

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, 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 & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillat

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

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 :

Aurélien Barrau, Bill Burns, Mathilde Causse, Hao Fang, Patrick

Forterre, Gérard Fouchard, Sophie Gallé-Soas, Marie-Laure Geai,

Michelle Garcin, André Nel, Laurence Perotto, José Pessis,

Christophe Pichon, Mickael Rigault, Daniel Tacquenot,

Hayan Tong

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

Directeur de la publicité : Jean-François Guillotin

jf.guillotin@pourlascience.fr

Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

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

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES

<http://boutique.pourlascience.fr/>

DIFFUSION

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

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 tra-

duction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous

les pays. La marque et le nom commercial « Scientific Ameri-

can » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence ac-

cordée 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 copie

(20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Une exception née du chaos

Il y a plus de vingt ans, en 1995, on découvrait pour la première fois une planète en orbite autour d'un soleil autre que le nôtre. Depuis, plusieurs milliers d'exoplanètes, donc presque autant de systèmes planétaires, se sont ajoutées aux catalogues de l'astronomie. Et à mesure que les découvertes se multiplient, le Système solaire que nous habitons apparaît de plus en plus comme une banalité cosmique.

Le Système solaire, une banalité ? En fait, pas du tout. Car sa structure, avec quatre petites planètes rocheuses dans la région interne, proche de l'étoile, et quatre planètes géantes et gazeuses dans la région externe, ne semble pas avoir d'équivalents parmi les systèmes extrasolaires connus à ce jour.

L'effet chasse-neige gravitationnel de Jupiter et Saturne

Ce caractère atypique a incité les astrophysiciens à revoir les scénarios qui décrivent la formation du Soleil et de son cortège planétaire à partir d'un nuage géant de gaz et de poussière. Et il y a peu, leurs travaux ont convergé pour raconter une toute nouvelle histoire. Trois des principaux protagonistes de ces recherches sur les débuts du Système solaire nous l'exposent dans ce numéro (voir pages 22 à 31).

La nouvelle version de ce lointain passé qui remonte à environ 4,5 milliards d'années diffère beaucoup du récit précédent où, somme toute, la formation du cortège solaire se déroulait tranquillement. Elle décrit plutôt un gigantesque chaos où, notamment, Jupiter et Saturne ont dévié vers le Soleil, créant des collisions destructrices et un effet chasse-neige gravitationnel, avant de revenir sur des orbites lointaines. Un chaos bien loin de la régularité d'horloge des mouvements planétaires d'aujourd'hui, sur laquelle l'humanité s'est longtemps appuyée pour concevoir le temps et le mesurer. ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 L'isomorphisme des graphes, moins complexe qu'on ne pensait
- 7 Mieux cultiver pour stocker le carbone
- 8 Une mutation génétique qui a profité au cerveau d'*Homo sapiens*
- 11 Le puissant arsenal de guerre des bactériophages



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Les brevets sur les plantes mettent en danger le modèle agricole européen
Frédéric Thomas
- 18 **Cabinet de curiosités sociologiques**
Pourquoi les chantiers sont-ils toujours en retard ?
Gérald Bronner
- 20 **Homo sapiens informaticus**
Spoutnik 2.0 : il faut relancer l'enseignement des sciences
Gilles Dowek



Ce numéro comporte une offre d'abonnement L'Express sur une sélection d'abonnés France métropolitaine.
En couverture : © Kenn Brown Mondolith Studios

À LA UNE

22 **ASTROPHYSIQUE** Le Système solaire, une exception née du chaos

Konstantin Batygin, Gregory Laughlin et Alessandro Morbidelli

Les premiers âges du Système solaire se caractérisent par des planètes vagabondes aux orbites instables et des collisions planétaires destructrices. Ce chaos a engendré un système qui, comparé aux autres systèmes planétaires découverts, constitue une anomalie.

32 **ÉCOLOGIE** Mieux recenser les tigres pour les sauver

Ullas Karanth

Les techniques de suivi des populations de tigres ont connu de grands progrès au cours des dernières années. Encore faut-il que les organismes chargés de la protection du grand félin asiatique les appliquent.

40 **MATHÉMATIQUES** La simulation numérique au service du son 3D

Matthieu Aussal et François Alouges

Un univers sonore comme si vous y étiez, mais avec un simple casque d'écoute : grâce notamment à des méthodes efficaces pour résoudre numériquement certaines équations, ce rêve des techniques de réalité virtuelle se concrétise enfin.

48 **MÉDECINE** L'amertume, sentinelle du système immunitaire

Robert Lee et Noam Cohen

Les récepteurs du goût amer ne se trouvent pas seulement sur la langue. Présents dans tout l'organisme, ils forment... une première ligne de défense contre les infections !

56 CLIMATOLOGIE Pergélisol et climat : les chiffres de la menace

Edward Schuur

Le dégel du sol arctique va vraisemblablement accélérer le réchauffement climatique pendant le XXI^e siècle. Un réseau mondial de chercheurs s'active afin d'évaluer à quel point.

62 PHYSIQUE Vers une définition quantique du kilogramme

Tim Folger

Plus fiable et plus précise, la nouvelle définition du kilogramme reposera, à partir de 2018, sur une constante fondamentale liée à la physique quantique.



70 MÉTROLOGIE « Le nouveau kilogramme sera plus pratique »

Entretien avec Richard Davis

À partir de 2018, le kilogramme sera défini à partir de la constante de Planck et non d'un cylindre de platine conservé dans un coffre-fort près de Paris. Richard Davis nous explique pourquoi cette nouvelle définition sera plus fiable et, surtout, plus pratique d'utilisation.

72 HISTOIRE DES TECHNIQUES La saga du premier câble transatlantique

Ainissa Ramirez

Il y a 160 ans débutait une épopée qui n'avait rien à envier à celle du rail : la pose d'un câble télégraphique sous-marin reliant l'Amérique à l'Europe.



Rendez-vous

78 Logique & calcul

Le vivant, plus fort que l'électronique

Jean-Paul Delahaye

Des systèmes biologiques sont capables d'enregistrer de l'information et de la traiter, comme le font les ordinateurs.

84 Science & fiction

Glapum'tien, de quelle espèce es-tu ?

J.-Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 Art & science

Les errances du jeune Werner

Loïc Mangin

89 Idées de physique

Le point de rupture des spaghettis

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



92 Question aux experts

Qu'est donc le spin ?

Jean-Marc Lévy-Leblond

94 Science & gastronomie

Jeux de gels

Hervé This

96 À lire

98 Bloc-notes

Les chroniques de Didier Nordon

POUR LA
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



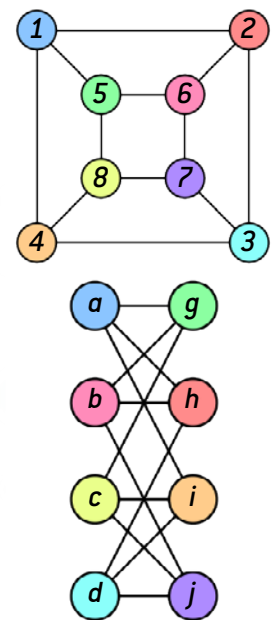
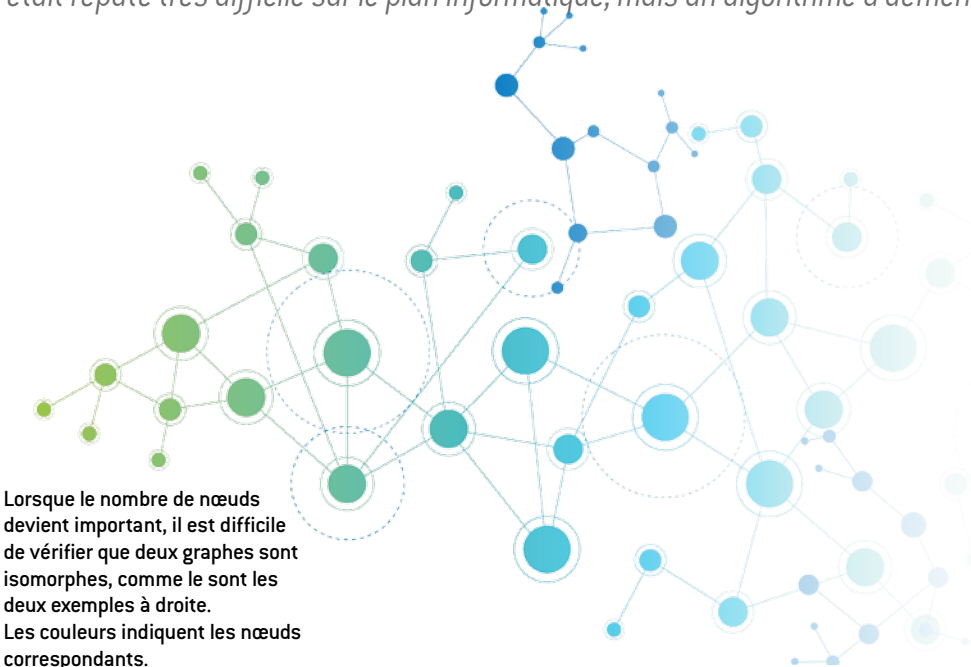
Recevez gratuitement la lettre d'information en inscrivant uniquement votre adresse mail sur www.pourlascience.fr

Actualités

Mathématiques

L'isomorphisme des graphes, moins complexe qu'on ne le pensait

Comment s'assurer que deux graphes d'aspect différent sont en fait les mêmes ? Ce problème était réputé très difficile sur le plan informatique, mais un algorithme a démenti cette idée.



© Shutterstock.com/Rachael Amott - chris-martin

En décembre 2015, László Babai, de l'université de Chicago, a annoncé un résultat qui promettait d'être un événement dans le domaine de l'informatique théorique et de la théorie de la complexité : le « problème d'isomorphisme des graphes » pourrait être résolu avec un algorithme « quasi polynomial » et serait donc moins complexe qu'on ne le pensait. Mais près d'un an après son annonce fracassante, le 4 janvier 2017, László Babai a signalé qu'un autre mathématicien, Harald Helfgott (université de Göttingen/CNRS-université Paris-Diderot), avait trouvé une faille dans son raisonnement... Quelques jours plus tard, László Babai est revenu à la charge avec un correctif. Peu après, lors d'un séminaire Bourbaki, Harald Helfgott a présenté

les résultats de László Babai et a confirmé qu'ils sont corrects.

Mais de quoi s'agit-il au juste ? Le problème relève de la théorie des graphes, domaine des mathématiques et de l'informatique qui a connu un formidable essor ces dernières décennies avec le développement des réseaux de télécommunications, et en particulier d'Internet. Un graphe est une représentation abstraite d'objets et de leurs relations par un ensemble de points ou « nœuds », reliés par des arêtes. La théorie des graphes fournit des outils puissants pour analyser les réseaux.

La question posée est la suivante. Si vous êtes confronté à deux graphes ayant le même nombre de nœuds, comment déterminer si ces graphes sont équivalents, c'est-à-dire si on peut faire correspondre

parfaitement les nœuds et arêtes d'un graphe à l'autre ? Si le nombre de nœuds est petit, un algorithme peut vérifier rapidement que les graphes sont équivalents en testant toutes les configurations. Mais avec cette méthode brutale, le temps nécessaire augmente exponentiellement avec le nombre de nœuds. Il devient très vite hors de portée pour de grands graphes. Peut-on faire mieux ? Ce problème d'isomorphisme des graphes résiste depuis plus de trente ans.

De façon générale, plus un problème est riche en paramètres, ici le nombre n de nœuds du graphe, plus le temps de calcul est long. Les mathématiciens répartissent les problèmes en deux classes de complexité. Les problèmes « faciles » ont un temps de résolution proportionnel à une puissance de n , par

exemple à n^2 ou n^3 , et peuvent être en général résolus avec un ordinateur. On parle de problème P (P pour « polynomial »). Les problèmes « difficiles », en revanche, demandent un temps de calcul exponentiel, par exemple de la forme 2^n , une fonction qui croît plus vite qu'un polynôme en n . On parle de problèmes NP, ou non polynomiaux (au sens strict, les problèmes NP sont ceux dont la résolution est non polynomiale, mais dont on peut vérifier une solution en un temps polynomial).

Pour en revenir à l'isomorphisme des graphes, ce problème était considéré comme un problème NP. Cependant, László Babai et Eugene Luks, un mathématicien de l'université de l'Oregon, avaient développé dans les années 1980 des méthodes théoriques performantes pour

Climatologie

Mieux cultiver pour stocker le carbone

Lancée lors de la COP 21, l'initiative « 4 pour 1 000 » [ou « 4 ‰ »] vise à séquestrer dans les sols chaque année une masse de carbone égale à celle que l'humanité émet dans l'atmosphère. Vincent Chaplot, qui s'est chargé du volet sud-africain d'une étude internationale préliminaire, nous explique comment cet objectif pourrait être atteint.

comparer des graphes. Et des algorithmes développés par ailleurs se montraient rapides quelle que soit la complexité des graphes comparés. Ces algorithmes de test d'isomorphisme de graphes sont utilisés par exemple en chimie pour vérifier que des molécules complexes sont les mêmes malgré des conformations différentes.

Les mathématiciens se demandaient donc si le problème était vraiment aussi difficile qu'on le pensait. Le résultat de László Babai confirme cette intuition. Il a développé un algorithme dont le temps de calcul augmenterait de façon « quasi polynomiale » (plus précisément : comme $\exp[(\log n)^a]$, où a est de l'ordre de quelques unités) en fonction de n . L'isomorphisme des graphes se rapproche donc de la classe des problèmes faciles.

La stratégie adoptée dans l'algorithme consiste à chercher des symétries dans les deux graphes à comparer et à les décomposer en éléments plus simples selon une procédure récursive. C'est justement dans cette procédure qu'Harald Helfgott a trouvé une faille. Une étape, la procédure « Split ou Johnson », se montrait problématique. Elle consiste à identifier à l'intérieur des deux graphes comparés un sous-graphe de type particulier, un « graphe de Johnson », ou à colorier les graphes d'une façon qui exhibe leurs symétries. Une partie de la procédure rendait l'algorithme instable. Grâce à l'analyse minutieuse de Harald Helfgott, László Babai a corrigé son algorithme tout en conservant sa conclusion : le problème d'isomorphisme des graphes est plus facile qu'on ne le pensait.

Sean Bailly

H. Helfgott, <https://arxiv.org/abs/1701.04372> ; L. Babai, <https://arxiv.org/abs/1512.03547>

Que signifie ce 4 ‰ ?

Vincent Chaplot : Ce programme part d'un calcul simple : nos émissions mondiales sont de 8,9 gigatonnes de carbone d'origine organique par an ; pour les équilibrer, il faudrait fixer autant de carbone dans le sol en plus des 2400 gigatonnes qui y sont déjà. Or $8,9/2400$ égale environ 0,0037, soit à peu près 4 ‰. Le programme portant ce nom vise à étudier les moyens de séquestrer un supplément de 0,4 % du carbone organique qui s'y trouve déjà.

Est-ce possible ?

V. C. : Techniquement, nous avons des solutions, mais la question centrale est que sur les 149 millions de kilomètres carrés de terres émergées, seulement 10 à 20 % sont aujourd'hui des surfaces agricoles où nous pouvons agir. À long terme, si nous nous en donnons les moyens, nous pourrions modifier la séquestration du carbone de 50 % des terres émergées, par exemple en créant des barrières vertes dans le désert, en plantant des forêts ou des prairies. À court terme, nous ne pouvons agir que sur les terres cultivées en y introduisant de nouvelles variétés.

C'est l'objectif du projet Carbofarm que vous portez ?

V. C. : Oui. Il s'agit de déterminer pour divers pays quelles sont les variétés cultivées des principales

céréales déjà sélectionnées qui séquestrent le plus de carbone dans le sol. Nous voulons aussi rechercher les systèmes de cultures rendant le plus de services non seulement aux hommes, mais aussi au sol.

Au sol ? Que voulez-vous dire ?

V. C. : Le carbone est le principal composant de la matière organique, qui nourrit les microbes du sol (lesquels représentent 80 % de la biomasse terrestre) ; le carbone y est associé à l'azote, au phosphore, aux



Vincent Chaplot, directeur de recherche à l'IRD.

métaux, etc. La matière organique joue aussi le rôle d'une éponge pour l'eau, qu'elle filtre comme une station d'épuration.

Dans le cas de l'Afrique du Sud, quelle est la situation des sols ?

V. C. : Seulement 10 % de la surface de ce pays est en surfaces agricoles. Le reste consiste en savanes peu fertiles. La décroissance des stocks de carbone dans le sol s'est en effet intensifiée avec l'arrivée

de l'agriculture moderne au cours des deux derniers siècles et de ses abus d'engrais azotés, qui accélèrent la consommation de la matière organique du sol ; et aussi parce qu'une mauvaise gestion des savanes les a livrées à un pâturage sédentaire suivi d'une dégradation du sol.

Comment redresser la situation ?

V. C. : Avec Carbofarm, nous travaillons déjà à sélectionner des variétés de maïs et de blés qui augmentent les intrants organiques dans le sol ; s'agissant des savanes, il s'agit d'imiter le comportement des herbivores sauvages qui, au lieu de stationner comme les vaches dans leurs enclos, suivent l'herbe, pâturant intensément mais temporairement en un lieu avant de l'abandonner pour longtemps, laissant à la végétation le temps de revenir.

Et en France ?

V. C. : Outre l'agriculture intensive qui exerce toujours la même pression excessive sur l'écosystème, nous avons l'occasion offerte par l'énorme déprise agricole. De plus en plus de terres redeviennent disponibles pour la forêt ou les pâtures. Encore faudrait-il s'en occuper en les rassemblant et en les gérant.

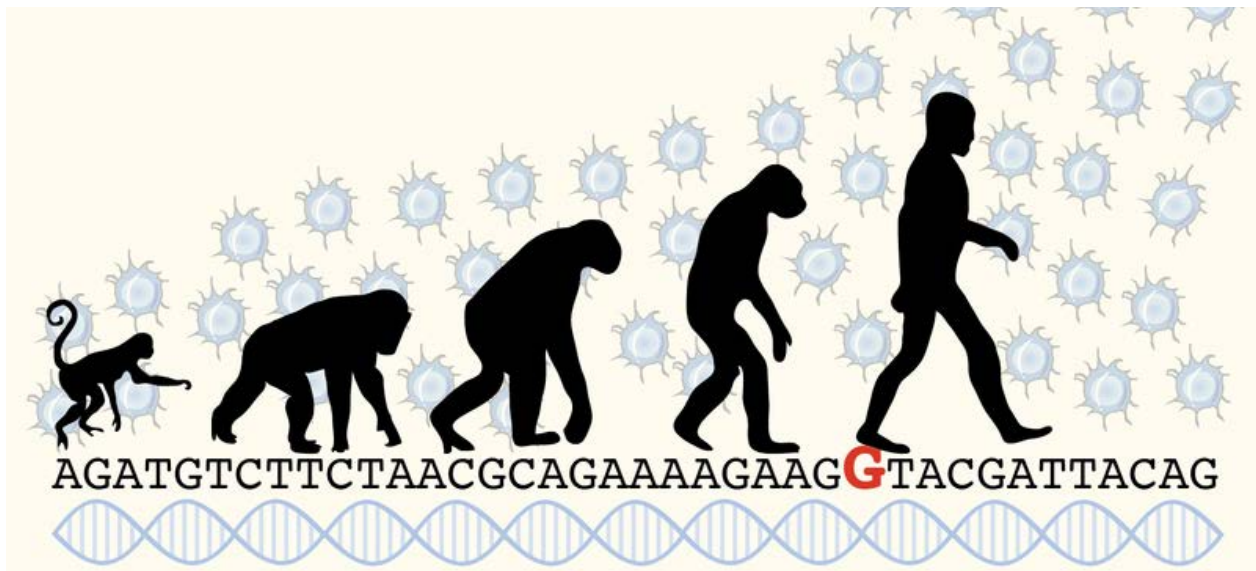
François Savatier

B. Minasny et al., *Geoderma*, vol. 292, pp. 59-86, 2017

Génétique

Une mutation génétique qui a profité au cerveau d'*Homo sapiens*

Une substitution d'une base dans un gène d'*Homo erectus* aurait provoqué une surproduction de neurones et fait franchir à l'évolution humaine une étape cruciale.



© Institut Max-Planck de biologie cellulaire et moléculaire et de génétique

Une mutation d'une base sur un gène d'*Homo erectus* aurait été à l'origine d'un fort développement du cerveau humain.

Les plus grands progrès résultent parfois d'une erreur, d'un accident fortuit aux conséquences incalculables. Prenez le cerveau humain : cet organe d'une complexité inouïe pourrait aussi être le fruit d'un coup du sort. C'est ce qu'ont découvert le paléogénéticien suédois Svante Pääbo et ses collègues, spécialistes de l'ADN préhistorique.

L'événement clé qui a donné un coup de fouet à l'évolution de notre encéphale se serait produit il y a environ 500 000 ans, chez nos ancêtres *Homo erectus*, des hominidés dont le cerveau était, en ce temps, nettement moins volumineux – et probablement moins puissant et moins doué d'abstraction. Mais à cette époque, une mutation totalement aléatoire aurait remplacé, sur le double brin d'ADN d'un de ces lointains aïeux, une base azotée de type C par une base G. Un microévénement qui aurait provoqué une réaction en chaîne. Car du fait de ce changement, un trio de bases C, T, A aurait été remplacé par la séquence G, T, A. Or ce triplet est

interprété par la machinerie de transcription de l'ADN des cellules comme un signal de coupure. Autrement dit, l'ARN messager transcrit du gène concerné (noté *ARHGAP11A*) a été amputé de 55 nucléotides par rapport à sa version originale. D'où la production d'une protéine aux fonctions profondément modifiées.

Jugez plutôt : alors que la protéine de nos ancêtres *Homo erectus* régulaient la croissance de filaments d'actine dans les neurones – des constituants du squelette interne des cellules –, la version *sapiens* stimule la division des neurones à partir de cellules mères, dites progénitrices, dans certaines zones cruciales du cerveau, les ventricules. Avec pour conséquence de produire beaucoup plus de neurones. Résultat : dans nos cerveaux modernes, les cellules progénitrices se divisent à un rythme accru, donnant naissance à de jeunes neurones qui migrent ensuite des ventricules vers la périphérie du cerveau, contribuant à la croissance du cortex ; lequel, à force de s'étendre,

est obligé de se plisser pour tenir de façon compacte à l'intérieur de la boîte crânienne, adoptant cet aspect replié caractéristique du cerveau humain.

D'ailleurs, en transférant la version mutée du gène à des souris, l'équipe de Svante Pääbo a constaté que le cerveau de ces rongeurs produisait des neurones à un rythme supérieur au taux habituel.

Il a donc peut-être suffi d'un changement ponctuel sur un seul maillon de l'ADN pour transformer un cerveau d'*Homo erectus* en cerveau d'*Homo sapiens*. Ce changement était probablement une erreur, un raté dans les mécanismes de réplication de l'ADN chez un *Homo erectus* anonyme dont on ne saura sans doute jamais s'il a vécu en Afrique de l'Ouest, en Asie ou en Europe, et qui est le père des hommes dotés de cerveaux modernes. Mais cette erreur s'est révélée un réel avantage évolutif et s'est imposée.

Sébastien Bohler

M. Florio et al., *Science Advances*, vol. 2, e1601941, 2016

900
centimètres cubes

C'est le volume du cerveau d'*Homo erectus*, contre 1 400 centimètres cubes chez *Homo sapiens*. Le cerveau de ce dernier est aussi très plissé, ce qui lui permet de contenir 86 milliards de neurones

Cosmologie

Une expansion de l'Univers un peu plus rapide ?

La collaboration internationale H0LiCOW, menée par Sherry Suyu, de l'institut Max-Planck d'astrophysique, à Munich, et à laquelle participent Vivien Bonvin et Frédéric Courbin de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, a utilisé les images de quasars déformées par des lentilles gravitationnelles pour estimer la constante de Hubble, qui mesure le taux d'expansion actuel de l'Univers.

Une galaxie massive déforme autour d'elle l'espace-temps et altère ainsi le parcours de la lumière venant d'un objet brillant en arrière-plan. L'image de cet objet lointain peut alors être amplifiée (d'où le nom de lentille gravitationnelle), déformée ou apparaître en plusieurs exemplaires. Dans ce dernier cas, les trajets correspondants de la lumière ne sont pas de la même longueur ; l'observateur détectera donc un éventuel changement de luminosité à des instants différents pour chaque image. En mesurant les délais, on peut alors calculer la constante de Hubble.



Une galaxie massive déforme l'espace-temps et crée un effet de lentille gravitationnelle. Les quatre points blancs qui l'entourent sont quatre images d'un même quasar situé en arrière-plan.

Les chercheurs de la collaboration H0LiCOW ont analysé les délais liés aux images de trois quasars, galaxies dont le noyau est très actif et dont la luminosité varie de façon aléatoire. Ils obtiennent une valeur de la constante de Hubble d'environ 71,9 kilomètres par seconde et par mégaparsec, en bon accord avec celle obtenue en 2016 par l'Américain Adam Riess et son équipe en déterminant les distances et les vitesses d'étoiles de type céphéïdes et de supernovæ.

Ces valeurs sont toutefois supérieures à celle (67,8) déterminée par la collaboration *Planck* en analysant le fond diffus cosmologique, la lumière émise par l'Univers quand il était âgé de 380 000 ans. La raison de la différence reste à élucider. Mais le fait de disposer désormais de trois méthodes différentes pour mesurer la constante de Hubble est, pour les cosmologistes, un bon point.

S. B.

V. Bonvin et al., *MNRAS*, 465(4), pp. 4914-4930, 2016

Samalas et le climat

Avec des collègues, Sébastien Guillet, de l'université de Berne, a analysé les effets climatiques de la violente éruption du grand volcan indonésien Samalas en 1257. L'explosion de la caldeira a projeté dans la stratosphère 40 kilomètres cubes de magma et deux fois plus d'aérosols sulfatés que l'éruption en 1815 du Tambora voisin, à l'origine de « l'année sans été ». On pensait que, comme l'explosion du Tambora, celle du Samalas avait refroidi le climat. En s'appuyant sur les archives historiques, sur les enregistrements climatiques issus des calottes de glace et sur la dendrochronologie, les chercheurs ont montré qu'en effet, les étés de 1258 et de 1259 ont été parmi les plus froids de tout le dernier millénaire, particulièrement au Japon, en Sibérie et en Europe occidentale. Mais l'Alaska et le nord du Canada ont au contraire bénéficié d'étés chauds. Un paradoxe que les chercheurs attribuent à un intense épisode d'El Niño.

Embryologie

Comment les organes internes se forment

L'embryogenèse est bien une histoire de mécanique. On savait que les mouvements des tissus induits par l'activation des gènes du développement régulent en retour la différenciation des tissus. Emmanuel Farge, à l'institut Curie, à Paris, et ses collègues viennent de prouver que des actions mécaniques activent aussi des mouvements de la morphogénèse. Ils ont montré chez la drosophile que la gastrulation – la formation de tubes précurseurs des organes internes – est déclenchée par des oscillations mécaniques.

Chez la mouche, le premier tube formé, le mésoderme, donne naissance à tous les organes

internes, hormis le tube digestif. Il apparaît grâce à l'accumulation d'une protéine, Myo-II, sous la membrane des cellules située vers l'extérieur de l'embryon. Cette protéine est un moteur moléculaire qui contracte la surface externe de l'embryon, laquelle se creuse jusqu'à former un tube. La contraction a lieu en deux étapes : au début, Myo-II n'est présente à la surface des cellules que sous la forme de petits spots instables qui produisent des pulsations aléatoires. Puis, avec la stabilisation des spots, la contraction se coordonne.

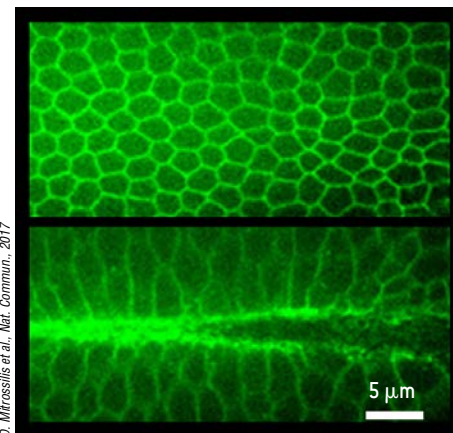
Chez un mutant où les pulsations sont inhibées et la formation du mésoderme est bloquée, les

chercheurs ont rétabli la gastrulation en imitant les premières pulsations à l'aide de vésicules magnétiques injectées dans les cellules et plongées dans des champs magnétiques oscillants. Myo-II s'est alors stabilisée à la surface externe des cellules et le mésoderme s'est creusé. De plus, l'équipe a montré que la déformation du mésoderme provoque la formation du tube gastrique.

La gastrulation, une étape commune à tout le règne animal, s'apparenterait donc à une cascade de dominos...

Marie-Neige Cordonnier

D. Mitrossilis et al., *Nature Commun.*, en ligne le 23 janvier 2017



Lors de la gastrulation, la surface de l'embryon (en haut) se courbe vers l'intérieur jusqu'à ce qu'elle forme un premier tube, le mésoderme (en bas), comme ici chez une drosophile.

L'énergie de l'or

Pour comprendre les propriétés de l'or, notamment sa couleur jaune, il faut prendre en compte des effets relativistes dans le calcul des niveaux d'énergie des électrons. Cependant, cela ne suffit pas pour calculer précisément l'énergie de première ionisation de cet atome, c'est-à-dire l'énergie minimale nécessaire pour en arracher un électron. Peter Schwerdtfeger, de l'université Massey, en Nouvelle-Zélande, et son équipe obtiennent un bon accord entre la théorie et la mesure expérimentale en prenant en compte des interactions impliquant jusqu'à cinq électrons.

Les archées d'Asgard

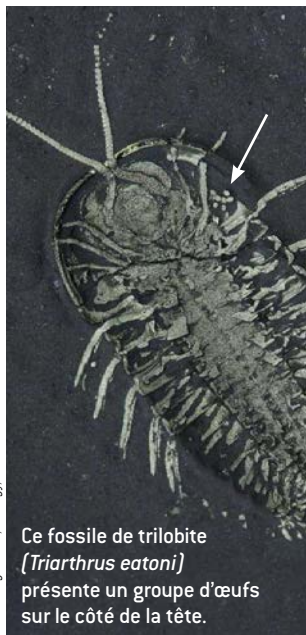
L'arbre du vivant a trois troncs : les bactéries et les archées sont des microorganismes simples, les eucaryotes peuvent être grands et complexes. Selon certains scénarios, archées et eucaryotes partageraient un ancêtre commun. En 2015, grâce à une analyse métagénomique, Thijs Ettema, de l'université d'Uppsala, et son équipe ont découvert Loki, une archée qui porterait des gènes aussi présents chez les eucaryotes. Par cette méthode indirecte, ces chercheurs ont trouvé trois cousines, qu'ils ont bien sûr nommées Thor, Odin et Heimdall ! Reste à les rencontrer pour confirmer leur génome.

ADN de tortue dans un trou

Sawmill Sink, un trou d'eau des îles Abacos, dans les Bahamas, avait conservé la carapace d'une tortue géante de l'espèce éteinte *Chelonoidis alburyorum*. Surprise : elle contenait encore tout son ADN, dont le séquençage a révélé une parenté avec la tortue d'Argentine *Chelonoidis chilensis* et avec la tortue géante des Galapagos *Chelonoidis vicina*. Les paléogénéticiens en déduisent que les tortues ont immigré aux Caraïbes il y a 13 à 15 millions d'années, donc un peu plus de 10 millions d'années après que leur groupe ancestral des *Geochelone* est arrivé en Amérique en provenance d'Afrique.

Paléontologie

Des œufs de trilobites



© T. A. Hegna et al., Geology, 2017

Ce fossile de trilobite (*Triarthrus eatoni*) présente un groupe d'œufs sur le côté de la tête.

Du Cambrien à la fin du Permien, il y a environ 250 millions d'années, les trilobites ont dominé dans les mers. Avec plus de 18750 espèces décrites, ces arthropodes marins sont bien connus, mais on ignorait tout de leur reproduction. Or Thomas Hegna, de l'université de l'Illinois de l'Ouest, a annoncé la découverte, sur deux fossiles de trilobites vieux d'environ 450 millions d'années, de structures qui seraient des œufs.

Il s'agit de petits corps ovoïdes d'environ 0,16 millimètre de long groupés sur le côté de la tête par paquets de 3 à 9 (voir le cliché ci-contre). Sur les images tomographiques, on ne distingue aucun détail interne ni comment ces corps étaient attachés à la tête, mais on ne peut douter qu'ils l'étaient.

S'agit-il vraiment d'œufs ? Pour les chercheurs, ces formes ovoïdes localisées près de la tête ne peuvent guère être des fossiles de microorganismes, d'excréments ou de quelque passager clandestin. Leur taille correspond par ailleurs à celle constatée généralement sur des œufs d'arthropodes.

Un argument supplémentaire vient de la reproduction des limules, des arthropodes marins en forme de fer à cheval. Ce sont des animaux actuels, mais dont le type existe depuis 500 millions d'années. Or les limules portent leurs œufs non fécondés dans un réseau ovarien situé dans la tête.

F. S.

T. A. Hegna et al., *Geology*, vol. 45, pp. 199-202, 2017

Insolite

L'origine des cercles de fées

Dans le désert du Namib, le sol est constellé de zones circulaires régulièrement distribuées et dépourvues de plantes. Corina Tarnita, de l'université de Princeton, et ses collègues ont proposé une explication. Elle combine deux hypothèses considérées indépendamment jusque-là : la compétition entre des colonies de termites qui mangent les plantes et une compétition entre les plantes pour l'accès à l'eau, rare dans cette région.



© T. Coverdale et J. Gayton, université Princeton

Virologie



Le puissant arsenal de guerre des bactériophages

Char d'assaut, corruption, agents dormants... Les stratégies des virus de bactéries sont bien plus complexes et variées qu'on ne le soupçonnait.

L'ingéniosité des bactériophages, des virus qui n'infectent que les bactéries, n'a pas fini de surprendre. Trois stratégies mises au jour révèlent à quel point ces entités s'apparentent à des machines de guerre bien rodées. La première concerne leur mode de reproduction. Comme tous les virus, les phages se multiplient en détournant la machinerie cellulaire de leurs hôtes. Mais la technique que Vorrapon Chaikeeratisak, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont découverte chez un phage des bactéries *Pseudomonas* tient plus du char d'assaut que d'un simple parasitage. En observant l'invasion en détail, les biologistes ont montré que lors de sa réplication, le phage construit un compartiment qui ressemble à un noyau de cellule eucaryote.

Comme dans ces cellules, le compartiment renferme de l'ADN (l'ADN viral) ainsi que les protéines impliquées dans sa réplication et sa transduction en ARN. Les fragments d'ARN sortent alors de la structure et sont traduits en protéines qui serviront à fabriquer l'armature du virus hors du compartiment ou iront renforcer les troupes à l'intérieur. On connaissait des virus

produisant de tels compartiments dans des cellules eucaryotes, mais rien de tel n'avait été décrit chez les bactéries.

Une fois prête, la nouvelle armée de phages détruit la bactérie et se déploie. C'est là qu'intervient la deuxième stratégie. Elhanan Tzipilevich, de l'université hébraïque de Jérusalem, et ses collègues ont mis en évidence un mécanisme par lequel des phages infectent des bactéries qui leur résistaient. En mettant en présence des bactéries *Bacillus subtilis* sensibles à un phage et d'autres résistantes, ils ont montré que lorsqu'une armée de phages s'échappe d'une bactérie sensible, la membrane bactérienne détruite forme de petites vésicules. Or la bactérie doit sa sensibilité à un récepteur sur sa membrane, lequel se retrouve à la surface des vésicules. Lorsque les vésicules rencontrent une bactérie, elles fusionnent avec celle-ci, lui apportant le récepteur qui rend sensible au phage...

La troisième stratégie, elle, optimise la production des armées. Zohar Erez, de l'institut Weizmann, en Israël, et ses collègues ont montré en étudiant plus d'une centaine de phages que ceux-ci communiquent: lorsqu'un phage

infecte une bactérie, il produit un peptide ressemblant à ceux que sécrètent certaines bactéries pour communiquer. Chez les bactéries, la concentration en peptide renseigne chaque individu sur la densité de population de ses proches voisins. Le peptide viral renseigne les phages sur la densité de population de leurs congénères en utilisant les mêmes mécanismes que les peptides bactériens. Plus la concentration en peptide viral est élevée dans une bactérie (signe qu'il y a beaucoup de phages aux alentours), plus le phage qui l'attaque a tendance non pas à développer une armée, mais à insérer son ADN dans le génome bactérien, tel un agent dormant.

Au fil de l'évolution, les bactéries ont développé des défenses contre les inventions de leurs prédateurs. En retour, la sélection naturelle a favorisé chez les phages des stratégies qui les contournent. Dans cette course à la survie, une bactérie infectée et son virus tenteront peut-être un jour de cohabiter, produisant une minuscule cellule à noyau pérenne... Seront-ils les premiers à avoir essayé?

M.-N. C.

Science, vol. 355, pp. 194-197, 2017;
Cell, vol. 168, pp. 186-199, 2017;
Nature, vol. 541, pp. 488-493, 2017

Les bactériophages (ou phages), les virus des bactéries, attaquent leurs hôtes en injectant leur ADN à travers leur membrane. Au fil de l'évolution, ils ont développé de multiples mécanismes qui leur permettent de parer les défenses des bactéries, et dont trois ont été découverts récemment.