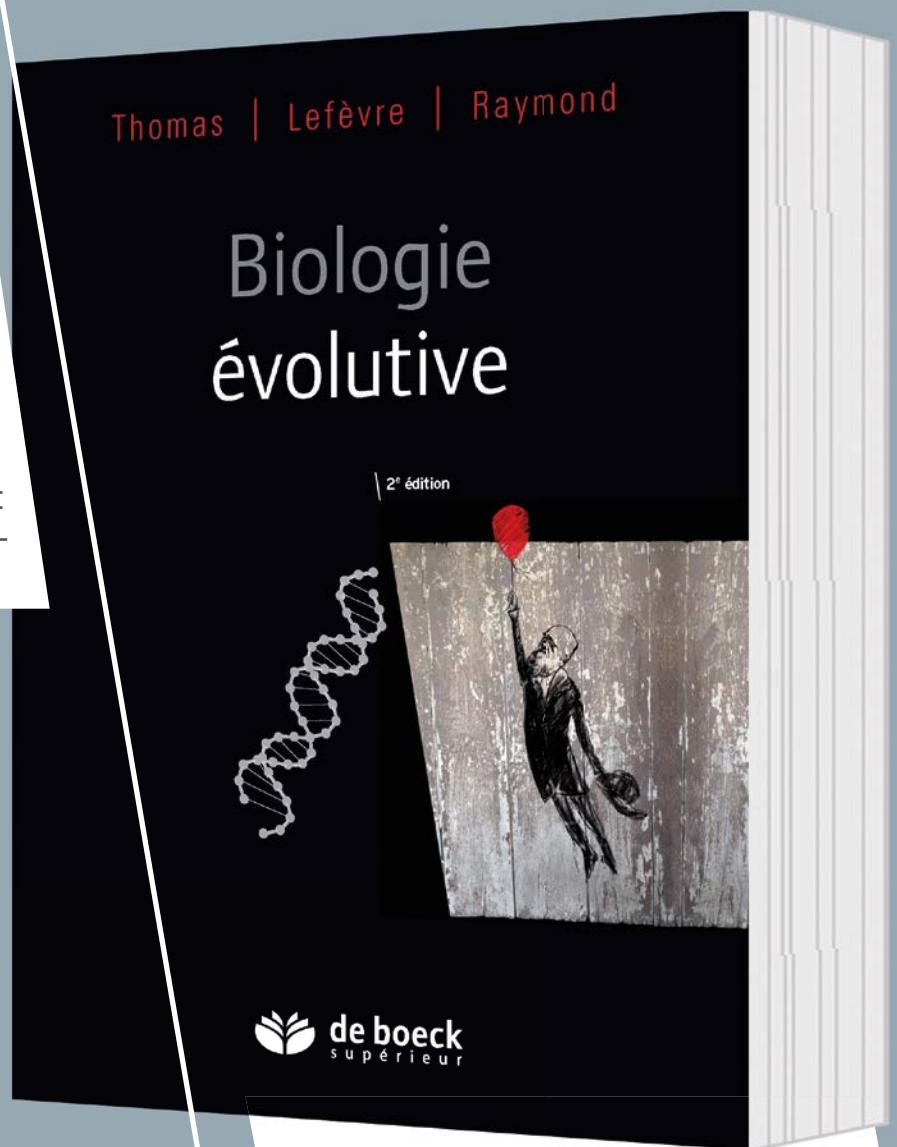


Biologie évolutive

2^e édition

Ce livre est une invitation à découvrir la biologie évolutive. Œuvre issue de la collaboration de nombreux chercheurs et enseignants, il reflète l'état des connaissances de la communauté scientifique en biologie évolutive et constitue le support idéal pour l'enseignement de la discipline.



Cette seconde édition aborde tous les grands thèmes de la biologie évolutive dans une version actualisée et enrichie de nouveaux chapitres. L'ouvrage, unique en langue française, présente ainsi un panorama étonnant du monde vivant et reste une œuvre à la pointe de la recherche dans ce domaine.

Avril 2016 • 1000 pages
92 € • 97828073029

Sous la direction de :
Frédéric Thomas
Michel Raymond
Thierry Lefevre

En librairie et sur www.deboecksuperieur.com

 **de boeck**
supérieur

■ POUR LA
SCIENCE
www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

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

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble

Marketing : Laurence Hay et Ophélie Maillat,

assistées de Marie Chaudy

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Jean-François Baroiller, Nicolás Bernal, Maud Bruguère,

Sophie Félix, Évelyne Host-Platret, Capucine Jahan,

François Képès, Anne Masé, Christophe Pichon, Bruno Poucet

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

[jf.guillotin@pourlascience.fr]

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 06 82 80 52 92

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne : <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science,

19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

COMMANDES 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

Information/modification de service/réassort :

Magazine disponible sur www.direct-editeurs.fr

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.

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors :

Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher,

Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.

President : Keith McAllister. 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 traduc-

tion, d'adaptation et de représentation réservés

pour tous les pays. La marque et le nom com-

mmercial « 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 inter-

dit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de co-

pie [20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris].



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Où suis-je, où vais-je ?

Si l'on veille à les prendre au premier degré, ces questions semblent si élémentaires que nous ne nous les posons qu'exceptionnellement. D'ordinaire, nous savons d'emblée, à tout moment, où nous sommes et où nous allons : pas besoin de réfléchir pour savoir que nous nous trouvons dans la cuisine et que nous devons rejoindre la salle à manger, ni pour déterminer l'itinéraire correspondant !

La capacité à s'orienter dans l'espace est certes répandue chez les animaux et essentielle à leur survie, mais ses rouages n'ont, si l'on y réfléchit un peu, rien d'évident. Comment le cerveau d'un animal détermine-t-il sa position et le chemin qu'il doit parcourir ?

Les scientifiques n'ont commencé à obtenir des réponses substantielles à la question qu'assez récemment. Bien qu'elles soient encore incomplètes, ces découvertes sont suffisamment importantes et spectaculaires pour avoir été distinguées par le prix Nobel de physiologie-médecine en 2014.

Des neurones spécialisés qui cartographient l'espace, une découverte nobélisée

Deux des trois lauréats, les époux norvégiens May-Britt et Edvard Moser, nous expliquent dans ce numéro ce que l'on a appris du « GPS cérébral » des mammifères grâce à des expériences sur les rats. Ils nous révèlent notamment les remarquables profils d'activité de certains neurones clés, tels que les « cellules de lieu » et les « cellules de grille », qui cartographient littéralement l'espace (voir « Le GPS de notre cerveau », pages 26 à 34).

Le système cérébral de localisation et d'orientation a par ailleurs des liens étroits avec les circuits de la mémoire. D'où, probablement, sa vulnérabilité précoce dans la maladie d'Alzheimer. Hélas, cela ne nous aidera pas à comprendre une autre maladie trop répandue, où des individus déboussolés prennent des trajectoires mortifères tout en ayant la prétention de savoir où ils vont : l'extrémisme. ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 **Le génome réduit à sa plus simple expression**
- 7 **Comment Zika s'attaque aux neurones**
- 8 **Une nouvelle régularité dans la suite des nombres premiers**
- 9 **Vision ultrarapide chez les passereaux**
- 9 **Alzheimer : faire revenir des souvenirs**



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Science et responsabilité : une réflexion collective s'impose
Léo Coutellec
- 16 **Entretien**
Apple et le FBI : « Un système de chiffrement muni d'une trappe serait catastrophique »
David Pointcheval
- 20 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Les classiques à la lumière des données massives
Gérald Bronner
- 22 **Homo sapiens informaticus**
Quel est le prix de notre anonymat ?
Gilles Dowek
- 24 **Lu sur SciLogs.fr**
Le pivot copernicien
Richard Taillet

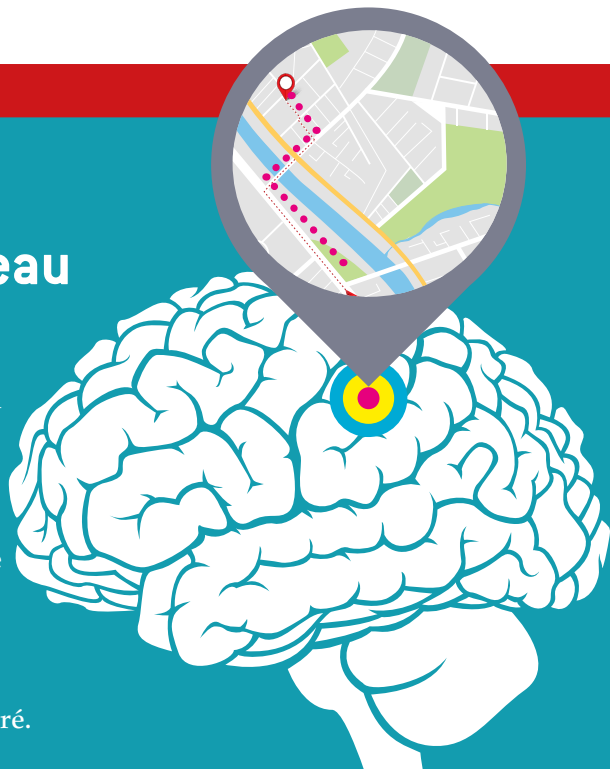
Ce numéro comporte un encart d'abonnement broché et un encart d'abonnement jeté en cahier intérieur sur la diffusion kiosque en France.
En couverture : © shutterstock.com/Alena Hovorkova

À LA UNE

26 NEUROSCIENCES **Le GPS de notre cerveau**

May-Britt Moser et Edvard Moser

Le sens de l'orientation n'est pas un mythe : notre cerveau est bien doté d'un système de localisation et de navigation hors pair. La découverte récente de ce GPS biologique a valu le prix Nobel aux époux Moser, qui nous décrivent ici ce système et son fonctionnement élaboré.



36 ASTROPHYSIQUE **Les multiples visages de la matière noire**

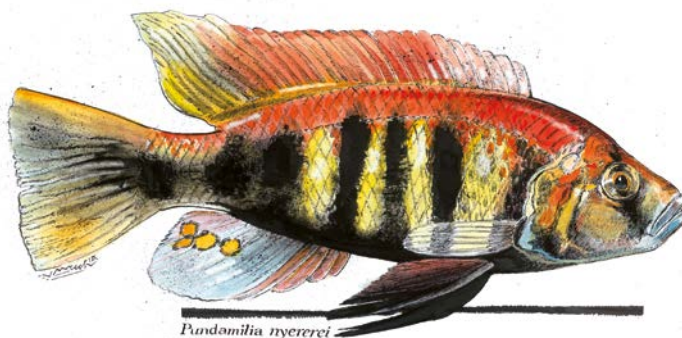
Bogdan Dobrescu et Don Lincoln

Pourquoi n'a-t-on toujours pas détecté la matière noire, censée être majoritaire dans l'Univers ? Parce qu'elle n'existe pas ? Ou parce qu'elle est bien plus complexe qu'on ne le pensait, comme le proposent de nouveaux modèles ?

44 ÉVOLUTION **Cichlidés : les clés d'une spectaculaire évolution**

Axel Meyer

Les poissons cichlidés comptent plus de 2500 espèces, dont beaucoup sont apparues en moins de 15 000 ans. Chez les vertébrés, il s'agit d'un record absolu, dont les ressorts sont tapis dans le génome.



52 MÉDECINE Quelles pistes pour soigner la DMLA ?

*Benjamin Wolff, Martine Mauget-Faïsse
et José-Alain Sahel*

À partir de 65 ans, la vision centrale d'une personne sur cinq se dégrade progressivement à cause de cette maladie de la rétine liée à l'âge. Les traitements actuels sont limités voire inexistant pour la forme sèche de la maladie. Mais de nouvelles thérapies devraient bientôt changer la donne.



62 ARCHÉOLOGIE L'Amazonie, une terre promise pour l'archéologie

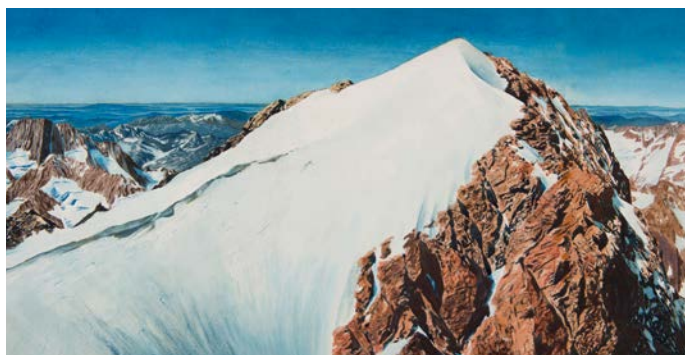
Stéphen Rostain

Sanctuaires de pierre, routes de 40 mètres de large, cités perchées sur d'imposants tertres de coquillages... De récentes fouilles révèlent le passé et la longue et riche histoire des Amazoniens, totalement méconnue jusqu'à ce jour.

70 HISTOIRE DES SCIENCES Paul Helbronner, le métronome de l'inutile

Daniel Léon

Entre 1903 et 1928, ce géodésien aujourd'hui oublié a gravi plus de sommets que quiconque dans les Alpes françaises. Avec une touchante obstination, il a mesuré le moindre recoin du massif... alors que de nouveaux instruments allaient bientôt rendre son travail obsolète. Restent ses magnifiques aquarelles et son immense collection de photographies.



Rendez-vous

78 Logique & calcul

Au pays des illuminés du nombre π
Jean-Paul Delahaye

La suite des décimales de π constitue un terrain de recherches et de jeux, ouvert à tous pour le meilleur... et pour le pire !

84 Science & fiction

L'imaginaire cristallisé

J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science

Bienvenue en Floride !

Loïc Mangin



89 Idées de physique

L'énergie du sel

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

92 Question aux experts

D'où viennent les comètes ?

Alain Doressoundiram

94 Science & gastronomie

Le beurre est bon, qu'il soit cru ou noisette

Hervé This

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

SCIENCE.fr

LETTRE D'INFORMATION



Ne manquez pas
la parution
de votre magazine
grâce à la NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



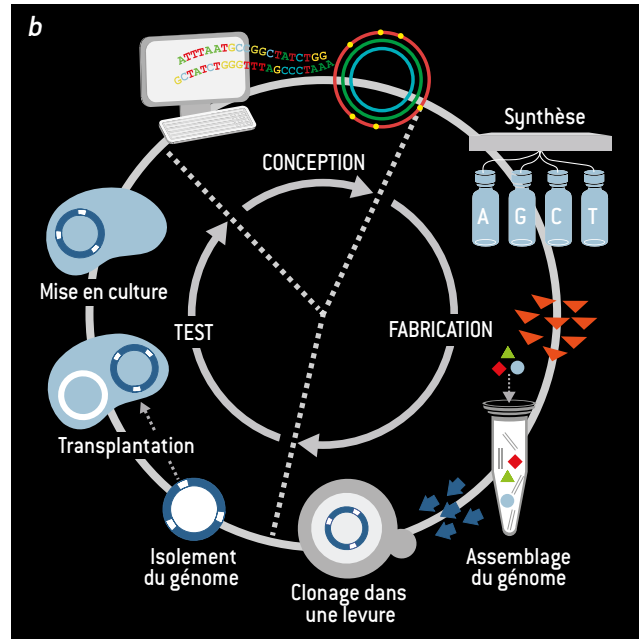
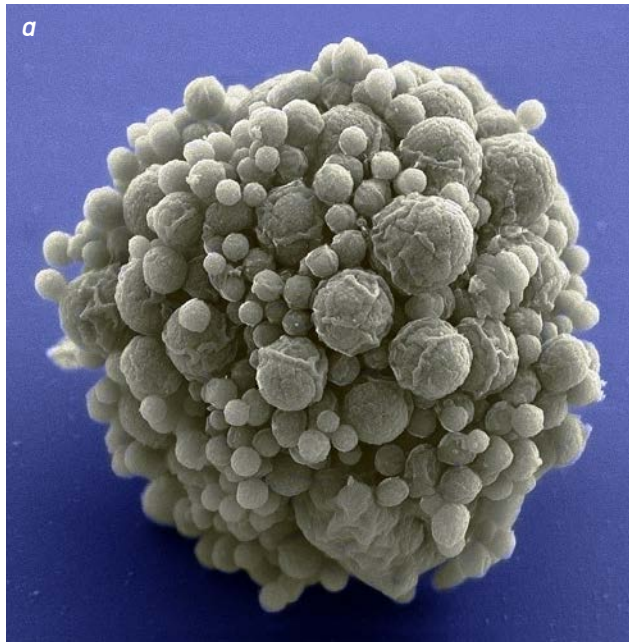
Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

Actualités

Biologie

Le génome réduit à sa plus simple expression

En éliminant progressivement des gènes, une équipe de biologistes a produit une cellule viable avec un génome artificiel formé de 473 gènes seulement – dont un tiers ont une fonction inconnue !



Un amas de cellules artificielles au génome minimal (a) a été obtenu par un processus circulaire d'essais et d'erreurs (b). Un génome est conçu à l'aide d'un ordinateur, puis assemblé à partir de nucléotides. Il est ensuite transplanté dans une cellule de bactérie dont on retire le génome d'origine. Une mise en culture permet de s'assurer que la cellule est viable et se réplique.

La nature a produit des génomes de toutes tailles. Par exemple, celui du blé compte plus de 120 000 gènes, celui de l'homme environ 20 000, quelques centaines ou milliers pour les bactéries... D'où une question qui interpelle les généticiens depuis longtemps : combien de gènes sont nécessaires pour produire une cellule viable et capable de se répliquer ? L'équipe de Craig Venter, cofondateur de l'institut qui porte son nom, à La Jolla en Californie, répond en partie à cette énigme. Elle a réalisé une telle cellule avec seulement 473 gènes.

Ce résultat est une étape importante de la biologie de synthèse, domaine scientifique dont l'un des objectifs est de construire de nouveaux systèmes biologiques pour mieux comprendre

les mécanismes du vivant. Pour Craig Venter et son équipe, la quête du génome minimal a commencé en 1995, lorsqu'ils ont séquencé le génome de *Mycoplasma genitalium*, une bactérie vivant dans le conduit urinaire humain et ne présentant que 517 gènes. C'est l'un des plus petits génomes connus pour un organisme capable de s'autorépliquer (un virus peut présenter encore moins de gènes, mais il doit infecter une cellule afin d'en détourner les fonctions et se répliquer).

En 2010, l'équipe de Craig Venter a synthétisé une réplique du génome de *Mycoplasma mycoides* (un parasite des ruminants qui a l'avantage de se répliquer plus vite que *M. genitalium*) et l'a substituée au matériel génétique d'une cellule d'une autre espèce

de mycoplasme. L'expérience a démontré la possibilité de synthétiser chimiquement à grande échelle de l'ADN et de l'injecter dans une cellule pour produire un organisme viable. Les chercheurs se sont ensuite servis de ce génome de synthèse pour déterminer les gènes indispensables ou superflus à la vie de la cellule.

Les biologistes ont d'abord sélectionné et inactivé eux-mêmes les gènes qui leur semblaient inutiles, à partir des connaissances du fonctionnement d'une cellule, mais l'approche était inefficace. Ils ont alors changé de stratégie et procédé par tâtonnement. Le génome de *M. mycoides* a été coupé en plusieurs éléments, qui pouvaient être assemblés tous ou en partie. En testant alors la viabilité de la cellule munie du génome

recombiné, les chercheurs ont éliminé, par essais successifs, les gènes non indispensables.

Le résultat final est une cellule de synthèse, nommée JCVI-syn3.0, comprenant 473 gènes. Parmi eux, 41 % participent à la régulation de l'expression du génome, 18 % à la structure et aux fonctions de la membrane, 17 % au métabolisme et 7 % à la préservation de l'information génétique. Certains gènes n'ont été ainsi classés que grâce à l'étude de leur structure, car leur rôle précis dans la cellule n'a pu être identifié, et, par ailleurs, la fonction de 79 gènes est totalement inconnue. Au total, 149 gènes ont un rôle non identifié, ce qui représente près d'un tiers du matériel génétique ! Les chercheurs s'attendaient à trouver des gènes dont le rôle serait inconnu,

Médecine

Comment Zika s'attaque aux neurones

Alors que l'épidémie du virus Zika se poursuit sur le continent sud-américain et aux Caraïbes, le nombre de manifestations neurologiques associées au virus s'est multiplié. Des chercheurs ont précisé comment le virus s'en prend au système nerveux. Le point avec Annie Lannuzel, professeure de neurologie au centre hospitalo-universitaire de Pointe-à-Pitre, en Guadeloupe, et chercheuse Inserm à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière, à Paris.

mais pas plus de 10%... Pour Jack Szostak, biochimiste à l'université Harvard, «le plus intéressant dans ce résultat est qu'il montre ce que nous ne savons pas».

La performance de l'équipe de Craig Venter indique qu'il y a encore beaucoup à découvrir sur les fonctions indispensables à la vie. Par ailleurs, dépouillée de toute complexité inutile, la cellule JCVI-syn3.0 pourra servir de base à de nombreux travaux fondamentaux. Par exemple, les biochimistes l'utiliseront comme plateforme pour y étudier des fonctions précises qu'ils ajouteront une à une.

Cependant, il ne faut pas voir en JCVI-syn3.0 la cellule minimale universelle. À partir d'une autre bactérie que *M. mycoides*, le génome minimal aurait pu être très différent. François Képès, de l'Institut de biologie systémique et synthétique de Genopole, à Evry, souligne que «certains principes quasi universels pourraient émerger d'une telle approche. Pour cela, il faudrait non pas fabriquer un génome viable, mais toute une série, afin de tester par comparaison certaines hypothèses sur ce qui rend un génome fonctionnel, ce qui le rend stable, etc.»

JCVI-syn3.0 a un cycle de répllication de trois heures et requiert un milieu de croissance riche et coûteux. Ce n'est pas économiquement intéressant, mais Craig Venter espère exploiter le potentiel de la biologie de synthèse afin de créer des fonctionnalités cellulaires sur mesure et produire des composants destinés au secteur pharmaceutique ou chimique. Dès lors, plus que jamais, une réflexion éthique est nécessaire pour encadrer l'usage de tels outils.

Sean Bailly

Science, vol. 351, p. 1414, 2016

Quelles manifestations neurologiques ont été associées au virus ?

Annie Lannuzel : L'infection par le virus Zika peut provoquer des syndromes de Guillain-Barré – une atteinte du nerf périphérique –, détectés notamment lors de l'épidémie de Polynésie française entre octobre 2013 et mai 2014, où le nombre de cas a été multiplié par 20. Les 42 cas ont *a posteriori* été rattachés au virus Zika, car des anticorps contre le virus ont été retrouvés chez tous. Plus récemment, des atteintes du système nerveux central ont été décrites sur des cas isolés : une myélite (inflammation de la moelle épinière avec déficit moteur des quatre membres) survenue mi-janvier chez une jeune femme de 15 ans, et une encéphalite chez un patient de 81 ans. Dans les deux cas, le virus était présent dans le liquide céphalorachidien, ce qui n'est pas le cas avec Guillain-Barré, qui survient au décours de l'infection.

Et chez les fœtus et les nouveau-nés ?

A. L. : Le lien entre microcéphalie et infection par le virus Zika est maintenant établi : le virus a été détecté dans le tissu cérébral de fœtus après avortement, ainsi que dans le liquide amniotique. On observe aussi, chez les femmes enceintes infectées, une augmentation des anomalies

échographiques. Le risque de microcéphalie est estimé à 1% et semble plus élevé lorsque l'infection est contractée durant le premier trimestre de grossesse.

Pourquoi ne s'aperçoit-on que maintenant de ces complications ?

A. L. : Zika est un flavivirus, comme le virus de la dengue, transmis par le même moustique et entraînant parfois des myélites ou des encéphalites. Pourquoi n'a-t-on pas découvert ces



Annie Lannuzel, professeure au CHU de Pointe-à-Pitre

pathologies dans des épidémies de Zika antérieures, notamment celle qui a sévi sur l'île de Yap (Micronésie) en 2007 ? Soit les manifestations n'existaient pas, puis le virus s'est transformé, soit elles n'ont pas été repérées. Nous n'avons pas encore les moyens de répondre.

Comment le virus agit-il sur les neurones ?

A. L. : En mars, une étude coordonnée par Guo-li Ming, de l'université Johns Hopkins, a donné des éléments de réponse,

notamment concernant la microcéphalie. Les biologistes ont montré *in vitro* que des précurseurs de neurones peuvent être infectés par le virus. Zika s'y réplique, entrave la progression du cycle cellulaire et diminue la croissance de ces précurseurs, voire entraîne leur mort cellulaire. Il altère aussi l'expression de gènes, dont certains sont impliqués dans la transcription de l'ADN en ARN. Les neurones matures sont en revanche moins sensibles au virus. Hormis chez le fœtus, on n'a pas d'indication sur sa capacité à envahir le système nerveux. L'action du virus peut être directe, par infection des neurones ou des cellules gliales, ou liée à l'inflammation qu'il entraîne. Cela reste à étudier.

Qu'impliquent ces découvertes sur Zika ?

A. L. : Dans notre démarche diagnostique au quotidien, nous avons intégré la composante Zika. Devant tout tableau neurologique évocateur, nous recherchons la présence du virus ou de ses anticorps. Le diagnostic d'infection par Zika doit cependant être amélioré. Il reste aussi beaucoup à apprendre sur les manifestations neurologiques dues à Zika ou à d'autres virus. En effet, dans de nombreuses situations cliniques, l'agent infectieux reste inconnu.

Marie-Neige Cordonnier

Mathématiques

Une nouvelle régularité dans la suite des nombres premiers

La répartition des nombres premiers semble en grande partie aléatoire. Deux mathématiciens viennent toutefois de mettre en évidence une propriété passée inaperçue : deux nombres premiers successifs se terminent par le même chiffre plus rarement qu'attendu.



246

On a démontré qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers séparés de 246 unités. Le cas des nombres premiers jumeaux, séparés de deux unités, reste à prouver.*

Les nombres premiers occupent une place particulière en mathématiques. Depuis des millénaires, les mathématiciens décortiquent les propriétés de ces entiers qui ne sont divisibles que par 1 et par eux-mêmes. Kannan Soundararajan et Robert Lemke Oliver, de l'université Stanford aux États-Unis, viennent de découvrir une propriété étonnante portant sur le chiffre par lequel se terminent deux nombres premiers consécutifs.

Les mathématiciens savent que la répartition des nombres premiers n'est pas complètement aléatoire : on connaît des régularités, tel le biais de Tchebychev selon lequel il y a plus de nombres premiers de la forme $4k+3$ que $4k+1$. Kannan Soundararajan et Robert Lemke Oliver viennent de mettre en évidence un autre biais : si l'on considère par exemple un nombre premier se terminant par le chiffre 9, le suivant a 65% de chance de plus de se terminer par 1 que par 9.

Ce qui a étonné les chercheurs est que ce biais est beaucoup plus

fort que le biais de Tchebychev. Les deux chercheurs ont ainsi montré numériquement (en analysant 400 milliards de nombres premiers) que les nombres premiers se terminant par le même chiffre ont tendance «à se repousser». Personne ne l'avait remarqué jusqu'à présent.

Comment expliquer qu'il soit plus rare de trouver deux nombres premiers consécutifs ayant le même chiffre final ? La première idée est la suivante. Prenons par exemple le nombre premier 43. Les nombres potentiellement premiers qui suivent sont 47, 49 et 51, avant d'arriver à 53 qui se termine aussi par un 3. Il serait donc plus vraisemblable de tomber sur un nombre premier se terminant avec un autre chiffre (et de fait, 47 est premier). L'argument est intuitivement sensé, mais il ne permet pas d'expliquer l'importance du biais.

L'explication se cacherait dans une conjecture proposée par les mathématiciens britanniques Godfrey Hardy et John Littlewood en 1923. Celle-ci

donne une estimation de la fréquence d'apparition de certaines structures de nombres premiers nommés k -tuples, par exemple les doublets de nombres premiers séparés de deux unités (aussi nommés nombres premiers jumeaux, tels 17 et 19), mais aussi des triplets, des quadruplets, etc. Cette conjecture, très générale, englobe par exemple la conjecture des nombres premiers jumeaux, qui suppose qu'il existe une infinité de telles paires.

En examinant de plus près la conjecture de Hardy et Littlewood, on obtient des corrélations sur les derniers chiffres des nombres premiers qui se suivent. Et ces résultats correspondent parfaitement aux observations de Kannan Soundararajan et Robert Lemke Oliver.

Les mathématiciens s'interrogent : ce biais est-il juste une bizarrerie des nombres premiers ou a-t-il un sens plus fondamental qui pourrait avoir une influence sur d'autres de leurs propriétés ?

S. B.

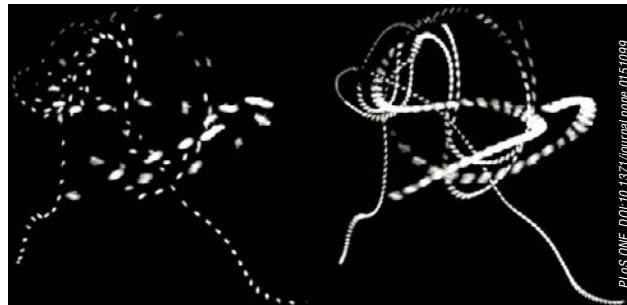
<http://arxiv.org/abs/1603.03720>

Zoologie

Vision ultrarapide chez les passereaux

Quand une lumière clignote à plus d'une soixantaine de hertz, l'œil humain n'est plus capable de percevoir les alternances lumière-obscurité. Qu'en est-il chez d'autres animaux ? Anders Ödeen et ses collègues, des universités d'Uppsala et de Stockholm, en Suède, ont mesuré cette capacité chez trois espèces de passereaux, et ont trouvé que ces oiseaux ont une vision au moins deux fois plus rapide que la nôtre : son pouvoir de résolution temporelle va jusqu'à 145 hertz !

Les zoologistes suédois ont réalisé des expériences sur la mésange bleue, le gobe-mouche à collier et le gobe-mouche noir. Elle consistaient à présenter aux oiseaux deux types de signaux lumineux émis par des LED : une lumière perçue comme constante (la fréquence de clignotement, due à la fréquence de la source électrique, dépassait les 2000 hertz), et une lumière clignotant à une fréquence réglable. Les oiseaux étaient entraînés de façon à ce qu'ils préfèrent s'approcher de



Le vol de deux mouches filmé à 40 (à gauche) et 120 (à droite) images par seconde. La première fréquence correspond à celle d'un œil humain, la seconde à celle d'un œil de gobe-mouche...

l'une des deux sources, une récompense alimentaire étant à la clé.

Cette procédure a permis de mesurer, pour diverses intensités lumineuses, la fréquence maximale perçue par chaque oiseau, au-delà de laquelle il était incapable de distinguer les deux sources de lumière. En moyenne, elle est d'environ 130-140 hertz pour les trois espèces étudiées. Cela dépasse d'une cinquantaine de hertz la plus haute fréquence mesurée chez les autres vertébrés, ainsi que les valeurs attendues par

un modèle fondé sur la masse corporelle et le rythme métabolique.

La sélection naturelle semble donc avoir favorisé une vision rapide chez ces espèces, qui se déplacent de façon agitée dans un environnement arbusatif encombré et se nourrissent d'insectes attrapés parfois en vol. On peut alors s'attendre à ce que la plupart des passereaux aient une vision moins perçante que celle d'un aigle, mais bien plus rapide.

Maurice Mashaal

PLoS ONE, en ligne le 18 mars 2016

Kawashima contre sclérose

Avec ses calculs et ses puzzles, le jeu d'entraînement cérébral du Dr. Kawashima, édité par la société Nintendo, ne « rajeunit » pas notre cerveau en améliorant nos aptitudes cognitives – si nous sommes en bonne santé. En revanche, il est bénéfique pour certains patients atteints de sclérose en plaques, selon Laura De Giglio et ses collègues, de l'université de Rome. Dans cette maladie, le système immunitaire détruit la gaine des prolongements neuronaux, ce qui gêne la circulation des signaux nerveux. Les symptômes dépendent des régions nerveuses touchées et peuvent être des troubles de la mémoire, de l'attention, de la planification... Or les patients qui se sont adonnés pendant 2 mois au jeu, à raison de 5 sessions de 30 minutes par semaine à domicile, ont amélioré leurs facultés cognitives. Et les bénéfices observés étaient liés à une augmentation de la connectivité du thalamus, une plaque tournante cérébrale qui permet entre autres de prendre des décisions.

Neurosciences

Alzheimer : faire revenir des souvenirs

Les patients atteints de la maladie d'Alzheimer depuis peu de temps souffrent essentiellement de troubles de la mémoire à long terme dite épisodique (celle qui permet de nous souvenir d'événements du passé avec leur contexte – date, lieu, émotions associées). Ces troubles sont dus au dysfonctionnement de neurones dans l'hippocampe, une région cérébrale surtout impliquée dans l'encodage, la consolidation et le rappel des souvenirs. Mais ces derniers ont-ils disparu ou sont-ils seulement inaccessibles ?

C'est la question à laquelle ont répondu Dheeraj Roy, du MIT

aux États-Unis, et ses collègues, en utilisant différents modèles de souris génétiquement modifiées pour souffrir de la maladie d'Alzheimer. Âgés de 7 mois, les rongeurs ne présentent que des troubles de la mémoire à long terme et oublient ainsi une pièce où ils ont reçu des chocs électriques 24 heures plus tôt.

Les chercheurs ont alors constaté que, dans leur gyrodenté, une région de l'hippocampe, les souris présentent moins d'épines dendritiques, des excroissances des câbles neuronaux où se font les contacts avec les autres neurones, que les souris à la mémoire normale. Ils ont ensuite

stimulé l'activité et la « pousse » de ces épines (c'est-à-dire la plasticité cérébrale) par optogénétique, en transférant dans leurs neurones des protéines qui ne s'activent que sous l'effet de la lumière. Résultat : les souris malades ont retrouvé la mémoire du choc douloureux subi et leurs neurones ont réacquis de nombreuses épines dendritiques, l'effet persistant plusieurs jours.

Dans les premiers stades de la maladie d'Alzheimer, c'est donc le rappel des souvenirs qui serait défaillant, et cette défaillance serait liée à une moindre plasticité des neurones de l'hippocampe.

Bénédicte Salthun-Lassalle

Nature, en ligne le 16 mars 2016



Des chercheurs ont réussi à rendre la mémoire à des souris atteintes des premiers stades de la maladie d'Alzheimer, en stimulant directement l'activité de certains neurones.

L'avantage de se ressembler

Vous en connaissez sans doute, des couples où les partenaires adoptent les mêmes manies. Cette convergence comportementale n'est pas l'apanage de notre espèce : Chloé Laubu et ses collègues de l'université de Bourgogne l'ont trouvée chez un poisson tropical. Les chercheurs ont arrangé des « mariages » entre des individus aux comportements très différents (l'un était par exemple agressif et l'autre non) et montré qu'ils finissaient par se ressembler. Ils augmentaient alors leur succès reproductif, se coordonnant mieux pour s'occuper de leur progéniture et la défendre contre les prédateurs.

La Lune a basculé

Sur la Lune, la glace d'eau doit se cacher à l'ombre pour perdurer. Or Matthew Siegler, de l'Institut des sciences planétaires, à Tucson, aux États-Unis, et ses collègues ont révélé certaines anomalies. Les régions les plus riches en glace d'eau ne sont pas aux pôles mais dans deux régions à 5° des pôles et aux antipodes l'une de l'autre. D'après les chercheurs, ces régions ont été les pôles il y a plusieurs milliards d'années, puis la Lune a basculé. La cause de ce changement d'axe serait la formation de la région Procellarum, une mer de basalte qui a fortement changé la répartition de la masse lunaire.

Une dévoreuse de plastique

Environ 311 millions de tonnes de plastique sont produites chaque année. Seuls 14 % sont recyclés... Mais l'équipe de Shosuke Yoshida, de l'institut de technologie de Kyoto, a découvert une bactérie, *Ideonella sakaiensis*, capable de dégrader le polytéréphtalate d'éthylène (PET). Elle utilise deux enzymes : la première coupe la longue chaîne du PET en paires de monomères qui sont ensuite hydrolysées par la seconde. Le processus est lent, mais ouvre des pistes pour le recyclage.

Biomécanique

Les nœuds inégalement espacés du bambou



© Shutterstock.com/NKA19999

Le long d'une tige, l'écart entre nœuds varie légèrement, ce qui optimise la résistance au vent, par exemple.

Hiroyuki Shima, de l'université de Yamanashi au Japon, et deux collègues se sont intéressés aux espacements entre deux nœuds successifs le long des tiges de bambou. Ils avancent des arguments et des calculs de mécanique des structures qui éclairent pourquoi et comment ces espacements varient le long d'une même tige.

L'internœud est en effet légèrement plus long vers le milieu de la tige et se réduit légèrement à mesure qu'on s'approche de l'une ou l'autre extrémité. Pour le comprendre, les chercheurs japonais sont partis de l'idée que, pour présenter une résistance optimale au fléchissement, la tige du bambou a une structure mettant en jeu un compromis dans la répartition des nœuds – qui renforcent la

tige, mais alourdissent le bambou et ralentissent sa croissance. En raisonnant sur la déformation d'un internœud (un cylindre creux fermé à ses deux extrémités par des cloisons circulaires) sous l'effet d'une force de flexion, les chercheurs définissent un paramètre de déformation qui dépend de la longueur de l'internœud, de l'épaisseur de la paroi formant la tige et du rayon de celle-ci. Et ils sont amenés à la conclusion que ce paramètre doit augmenter régulièrement à mesure qu'on s'élève le long de la tige. C'est ce qu'ils constatent, sauf vers le sommet du bambou où les nœuds sont denses, probablement pour supporter les abondantes jeunes branches.

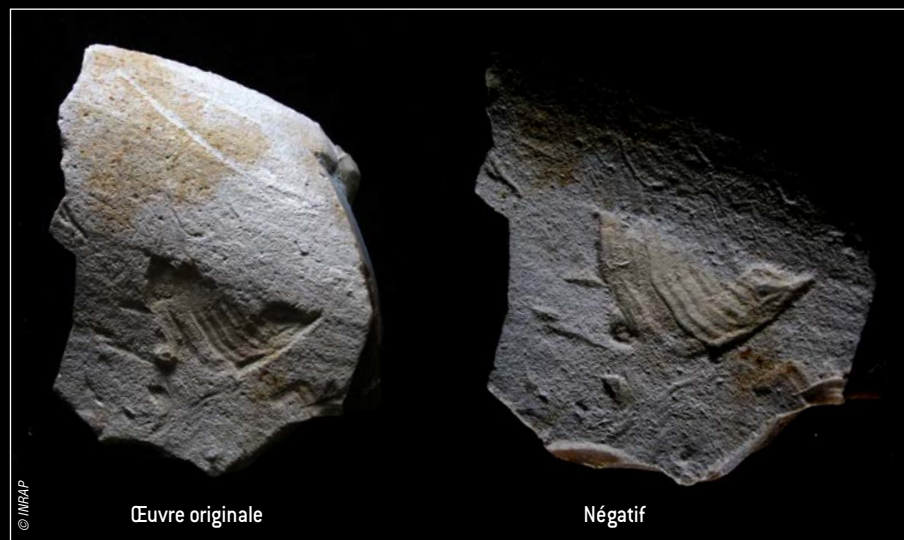
M. M.

Physical Review E, vol. 93, 022406, 2016

Insolite

L'alouette préhistorique de Cantalouette

Un oiseau chantait en buvant dans une flaque. Une alouette, ou un passereau semblable. Charmé, un tailleur de pierre s'interrompt pour la dessiner. Quelque 35 000 ans plus tard, la fouille de sauvetage du site de Cantalouette, non loin de Bergerac, en Dordogne, a amené l'Inrap à retrouver ce passereau gravé sur le revers calcaire d'un éclat de silex. Selon les chercheurs, il s'agit sans doute de l'un de ces nombreux exercices spontanés auxquels devaient se livrer les artistes préhistoriques. Un brouillon, en somme !



Archéologie

L'arc de l'âge du Fer d'Arabie retrouvé

La mission archéologique française dirigée par Guillaume Gernez vient de découvrir au sultanat d'Oman des répliques en bronze de flèches, de carquois et d'arcs d'une forme qui aurait été employée dans la péninsule Arabique au cours du deuxième âge du Fer, soit entre 900 et 600 avant notre ère.

Les archéologues ont mis au jour ces pièces dans un lieu de rassemblement ou sanctuaire, composé de deux bâtiments et quelques aménagements annexes, au pied du djébel Mudhmar, une montagne du centre du sultanat. Comme la plupart des objets retrouvés sur place se rapportent à la guerre, les archéologues supposent qu'il s'agissait d'offrandes à un dieu guerrier. Sans doute est-ce pour rendre leurs



Dans l'Antiquité, des nomades arabes ont réalisé en bronze cette réplique d'arc afin de la déposer dans un sanctuaire en offrande à un dieu guerrier. Elle nous renseigne sur la forme de l'arc arabe antique.

témoignages de ferveur ostentatoires et durables que les utilisateurs du sanctuaire ont préféré des offrandes faites de bronze, une matière semi-précieuse.

Quelle était la population qui fréquentait le site ? Selon Guillaume Gernez, une élite nomade qui prospérait grâce au commerce

du cuivre s'était constituée dans la région du djébel Mudhmar. Étant donné la richesse qu'ils transportaient, ces nomades devaient être constamment sur le pied de guerre, ce qui expliquerait l'importance du culte dédié à un dieu guerrier.

François Savatier

L'énergie du cœur galactique

Les astrophysiciens pensent qu'il existe des objets dans la Galaxie qui confèrent une énergie extrême, de l'ordre du petaélectronvolt (10^{15} électronvolts), à des particules observées dans les rayons cosmiques qui bombardent la Terre. Mais de telles sources de rayons cosmiques n'ont pas été identifiées... Cependant, l'expérience *HESS*, en Namibie, a collecté pendant dix ans des données sur les rayons cosmiques provenant du centre de la Voie lactée. Et leur analyse montre que l'intensité de ces émissions serait due au bombardement des nuages moléculaires géants de la région par des protons d'une énergie de l'ordre du petaélectronvolt. Une énergie acquise probablement grâce au trou noir supermassif qu'abrite le centre de la Galaxie.



POUR ÉNERGISER VOTRE CARRIÈRE AYEZ LE RÉFLEXE UPMC

FAÎTES LE CHOIX DE L'EXCELLENCE

**UPMC : UNIVERSITÉ DE RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE**

Une offre complète
qui s'adapte à vos besoins

- > Formations qualifiantes inter entreprises
- > Formations sur mesure
- > Parcours individualisés

www.fc.upmc.fr

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS



SANTÉ

ÉCOLOGIE - BIODIVERSITÉ

CHIMIE ÉLECTRONIQUE

BIOLOGIE

MÉCANIQUE

MATHÉMATIQUES

INFORMATIQUE

Formation continue
Université Pierre & Marie Curie

formation.continue@upmc.fr
01 44 27 82 82

Virologie

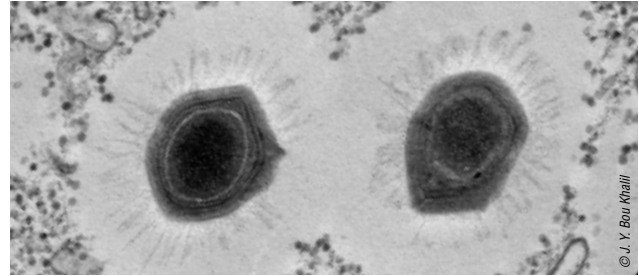
Un système CRISPR dans un virus géant

Même les virus géants ont leurs propres virus – les virophages – et, du moins pour certains, un système immunitaire pour les combattre. L'équipe de Didier Raoult, à Aix-Marseille Université (CNRS/IRD/Inserm), vient de mettre en évidence un mécanisme de défense ressemblant au système CRISPR-Cas. Décrit ces dernières années chez nombre de bactéries et d'archées, ce système insère dans une « banque » (CRISPR) des séquences d'ADN des virus rencontrés, puis, lors d'une nouvelle infection, il compare l'ADN du nouveau virus à sa banque. S'il reconnaît une séquence, une enzyme (Cas) détruit l'ADN viral, bloquant ainsi la propagation de l'infection.

En 2014, l'équipe de Didier Raoult avait découvert un

virophage, Zamilon, qui infecte certains mimivirus – une famille de virus géants –, mais pas tous. Les mimivirus résistants gardaient-ils une mémoire du virophage ? Pour le savoir, les biologistes ont analysé le génome de 60 souches de mimivirus et regardé si des séquences correspondaient avec l'ADN de Zamilon. Résultat : les mimivirus résistants arboraient de telles séquences. Et à côté d'elles, d'autres codaient des enzymes qui déroulent et dégradent l'ADN, comme dans le système CRISPR-Cas. De plus, si on bloquait l'activité d'un de ces composants, les mimivirus ne résistaient plus au virophage.

Pour Didier Raoult, les virus géants constitueraient une quatrième branche du vivant, aux côtés des bactéries, des archées



Une lignée de mimivirus, un virus de 400 nanomètres (ci-dessus), a développé un système immunitaire proche de celui des bactéries.

et des eucaryotes. Leur génome comporte plus d'un millier de gènes (contre une dizaine chez les virus classiques), dont certains sont impliqués dans la traduction de l'ADN en protéines ou dans d'autres fonctions qu'on ne trouve habituellement pas chez les virus. Le système de défense mis au jour est une spécificité supplémentaire

des virus géants. Et, pour Didier Raoult, un argument en faveur de son hypothèse. Commun aux bactéries, aux archées et aux virus géants, le système de défense de type CRISPR-Cas leur viendrait d'un ancêtre commun...

M.-N. C.

A. Levasseur et al., *Nature*, vol. 531, pp. 249–252, 2016

Palais DÉCOUVERTE

les conférences

Au Palais de la découverte Entrée libre dans la limite des places disponibles

cycle Les voyages spatiaux habités : un rêve ?

Les samedis à 15h

Conseiller scientifique : Frédéric Tognella, spécialiste de la médecine spatiale et du sport, fondateur de Tognella Biomed Consult.

21 mai
Les radiations : danger pour les spationautes
Avec Frédéric Tognella

28 mai
L'effet de l'apesanteur sur le corps
Avec Frédéric Tognella

4 juin
Quelles applications sur notre vie quotidienne ?
Avec Patrick Eymar, président de N4E, ancien responsable de la stratégie à Astrium Space Transportation (Airbus).

11 juin
Mars : pour quand le voyage ?
Avec Alain Souchier, président de l'Association Planète Mars.

programme complet sur palais-decouverte.fr

Avec le soutien de

SCIENCE **Ciel & espace** **FUTURA - SCIENCES**

Archéologie

Une rare panoplie romaine

Dans la seconde moitié du III^e siècle, un incendie ravage la réserve d'une villa rurale située à Saint-Clément, près de Sens. Dans la masse compacte qui a rempli sa cave et protégé son contenu de l'air, l'Inrap vient de retrouver près de 200 outils agricoles. Ce matériel correspond bien à ce que préconisaient les auteurs antiques de traités d'agronomie.

Par exemple, dans le chapitre X de *De re rustica*, Caton l'Ancien (234-149 avant notre ère) dresse la liste suivante des « instruments en fer » à fournir à son intendant : huit fourches, huit sarcloirs, quatre pelles, cinq houes, deux râtaux à quatre dents, trois faux à foin, six faux à chaume, cinq croissants, trois haches, trois coins, un pilon à blé, deux pelles à feu... Cette liste est très similaire à celle de la panoplie d'outils agricoles romains de Saint-Clément qui, à ce stade, est sans équivalent.

F. S.

Mathématiques

Andrew Wiles reçoit le prix Abel

L''Académie norvégienne des sciences et des lettres a décerné le prix Abel 2016 à Andrew Wiles, de l'université d'Oxford, pour « son éblouissante démonstration du dernier théorème de Fermat en utilisant la conjecture de modularité sur les courbes elliptiques semistables, et ouvrant une nouvelle ère en théorie des nombres ».

L'histoire commence en 1637, lorsque Pierre de Fermat énonça une conjecture : « Il n'existe pas de solution entière pour l'équation $x^n + y^n = z^n$ quand n est strictement plus grand que 2. » Près de 350 ans plus tard, en 1993, Andrew Wiles en donna la preuve. Elle consistait à démontrer d'abord une autre conjecture, dite de Taniyama-Shimura, dont le lien avec la conjecture de Fermat avait été établi en 1984. La conjecture de Taniyama-Shimura stipule que « pour chaque courbe elliptique, il existe une forme modulaire correspondante ». Andrew Wiles, spécialiste des courbes elliptiques (objets définis par des équations cubiques à deux variables) et des formes modulaires (objets abstraits avec un haut degré de symétrie), a prouvé le lien d'équivalence entre ces objets et, du même coup, le grand théorème de Fermat.

S. B.

Géophysique

Comment l'olivine se déforme

Une équipe animée par Patrick Cordier, de l'université de Lille, vient d'observer directement la propagation d'une dislocation dans un cristal d'olivine, l'un des principaux silicates dont est constitué le manteau terrestre. Or une meilleure connaissance de ce phénomène dans les roches mantelliques est nécessaire pour améliorer notre description des mécanismes de la dérive des continents.

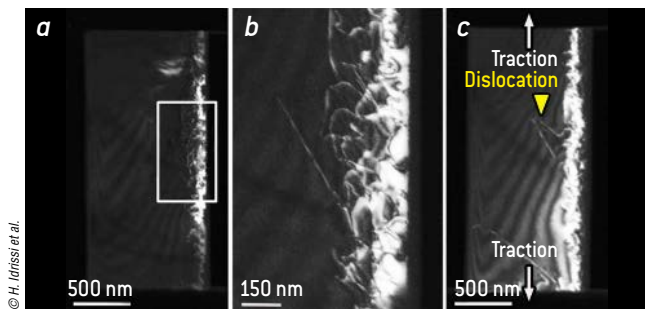
Les dislocations sont des fronts internes au cristal, où les liaisons interatomiques sont brisées. Elles naissent lorsque – par choc, compression ou étirement – on déforme un matériau cristallin afin d'y créer des contraintes, c'est-à-dire la mise sous pression de certains plans internes. Pour en créer, l'équipe de Patrick Cordier a mis au point un appareil capable de tirer aux deux extrémités d'un nanocristal d'olivine sans le briser, de sorte que des dislocations peuvent s'y

propager à température ambiante, au sein d'un microscope électronique par transmission. Cette nouvelle méthode rend les observations plus fiables que celles des expériences précédentes à température élevée.

Les chercheurs sont parvenus à mesurer les modalités de la propagation des dislocations dans l'olivine. Présentes en grand nombre dans le minéral, elles interagissent, s'enchevêtrent et tendent à s'accumuler aux interfaces entre grains cristallins, ce qui explique que la roche se déforme sans rompre, bref, sa ductilité. Désormais appréciée sur des bases expérimentales plus solides, la ductilité de l'olivine est l'un des paramètres des modèles numériques décrivant la façon dont les roches mantelliques se déforment pour rendre possible le glissement des plaques tectoniques.

F. S.

H. Idrissi et al., *Science Advances*, vol. 2(3), e1501671, 2016



En (a), l'échantillon d'olivine avant déformation. En (b), l'intérieur du rectangle montrant une couche endommagée. En (c), la naissance d'une dislocation (triangle) sur le point de se propager dans l'olivine.

Coup de vieux pour *Homo floresiensis*

En 2003, on annonçait la découverte, sur l'île indonésienne de Florès, d'*Homo floresiensis*. Haute de un mètre, cette espèce humaine était dotée d'un cerveau de 400 centimètres cubes et aurait été encore présente il y a 18 000 ans. Une époque aussi récente semblait peu plausible. Ses découvreurs viennent de réétudier de fond en comble la grotte où *H. floresiensis* a été mis au jour. Ils concluent que son fossile date d'il y a entre 100 000 et 60 000 ans, une fourchette temporelle beaucoup moins problématique.

L'Antarctique contribue à la montée des eaux

Au Pliocène, il y a près de 3 millions d'années, le niveau moyen des océans était plus haut qu'il ne l'est aujourd'hui. Or les modèles d'évolution de la calotte polaire antarctique, en particulier sa fonte, ne restituaient pas la bonne élévation du niveau des mers. Deux climatologues américains,

Robert DeConto et David Pollard, ont amélioré les modèles en incluant certains phénomènes de fragilisation de la calotte. Ils reproduisent correctement les événements du passé. Utilisé avec des scénarios climatiques, leur modèle prévoit que l'Antarctique pourrait contribuer jusqu'à un mètre à la montée des eaux d'ici 2100.

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



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Science et responsabilité : une réflexion collective s'impose

La controverse autour du tremblement de terre de L'Aquila en 2009, qui a conduit à la condamnation de scientifiques, nous oblige à repenser ensemble la représentation que nous nous faisons des sciences et donc, a fortiori, de leur responsabilité sociale.

Léo COUTELLE

Le 22 octobre 2012, un verdict très attendu a soulevé une indignation assez unanime dans la communauté scientifique. Sept scientifiques de l'Institut italien de géophysique et vulcanologie, membres de la commission italienne des grands risques, ont été condamnés à six années de prison et 9 millions d'euros d'amende pour homicide par imprudence. Les scientifiques étaient accusés d'avoir sous-estimé le risque sismique à L'Aquila. Dans cette petite ville italienne, trois ans plus tôt, le 6 avril 2009, un tremblement de terre avait causé la mort de plus de 300 personnes, saccageant le centre historique et faisant des dizaines de milliers de sans-abri.

Or six jours avant le séisme, le 31 mars 2009, les membres de la commission, jugée compétente pour l'évaluation des risques sismiques, s'étaient réunis à L'Aquila pour donner un avis sur la probabilité qu'un tremblement de terre majeur y survienne. S'appuyant sur l'analyse d'une série de secousses ayant frappé L'Aquila pendant les mois précédents, la commission avait conclu, en substance, qu'il n'y avait pas lieu de s'affoler, qu'il n'y aurait pas de secousses plus importantes que celles des mois précédents. Six jours plus tard, l'Italie connaissait l'une de ses plus grandes catastrophes sismiques.

La réaction fut très vive dans la communauté scientifique, notamment par l'intermédiaire d'une pétition qui soulignait qu'une

telle condamnation était inacceptable parce qu'il était impossible de prédire un séisme avec précision, et donc que cette décision de justice ne prenait pas en compte la nature même de la connaissance scientifique.

On a aussi reproché au juge un verdict disproportionné et inapproprié : l'argument principal du réquisitoire contre les membres de la commission concernait le manquement aux vertus attendues de la communauté scientifique. Les scientifiques auraient mal

**Être éthiquement responsable,
c'est être en capacité de
« répondre de »
et de « répondre à »**

communiqué, avec peu de prudence et de nuances. Pour nombre de scientifiques, en convoquant ainsi l'éthique des vertus du scientifique, en se faisant police des vertus, la justice dépassait ses attributions.

Le 10 novembre 2014, les sept scientifiques ont été acquittés en appel et, en novembre dernier, la Cour de cassation a appuyé cette décision. Cependant, quelle que soit l'issue du procès, la responsabilité des scientifiques est à repenser. En effet, étant donné la portée de la science sur nos existences, cette dernière ne peut plus être vue comme une entreprise désintéressée et unifiée dont le seul objectif est l'avancement des connaissances.

La responsabilité des scientifiques est engagée. Mais de quoi s'agit-il ? Au-delà de sa dimension juridique ou morale, la responsabilité comporte aussi une part éthique. Et être éthiquement responsable, c'est être en capacité d'une part de « répondre de », c'est-à-dire de rendre des comptes en raison d'une mission qui nous a été confiée, et, d'autre part, de « répondre à », c'est-à-dire de prendre en considération les attentes et les interrogations des individus ou collectifs avec qui nous sommes en relation.

Il ne s'agit donc pas seulement de savoir si l'on peut prédire un séisme avec certitude (responsabilité juridique) ou d'exiger certaines vertus dans la communication à son égard (responsabilité morale). La responsabilité éthique, notamment dans sa dimension sociale, exige un travail beaucoup plus profond qui consiste à réinterroger les valeurs et les finalités de la démarche scientifique. La science repose sur diverses valeurs ayant un rapport direct avec la façon de produire les connaissances, telles que la rationalité, la cohérence ou l'adéquation avec l'expérience. Mais d'autres, plus contextuelles, entrent aussi en jeu, telles que le bien-être, la justice ou l'intérêt économique. Comment prendre en compte leur influence dans le processus scientifique ? Autrement dit, parler de responsabilité sociale des sciences, c'est avant tout consentir à un effort conceptuel qui vise à renouveler la représentation que l'on peut en avoir. Il ne peut donc s'agir que d'une réflexion et d'une responsabilité collectives.