

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 Royet, 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 Inchcombe. 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 tra-
duction, 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 par-
tiellement la présente revue sans autorisa-
tion de l'éditeur ou du Centre français de l'ex-
ploitation du droit de copie (20, rue des
Grands-Augustins - 75006 Paris).



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). ■

1 Édito

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

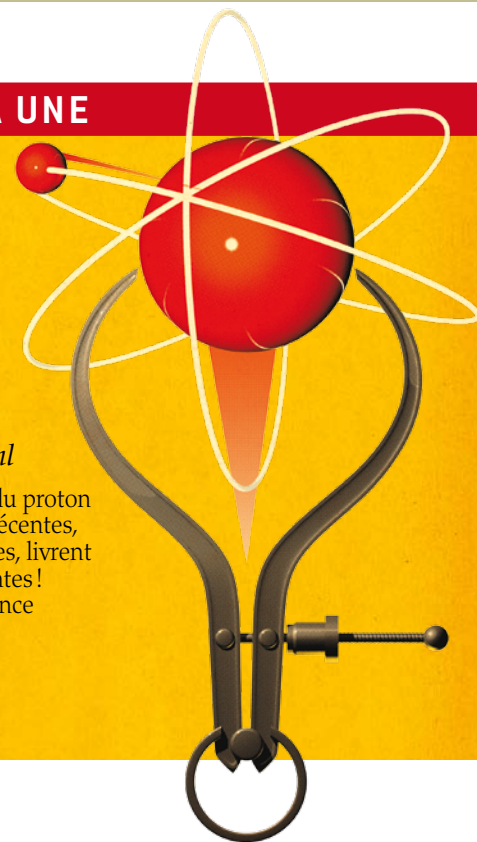
Ce numéro comporte un encart livre Pour la Science jeté à 40 000 ex dans diffusion France, ainsi que deux encarts d'abonnement à Pour la Science brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © Tavis Coburn

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**

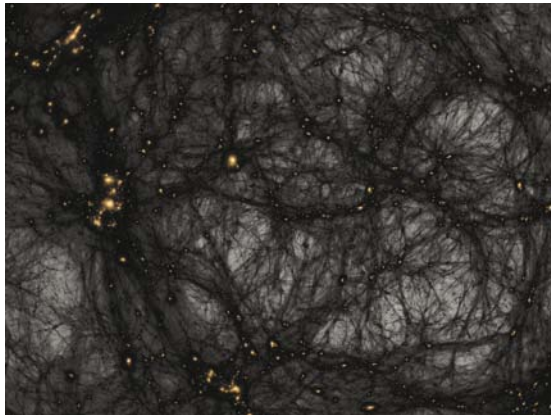
Kyle Wesson et Todd Humphreys

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.

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

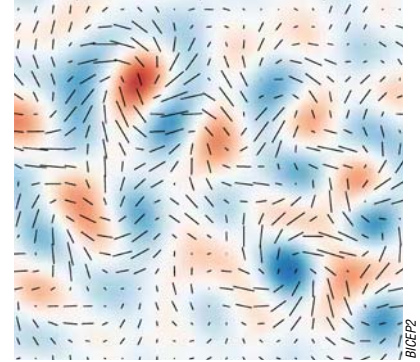
maintenant sur www.pourlascience.fr

* Numéros à lire en ligne ou téléchargeables en PDF, en vente à l'unité ou accessibles par abonnement.





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
<http://arxiv.org/abs/1403.3985>



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 tolère-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).

D. Canestrari et al.

Les observations sur 741 nids de corneilles révèlent en effet que ces 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. Canestrari et al., *Science*, en ligne le 27 mars 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.

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 frot-



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

© Enrico Fonda

ttements 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.

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 !

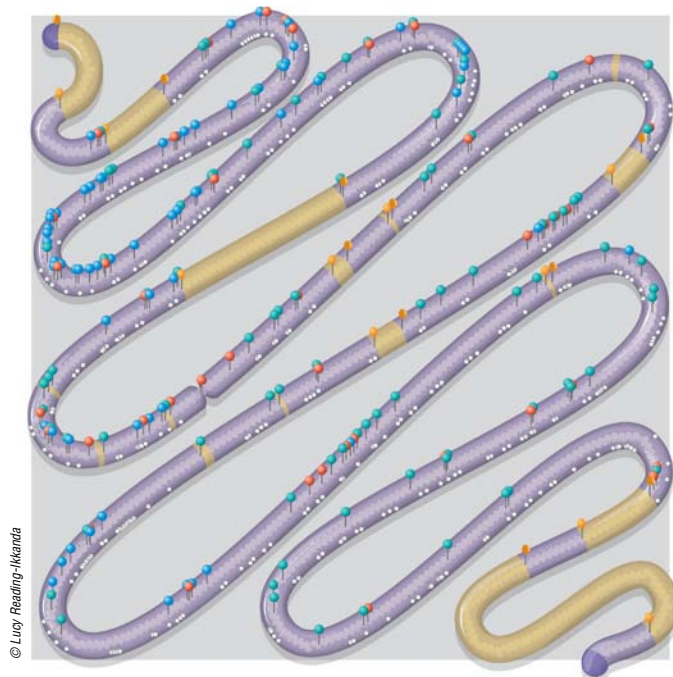
Sean Baillly

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

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.



© Lucy Reading-Ikkanda



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 le 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 déclen-

cher 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 Sinai, 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 Sinai, 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. Sinai 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-Sinai, 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



Yakov Sinai, spécialiste de la théorie des systèmes dynamiques.

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. Sinai a notamment étudié comment, pour de tels systèmes dynamiques, l'analyse statistique permet de faire des prévisions précises.

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. Sinai 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. Sinai, 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 Sinai, les mesures de Sinai-Ruelle-Bowen ou encore la théorie de Pirogov-Sinai. 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 25 000 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.

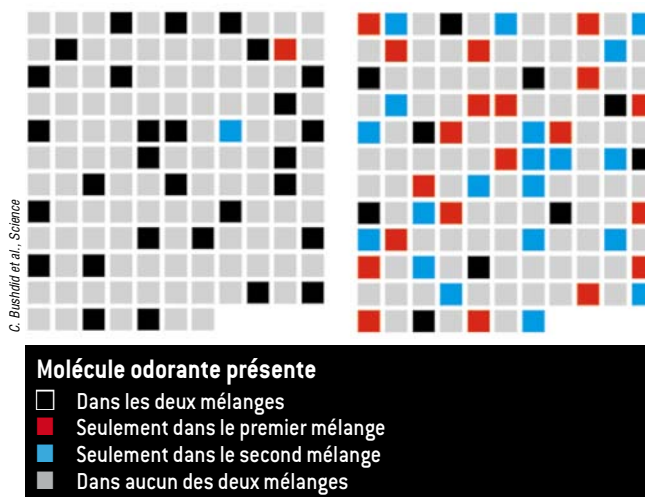
Neurophysiologie

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, des 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 Zlatić, 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



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

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.

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 « jeunesse » 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.

J. 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 désinclinations, 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 régaleront. 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.

Coques 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

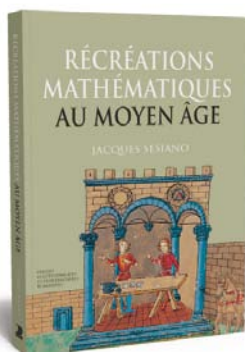
LES RUPTURES FERTILES

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 événement, 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 Âge.

300 pages, ISBN 9782880744984

TRACES D'ARMES À FEU

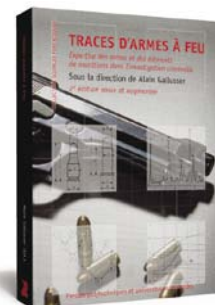
Expertise des armes et des éléments de munitions dans l'investigation criminelle

2^e 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 10^e 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

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.

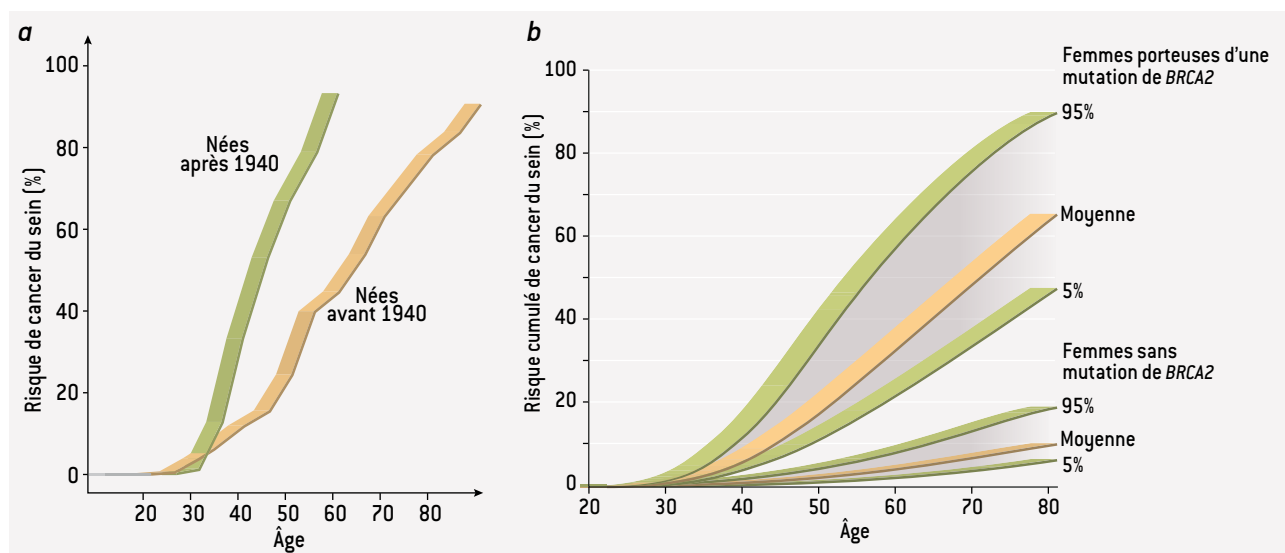
les capacités d'analyse des laboratoires de génétique à visée médicale. Il autorise, pour des maladies fréquentes, l'exploration de nouveaux gènes associés à une maladie donnée, jusque-là peu analysés, car sièges de mutations rares. Il permet d'élargir les critères de prescription des tests génétiques. 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'ana-

lyse 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.

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



D'après (a) King et al., Science, 2003 et (b) Milne et Antoniou, Annals of Oncology, 2011

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. Voudrions-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.

Ces 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.

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.

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

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