunas d'Angleterre et bien d'autres, l'étude du double crochet et de ses variantes se poursuit. Elle produit des constructions géométriques nouvelles aussi bien que de belles œuvres d'art exposées dans le monde entier.

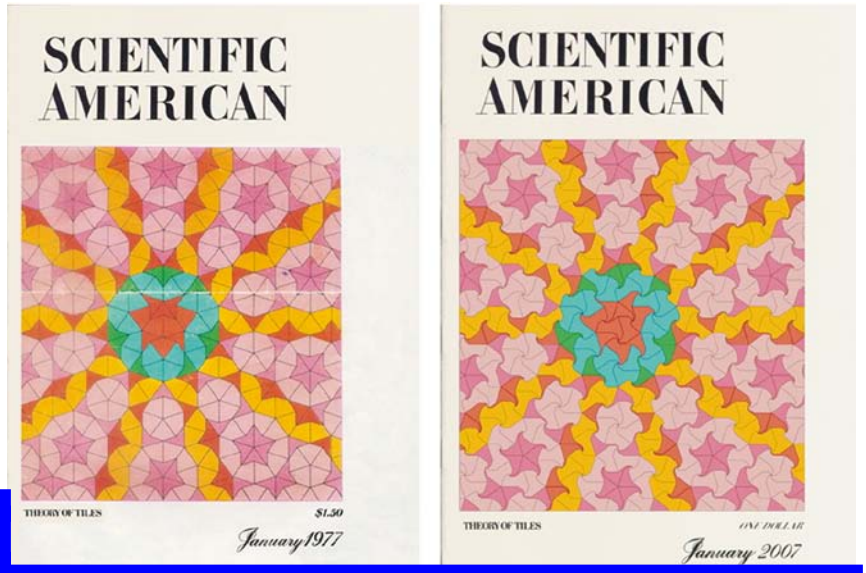
Des variantes du Spidron obtenues en modifiant les deux triangles de base de la figure découverte par D. Erdély autorisent d'autres pavages du plan (n'ayant plus nécessairement la propriété de se contracter comme le pavage par le Spidron original), ou donnent naissance à des formes tridimensionnelles remarquables composées uniquement de deux triangles utilisés à diverses échelles et formant des crochets logarithmiques.

Ces formes conduisent par exemple à définir de nouvelles dissections des polyèdres platoniciens. On sait qu'il est possible de couper un cube en deux parties identiques ayant une face hexagonale : c'est la dissection hexagonale du cube. En exploitant cette construction et les surfaces bosselées de l'hexagone contractile, on a proposé de nouveaux découpages du cube en deux ou six parties identiques ou énantiomorphes *(voir la figure 2)*. Les autres polyèdres platoniciens ont aussi été découpés grâce aux Spidrons. Un petit film réalisé par le groupe de recherche sur les Spidrons et fondé sur le cube de Yoshimoto (www.youtube.com/watch?v=xupWsbc4zhg) montre une chorégraphie de polyèdres utilisant ce découpage.

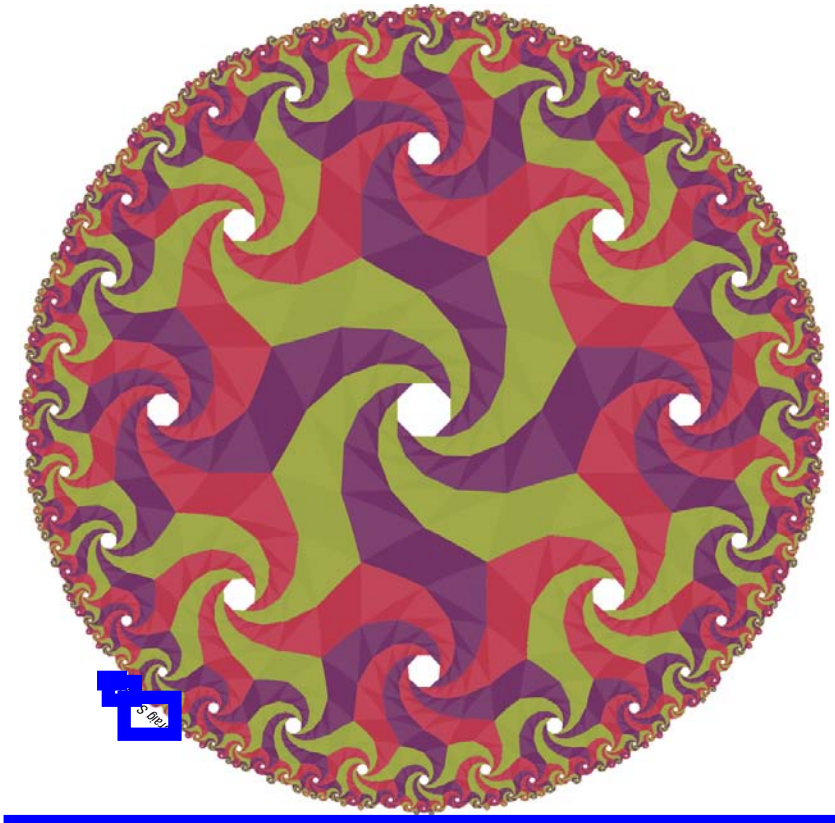
Polygones et polyèdres spidronisés

Dans le cadre de l'étude des généralisations de l'hexagone pliable, les chercheurs ont défini la notion de « polygone spidronisé » : il s'agit d'une forme dans l'espace composée de deux triangles isocèles disposés en couronnes (chacune composée d'une suite de triangles) reproduite en taille décroissante, selon la même idée que l'hexagone de base de D. Erdély, qu'on peut regarder comme une couronne de 12 triangles reproduite à des échelles de plus en plus petites. Ces couronnes emboîtées composent des surfaces bosselées, assemblages de spirales logarithmiques ayant un centre commun. Les polygones convexes ayant quatre côtés ou plus peuvent tous être « spidronisés ». Cela conduit à une méthode pour remplacer les faces des 13 polyèdres archimédiens par des polygones « spidronisés », ce qui donne des versions spidronisées de ces polyèdres (*voir les figures 1, 3 et 4*, et http://spidron.hu/archispidron/).

On sait qu'il existe des polyèdres flexibles, c'est-à-dire pouvant changer de forme sans se défaire et sans que leurs faces soient déformées. Le premier polyèdre flexible fut proposé par mathématicien canadien Robert Connelly en 1977. Une version simplifiée en a été donnée par Klaus Steffen. Le plan couvert de Spidrons est une sorte de polyèdre flexible de taille infinie ! D'après un théorème attribué à Cauchy



5. EN MODIFIANT LES DEUX PAVES APÉRIODIQUES DE PENROSE, les artistes du groupe de recherche sur les Spidrons ont créé deux tuiles avec des crochets de demi-Spidron qui pavent le plan de manière apériodique. Sur ce modèle, une fausse couverture de *Scientific American* a été réalisée *(à droite)* en hommage à la couverture historique de janvier 1977, qui représentait le pavage apériodique de Penrose *(à gauche)*.



6. UN PAVAGE SPIDRONISÉ DU PLAN HYPERBOLIQUE. Le plan hyperbolique (modèle plan de géométrie hyperbolique, où la somme des angles d'un triangle est inférieure à 180°) est-il pavable avec des formes spidronisées ? Craig Kaplan a montré que oui.

malgré la preuve incorrecte qu'il en donna, corrigée depuis), il n'existe aucun polyèdre flexible convexe. Le « théorème du soufflet » démontré en 1997 par R. Connelly, Idzhad Sabitov et Anke Waltz, indique que les polyèdres flexibles ont un volume qui reste constant quand on les déforme.

Un raconte que l'idée de ce surprenant théorème serait venue du mathématicien américain Dennis Sullivan, qui s'amusa à souffler de la fumée de cigarette dans le modèle de polyèdre flexible de la salle de thé de l'Institut des hautes études scientifiques (IHÉS) à Bures sur Yvette, et qui aurait constaté que celle-ci restait dans le polyèdre même quand on le déformait.

C'est dans ce théorème du soufflet que se trouve sans doute l'explication qu'aucun polyèdre spidronisé construit jusqu'ici n'est flexible. Puisque ces polyèdres sont composés de Spidrons généralisés et que le plan est flexible quand il est spidronisé, on s'attendait à ce que certains polyèdres spidronisés soient flexibles. Cependant, cette éventuelle flexibilité d'un polyèdre spidronisé ne semble pouvoir s'obtenir que par une contraction ou une expansion du polyèdre (car c'est ce qui se produit pour le plan), laquelle entraînerait un changement de son volume et contredirait donc le théorème du soufflet : les polyèdres spidronisés ne seront sans doute jamais flexibles.

Pavages de l'espace

Toujours à propos des polyèdres, les recherches du groupe réuni par D. Erdély ont mis au jour une série de nouveaux polyèdres, dont de nombreux polyèdres ou systèmes de polyèdres pavant l'espace.

Les polyèdres pavant l'espace constituent une famille de polyèdres aussi intéressante que mal connue. Le cube est le seul des cinq polyèdres platoniciens qui pave l'espace. Cependant, une combinaison de tétraèdres et d'octaèdres (deux autres polyèdres platoniciens) pave l'espace.

Il n'existe que cinq polyèdres convexes ayant des faces régulières (c'est-à-dire dont les faces sont des polygones réguliers) pavant l'espace. Ce sont le cube, le prisme triangulaire, le prisme hexagonal, le dodé-

caèdre rhombique, l'octaèdre tronqué, et e gyrobiprisme triangulaire (deux prismes riangulaires collés l'un à l'autre par leur face carrée en s'arrangeant pour que les riangles n'aient pas de côtés communs).

En supprimant l'exigence que les faces soient des polygones réguliers, on obtient une famille infinie de polyèdres pavant l'espace. En supprimant l'exigence de convexité, la famille s'agrandit encore. Si, de plus, on accepte d'utiliser plusieurs polyèdres pour un seul pavage de l'espace, les systèmes de pavages deviennent si nombreux qu'aucun classement complet n'en a été produit, et d'ailleurs on en découvre régulièrement de nouveaux.

Une classification partielle des pavages de l'espace par des polyèdres a été proposée par Michael Golderg en 1980, et une liste de 42 systèmes de polyèdres pavant l'espace a été détaillée par Peter Pearce dans son livre *Structure in Nature is a Strategy for Design* (1978). Cette liste a été utilisée par le groupe de recherche sur les Spidrons et a servi à concevoir d'autres systèmes de polyèdres pavant l'espace, composés de polyèdres spidronisés.

En 2009, Walt van Ballegooijen, Paul Gailiunas et D. Erdély ont ainsi construit 42 nouveaux systèmes de polyèdres spidronisés ayant tous la propriété de remplir parfaitement l'espace. Dans ce travail, il a fallu être très attentif au sens de rotation des spirales utilisées, car, pour que deux faces de polyèdres spidronisés s'emboîtent parfaitement, il faut qu'elles soient basées sur des spirales tournant dans des sens opposés (sur http://spidron.hu/spidronised_spacefillers/main.html, une magnifique présentation de ce travail est visible, comportant plusieurs petits films).

Pavages apériodiques

Les membres du groupe se sont aussi intéressés au classique problème des pavages apériodiques du plan. On recherche un jeu de formes planes (chacune est disponible en quantité illimitée) pouvant paver le plan sans trou, ni chevauchement, et ne pouvant le faire que de manière non périodique (aucune translation ne doit laisser invariant le pavage). La présente rubrique de novembre 2013 donnait quelques exemples de ces jeux de formes, et présentait en particulier le pavage apériodique n'utilisant qu'une seule tuile décorée, récemment découvert par Joan Taylor.

Ici, le jeu a consisté à trouver des tuiles apériodiques qui soient chacune construites avec un crochet de type Spidron. Le défi semblait délicat. Il a pourtant été relevé et un jeu de deux tuiles spidronisés apériodiques a été trouvé. Ces tuiles sont construites sur le modèle des deux tuiles de Roger Penrose dénommées la « flèche » et le « cerf-volant ». Les chercheurs se sont amusés à reprendre la couverture du *Scientific American* de 1977 qui présentait un pavage de Penrose avec des flèches et des cerfs-volants, et ils l'ont transformé en un pavage avec leurs tuiles spidronisées (*voir la figure 5*).

Spidrons sur le plan hyperbolique

Paver le plan jusqu'à l'infini est intéressant, mais il existe une représentation géométrique plus concrète de l'infini, celle du plan hyperbolique modélisé dans un disque. On imagine que plus on s'éloigne du centre d'un disque, plus il devient difficile d'avancer, au point qu'il est impossible d'atteindre la frontière du disque, laquelle joue le rôle d'un horizon, à distance finie. Cette géométrie particulière, où par un point passent plusieurs parallèles à une droite donnée, oblige à revoir les pavages usuels du plan, qui ne conviennent plus. Se pose alors la question de savoir si ce plan hyperbolique est pavable par des formes spidronisées. La réponse positive a été donnée par Craig Kaplan (*voir la figure 6* et http://www.cgl.uwaterloo.ca/ffcsk/projects/spidron/).

Les magnifiques formes construites à partir de Spidrons sont le résultat du travail d'artistes s'occupant de design et de mathématiciens qui se fondent sur une tradition millénaire. Leur dialogue permet à chaque groupe de bénéficier du savoir-faire et des visions de l'autre. Il doit se poursuivre. ■

L'AUTEUR

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

Le blog de Jean-Paul Delahaye sur *SciLogs.fr* : www.scilogs.fr/complexites/

BIBLIOGRAPHIE

The New Spidron, 2014 : http://www.spidron.hu/

Spidron System, 2014 : http://edan.szinhaz.org/SpidronNew/index.html

W. van Ballegooijen *et al.*, **Spidronised space-fillers**, Bridges 2009 Proceedings.

D. Erdély et M. Pelletier, **Spidron domain expanding Spidron universe**, Bridges 2006 Proceedings, pp. 549-550.

D. Erdély, **Some surprising new properties of Spidrons**, Bridges 2005 Proceedings, pp. 179-186.

Groupe de recherche autour du Spidron : Dániel Erdély, Gergo Kiss, Peter Koszegi, Emil Molnar, Laszlo Beke, Lajos Szilassi, Rinus Roelofs, Cristiana Grigorescu, Paul Galiunas, Miklos Laczkovich, Walt van Ballegooijen, Amina Buhler-Allen, Janos Erdos, Marc Pelletier.

Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Godzilla, le réveil d'un dinosaure ?

Ce monstre légendaire de la culture japonaise fascine par sa taille et sa force. Mais d'où vient ce destructeur des villes, hybride de plusieurs espèces disparues ?

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Godzilla revient sur les écrans en mai 2014. Ce reptile mutant, apparu à la suite d'une catastrophe nucléaire, symbolise la revanche de la nature sur la folie des hommes. Sa morphologie impressionnante, sa taille démesurée et sa crête dorsale évoquent certains dinosaures, mais il semble aussi s'inspirer d'autres espèces. Quelle est donc sa véritable identité ?

Godzilla apparaît pour la première fois à l'écran en 1954, dans un contexte très tendu entre les États-Unis et le Japon, encore traumatisé par la guerre. Le reptile mutant est réveillé par des explosions nucléaires dans l'océan Pacifique. Le film ne fait cependant pas référence aux horreurs de Hiroshima ou de Nagasaki (responsables de 400 000 victimes) mais à un grave incident diplomatique : la contamination du thonier *Daigo Fukury Maru* par les retombées radioactives d'un test nucléaire américain au large de l'atoll de Bikini, en mars 1954. Les États-Unis, ayant sous-estimé la puissance de leur bombe, reconnaîtront difficilement leur faute… Le réalisateur Ishiro Honda s'empare de l'affaire et crée Godzilla, monstre marin qui émerge après le naufrage de bateaux nippons détruits par des tests nucléaires sous-marins. Le film devient rapidement une œuvre culte au Japon.

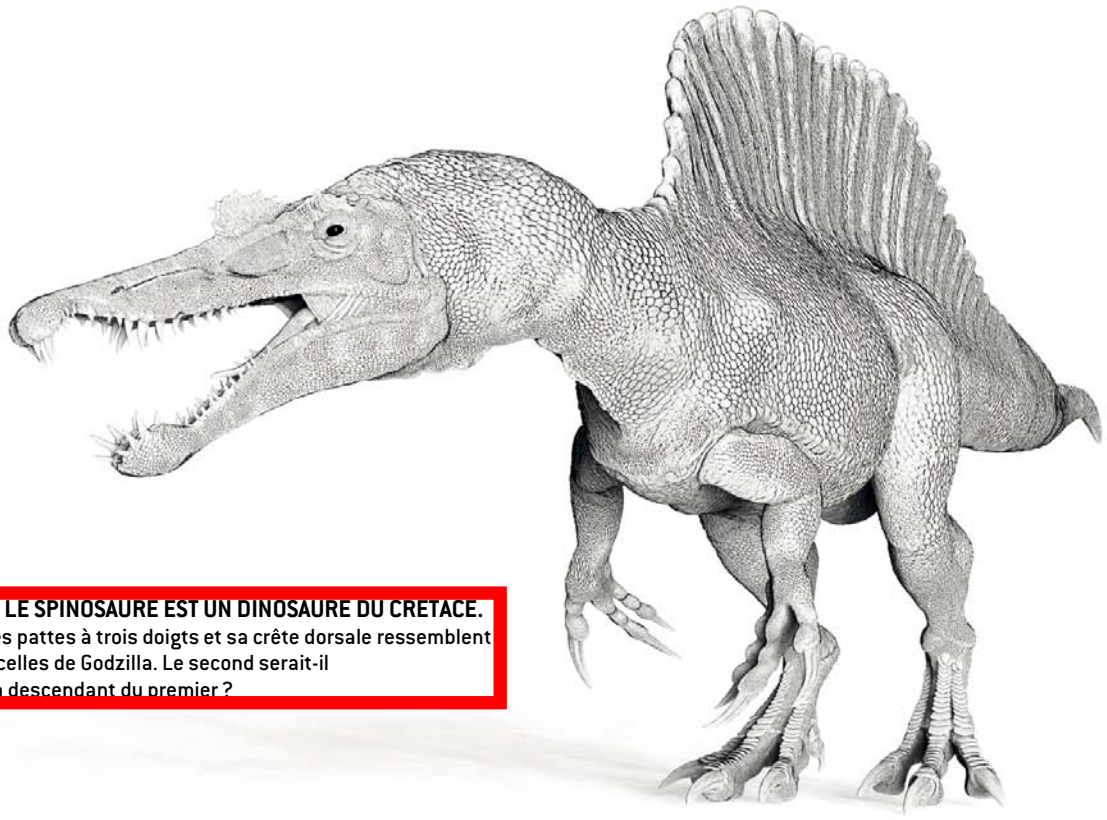
De l'autre côté du Pacifique, l'accueil est plutôt froid, *Godzilla* est même censuré à sa sortie aux États-Unis. Pourtant, un an auparavant, les Américains produisaient *The Beast from 20,000 Fathoms* (Le Monstre des temps perdus), inspiré d'une nouvelle de Ray Bradbury où une sorte de dinosaure nommé *Rhedosaurus*) se réveille des glaces arctiques à la suite de tests nucléaires et attaque New York. Pour la première fois dans l'histoire du cinéma, un monstre naissait d'une explosion nucléaire. Notons que dans le *remake* hollywoodien de *Godzilla* réalisé par Roland Emmerich en 1998, ce sont des essais nucléaires français et non américains qui réveillent le monstre.

Quoi qu'il en soit, Godzilla devint vite un « mononoké » de la culture nippone, sorte de divinité de la nature qui se réveille pour punir les hommes. D'autres réalisateurs ont aussi exploité le filon : la mode des dinosaures et autres monstres géants qui envahissent les villes était lancée, et *Godzilla* devint un genre à part entière, le genre « kaiju » (« bête étrange ou mystérieuse » en japonais) dont *Pacific Rim* (Guillermo Del Toro, 2013) est le dernier avatar.

1. DANS LE FILM *GODZILLA*, un monstre géant surgit du fond des océans et s'attaque aux villes. S'agit-il d'un dinosaure ?

Des caractères dinosauriens ?

Qui est Godzilla, dont le nom signifie « gorille-baleine » en japonais ? Excellent plongeur, le monstre émerge des profondeurs et se déplace rapidement sous l'eau. Ses pattes sont positionnées le long des flancs tandis que tout le corps ondule, propulsé par une queue puissante comme celle des crocodiles ou des iguanes marins. Ces derniers apparaissent d'ailleurs dans le *remake*



2. LE SPINOSAURE EST UN DINOSAURE DU CRÉTACÉ.
Ses pattes à trois doigts et sa crête dorsale ressemblent à celles de Godzilla. Le second serait-il un descendant du premier ?

américain de 1998 pour représenter l'origine reptilienne du dinosaure mutant. Bien qu'il affiche une origine marine, Godzilla est souvent considéré comme un dinosaure. Or les dinosaures n'étaient pas des animaux aquatiques, mais des reptiles essentiellement terrestres qui se déplaçaient à l'aide de leurs pattes situées sous le corps, comme les mammifères, et non sur le côté comme chez les autres reptiles « classiques ».

Néanmoins, les oiseaux sont des dinosaures à plumes et certains, tels les manchots, sont marins : il existe bien des dinosaures aquatiques. Admettons que les deux termes ne soient pas antinomiques et que Godzilla partage quelques caractères avec des dinosaures. Quels sont ces traits communs ? Dans les films, Godzilla semble être piscivore, ce qui le rapprocherait des spinosaures, groupe de théropodes (dinosaures bipèdes généralement prédateurs) à tête de crocodile et ayant vécu du Jurassique au Crétacé (il y a entre 155 et 85 millions d'années environ). Cette appartenance au groupe des théropodes est aussi cohérente avec le fait que Godzilla laisse dans certains films des traces tridactyles (à trois doigts) sur le sol. Cependant, dans le film de 1954, des traces de la plante du pied du monstre suggèrent une locomotion plantigrade alors que les théropodes étaient digitigrades.

Essayons tout de même de trouver des caractères dinosauriens au monstre : ses épines dorsales évoquent encore celles des spinosaures. Ces derniers arboraient une crête sur le dos soutenue par des apophyses ou épines vertébrales (*spino* signifie épine en latin). Le problème est que les épines dorsales de Godzilla sont beaucoup plus crénelées et dentelées que celles des spinosaures.

Un géant hors normes

La taille de Godzilla en fait-elle alors un dinosaure ? Le squelette de *Spinosaurus aegyptiacus*, bien que fragmentaire (les fossiles originaux ont volé en éclats lors du bombardement de Munich par les Anglais en avril 1944), aurait atteint environ 14 mètres de longueur pour 6 mètres de hauteur, ce qui en ferait un des plus gros reptiles terrestres carnivores. Mais d'autres reptiles piscivores, tel l'ichtyosaure *Shastosaurus* du Trias, pouvaient dépasser 20 mètres de longueur. Ces records restent cependant ridicules par rapport à la taille de Godzilla qui augmente au cours de l'histoire du cinéma ! Dans la version japonaise de 1954, le monstre mesure environ 50 mètres alors qu'il atteint 150 mètres dans le dernier *remake*. Ces tailles démesurées correspondent à des masses corporelles estimées variant entre 5 000 et 150 000 tonnes : dans ce cas, on s'interroge sur la capacité du monstre à se déplacer sur la terre ferme sans s'effondrer sous son propre poids… Ses os sont-ils creux comme ceux des théropodes – oiseaux compris – ou des ptérosaures (reptiles volants du Mésozoïque) ? Le souci est que des os creux ne sont guère compatibles avec le mode de vie amphibie ou aquatique de Godzilla : la plupart des reptiles et mammifères marins présentent au contraire des os souvent très denses, permettant de lester le corps pour optimiser le temps de plongée à grande profondeur. Godzilla serait-il alors doté de sacs aériens comme les oiseaux ou les insectes volants ? Hélas, les films ne nous renseignent pas sur le sujet.

Les différents films montrent d'ailleurs l'évolution de nos connaissances en paléontologie et en biologie de l'évolution. Ainsi, dans les années 1950, l'évolution était considérée comme une succession de « chaînons manquants » et non comme un processus buissonnant et aléatoire : Godzilla était alors une « créature intermédiaire » avec une mosaïque de caractères tels un buste de gorille et un museau d'ours. Le monstre pourrait donc se rapprocher des reptiles mammaliens plutôt que des dinosaures ! Rappelons que les reptiles mammaliens, apparus au Carbonifère – bien avant les dinosaures –, ont donné naissance aux mammifères. L'un des plus connus est le dimetrodon du Permien des États-Unis (âgé d'environ 270 millions d'années), féroce carnivore, quadrupède, souvent confondu avec un dinosaure. Il présente une belle crête dorsale composée de longues épines vertébrales. N'est-ce pas aussi le cas de Godzilla ? ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

ART & SCIENCE

Les folles créatures de la plage

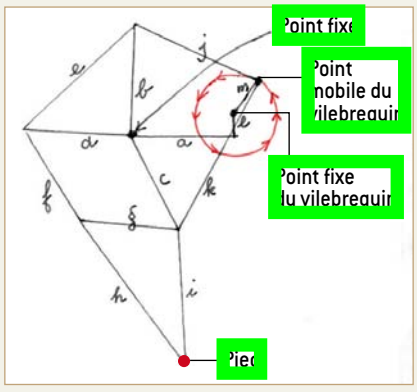
Des structures faites de tuyaux et de bouteilles en plastique arpentent les plages des Pays-Bas. Ces créatures ont été élaborées à partir d'algorithmes évolutionnistes qui imitent les principes de la sélection naturelle. Elles sont désormais exposées à Paris.

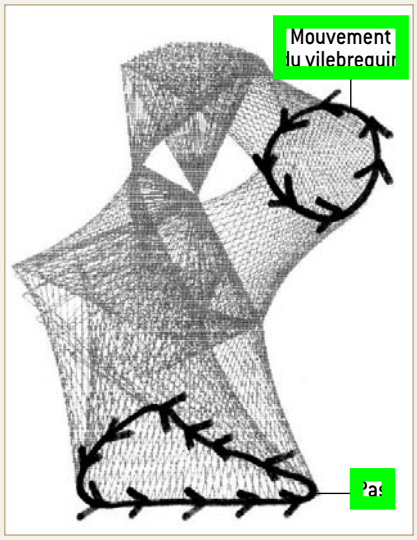
Loïc MANGIN

Jusqu'au 4 janvier 2015, les robots investissent la Cité des sciences et de l'industrie, à Paris, à l'occasion d'une exposition consacrée à l'art robotique. L'idée est de montrer des œuvres qui n'auraient jamais pu voir le jour sans un robot. Certaines sont constituées du robot lui-même, d'autres ont été créées grâce à l'intervention d'un robot qui n'apparaît pas.

Parmi les artistes invités, le sculpteur hollandais Theo Jansen est venu avec trois immenses créatures qu'il laisse d'ordinaire baguenauder en liberté sur les grandes plages de la mer du Nord : *Animaris Umerus*, *Animaris Ordis* et *Animaris Adulari* sont des sortes d'insectes géants, de plusieurs mètres de longueur, élaborés avec des tubes et des bouteilles en plastique fixés par du ruban adhésif *(voir la photographie page ci-contre)*. Animés par le vent, ils se déplacent sur le sable à l'aide de leurs multiples pattes *(voir la vidéo en lien avec le QR-code page suivante)*.

L'histoire de ces machines commence il y a plus de 25 ans quand T. Jansen, physicien de formation, s'intéresse à la théorie de l'évolution et au processus de sélection naturelle. Il applique ce dernier à des machines, d'abord virtuelles, qu'il met en compétition dans son ordinateur : seules celles qui se déplacent le mieux sont retenues pour subir une étape de modifications aléatoires (l'équivalent de mutations). La nouvelle population est à son tour testée, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'« individus » performants. Les vainqueurs ont ensuite été construits avec du matériel bon marché et « lâchés » dans la nature. Détaillons quelques-unes de leurs caractéristiques.





LES CRÉATURES se déplacent grâce aux mouvements de vilebrequins reliés aux pattes de la créature par plusieurs tiges en plastique *(en haut)*. Ainsi, le mouvement circulaire est converti en un pas *(en bas)*.

Certaines de ces créatures, qui se déplacent de façon autonome, ont en guise de poumons des bouteilles en plastique, où de l'air peut être comprimé grâce à des pompes actionnées par le vent via des ailettes en plastique. De la sorte, la machine dispose d'une réserve d'énergie pour mettre en branle ses membres, équipés de pistons qui font office de muscles. Ces pistons sont actionnés par l'air qui sort des bouteilles à travers de petits tuyaux.

Le déplacement des pattes commence par la rotation de vilebrequins (qui transforment le mouvement linéaire des pistons en un mouvement circulaire) disposés le long de l'ossature de la créature. Ce mouvement circulaire est converti en un mouvement triangulaire du pied correspondant grâce à 11 tiges en plastique *(voir les figures ci-contre)*. Chaque fois que le pied touche le sol, il décrit une ligne horizontale et tire la structure. À l'extrémité de cette ligne, le pied se soulève pour parcourir le reste du triangle arrondi, tandis que d'autres pieds prennent la relève.

L'algorithmique évolutionniste s'est ici révélée précieuse pour déterminer les longueurs de chacune des 11 tiges *(de a à k sur la figure ci-contre en haut, la tige m correspondant au vilebrequin et la tige l étant accessoire)*. En effet, le mouvement du pied dépend beaucoup des proportions de ces

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

éléments. Or le nombre de combinaisons possibles est immense, même pour un ordinateur : il est impossible de les tester toutes.

L'artiste est parti d'une population de 1 500 pattes aléatoires qu'il a soumises au processus de mutations et de sélection. Seuls les 100 meilleurs membres (qui s'approchaient le plus du pas idéal, c'est-à-dire le triangle arrondi) étaient conservés, les autres étant éliminés. L'étape de reproduction correspondait à un mélange des tiges sélectionnées de façon à confectionner une nouvelle population (les « parents » compris) de 1 500 pattes, celles-ci étant à nouveau mises en compétition. Au terme de quelques mois de ce processus, l'ordinateur a livré les 11 longueurs optimales pour une marche performante.

Les créatures ainsi obtenues sont d'abord testées dans un bac à sable d'environ 500 mètres carrés avant d'être mises en conditions réelles sur une plage balayée par les vents. Les espèces se succèdent et les nouvelles remplacent les anciennes, celles-ci étant alors reléguées dans un « cimetière » où, le soleil et le vent aidant, le plastique prend progressivement l'apparence de vrais fossiles.

L'adaptation est parfois déroutante. Par exemple, dès que le vent souffle trop fort, la créature *Animaris Sabulosa* se fixe au sol en plantant un piquet avec un marteau, les deux éléments faisant partie de son anatomie ! Autre cas, *Animaris Rhinozeros* peut transporter un individu. T. Jansen espère qu'un jour ses créatures seront suffisamment indépendantes pour vivre leur vie, seules sur la plage, en toute autonomie... ■

J.-A. Meyer et A. Guillot, **Vers une robotique animale**, *Pour la Science*, n° 300, 2002.

Exposition à la Cité des sciences et de l'industrie : http://bit.ly/1k1Yb03

IDÉES DE PHYSIQUE

Charges en stock

Les supercondensateurs permettent d'emmagasiner ou de libérer rapidement de l'énergie électrique. Ils constituent des alternatives intéressantes aux batteries.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Recharger un véhicule électrique en seulement quelques minutes ? Si l'énergie est stockée dans des batteries, cela reste irréaliste. Mais de nouveaux types d'accumulateurs électriques, les supercondensateurs, le rendent possible. Ces dispositifs, dont la capacité est un millier de fois supérieure à celle des condensateurs classiques, deviennent incontournables dès qu'une application requiert une puissance instantanée très élevée ou répétée, de l'ouverture d'urgence des portes de l'Airbus A380 à l'alimentation d'une perceuse électrique. À quoi tiennent leur capacité décuplée et leur rapidité d'action ?

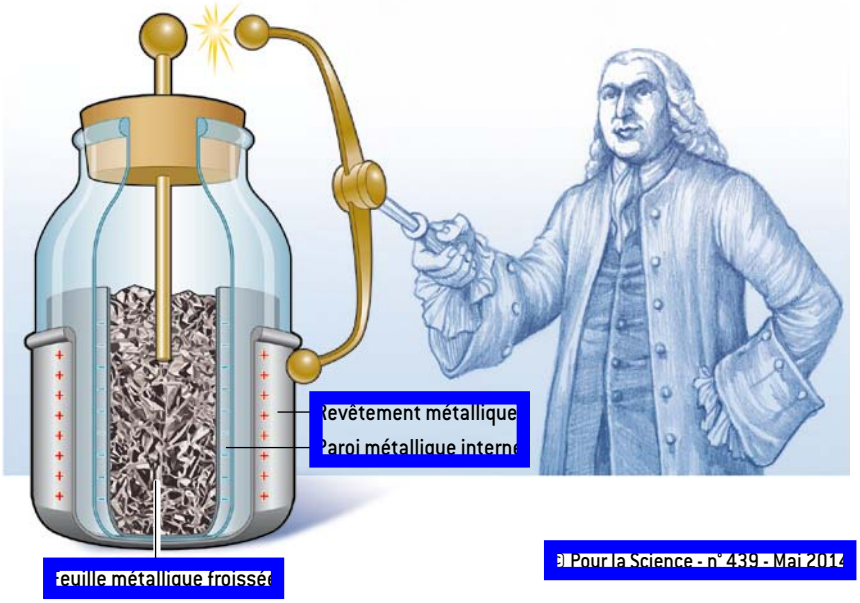
Une bouteille difficile à remplir

Un condensateur est un dispositif permettant de stocker des charges électriques. Son ancêtre, la bouteille de Leyde, inventée en 1745, va nous permettre d'en saisir le principe. Dans sa forme initiale, il s'agit d'une bouteille de verre emplie de feuilles d'étain chiffonnées et recouverte d'une feuille métallique à l'intérieur et à l'extérieur *(voir la figure 1)*. Comment fonctionne-t-elle ? Imaginons qu'à l'aide d'un générateur, nous recueillions à l'intérieur de la bouteille le « fluide électrique », des électrons par exemple. Ces charges négatives, qui circulent au sein de l'étain, un très bon conducteur, se repoussent mutuellement jusqu'à atteindre la paroi métallique interne.

Quelle charge électrique totale la bouteille peut-elle contenir ? Elle est proportionnelle au potentiel électrique du générateur, et le coefficient de proportionnalité est la « capacité » du consensateur. En l'absence de feuille métallique extérieure, on constate que la capacité ne dépend essentiellement que du diamètre de la bouteille, et non de son volume. Avec une capacité de l'ordre d'un centième de nanofarad pour une dimension de dix centimètres, on ne stocke que 10^{-11} coulomb sous une tension de un volt, c'est-à-dire 60 millions d'électrons ! Pourquoi aussi peu ?

Les charges de même signe se repoussant, il est difficile de les amasser. C'est pourquoi on recouvre la bouteille d'une feuille métallique. Cette dernière est reliée à la masse (il suffit de la tenir à la main !) lors de la charge. Soumise au champ électrique des charges à l'intérieur de la bouteille, la surface au contact du verre se couvre de charges opposées, jusqu'à ce que les charges en vis-à-vis se compensent. Cette astuce permet d'augmenter sensiblement la capacité, typiquement d'un facteur 100.

En pratique, pour réaliser un condensateur, nul besoin de bouteille : il suffit de disposer face à face deux conducteurs électriques, séparés par de l'air ou un autre isolant électrique. La capacité est alors proportionnelle à l'aire en vis-à-vis



1. LA BOUTEILLE DE LEYDE est l'ancêtre du condensateur électrique. Ses deux pôles sont constitués par ses surfaces métalliques interne et externe, isolées l'une de l'autre par la paroi de verre. En les reliant avec un conducteur électrique, le manipulateur crée un court-circuit et décharge le condensateur.

et inversement proportionnelle à l'épaisseur (l'écart entre les deux surfaces). On réalise ainsi des condensateurs en enroulant dans un petit cylindre scellé deux feuilles d'aluminium séparées par une feuille d'isolant d'épaisseur micrométrique. Sur ce même principe, on fabrique des condensateurs en céramique mesurant quelques millimètres et ayant des capacités de l'ordre du microfarad.

Du charbon poreux pour emmagasiner les charges

Tout cela est fort utile pour réaliser des circuits électroniques, mais ne suffit pas pour stocker une quantité substantielle de charges. Pour obtenir des capacités bien supérieures, il faut augmenter la surface du condensateur et réduire son épaisseur.

Pour ce qui est de l'épaisseur, les supercondensateurs exploitent un phénomène connu sous le nom de double couche électrochimique, qui advient lorsqu'un électrolyte (un solvant contenant des ions) se trouve en contact avec une surface chargée *(voir la figure 2)*.

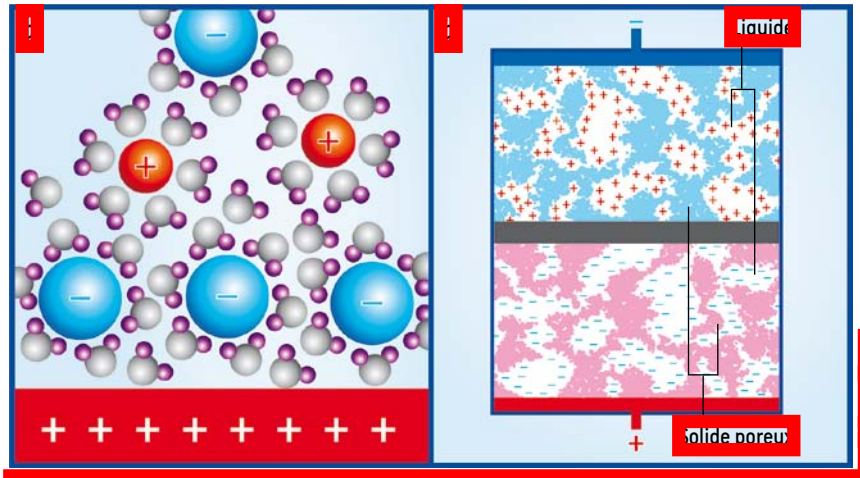
Imaginons que la charge de cette plaque soit positive. Elle attire les ions négatifs, les anions, qui viennent à proximité de la surface tandis que les ions positifs sont repoussés. Or chacun des anions est solvaté, c'est-à-dire entouré par des molécules du solvant, qui forment comme une cage protectrice autour de lui. Si la tension de la plaque n'est pas trop importante (en pratique, de l'ordre du volt), il n'y aura pas de transfert de charges entre la surface et les anions (cela évite en outre de déclencher des réactions d'électrolyse, qui requièrent des tensions seuils).

Le résultat est que, face à la plaque chargée positivement, se forme une couche d'anions, la plaque positive et la couche d'anions étant séparées par l'épaisseur d'une molécule de solvant. On a ainsi réalisé un condensateur d'épaisseur inférieure au nanomètre, soit une capacité d'une dizaine de microfarads par centimètre carré.

Reste à augmenter la surface. Comment ? En utilisant un matériau poreux, tels les charbons actifs qui peuvent présenter des surfaces de 1 000 à 2 000 mètres carrés par gramme – ce qui laisse espérer une capacité de 100 farads par gramme de matériau poreux. Le stockage en surface, caractéristique d'un condensateur classique, devient un stockage en volume.

Un supercondensateur typique est ainsi constitué de deux électrodes de charbon actif imprégnées d'une solution électrolytique et séparées par une membrane isolante, mais perméable aux ions *(voir la figure 2)*. Par rapport aux batteries usuelles, l'absence de réactions chimiques autorise une stabilité de charge et de décharge bien plus importante, avec une durée de vie supérieure à un million de cycles de charge/décharge contre quelques milliers de cycles pour une batterie lithium-ion.

Par ailleurs, comme le processus de charge ou de décharge met en jeu la mobilité des ions, mais ne transforme pas ces derniers, il peut s'effectuer en quelques secondes – durée à comparer aux minutes nécessaires à la décharge d'une batterie et aux dizaines de minutes, voire aux heures, pour la recharger. En revanche, la tension de fonctionnement (le volt) limite assez fortement la densité d'énergie



2. LES SUPERCONDENSATEURS mettent à profit le phénomène de « double couche électrochimique » *(a)*. Une surface chargée, mettons positivement, est mise au contact d'un liquide contenant des ions solvatés (entourés de molécules du solvant). Se constitue alors une couche d'anions, séparée de la surface positive par une épaisseur moléculaire. Cette configuration équivaut à un condensateur de très faible épaisseur. Dans un supercondensateur *(b)*, cet effet de double couche électrochimique est reproduit sur toute la surface offerte par un matériau poreux baignant dans un liquide contenant des ions. La faible épaisseur des doubles couches et la grande surface effective confèrent au dispositif une très grande capacité électrique.

LES AUTEURS

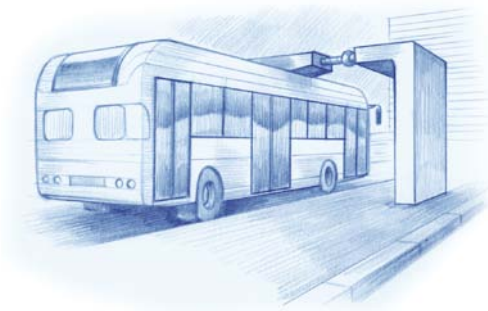
Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : http://blog.idophus.f

BIBLIOGRAPHIE

S. Kondrat *et al.*, **Accelerating charging dynamics in subnanometre pores**, *Nature Materials*, vol. 13, pp. 387-393, 2014.

P. Jampani *et al.*, **Advancing the supercapacitor materials and technology frontier for improving power quality**, *Interface*, vol. 19(3), pp. 57-62, 2010.

Retrouvez la rubrique Idées de physique sur www.pourlascience.fr

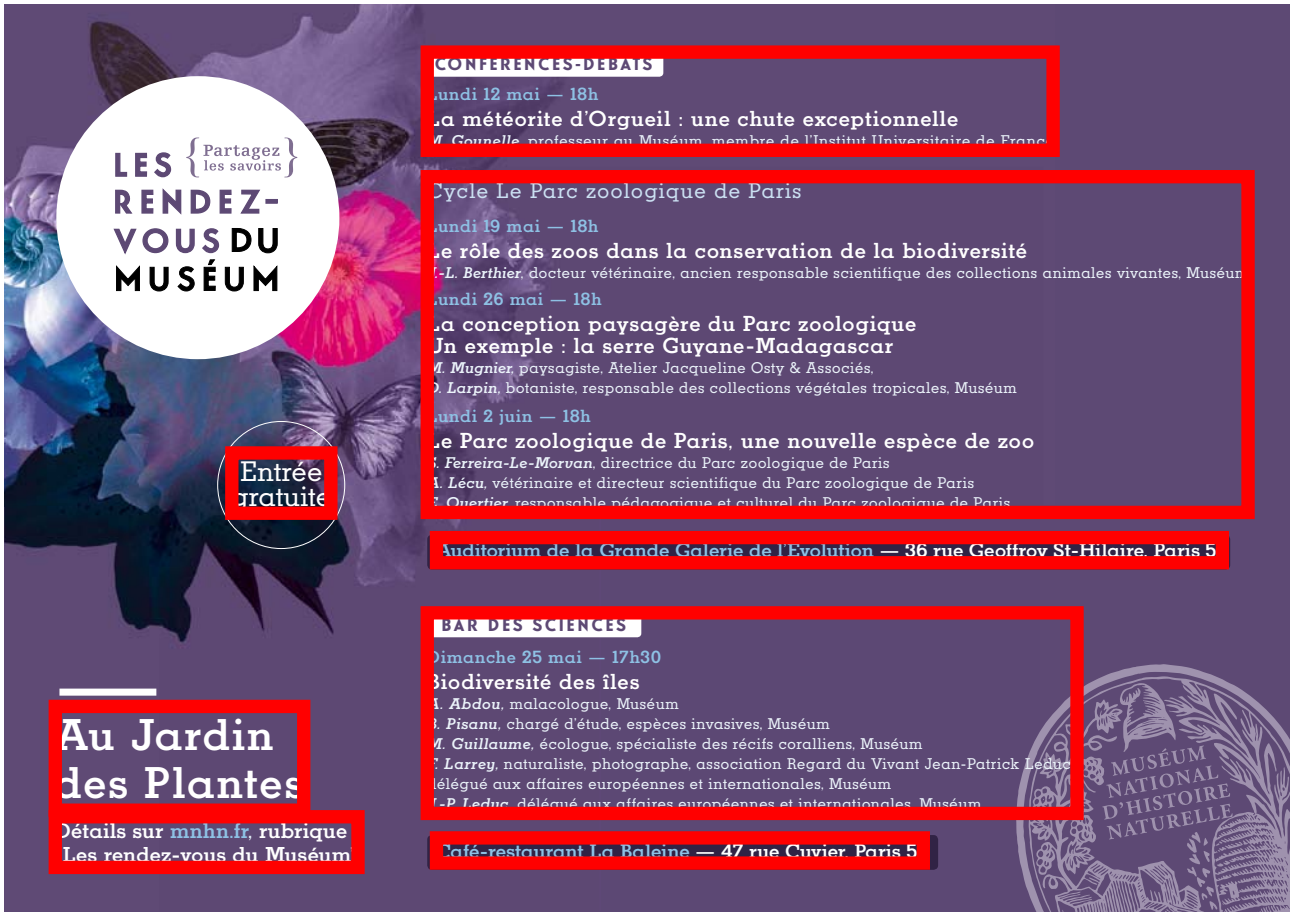


3. DES AUTOBUS TOUT ÉLECTRIQUES fonctionnant grâce à des supercondensateurs voient peu à peu le jour. La recharge des supercondensateurs, placés sur le toit du véhicule, est effectuée durant l'arrêt à chaque station, *via* une borne électrique installée en hauteur. L'énergie ainsi emmagasinée permet à l'autobus de se déplacer jusqu'à la station suivante.

électrique stockable : on atteint la dizaine de wattheures par kilogramme, soit un dixième de la densité d'énergie des batteries lithium-ion. Autrement dit, le dispositif est idéal pour stocker et fournir dans un temps record de l'énergie, mais en quantité modeste.

Parmi les nombreuses applications envisageables, on peut citer le domaine des transports *(voir la figure 3)* : les supercondensateurs servent désormais à récupérer l'énergie du freinage d'une voiture, qui sinon était perdue sous forme de chaleur. À la clef : des économies d'énergie pour les métros, les tramways (jusqu'à 40 pour cent), les véhicules disposant d'un système *Stop & Start* (extinction à l'arrêt et redémarrage), ou une poussée des performances des voitures de course, telle la *Toyota Supra HV-R*, ou de tourisme, telle la *Toyota Yaris Hudrid-R*. Cette dernière est équipée sous sa banquette arrière d'un supercondensateur, de la taille d'une petite valise, qui fournit à deux moteurs électriques une puissance de 40 chevaux pendant dix secondes.

Le *Bluetram* du groupe Bolloré est plus ambitieux encore. Il s'agit d'un projet d'autobus entièrement électrique qui roulera en toute autonomie d'une station à une autre. Ses supercondensateurs, installés sur le toit, sont rechargés par un bras télescopique à chaque station en 90 secondes (à peine plus qu'un arrêt standard), pour une autonomie de plus d'un kilomètre. L'ensemble comporte 30 modules de 20 supercondensateurs, chacun pesant 500 grammes, de capacité 2 600 farads et de tension 2,7 volts, soit une énergie totale de 6 millions de joules environ. La mise en route est prévue d'ici 2015 à Singapour et à Bordeaux. ■



© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

QUESTION AUX EXPERTS

Boire un café dans l'après-midi empêche-t-il de dormir ?

En général, oui. Les effets de la caféine restent sensibles jusqu'à six heures après son ingestion, parfois plus longtemps.

Astrid NEHLIG

Chez les adultes, le café est la boisson la plus consommée dans le monde après l'eau. C'est un liquide complexe, contenant plus de 1 000 composés différents. En particulier, il est riche en caféine, une substance qui augmente la vigilance et la concentration, tout en apportant une sensation de bien-être. Le revers de la médaille est qu'il peut perturber le sommeil. Faut-il alors arrêter d'en boire à partir d'une certaine heure ?

En général, la consommation de café est élevée le matin et en début d'après-midi, puis diminue notablement après 16 heures. L'effet de la caféine sur la vigilance et la concentration peut être un avantage : augmentation des performances matinales, amélioration du travail de nuit, aide contre le décalage horaire... Une étude réalisée en 2006 par Pierre Philip, de l'Université de Bordeaux, a montré que la nuit, une tasse de café limite aussi efficacement les fautes de conduite qu'une sieste de 15 minutes.

Cependant, des questionnaires soumis à de larges échantillons de population ont révélé une association entre la consommation quotidienne de café et des troubles du sommeil. La caféine retarde l'endormissement, diminue la durée totale de sommeil, modifie sa qualité (le sommeil léger est prolongé au détriment du sommeil profond) et augmente la fréquence des réveils. Globalement, ces effets se traduisent par la sensation d'avoir mal dormi et entraînent souvent des moments de somnolence pendant la journée.

Comment la caféine agit-elle ? L'envie de dormir est régulée par une substance synthétisée par le cerveau, l'adénosine. Celle-ci se fixe sur des récepteurs membranaires des neurones, dont elle ralentit l'activité. Elle provoque ainsi la somnolence. La caféine bloque ces récepteurs, ce qui inhibe l'action de l'adénosine.

Des individus insensibles à la caféine

Notons que les effets de la caféine sur le sommeil varient selon les individus. Pour des raisons mal comprises, ils sont moins marqués chez les consommateurs réguliers que chez les consommateurs occasionnels. En outre, environ 30 pour cent des individus s'y déclarent insensibles : ils peuvent boire un café juste avant d'aller se coucher, sans conséquence sur leur sommeil. On s'est longtemps interrogé sur les raisons de cette insensibilité. Ce n'est qu'en 2007 que l'équipe de Hans-Peter Landolt, de l'Université de Zurich, a montré qu'elle a une origine génétique et qu'elle s'explique par une variante particulière du gène codant le récepteur de l'adénosine.

La caféine agit vite : elle arrive au cerveau en à peine 10 minutes et atteint un pic de concentration 45 minutes après son ingestion. Sa concentration reste élevée pendant deux à quatre heures en moyenne, puis la caféine est éliminée de l'organisme. Cette élimination est plus ou moins rapide selon les individus. Généralement, les effets de la caféine restent sensibles durant deux à six heures.

Les effets dépendent aussi de la dose totale absorbée. Au-dessous de 100 milligrammes de caféine, soit l'équivalent d'une tasse de café, ils sont peu marqués, voire imperceptibles. En revanche, l'absorption de 100 à 200 milligrammes de caféine 30 à 60 minutes avant le coucher retarde l'endormissement de 33 minutes en moyenne et raccourcit le sommeil d'environ 10 à 30 minutes. En 2013, Christopher Drake et ses collègues, de la Faculté de médecine de l'Université de Wayne State (Détroit, États-Unis), ont mis en évidence un effet significatif de la caféine sur le sommeil six heures après son absorption, mais la dose utilisée était de 400 milligrammes, ce qui équivaut à quatre tasses avalées d'un coup ! Ce n'est donc pas représentatif d'une consommation réelle, mais cela montre que pour les grands buveurs de café, l'effet peut durer plus longtemps.

De façon générale, mieux vaut arrêter de boire du café après 16 heures. C'est d'ailleurs ce que font la plupart des individus, qui ajustent bien leur consommation en fonction de leurs besoins et de leur sensibilité à la caféine. ■

Astrid NEHLIG est directrice de recherche à l'INSERM et à l'Hôpital Necker, à Paris.

© Pour la Science - n° 439 - Mai 2014

L'information scientifique de référence **maintenant sur tablette et smartphone !**

Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
Le 1er numéro de *Pour la Science* est offert !

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie le mensuel *Pour la Science* à 4,49 € et son trimestriel *Dossier Pour la Science* à 5,49 € en version numérique optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif, contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.

Disponible sur App Store

DISPONIBLE SUR Google play

lashez ce QR cod
vec votre mobile
u votre tablette
our télécharger
mmédiatement
application

&

Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver le magazine *Cerveau & Psycho* et son trimestriel *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

SCIENCE & GASTRONOMIE

La querelle du lait cru

Les études scientifiques établissent enfin l'intérêt des fromages traditionnels au lait cru. Sans le savoir, les fermiers ont appris, au fil des siècles, à contaminer convenablement leurs produits !

Hervé THIS

Peut-on manger des fromages au lait cru sans risque pour la santé ? Est-il plus sain de consommer des fromages produits à partir de lait « assaini » par des chauffages ou par des filtrations éliminant les micro-organismes ?

Les risques et les bénéfices des fromages au lait cru sont rarement débattus avec bonne foi. Certains agitent le spectre des listérioses pour imposer la pasteurisation du lait, d'autres avancent sans preuve que les fromages pasteurisés sont moins goûteux.

De nombreux industriels qui préfèrent ensemencer de grandes quantités de lait assaini avec quelques souches de micro-organismes, standardisant leurs produits, vantent les mérites de leurs fromages avec force publicité. Les artisans travaillent avec de petits volumes de lait, souvent cru, et les pratiques traditionnelles consistent à ensemencer le lait et le fromage avec une grande variété de micro-organismes ; ils font valoir que la pasteurisation (trop coûteuse pour eux) n'est pas une garantie sanitaire, les laits étant alors exempts des micro-organismes qui protégeraient « naturellement » les fromages… Les États aussi s'y mettent et protègent des productions nationales, au lait cru pour la France, au lait pasteurisé (pour des raisons sanitaires) pour d'autres pays. Terrible cacophonie !

Toutefois, les temps changent. Lors d'une séance de l'Académie d'agriculture de France, les intervenants ont indiqué que des spécialistes français des fromages au lait cru sont invités par des institutions américaines et chinoises, que la production de fromages au lait thermisé semble perdre de sa force, que celle de fromages au lait cru se développe. Surtout, des chercheurs de l'INRA et des Universités de Caen et Besançon ont synthétisé les études récentes (M.-C. Montel *et al., Int. J. of Food Microbiol.*, vol. 177, pp. 136-154, 2014). En voici quelques conclusions.

La listériose associée à la consommation de fromage est très rare, alors qu'elle est toujours montrée du doigt par les tenants de la pasteurisation. De surcroît, elle n'est pas spécifique des fromages au lait cru, des fromages au lait pasteurisé pouvant aussi être contaminés, en raison soit d'une pasteurisation inappropriée, soit d'une contamination ultérieure à cette étape.

La plus grande diversité microbienne des laits et des fromages résulte de toutes les sources possibles, de la traite à l'affinage : l'air de l'étable, la litière des animaux, leur fourrage, les ustensiles de manipulation du lait, etc. Les savoir-faire traditionnels semblent augmenter la richesse de la microflore. Les cuves en bois utilisées pour la fabrication du fromage de Salers, par exemple, les planches d'affinage du reblochon de Savoie sont des réservoirs de micro-organismes variés (levures, moisissures et bactéries lactiques). Les résultats portent aussi sur l'incidence de l'alimentation du bétail sur la qualité des fromages (plus grande pour les fromages au lait cru) et sur la diversité des microflores, au cours des transformations du lait et de l'affinage des fromages.

Et pour la sûreté ? Il est maintenant établi que les fromages au lait cru sont plus sains que les laits non fermentés : les bactéries lactiques produisent une large gamme de substances antimicrobiennes, elles réduisent la quantité de sucres fermentescibles et augmentent l'acidité, ce qui prévient l'installation de micro-organismes pathogènes. Les travaux de l'INRA d'Aurillac ont montré les potentialités des laits et des fromages au lait cru pour inhiber les pathogènes dans le cœur de fromages à pâte pressée non cuite.

L'influence de la consommation de fromages au lait cru sur la santé semble la partie la plus difficile à étudier. En l'absence d'arguments péremptoires, intéressons-nous au goût : des études rigoureuses ont montré que le goût des fromages au lait cru est jugé plus caractéristique, grâce à une quantité supérieure de composés odorants (acides, aldéhydes, alcools, esters et composés soufrés).

Vive les fromages au lait cru fabriqués de manière artisanale ! ■

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 la rubrique Science & Gastronomie sur www.pourlascience.fr

MATHÉMATIQUES

La forme d'une vie

Benoît Mandelbrot

Flammarion, 2014
(381 pages, 25 euros).

Longtemps, les mathématiques modernes ont dominé en France. Puis tout a changé : les probabilités et l'informatique occupent désormais les premières places dans la modélisation. Cela, nous le devons entre autres à Benoît Mandelbrot (1924-2010), un génie qui a eu la bonne idée de nous raconter sa quête passionnée avant de disparaître.

Qui dit fractales dit Mandelbrot, même si l'introduction du premier processus stochastique fractal – le mouvement brownien fractionnaire – est due au mathématicien soviétique Andreï Kolmogorov, en 1940. Mais le lien entre les modèles probabilistes abstraits et les applications, la création des concepts et leur popularisation jurent l'œuvre de Mandelbrot, durant l'âge d'or (1958-1993) de ses 35 années à IBM, couplées à 17 années à Yale.

Mandelbrot naquit à Varsovie dans une famille juive de tradition érudite. Son oncle Szolem était mathématicien et professeur au Collège de France. Devant la montée du nazisme, la famille émigra à Paris, puis se replia sur Tulle (Corrèze) où le jeune citadin passa le baccalauréat. À la Libération, Mandelbrot réussit brillamment les concours d'admission à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure. Un « conseil de guerre » familial fut réuni pour discuter du choix entre les deux écoles, au profit de la première.

Entrecoupée par une série de séjours aux États-Unis, toute la période française (1936-1958) constitue un témoignage sur le contexte historique et politique, à travers l'histoire d'un jeune immigré pauvre, mais brillant élève. Son excellence scolaire explique de discrets soutiens pendant la guerre et lui a permis ensuite de partager le cursus des élites.

À sa sortie de Polytechnique, Mandelbrot évoque « un long apprentissage de la science et de la vie » (1947-1958) rythmé par les allées et venues entre les États-Unis et la France. Cette période de formation, d'oscillations entre physique théorique et mathématiques appliquées, a été fondamentale pour la gestation des fractales.

Une autobiographie instructive et agréable à lire, illustrée par des dessins et des photographies.

Pierre Bertrand
Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

BOTANIQUE-MÉDECINE

Plaidoyer pour l'herboristerie

Thierry Thévenin

Actes Sud, 2013
(304 pages, 22 euros).

Le livre de Thierry Thévenin se présente d'abord comme un manifeste prônant la réhabilitation d'une science en voie de marginalisation : l'herboristerie. À un moment où la revendication d'une responsabilité individuelle accrue et plus autonome dans la gestion de la santé traverse fortement notre société, la « santé par les plantes », présentée comme une alternative à de nombreuses situations morbides, trouve un fort écho dans une population soucieuse de mieux vivre en harmonie avec la nature et de s'intégrer à un projet sociétal « durable ». S'il est difficile de juger de l'importance réelle de ce courant, il y a en revanche une évidence : sous les coups de butoir des monopoles pharmaceutiques et de la réglementation européenne, le statut d'herboriste a disparu de notre horizon quotidien avec des pans entiers de connaissances et de savoir-faire.

Les plantes médicinales, à la base d'une pharmacopée ancestrale remontant à la tradition monastique du Moyen Âge, ont quasiment disparu de notre environnement au fur et à mesure qu'elles ont été utilisées dans la pharmacopée moderne pour synthétiser des médicaments. Parallèlement, le législateur a renforcé ce mouvement en garantissant le monopole de l'usage et de la prescription thérapeutique des plantes au monde pharmaceutique. C'est contre cette évolution lourde de sens et de conséquences que l'auteur, herboriste « cueilleur-producteur » de plantes médicinales, s'insurge et tire la sonnette d'alarme. Certes, l'ouvrage n'échappe pas à la revendication militante. On ne peut toutefois lui en faire grief, car il constitue une somme d'informations bien documentée et précieuse pour tous ceux (entreprises agroalimentaires, formulateurs de compléments alimentaires ou simples consommateurs) qui souhaitent avoir une information solide sur ce sujet.

Conscient que la marchandisation aboutit inéluctablement à la création de monopoles qui excluent les acteurs traditionnels, l'auteur nous propose une approche intéressante des rapports de la société avec la santé. Le cœur de l'ouvrage est essentiel, car il fait le point sur la réglementation, tant sur le plan national qu'européen. Enfin, alors que seules 148 plantes échappent aujourd'hui au monopole pharmaceutique, les reconnaître, les préparer et préciser leur usage constituent l'enjeu de la dernière partie : sans exclure la médecine académique, l'auteur revendique bon sens et sauvegarde d'un patrimoine capable de réhabiliter une médecine populaire fondée sur un savoir traditionnel.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorien

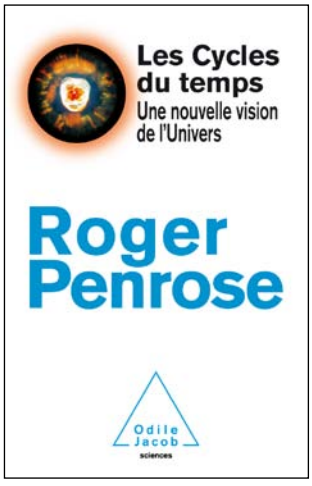
COSMOLOGIE

Les cycles du temps

Roger Penrose

Odile Jacob, 2013
(262 pages, 25,90 euros).

Sir Roger Penrose est indiscutablement l'un des plus éminents scientifiques britanniques. Il aborde ici la question de l'avant-Big Bang – sujet tabou s'il en est, y compris à ses propres yeux jusqu'à récemment – afin d'expliquer ce qu'il considère



comme des incongruités dans le modèle standard. Comme ses livres précédents, celui-ci suppose un solide bagage en physique, au moins pour la troisième partie.

La thèse défendue ici par Penrose peut être résumée de la façon suivante : lorsque l'Univers finit de se diluer dans un grand vide froid sous l'effet de son accélération accrue, les conditions deviennent alors parfaites pour produire un nouveau Big Bang, de telle sorte que les univers comme le nôtre se succèdent suivant un motif éternel. En ce sens, notre Big Bang n'est plus un commencement, mais le début d'un de ses motifs. C'est un scénario qui rejoint certaines cosmogonies antiques, mais l'intérêt de l'approche de Penrose est de lui donner un nouveau fondement mathématique et physique, via ce qu'il appelle la cosmologie conforme cyclique.

Ce fondement repose sur l'idée que le début et la fin de l'Univers sont identifiables dans le contexte d'un univers dominé par la constante cosmologique, car l'un comme l'autre ne contiennent que des particules de masse nulle. En effet, entre le présent et un futur très lointain, toutes les galaxies et leurs contenus auront été engloutis par des trous noirs, qui se seront à leur tour évaporés sous la forme de photons. Ce processus permet à l'Univers de retourner à un état de basse entropie. De plus, ces particules sans masse ont comme particularité de ne pas avoir la notion du temps, car elles n'ont pas de fréquence propre. À la fin des temps de cet univers-là, le temps lui-même s'arrête, et son état peut donc être identifié à un nouveau Big Bang par une certaine transformation conforme. Ce processus pourrait plus ou moins naturellement expliquer la matière noire et l'énergie sombre et reste compatible avec le second principe de la thermodynamique.

La théorie de Penrose prédit des échos possibles de la phase d'univers précédente, sous la forme d'ondes gravitationnelles dans le fond diffus cosmologique, correspondant à la coalescence des derniers trous noirs supermassifs. Une analyse préliminaire a été menée sur les données du satellite *Planck*, mais n'a pas encore convaincu. Si la théorie énoncée peut paraître assez hétérodoxe (ce que reconnaît l'auteur), le cheminement suivi par le livre amène toutefois son lecteur à réfléchir à de nombreuses notions fascinantes.

Christophe Pichon
Institut d'astrophysique de Paris

MÉDECINE

Le plaisir du sucre au risque du prédiabète

Réginald Allouche
Odile Jacob, 2013
(240 pages, 21,90 euros)

Les excès de sucre trop souvent répétés exposent au risque de diabète de type 2. Or une prévention précoce permet d'éviter l'apparition de la maladie, et des mesures simples et de bon sens l'enrayer son développement. C'est là tout l'enjeu de ce livre.

Un bref rappel épidémiologique illustre un constat sans concession : cette pathologie se développe sournoisement au rythme d'une véritable épidémie, et constitue un défi pour toutes les politiques de santé publique. Le diabète touche en effet près de 9,5 pour cent de la population mondiale, tandis que parallèlement, l'obésité, qui fait le lit du diabète, concerne jusqu'à 35 pour cent des habitants de certains États d'Amérique du Nord. Mais tous les pays, sans exception, sont concernés à des degrés divers. Pour la première fois dans les pays industrialisés, on constate ainsi une diminution de l'espérance de vie et surtout de l'espérance de vie sans incapacité, en lien avec les complications de cette maladie.

Comment passe-t-on du goût du sucre à l'intolérance au glucose, puis de l'intolérance au glucose au diabète ? Médecin et chercheur diabétologue, l'auteur propose un vaste tour d'horizon des mécanismes impliqués dans cette spirale pathogène (résistance à l'insuline, rôle des graisses et du rapport oméga 6/oméga 3, implication de l'épigénétique qui « réveille » de mauvais gènes

La grande invasion
Jacques Tassin
Odile Jacob, 2014
(240 pages, 22,90 euros)

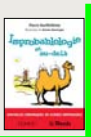
Peste verte (*Caulerpa taxifolia*) ou rouge écrevisse de Louisiane), péril jaune (frelon asiatique)... Les surnoms des espèces provenant d'ailleurs disent par eux-mêmes la terreur qu'elles nous inspirent. Sans nier le phénomène, l'écologue Jacques Tassin le relativise en essayant de l'inscrire dans son contexte, celui du mouvement perpétuel des espèces au sein de la nature. S'il est vrai qu'aujourd'hui, les activités de « *Homo disseminator* », c'est-à-dire nous, sont le principal moteur de l'expansion de certaines espèces, les effets de ces « invasions » ne sont pas toujours négatifs.

Pêcheurs de pierre
Gilbert Boillot
L'Harmattan, 2014
(145 pages, 14,50 euros)

Un enseignant-chercheur s'imagine raconter sa carrière à des lycéens. Il en profite pour vulgariser sa quête scientifique de géologue marin pour expliquer les mécanismes de rupture continentale à l'origine des marges atlantiques de la péninsule Ibérique. Entrecoupé de dialogues, le texte qui en résulte est d'une lecture aisée plaisante et instructive, qui illustre de façon distanciée mais très vivante la façon dont se déroule la recherche géologique.

La Celtique méditerranéenne
Dominique Garcia
Errance, 2014
(248 pages, 32 euros)

Il y a longtemps eu deux Gaules, l'une chevelue, et l'autre... méditerranéenne. L'un des grands spécialistes de la seconde livre ici une deuxième édition enrichie de sa synthèse sur ce monde disparu à l'origine de notre Midi. L'auteur a procédé par thèmes, tels l'espace habité, la civilisation des oppida, l'habitat, etc. Les discussions suscitées par la première édition ont abouti à un tableau très travaillé et plein de nuances de la Celtique du Sud de la France. De quoi fournir à chaque Méridional les moyens de décider s'il est plutôt un Celtibère ou un Celtoligure !



mprobabologie et au-del

Pierre Barthélémy
Dunod, 2014
171 pages, 12,90 euros).

Comme la précédente, cette sélection des chroniques du journaliste P. Barthélémy sur son blog *Passeur de science* est axée sur le loufoque en science. Parmi les résultats scientifiques sérieux qu'il parcourt, l'auteur choisit ceux qui ont un parfum d'insolite. On apprend ainsi que la science a prouvé que les hommes portant une robe restent plus fertiles, que le nombre d'animaux tués sur les routes est fortement sous-estimé, que l'on nage aussi vite dans l'eau que dans le sirop, etc.

Dans les secrets du cie

Mathieu Vidard
Grasset, 2014
285 pages, 19 euros)

L'animateur de l'émission *La tête au carré* sur France-Inter livre ici 26 récits très personnels de ses rencontres avec ce qu'il nomme les « secrets du ciel ». Qu'il s'agisse d'une balade à Hiroshima, d'une nuit en forêt guyanaise avant un départ de fusée, ou de ses rencontres avec les acteurs de la science qui l'ont passionné, tout a un rapport avec l'expérience de l'Univers par l'humanité. De beaux textes riches d'informations et d'observations qui invitent à méditer.

Histoires de gare, le dessins et de ruine

Jean-Louis Brahem
Le Pommier, 2014
220 pages, 27 euros).

Un livre au charme étrange. Le réalisme du dessin industriel, des plans de coupe, des croquis cotés, des photos d'époque, illustre la représentation géométrique au service de l'architecture et des techniques, le tout au travers de l'histoire d'un village fictif de Lorraine, Maudicourt-sur-Mouise : la construction de sa gare et les polémiques qui l'accompagnent ; le déraillement d'un train de marchandises lancé à la vitesse de 30 kilomètres par heure ; l'imagination pédagogique de l'instituteur du village ; les plans pour le dessin d'un jeune élève. Ce monde inventé fait renaître la Lorraine des années 1900 et les techniques de l'époque.

ransmissibles sous la dépendance de facteurs environnementaux, rôle du tissu adipeux). D'une manière magée, il nous décrit en particulier 'intrication des trois « mondes » dépendants de l'alimentation : le erveau, l'intestin et le microbiote, qui interagissent par tout un réseau ormonal et neurologique. C'est le dérèglement de cette machinerie complexe qui préside à l'installation progressive du diabète. C'est à sa restauration qu'il convient donc d'œuvrer.

Par souci de vulgarisation, la présentation faite de ces mécanismes biologiques est simplifiée, mais elle forme néanmoins une synthèse intéressante, même pour des chercheurs connaissant bien la question. Au travers de différents témoignages, l'auteur analyse ainsi les principaux comportements à risque pour lesquels des mesures préventives s'imposent. Les conseils qu'il propose constituent un outil pédagogique intéressant. Et si cet ouvrage ne représente pas une révolution en matière de conseils alimentaires, son originalité tient à la présentation et à l'éclairage qu'il apporte sur la façon dont notre organisme réagit et gère le dilemme « plaisir/excès du sucre » au quotidien.

Un livre aussi utile que fiable, à mettre entre toutes les mains.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

PHYSIQUE

Les sons en 150 questions

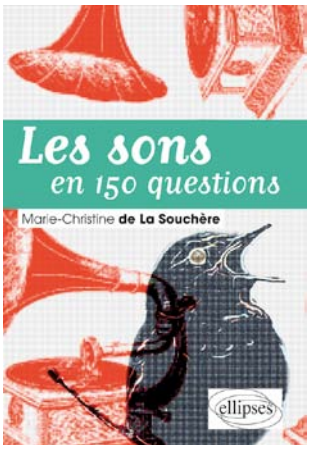
Marie-Christine de La Souchère
Ellipses, 2013
(176 pages, 16 euros).

Le son est un phénomène omniprésent, mais qui fascine les hommes depuis l'Antiquité. Ainsi, Aristote avait anticipé sa définition actuelle - celle d'une vibration mécanique dans un milieu matériel –, tandis que l'ingénieur romain Vitruve (Ier siècle avant notre ère) le maîtrisait assez pour que l'acoustique des théâtres antiques approche la perfection. Pour raviver de façon plaisante notre intérêt pour ce phénomène si banal que nous n'y pensons plus, l'auteur répond à 150 questions fondamentales ou inattendues sur le son.

Les premières d'entre elles concernent les fondements physiques du phénomène sonore ainsi que les expériences qui ont permis de les caractériser dans divers milieux. Elles sont l'occasion d'apprendre des histoires étonnantes, telle la façon dont Jean-Baptiste Biot (1774-1862) mesura la vitesse du son à travers les conduites de fonte des égouts parisiens alors en construction. Les sons de la vie de tous les jours méritent aussi que l'on se pose des questions, dont s'empare l'auteur. Nous apprenons ainsi ce qui produit le crissement de la craie sur le tableau ou encore le bruit de la mer dans un coquillage.

Les questions abordées ensuite convoquent l'imagination et la poésie, telles celles du murmure des ruisseaux ou encore du bruit du vent dans les branches. Le lecteur à la recherche d'informations sur des sujets plus fréquents trouvera aussi des réponses à ses interrogations sur la visualisation des sons, la sonoluminescence ou encore le plus classique mur du son.

La lecture nous emmène ensuite vers les territoires inattendus des questions connexes



au son. Ainsi, le chapitre consacré aux sons dans le monde animal nous apprend que les oiseaux ont un accent en fonction de leur région et nous donne une information passionnante sur l'anatomie des oreilles des vertébrés. Celui sur le langage musical explique l'origine du nom des notes et raconte l'étonnante histoire de la fréquence du diapason. L'acoustique architecturale est également abordée à travers les opéras, les églises ou tout simplement le métro ! Le secret des galeries des murmures, comme celle de la cathédrale Saint-Paul de Londres, nous est révélé.

L'ouvrage s'achève sur des thèmes plus concrets, tels la lutte contre le bruit ou les ultrasons et les applications de ces derniers en échographie ou dentisterie.

On fait ainsi le tour du son grâce à un choix éclectique de questions surprenantes, bien choisies et coordonnées de façon à éviter l'impression que nous aurait donnée un catalogue.

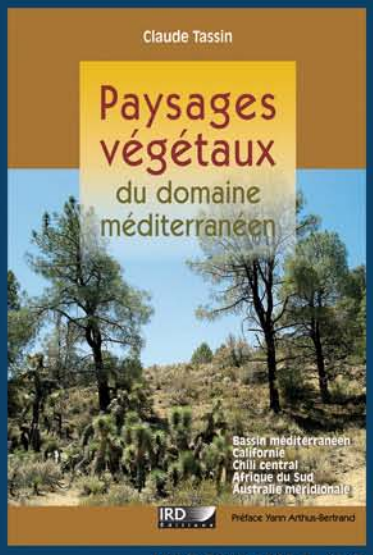
Stéphane Fay
Palais de la Découverte, Paris

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

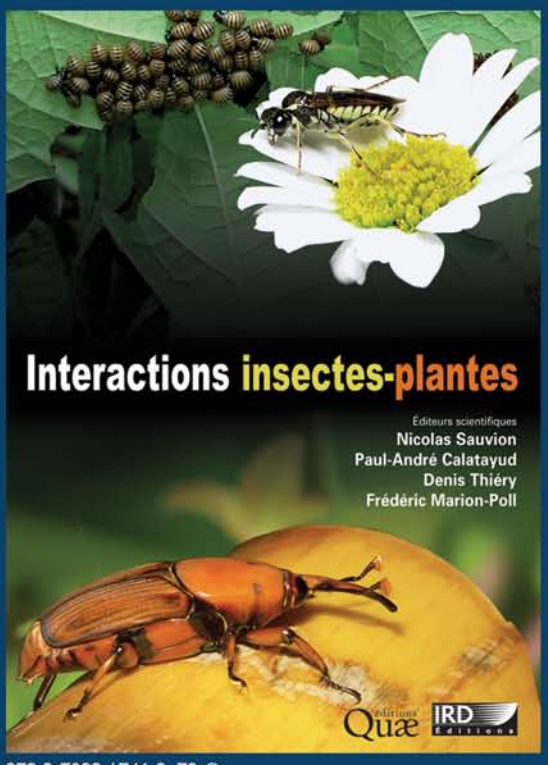
IRD Éditions

Institut de recherche pour le développement

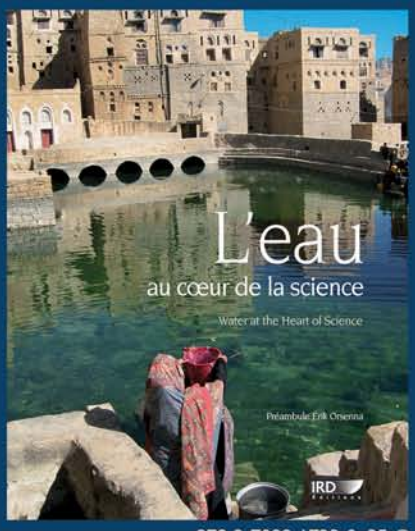
Un éditeur pour le développement



978-2-7099-1731-5 45 €

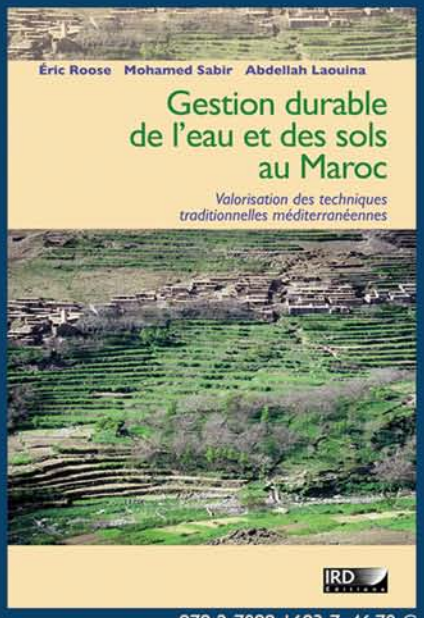


978-2-7099-1746-9 79 €

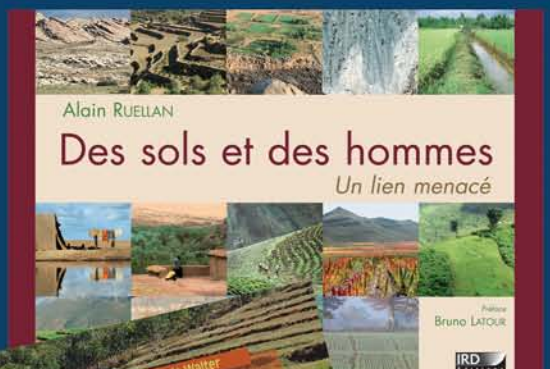


978-2-7099-1723-0 35 €

978-2-7099-1696-7 35,50 €

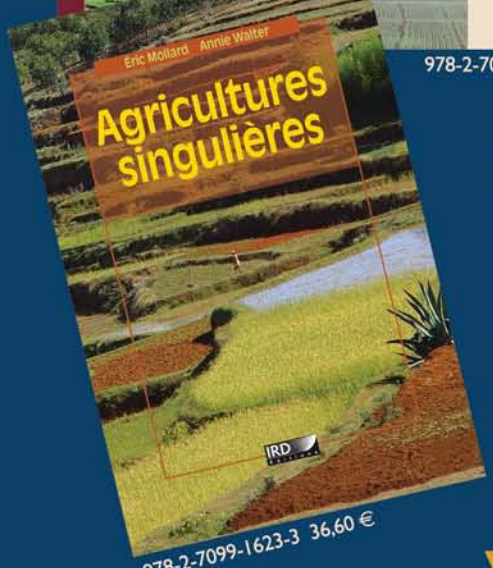


978-2-7099-1683-7 46,70 €



978-2-7099-1690-5 28,40 €

978-2-7099-1738-4 42 €



978-2-7099-1623-3 36,60 €

Diffusion libraires
Eyrolles/Géodif

Vente par correspondance
IRD Diffusion
32, av. Varagnat
F 93143 Bondy cedex
diffusion@ird.fr

www.edition.ird.fr

BLOC-NOTES

de Didier Nordon

CHRONIQUE DE L'ANACHRONIQUE

« Juger les hommes du passé sur les conséquences de leurs décisions est un anachronisme inadmissible. » « Nous avons désormais assez de recul pour juger. »

Ces affirmations se contredisent : si le recul aide à juger, c'est que les événements postérieurs apportent une information dont il faut tenir compte. Elles sont si banales, pourtant, qu'on les entend parfois venant d'une même bouche. Or je les crois toutes deux fausses !

Le recul n'aide pas au jugement, car il n'y a pas de jugement en histoire, mais de constantes réévaluations. Avoir plus de recul sur un événement ne signifie pas être plus proche d'un jugement fondé. Chaque époque analyse le passé à travers ses biais propres. Les hommes de la Renaissance évaluaient autrement que nous l'Antiquité : ils avaient leurs préoccupations, nous avons les nôtres.

Quant à l'anachronisme, il est absurde s'il est brutal (« Beethoven aurait aimé Mahler »), mais peut être éclairant s'il est subtil (« Y a-t-il des aspects de Beethoven dont on sent comment ils ont conduit à Mahler ? »). Chaque acteur est pris dans un courant né avant lui et destiné à lui survivre. Porté par ce courant, il en est aussi porteur. Ainsi, se dire de gauche ou de droite, ce n'est pas seulement prendre des positions aujourd'hui : c'est se sentir héritier de vieilles traditions, et se solidariser avec des projets qui ont toutes les chances d'évoluer longtemps encore. Enfin – à condition de ne pas oublier que le concept d'économie leur est postérieur – pourquoi s'interdire d'analyser certains événements de l'Antiquité à l'aide de considérations économiques ?

Autoriser ou interdire l'anachronisme ne change rien au fait que, de toute façon, nul n'est jamais en situation de porter un jugement irrévocable.

TO BUY OR NOT TO BUY..

En vente à l'épicerie, des fruits exotiques provenant d'un pays pauvre. Faut-il en acheter ?

Bien sûr ! Si peu que ce soit, cela aidera des paysans à survivre.

Surtout pas ! Transporter ces fruits gaspille de l'énergie, accroît la pollution, empoisonne l'environnement.

Bref, si vous achetez ces fruits, vous agissez selon votre devoir, si vous n'en achetez pas, vous agissez selon votre devoir.

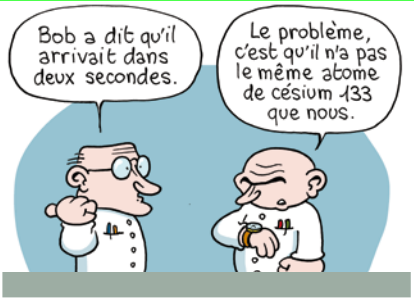
Cette situation relève d'un phénomène général : quoi que vous fassiez, il se trouve toujours un grand principe pour démontrer que vous vous comportez de la façon la plus immorale qui soit.

UNITÉS TRÈS PHYSIQUES

Si l'on mesurait encore les longueurs en coudées, en pieds, en brasses, et autres unités variant selon les provinces, et si la seconde était définie comme une certaine fraction du jour solaire moyen, nous ne disposerions ni de téléphones portables, ni d'Internet, ni de GPS. Ces appareils exigent que les unités de mesure soient les mêmes partout, et soient d'une précision extrême. Jadis, paraît-il, a existé une unité de longueur définie comme « égale à la distance entre le nez du roi Henri I^er^ d'Angleterre et le bout de son médium » : ce n'est pas avec elle qu'on aurait pu mettre au point le GPS !

Pour jouir des objets technologiques, nous avons fait un sacrifice. Les définitions actuelles du mètre et de la seconde ont toute la précision voulue, mais elles sont incompréhensibles à quiconque n'est pas physicien. Elles nous privent ainsi d'un rapport primordial à ce qui nous entoure : nous ne le mesurons plus à partir de nos corps et de nos perceptions. C'est une dépossession.

On ne gagne jamais sur tous les tableaux : cette idée est vieille, mais la technologie moderne ne la rend pas caduque.



UN ABSOLU RELATIF

À Bordeaux, aux intersections des rues avec les voies du tram, des panneaux portent l'injonction : « Rouge clignotant. Arrêt absolu. » Absolu ? Étrange. Les intersections entre rues ne sont pas munies d'une telle sommation : faut-il en déduire que l'obligation de s'arrêter au feu rouge y est toute relative ? Écartons cette interprétation incivique ! Raisonnons plutôt en scientifiques. Les feux aux intersections des rues imposent un arrêt non pas absolu, mais relatif à un repère – qu'on peut supposer lié à la Terre. Les feux des intersections avec le tram, eux, imposent un arrêt absolu : l'automobiliste ne doit pas quitter le point de l'Univers où il se trouve quand le feu se met à clignoter.

La notion d'immobilité absolue d'un point dans l'Univers n'a pas grand sens, je crois, mais qu'importe. Si j'étais policier, je me ferais une joie de verbaliser un automobiliste arrêté à un feu rouge clignotant, au motif qu'il est arrêté relativement à la Terre, alors qu'il devait s'arrêter dans l'absolu. ■

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Mai 2014 – N° d'édition M0220439-01 – Commission paritaire n° 0912 K 82029 – Distribution : NMPP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 101/189 206 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

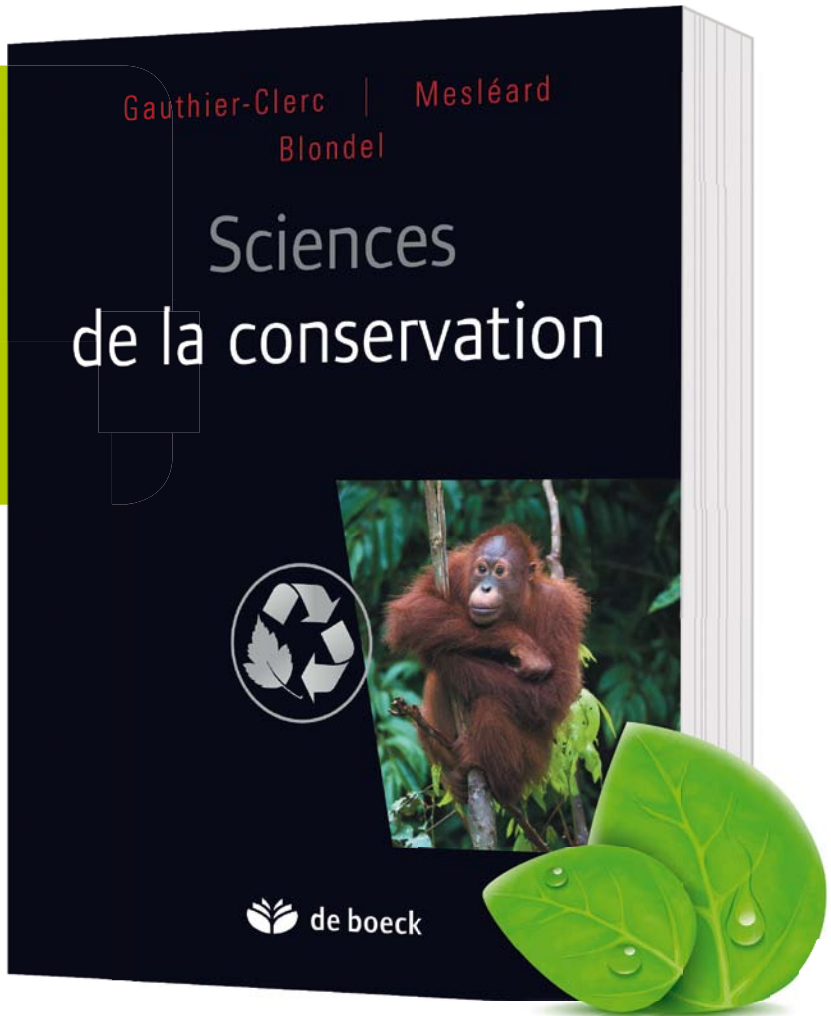
L'environnement dans toute sa...

biodiversité

La **biodiversité** est en plein bouleversement et nécessite des connaissances précises issues de toutes les disciplines scientifiques pour aider à sa **conservation**. Ce livre constitue une véritable **référence** en la matière.

POINTS **FORTS**

- De nombreuses illustrations en couleurs
- Un glossaire complet
- Des focus présentant des études de cas pratiques, des notions particulières et différents points de vue scientifiques
- Une multitude d'exemples concrets



Sciences de la conservation

M. Gauthier-Clerc
F. Mesléard, J. Blondel

370 pages • 21,5 x 27,5 cm
Édition 2014 • 54 €

En librairie ou sur www.deboeck.fr

de boeck

MACMILLAN
SCIENCE COMMUNICATION

Scientific **Editing**

Services d'édition aux standards de *Nature* et de conseil pour manuscrits scientifiques

Les éditeurs de **MSC Scientific Editing** savent aller à l'essentiel et comprendre n'importe quel texte scientifique, que ce soit un article rédigé pour le soumettre à un journal, une demande de bourse ou tout autre document technique. Le processus d'édition est réalisé avec une connaissance approfondie des besoins d'une publication scientifique dans un journal à facteur d'impact élevé.

Ces services incluent de nombreuses améliorations détaillées, des commentaires précis et un rapport écrit contenant :

- Des commentaires constructifs et des conseils utiles sur la façon de présenter au mieux vos recherches
- Une étude des principaux points à revoir
- Des recommandations sur le journal le mieux adapté à l'article que vous souhaitez publier (si nécessaire)

Vous pouvez bénéficier d'une réduction de 10% sur votre premier projet d'édition en entrant le code **SE_ADF14** au cours du chargement de votre article ou avec votre email.

Nos éditeurs savent ce qu'il faut faire pour publier dans les meilleurs journaux.
Confiez-leur vos manuscrits dès aujourd'hui!

msc.macmillan.com

Nature Publishing Group editorial and publishing decisions are independent of MSC services

Exclusive partner of Nature Publishing Group, publisher of Nature *and* Scientific American

MACMILLAN
SCIENCE COMMUNICATION