

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

PHYSIQUE
**POURQUOI
LES TRICOTS SONT
SI ÉLASTIQUES**

NEUROSCIENCES
**NE DORMIR
QUE D'UN
DEMI-CERVEAU**

ASTROPHYSIQUE
**KAGRA, QUATRIÈME
DÉTECTEUR D'ONDES
GRAVITATIONNELLES**

M 02687 - 506S - F. 6,90 € - RD

DÉCEMBRE 2019
N° 506

PALÉOANTHROPOLOGIE

L'HOMME DE

DENISOVA

Notre
cousin d'Asie
sort de l'ombre

**POUR LA
SCIENCE**

www.pourlascience.fr

170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

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

Stagiaire: Lucas Gierczak

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Keryhuel

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Charlotte Calament,

Ingrid Leroy, Raphaël Queruel

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétaire général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Séléna Berteloot

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: François Pétry
et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Rodolphe Barrangou, Céline Bon, André Brack,
Régis de la Bretèche, Maud Bruguère, Pierre Charollois,
Pauline Colinet, Audrey Dussutour, David Holcman,
Astrid Lamberts, Paul-Antoine Libourel,
Olivier Minazzoli, Laurent Naudon, Jérôme Novak,
Christophe Pichon, Romain Pirrachio, François Rouyer,
Jean Vannier

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

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

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél. 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

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting editor in chief: Curtis Brainard

President: Dean Sanderson

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. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

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

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

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

**É
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

UNE PHALANGE DEVENUE LÉGION?

Pour les paléanthropologues, l'année 2010 restera dans les annales en raison de deux événements majeurs. Tout d'abord, elle a vu le décryptage du génome de l'homme de Néandertal, cette espèce sœur de la nôtre, *Homo sapiens*, et que l'on a longtemps considérée à tort comme une sous-espèce – y compris dans le sens péjoratif du terme. L'autre événement paléogénétique majeur de cette année-là a été le décryptage de l'ADN contenu dans un tout petit bout d'os, un fragment de phalange vieux de plus de 50000 ans découvert dans la grotte de Denisova, en Sibérie. Or cette analyse a révélé que cette phalange humaine n'appartenait ni à un *Homo sapiens* ni à un Néandertalien: cela signait la découverte d'une troisième espèce humaine, sœur et contemporaine des deux autres – l'homme de Denisova.

C'est cette épopée de la paléanthropologie que nous raconte dans ce numéro l'un de ses principaux acteurs, Jean-Jacques Hublin (voir pages 28 à 36). Et cela jusqu'à ses développements les plus récents, car l'homme de Denisova ne se résume plus à l'ADN d'une phalange. Depuis 2010, d'autres vestiges mis au jour renseignent sur la répartition géographique des Denisoviens, leurs sous-populations, voire leur apparence physique... Et ces études ne font sans doute que commencer: dans les collections paléontologiques de la Chine, les fossiles non encore analysés et dont l'appartenance dénisovienne est vraisemblable semblent légion. ■

SOMMAIRE

N° 506 /
Décembre 2019

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Modifier le génome sans introduire trop d'erreurs
- La prévalence des maladies rares évaluée
- Nombres premiers jumeaux: la conjecture avance
- Des trilobites qui se suivent en file indienne
- De l'ARN formé dans une soupe primordiale?
- Un graviton massif?
- Le gène du petit dormeur
- Une nécropole domestique à Narbonne
- Des magnétars nés de la fusion d'étoiles?
- Pas de bouchons chez les fourmis

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 22

AGENDA

P. 24

HOMO SAPIENS INFORMATICS

La hotte virtuelle du père Noël

Gilles Dowek

P. 26

QUESTIONS DE CONFIANCE

Un cache-sexe qui brise les conventions

Virginie Tournay



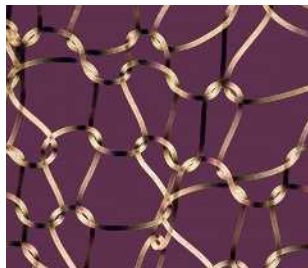
En couverture:

D'après D. Gokham et al., *Cell*, vol. 179, pp. 180-192, 2019.

© Shutterstock.com/Denis Maliugin
© Shutterstock.com/life_in_a_pixel

Ses portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



P. 38

PHYSIQUE

ÉLASTIQUE COMME UN TRICOT

Samuel Poincloux

Un réseau de mailles présente des propriétés mécaniques singulières. Leur étude révèle des connexions étonnantes avec les séismes. Et inspire aussi la conception de robots souples.



P. 50

ASTROPHYSIQUE

KAGRA, L'ÉVEIL DU GÉANT SOUS LA MONTAGNE

Lee Billings

La mise en fonction du premier instrument de détection d'ondes gravitationnelles installé sous terre, au Japon, est imminente.



P. 44

NUTRITION

LES EFFETS PERVERS DU COMMERCE DU POISSON

Daniel Pauly

L'essentiel du poisson pêché dans les pays en voie de développement est expédié à l'étranger, alors qu'en consommer une fraction sur place suffirait à réduire les carences nutritionnelles dont souffrent les populations locales.



P. 56

BIOLOGIE

QUAND LES BRANCHES DE L'ARBRE DU VIVANT S'ENTREMÊLENT

Éric Tannier, Bastien Boussau et Vincent Daubin

Par divers mécanismes, de multiples gènes passent d'un organisme à un autre sans qu'ils soient parents directs. Si l'on ne peut plus s'appuyer sur ces gènes pour retracer l'histoire du vivant, serait-ce la fin des arbres de parenté? Bien au contraire...



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



Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



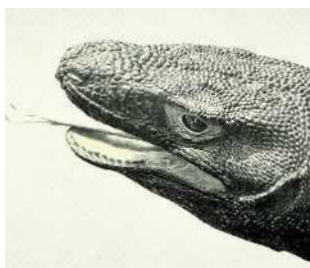
P. 66

NEUROSCIENCES

NE DORMIR QUE D'UN DEMI-CERVEAU

Gian Gastone Mascetti

Dauphins et phoques partagent avec d'autres animaux une remarquable capacité: dormir avec un seul hémisphère de leur cerveau, tandis que l'autre reste éveillé. Un demi-sommeil qui présente bien des avantages.



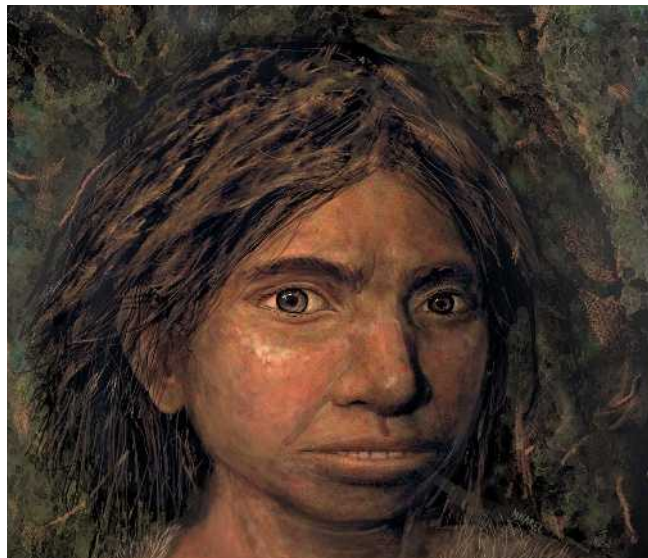
P. 72

HISTOIRE DES SCIENCES

À LA POURSUITE DU DRAGON DE KOMODO

Benoît Grison

En 1927, William Burden, un jeune explorateur américain, relata son expédition dans un « monde perdu » des îles hollandaises où régnaient de mystérieux « dragons ». Il n'en fallut pas plus pour transformer le grand varan de Komodo en superstar...



P. 28

PALÉOANTHROPOLOGIE

DENISOVA, NOTRE COUSIN D'ASIE SORT DE L'OMBRE

Jean-Jacques Hublin

Il y a dix ans, des paléogénéticiens ont découvert une nouvelle espèce humaine fossile, l'homme de Denisova, uniquement grâce à de l'ADN ancien conservé dans une phalange retrouvée dans l'Altai. Mais pourquoi ce cousin n'avait-il pas laissé de fossiles plus imposants? En fait, ils étaient sous nos yeux...

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

LA PHYSIQUE A-T-ELLE BESOIN DES NOMBRES RÉELS?

Jean-Paul Delahaye

L'usage des nombres réels pour représenter des grandeurs physiques semble aller de soi. Pourtant, ces nombres ne sont pas aussi réels que le suggère leur nom, et ils engendrent parfois illusions et faux espoirs.

P. 86

ART & SCIENCE

Nous aurons des coquelicots

Loïc Mangin



P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Des volants pleins d'énergie

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

L'impénétrable venin du serpent à sonnettes

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Une nouvelle sauce: les jaunes au beurre

Hervé This

P. 98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.22 Agenda

P.24 *Homo sapiens informaticus*

P.26 Questions de confiance

GÉNÉTIQUE

MODIFIER LE GÉNOME SANS INTRODUIRE TROP D'ERREURS



La nouvelle génération d'outils d'édition de l'ADN repose sur la technique CRISPR-Cas9, mais avec une précision améliorée et moins de défauts.

Une nouvelle technique de modification de l'ADN, le « prime editing », améliore l'outil CRISPR-Cas9 en offrant plus de fiabilité et de polyvalence.

En 2012, Emmanuelle Charpentier, alors à l'université d'Umeå, en Suède, et Jennifer Doudna, de l'université de Californie à Berkeley, déclenchaient une révolution dans le domaine de la génétique. Avec leurs collègues, elles ont développé un outil simple, peu coûteux et efficace, nommé CRISPR-Cas9, capable d'« éditer » une séquence d'ADN quasi à volonté (*voir PLS n° 456*). Les perspectives de traiter certaines maladies par cette approche étaient très encourageantes. Cependant,

même si cette technique fait maintenant partie de la boîte à outils des généticiens, elle souffre de quelques défauts. David Liu, de l'Institut Broad (associé au MIT et à l'université Harvard), aux États-Unis, et ses collègues viennent d'améliorer la technique, en la rendant plus fiable et plus polyvalente.

Pour mettre au point CRISPR-Cas9, Emmanuelle Charpentier, Jennifer Doudna et leurs collègues s'étaient inspirés d'un mécanisme de défense que l'on trouve chez des bactéries. Celui-ci agit un peu comme un système immunitaire: il

reconnaît l'ADN d'un virus qui aurait déjà tenté par le passé d'infecter la bactérie. Comment cela fonctionne-t-il? Lors d'une première attaque virale, la bactérie récupère une séquence de l'ADN du virus et la conserve dans une région de son propre génome, nommée CRISPR et faisant office de bibliothèque. Quand le même virus envahit de nouveau la bactérie, l'enzyme bactérienne Cas9, guidée par deux ARN, reconnaît l'ADN viral et le rend inopérant en le coupant de façon spécifique.

Les généticiens ont détourné ce système de façon astucieuse. Un seul ARN, molécule facile à synthétiser en laboratoire, sert de guide à l'enzyme Cas9. Il est conçu pour identifier la région du génome à modifier; Cas9 se fixe alors à l'ADN et coupe ses deux brins à l'endroit

visé. Si, par exemple, une séquence d'ADN appropriée est introduite dans le milieu, elle s'insère au niveau de la coupure. La cellule répare elle-même les jonctions coupées.

Cependant, la technique, bien que précise, n'est pas parfaite. Par exemple, elle n'est pas adaptée quand il s'agit de remplacer une unique base (constituant de l'ADN) par une autre dans un gène. Or de nombreuses maladies génétiques sont dues à une mutation sur une unique base. Autre inconvénient de la technique, lorsque la cellule répare les jonctions (quand les deux brins de l'ADN ont été coupés), il arrive que des bases s'y insèrent ou disparaissent de façon aléatoire. Enfin, des études ont aussi montré que l'enzyme Cas9 confond parfois différentes zones de l'ADN et opère des modifications non désirées.

Est-il possible de développer une méthode plus fiable et plus polyvalente que CRISPR-Cas9? Celle mise au point par David Liu et ses collègues, nommée «prime editing», s'appuie sur une version améliorée de l'enzyme Cas9, associée à une seconde enzyme, une transcriptase inverse (comme on en trouve dans les rétrovirus) et à un brin d'ARN. Ce dernier sert toujours de guide pour repérer la zone d'intérêt sur l'ADN, mais il a une seconde fonction: il porte la séquence à insérer. Dans cette technique, l'enzyme Cas9 modifiée réalise une incise sur un seul brin au lieu de deux. La transcriptase inverse se charge alors d'incorporer dans l'ADN la séquence à insérer. Avec quelques étapes supplémentaires assez simples, on obtient un ADN modifié de façon programmable et prévisible.

L'équipe de David Liu a testé la méthode de différentes façons sur des cellules humaines et des neurones de souris. Elle a montré qu'il était possible de réaliser toutes les mutations possibles d'une base unique, des insertions et des suppressions de séquences. L'efficacité de l'outil (le taux de modifications réussies dans une population de cellules) se révèle supérieure à celle de CRISPR-Cas9 dans la plupart des cas. Et le taux de modifications involontaires est réduit. Une technique prometteuse, même si le chemin est encore long avant une éventuelle utilisation thérapeutique. ■

SEAN BAILLY

A. V. Anzalone *et al.*, *Nature*, en ligne le 21 octobre 2019

La prévalence des maladies rares évaluée

Près de 300 millions de personnes dans le monde souffrent d'une maladie rare. Des chercheurs, notamment de l'Inserm, ont utilisé la base de données Orphanet pour estimer cette prévalence. Ana Rath, qui a dirigé l'étude, nous explique les enjeux de ces travaux.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

ANA RATH
directrice de l'US14-
Orphanet de l'Inserm

Quelle est la définition d'une maladie rare ?

Une maladie rare, telle que la sclérodémie systémique ou la polyglobulie de Vaquez, ne touche qu'une faible part de la population. En Europe, dans sa définition réglementaire, une maladie est dite « rare » si elle touche moins de 5 personnes sur 10 000. Afin de mieux étudier ces maladies, l'Inserm a créé en 1997 le portail Orphanet, qui rassemble les informations provenant des publications scientifiques. Aujourd'hui, 38 pays participent à Orphanet et près de 6 200 maladies rares y sont recensées, dont 72 % sont d'origine génétique et 70 % se déclarent dès l'enfance. C'est la base de données la plus complète sur le sujet.

Ces maladies sont rares, mais combien de personnes touchent-elles ?

À partir de la base Orphanet, nous avons estimé la prévalence des maladies rares dans la population mondiale. Cela a nécessité de normaliser toutes les données et de voir celles que nous pouvions extrapoler de façon fiable à l'échelle du globe. Nous avons ainsi montré qu'au moins 300 millions de personnes souffrent d'une maladie rare, soit 4 % de la population mondiale ! Par ailleurs, parmi celles prises en compte dans l'étude, 149 pathologies sont responsables à elles seules de 80 % des cas de maladies rares. La conclusion importante de notre étude est que, si chacune de ces maladies est rare, ensemble, elles touchent une grande part de la population. Il est donc impératif de mieux les diagnostiquer.

Quels sont les obstacles ?

Ces maladies sont nombreuses et on ne peut pas demander aux professionnels de santé de toutes les connaître. Dès lors,

leur diagnostic et leur prise en charge sont difficiles. Cela engendre beaucoup de souffrance pour les patients et leurs familles. En outre, seules 5 % de ces maladies ont un traitement adapté.

Quelles sont les solutions ?

Il y a plusieurs modes d'action. La France a été pionnière pour organiser l'expertise (les spécialistes sont eux-mêmes peu nombreux) grâce aux centres de référence répartis sur le territoire. Ils facilitent le rapprochement entre les patients, les professionnels de santé et les experts des maladies rares. Un malade peut ainsi être facilement orienté vers le bon interlocuteur pour un meilleur suivi. Ce système est en train de s'exporter et de s'étendre à l'échelle européenne avec une dimension transfrontalière. Ainsi, si une personne souffre d'une certaine maladie et qu'il n'y a pas d'expert dans son pays, on peut la rediriger vers un pays voisin.

Autre approche : en 2018, l'État français a lancé son troisième plan pour les maladies rares. Doté d'un budget de près de 780 millions d'euros sur cinq ans, il intervient à tous les niveaux : diagnostic, traitement, qualité de vie des malades, etc. Un objectif particulier du plan est de s'attaquer à l'errance de diagnostic afin de comprendre pourquoi certaines personnes mettent des années avant de recevoir un bon diagnostic.

Enfin, il est essentiel d'avoir des données fiables sur ces maladies rares. Les pouvoirs publics, les patients et les associations de patients sont demandeurs de tels chiffres. D'ailleurs, Eurordis, une alliance d'associations de malades, a participé à notre étude. Pour faciliter cette démarche, Orphanet propose une nomenclature standardisée qui commence à être implémentée en France et d'autres pays. Grâce à elle, nous pourrions homogénéiser nos informations et gagner en efficacité. ■

S. Nguengang Wakap *et al.*, *Euro. J. Hum. Genet.*, en ligne le 16 septembre 2019

MATHÉMATIQUES

NOMBRES PREMIERS Jumeaux : LA CONJECTURE AVANCE

Deux mathématiciens ont prouvé la conjecture des nombres premiers jumeaux... dans une version transposée aux « corps finis » de nombres.

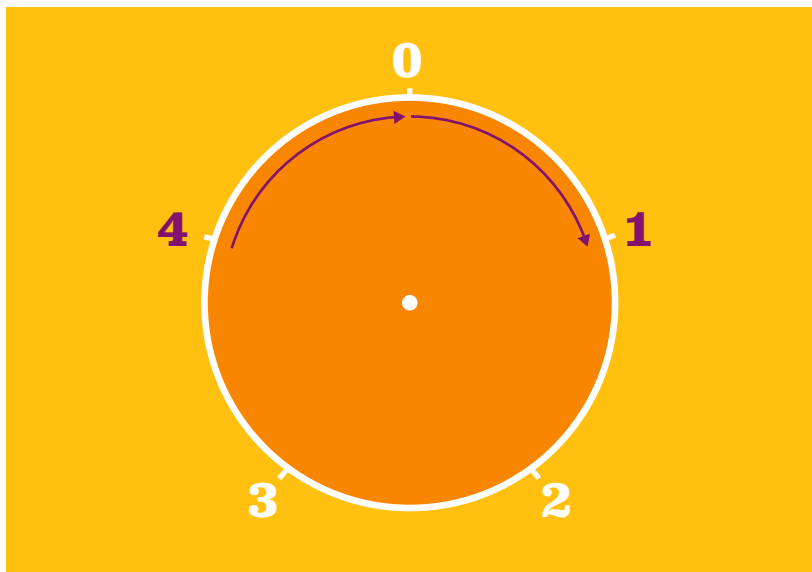
Les nombres premiers, à savoir les entiers divisibles seulement par 1 et par eux-mêmes, posent de nombreuses questions difficiles, voire non résolues. On sait en particulier, depuis Euclide, qu'il en existe une infinité. Mais qu'en est-il pour les paires de nombres premiers dont la différence est égale à 2 (comme 3 et 5, ou 11 et 13) et dits « nombres premiers jumeaux » ? Une conjecture affirme qu'il existe une infinité de telles paires.

En 1849, un mathématicien français, Alphonse de Polignac, formula une version plus forte de cette conjecture en incluant toute différence paire : les différences de 4 (comme 3 et 7), de 6 (comme 5 et 11), etc. Depuis, les progrès ont été rares. En 2013, le mathématicien chinois Zhang Yitang a montré qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers qui diffèrent de moins de 7×10^7 . Mais la conjecture initiale est encore loin d'être prouvée.

En septembre 2019, Will Sawin, de l'université Columbia, et Mark Shusterman, de l'université du Wisconsin à Madison, ont eu l'idée d'étudier le problème en l'appliquant non pas à l'ensemble des entiers classiques, mais à des ensembles de nombres plus exotiques : les corps finis. Que sont les corps finis ? Certains nous sont familiers et fonctionnent comme les heures indiquées sur une horloge (voir la figure ci-dessus). Ils contiennent un nombre fini de nombres entiers, en commençant par 0 et en « rebouclant » quand on arrive au plus grand nombre.

Problème : dans les corps finis, il n'y a pas de nombres premiers, car tout nombre est divisible par tout autre, sauf par zéro. Cependant, on peut construire à partir des corps finis des objets pour lesquels le concept de primalité existe : les polynômes (comme $2x^2+3x+1$) dont les coefficients sont des éléments du corps fini. La plus grande puissance de x est nommée le degré. Un tel polynôme est dit « premier » (ou irréductible) lorsqu'on ne peut pas le factoriser. Par exemple, x^2+x+1 est premier, mais $x^2-1 = (x+1)(x-1)$ ne l'est pas, et $x+1$ et $x-1$ sont ses facteurs premiers (il en a donc deux distincts).

On peut alors définir des polynômes premiers jumeaux. Par exemple, les polynômes x^2+x+1 et x^2+2x+3 sont premiers. Et comme



Un corps fini avec 5 nombres de 0 à 4. Pour additionner deux nombres, on fait des tours dans le sens horaire : par exemple, $4 + 2 = 1$. On peut aussi soustraire, ou multiplier : $4 \times 3 = 4 + 4 + 4 = 2$. Pour les polynômes dont les coefficients sont des nombres d'un tel corps fini, on peut formuler une conjecture des « polynômes premiers jumeaux », qui vient d'être démontrée.

246

GRÂCE AU PROJET COLLABORATIF POLYMATH, DES MATHÉMATICIENS ONT MONTRÉ QU'IL EXISTE UNE INFINITÉ DE PAIRES DE NOMBRES PREMIERS DONT L'ÉCART EST INFÉRIEUR À 246. ILS ONT AINSI AMÉLIORÉ LE RÉSULTAT OBTENU PAR ZHANG YITANG EN 2013.

leur différence est $x+2$, ils sont jumeaux pour l'écart $x+2$.

La question est alors : pour un écart donné, existe-t-il une infinité de paires de polynômes premiers jumeaux ? Cette version de la conjecture est plus facile à traiter que celle des nombres premiers jumeaux parce qu'elle se reformule géométriquement. Will Sawin et Mark Shusterman ont suivi cette approche, en associant à chaque polynôme de degré d un point dans l'espace de dimension $d+1$ dont les coordonnées sont définies par les coefficients du polynôme. La difficulté est alors d'identifier les points qui correspondent aux polynômes premiers. Les chercheurs y sont parvenus en développant de nouvelles méthodes géométriques. Pour finir, ils ont utilisé des résultats déjà connus sur les entiers pour démontrer qu'il existe bien une infinité de polynômes premiers jumeaux pour chaque écart possible sur les corps finis. Reste à voir comment utiliser ce résultat pour le cas des nombres premiers jumeaux. ■

LUCAS GIERCZAK

W. Sawin et M. Shusterman, en ligne sur arXiv le 7 septembre 2019

EN BREF

DES FOURMIS SPRINTÉES

Pour survivre à une chaleur et une sécheresse extrêmes, les fourmis du Sahara de l'espèce *Cataglyphis bombycina* développent des vitesses de marche remarquables : jusqu'à 85,5 centimètres par seconde. Mesurée par l'équipe de Sarah Pfeffer, de l'université d'Ulm, en Allemagne, cette prouesse serait possible grâce à une masse faible et des pattes courtes, couplées à une fréquence de pas élevée (47 pas par seconde) et une synchronisation précise des pattes, posées trois par trois comme un trépied.

CLASSES SOCIALES À L'ÂGE DU BRONZE

Par recoupement de données archéologiques, génétiques et isotopiques, Alissa Mittnik, de l'institut Max-Planck d'économie à Iéna, en Allemagne, et ses collègues ont montré qu'il y a 4 000 ans, dans l'actuelle Allemagne, un système patriarcal impliquant plusieurs classes sociales existait déjà : les biens se transmettaient de père en fils, les élites vivaient mélangées aux classes sociales inférieures et les hommes de ces élites épousaient des femmes de haut rang social venues d'autres communautés.

FERTILES FUSIONS D'ÉTOILES À NEUTRONS

On savait que les fusions de deux étoiles à neutrons engendraient des éléments lourds, sans avoir pu les mettre en évidence. La température et la densité en neutrons, élevées lors de ces événements, offrent en effet les conditions de leur synthèse. Darach Watson, de l'université de Copenhague, et ses collègues ont, pour la première fois, identifié avec certitude la signature d'un tel élément lourd, le strontium, via l'analyse, grâce à un spectrographe du VLT, au Chili, de la lumière provenant de l'événement de fusion noté GW170817.

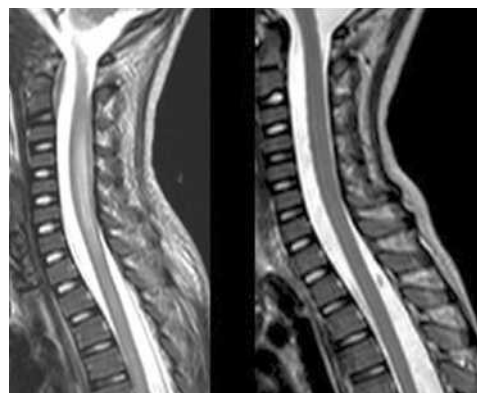
VIROLOGIE

LA CAUSE DE LA « PSEUDO-POLIO »

La paralysie flasque aiguë (PFA) est une maladie neurologique rare et grave, proche de la poliomyélite. Observée pour la première fois en 2012, cette maladie qui touche les jeunes enfants se caractérise d'abord par des symptômes comparables à ceux d'un simple rhume, avant d'entraîner un affaiblissement musculaire des membres puis une paralysie générale en l'espace de quelques jours. On dénombre aujourd'hui plus de 500 cas aux États-Unis. Mais la cause de cette maladie parfois mortelle était encore débattue. L'équipe de Joseph DeRisi et Michael Wilson, de l'université de Californie à San Francisco, lève enfin le voile sur le responsable : un entérovirus.

Pour y parvenir, les chercheurs ont utilisé VirScan, la version améliorée d'un programme de recherche de virus. Celui-ci sonde le liquide cébrospinal (dont celui de 42 patients atteints de PFA) à la recherche d'une réponse immunitaire dirigée contre des entérovirus et des milliers d'autres virus à la fois. La détection d'une telle réponse est synonyme d'une activité virale non négligeable.

Résultat : des anticorps dirigés contre des entérovirus ont été détectés chez près de 70 % des patients atteints de PFA. Par ailleurs, ce



Sur cette image d'IRM, on constate une inflammation de la moelle épinière (renflée, à gauche) qui se résorbe quelques semaines plus tard (à droite).

test a permis de démontrer que les échantillons de ces mêmes patients ne contenaient pas d'anticorps dirigés contre d'autres virus, éliminant ainsi tout autre coupable potentiel. Il reste à déterminer comment ces souches d'entérovirus, pourtant connues depuis des décennies, sont soudainement devenues capables d'engendrer une paralysie des hôtes infectés. Autre inconnue de l'équation : pourquoi la maladie ne touche-t-elle que des enfants, et aucun adulte ? ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

R. D. Schubert et al., *Nature Medicine*, en ligne le 21 octobre 2019

NEUROSCIENCES

PRÉVENIR LES SÉDATIONS TROP PROFONDES

Au cours d'une anesthésie générale, une sédation trop forte peut entraîner divers troubles cognitifs postopératoires, tels que confusion mentale ou troubles du sommeil. Serait-il possible de les prévenir ? David Holcman, chercheur du CNRS à l'Institut de biologie de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues ont montré qu'il serait au moins possible d'identifier les personnes à risque grâce à l'analyse des dix premières minutes de leur électroencéphalogramme (EEG) et d'ajuster alors le dosage des agents anesthésiques.

Les chercheurs se sont intéressés aux enregistrements EEG de 80 patients sous anesthésie générale. Ils se sont plus précisément penchés sur le tracé des ondes dites alpha, qui



Prévoir les complications d'une anesthésie générale serait possible en analysant l'électroencéphalogramme du patient.

sont dominantes dans l'EEG d'une personne anesthésiée. Ils ont observé que l'on pouvait s'appuyer sur les caractéristiques de phases où ces ondes alpha sont supprimées pour prédire la survenue de complications, et cela, des dizaines de minutes avant leur apparition. ■

ALINE GERSTNER

D. Holcman et al., *Communications Biology*, vol. 2, article 327, 2019

EN IMAGE

DES TRILOBITES QUI SE SUIVENT EN FILE INDIENNE

Les comportements collectifs sont courants chez les animaux: les poissons se rassemblent en bancs, les chenilles processionnaires se suivent... On ignorait de quand datent précisément ces caractères sociaux. Mais en analysant des fossiles très bien conservés de trilobites (des arthropodes marins) datant de 480 millions d'années, Jean Vannier, de l'université Lyon 1, et ses collègues ont découvert que des animaux manifestaient déjà à cette époque des comportements de groupe.

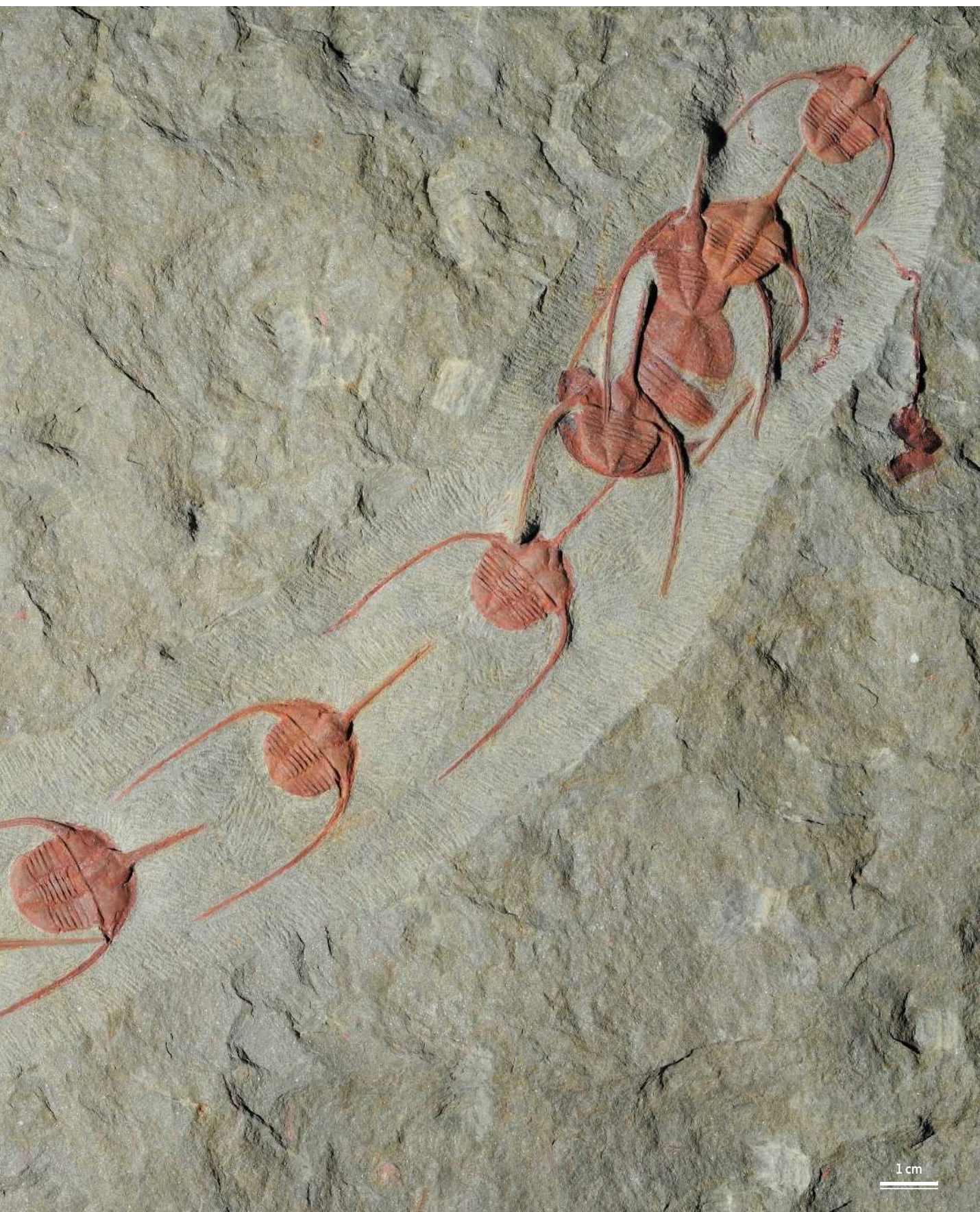
Trouvés au Maroc, les fossiles contiennent des groupes d'individus de l'espèce *Ampyx priscus*. Leur particularité? Au lieu d'être disposés aléatoirement, ces trilobites constituent des formations bien organisées: ils pointent dans la même direction et sont à peu près régulièrement espacés. Il semble ainsi que ces trilobites se suivaient sur les fonds marins avant d'avoir été subitement ensevelis puis fossilisés.

Les chercheurs ont montré que les alignements ne sont en effet pas le fruit du hasard: les fossiles sont ceux de corps entiers, et non d'enveloppes expulsées lors de la mue. Les trilobites étaient donc vivants lorsqu'ils ont été ensevelis. De plus, il s'agissait uniquement de mâles adultes, ce qui suggère un regroupement en période de reproduction. Pour ces raisons, les chercheurs pensent que les trilobites se déplaçaient en groupe sur les fonds marins, en communiquant soit par phéromones, soit tactilement par l'intermédiaire des longues épines de leur carapace. ■

L. G.

J. Vannier *et al.*, *Scientific Reports*,
vol. 9, article 14941, 2019





EXOBILOGIE

DE L'ARN FORMÉ DANS UNE SOUPE PRIMORDIALE ?

La synthèse des quatre bases de l'ARN, réalisée dans les conditions qui régnaient sur Terre il y a 4 milliards d'années, appuie l'un des scénarios proposés pour l'origine de la vie.

La question de l'origine de la vie sur Terre fascine. Certaines théories envisagent une arrivée de molécules organiques depuis l'espace, par des comètes par exemple ; selon les autres, de telles molécules seraient apparues spontanément sur Terre, au fil de mécanismes physicochimiques de plus en plus complexes donnant naissance aux briques élémentaires de la vie. Sous la direction de Thomas Carell, de l'université Louis-et-Maximilien, à Munich, en Allemagne, une équipe vient d'appuyer la seconde hypothèse : elle a montré que des précurseurs de l'ARN, une molécule support de l'information génétique, ont pu se former spontanément dans une « soupe primordiale ».

Pour tester l'idée que la vie serait apparue sur Terre, on peut recréer des conditions physicochimiques (température, pression, pH, éléments présents...) proches de celles régnant sur Terre avant les plus anciennes traces de vie connues, qui remontent à environ 3,4 milliards d'années. On examine ensuite si ces conditions donnent spontanément naissance à des molécules organiques complexes, notamment des acides nucléiques tels que l'ADN ou l'ARN, susceptibles de stocker une information génétique.

Ces dernières années, les chercheurs se sont focalisés sur l'ARN, car on s'est aperçu que dans les cellules, cet intermédiaire de traduction des gènes en protéines remplit aussi d'autres fonctions cruciales : nombre d'ARN régulent l'activité d'autres molécules, par exemple en les guidant vers une cible, en les séquestrant ou en catalysant des réactions. Des biochimistes ont alors imaginé un « monde à l'ARN » – un monde où l'ARN aurait assuré seul diverses fonctions biologiques. L'ADN, dont la réplication et la traduction nécessitent une machinerie complexe, serait apparu dans un deuxième temps. Afin de déterminer si un tel monde à l'ARN a été possible, Thomas Carell et ses collègues ont essayé de synthétiser de l'ARN en laboratoire dans des conditions imitant celles de la Terre avant l'apparition de la vie.

Pour rappel, cette macromolécule est formée d'une suite de « bases azotées » de quatre types, notés A, C, G et U, dont l'enchaînement



La vie a-t-elle émergé d'ingrédients simples et de conditions physicochimiques cycliques dans des bassins comme le Grand Prismatic Spring, dans le parc de Yellowstone, aux États-Unis ?

95 °C

C'EST LA TEMPÉRATURE MAXIMALE UTILISÉE PAR L'ÉQUIPE DE THOMAS CARELL POUR SA SYNTHÈSE UNIFIÉE DES BASES DE L'ARN.

LA TEMPÉRATURE MINIMALE DANS LE MÉCANISME RÉACTIONNEL EST DE 10 °C.

AINSI, PRESQUE TOUTE LA PLAGE DE TEMPÉRATURES CORRESPONDANT À L'ÉTAT LIQUIDE DE L'EAU EST EXPLOITÉE

constitue l'information génétique. Or personne n'était parvenu à produire ces quatre bases en même temps. En 2016, l'équipe avait réussi à créer ensemble les bases A et G, et une autre avait produit les bases C et U, mais dans des conditions incompatibles.

Cette fois, les chercheurs ont mis en évidence un mécanisme réactionnel produisant simultanément les quatre bases à partir d'ingrédients simples tels que l'eau, l'azote et le dioxyde de carbone, dans des conditions similaires à celles de la Terre il y a 4 milliards d'années. Ils ont créé deux mares contenant ces ingrédients et pouvant échanger des molécules solubles par des flux d'eau, et ont fait varier les conditions pour imiter le cycle des saisons, entre sec et humide, froid et chaud, acide et basique. C'est cette succession de phases qui a permis de concilier les deux synthèses auparavant incompatibles. Ces réactions sont si efficaces qu'en cristallisant durant des millénaires, les bases synthétisées auraient pu former d'épaisses couches gris-brun à la surface de la Terre... ■

L. G.

S. Becker et al., *Science*, vol. 366, pp. 76-82, 2019

EN BREF

DU LAPIN POUR LES NÉANDERTALIENS

Les Néandertaliens avaient d'énormes besoins énergétiques et chassaient de grandes proies. Négligeaient-ils pour autant les petites ? Non, ont montré Maxime Pelletier, de l'université d'Oulu, en Finlande, et trois collègues, en analysant les restes de faune de l'abri Pié-Lombard, dans les Alpes-Maritimes. Datées d'environ 70 000 ans, les strates néandertaliennes de cet abri-sous-roche contiennent certes les habituels restes de grands mammifères, mais aussi... 16 084 os de lapins, correspondant à 225 animaux presque tous adultes. Cela distingue cet assemblage d'os de lapins de celui que laisseraient des renards, et la présence de nombreuses traces de découpe achève de convaincre qu'il est dû aux Néandertaliens.

ASTROPHYSIQUE

UN GRAVITON MASSIF ?

Si l'on prend pour base la théorie de la relativité générale d'Einstein, le graviton, l'hypothétique particule médiatrice de l'interaction gravitationnelle, est de masse strictement nulle. Mais cette particule pourrait avoir une masse non nulle dans des théories proposées pour aller au-delà de celle d'Einstein. Afin de déterminer la valeur possible de cette masse, Clifford Will, de l'université de Floride à Gainesville, avait proposé en 1998 d'utiliser des données observationnelles très précises, de les modéliser et de voir comment une masse non nulle se traduirait dans les écarts entre les données d'observation et les prévisions du modèle.

En suivant cette idée qu'ils ont améliorée, Léo Bernus, de l'observatoire de Paris, et ses collègues ont utilisé les éphémérides INPOP17b, qui intègrent des données observationnelles de 1914 à 2017 et qui incluent toutes les planètes (avec Pluton), la Lune, d'autres satellites naturels et 168 astéroïdes. Ils ont ensuite développé un modèle qui prend en compte l'éventuelle masse du graviton. En calculant les mouvements



En étudiant les orbites des planètes, les chercheurs ont testé l'hypothèse d'un graviton massif.

de ces corps à partir du modèle, ils ont examiné à partir de quelle valeur de la masse du graviton le modèle ne reproduit plus correctement les observations. Les chercheurs obtiennent une borne supérieure de $6,76 \times 10^{-23}$ électronvolt, une valeur infime (par exemple, la masse de l'électron, particule très légère, est de $5,1 \times 10^5$ électronvolts). ■

S. B.

L. Bernus et al., *Physical Review Letters*, vol. 123, article 161103, 2019

RENCONTRES

Lundi 2 décembre – 19h : Hybridation, le futur de l'océan ?

Avec : Anthony Herrel, biologiste, Muséum - K. Tailhades et Y. Thireau, réalisateurs. Précédé d'une projection du court métrage d'animation *Hybrids*, de F. Brauch, K. Tailhades, M. Pujol, Y. Thireau et R. Thirion.

Lundi 16 décembre – 19h : Haute mer, quels enjeux ?

Avec : Cédric Cotté, océanographe et écologue, Muséum - Cédric Marteau, directeur de la Réserve Naturelle des Terres Australes Françaises - Julien Rochette, directeur du programme OCEAN, Institut du Développement Durable et des Relations Internationales - Serge Ségura, Ambassadeur chargé des océans, Ministère des affaires étrangères et du développement international. Table-ronde animée par Andréa Rigal-Casta, avocat en droit de l'environnement et co-fondateur du cabinet Géo Avocats.

FILMS

Samedi 7 décembre – 15h : Le bouton de nacre

Réal. : P. Guzmán (Chili – 2015 – 82 min – VOSTF)
Suivie d'une présentation des photos de M. Gusinde par Ch. Barthe, responsable de l'Unité patrimoniale des collections photographiques au Musée du Quai Branly, commissaire de l'exposition *Patagonie. Images du bout du monde*

Samedi 14 décembre – 15h : Finis Terrae

Réal. : J. Epstein (France – 1929 – 37 min – muet)
Intervenant : C. Garineaud, ethno-écologue, chargé de mission Natura 2000, Muséum

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

LES {Partagez les savoirs}
RENDEZ-VOUS DU
MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur
jardindesplantesdeparis.fr

POUR LA
SCIENCE



GÉNÉTIQUE

LE GÈNE DU PETIT DORMEUR

Le sommeil est primordial pour une bonne récupération cérébrale et la consolidation de la mémoire. En moyenne, les adultes ont besoin de dormir huit heures par nuit, mais certaines personnes en ont besoin de bien moins. Une capacité inscrite dans les gènes? L'équipe de Ying-Hui Fu, de l'université de Californie à San Francisco, vient de montrer chez un père et son fils, dormant respectivement 5,5 heures et un peu plus de 4 heures par nuit sans aucun effet secondaire notable, la présence d'une mutation rare dans le gène *NPSR1*, qui code un récepteur neuronal.

La mutation a été introduite chez des souris, qui ont manifesté un comportement plus mobile à la fois pendant la journée et pendant la nuit. Les souris mutantes dorment en moyenne environ une heure de moins par cycle de 24 heures que les souris du groupe contrôle. Elles se montrent aussi plus résistantes à la pression de sommeil, qui augmente après une veille forcée.

Les chercheurs ont montré que la mutation touche la partie extracellulaire des récepteurs, lesquels sont présents à la surface de certains neurones corticaux. La mutation augmenterait la capacité de réponse de ces neurones. Des études moléculaires sur les voies de signalisation connues de ces neurones, dans différentes



Certaines personnes n'ont besoin que de quelques heures de sommeil, sans que cela affecte leurs performances cognitives.

zones du cortex des souris, montrent en effet une activité augmentée en présence des ligands. Ces voies de signalisation sont aussi impliquées dans la régulation du sommeil, mais il reste à comprendre les conséquences de leur suractivation sur les neurones concernés et le temps de sommeil. ■

NOËLLE GUILLON

Lijuan Xing et al., *Science Translational Medicine*, vol. 11, n° 514, eaax2014, 2019

BIOLOGIE ANIMALE

LES MOUCHES ET LES COULEURS

La drosophile aurait une préférence pour la couleur verte le matin et le soir, pour le rouge l'après-midi. Sheyum Syed, de l'université de Miami, et ses collègues ont montré que l'horloge interne de l'insecte dicte ce choix. Les chercheurs ont identifié ce comportement en plaçant des mouches dans des tubes présentant des sections colorées (rouges, vertes et bleues). Avec des insectes mutants dont l'horloge biologique était soit non fonctionnelle, soit dérégulée, les premiers restaient toujours dans la section verte du tube, tandis que les seconds alternaient entre les parties verte et rouge, comme les mouches non mutées, mais à des rythmes anormaux, démontrant ainsi le rôle de l'horloge biologique.

Qu'une drosophile préfère le vert n'a en soi rien d'étonnant, cette couleur étant dominante dans la nature. En outre, les mouches perçoivent



Chaque tube est divisé en trois sections (bleue, verte et rouge). La drosophile circule surtout dans la zone de sa couleur préférée.

le rouge comme un vert peu intense: le choix de l'après-midi revient à chercher un éclairage réduit durant la période la plus chaude de la journée... Pourquoi? Pour faire la sieste! ■

CORALINE MADEC

S. Lazopulo et al., *Nature*, vol. 574, pp. 108-111, 2019

EN BREF

COUP DE VIEUX POUR LES PAPILLONS

L'ordre des lépidoptères, les papillons, aurait émergé il y a environ 300 millions d'années, à la fin du Carbonifère, soit 100 millions d'années plus tôt qu'on ne le pensait. C'est ce qu'ont conclu Akito Kawahara, de l'université de Floride, aux États-Unis, et ses collègues d'une étude phylogénétique fondée sur des fossiles. Les premiers papillons auraient donc précédé les plantes à fleurs et se seraient alors nourris de mousses. Au cours de l'évolution, ils ont acquis une trompe qui leur a permis de butiner le nectar des fleurs.

L'ERREUR EST UTILE

Pour apprendre vite, il est nécessaire de se tromper de temps à autre : une tâche trop facile ou trop ardue n'instruit pas. Robert Wilson, de l'université de l'Arizona, aux États-Unis, et ses collègues viennent de donner un fondement théorique à cette intuition, en donnant des tâches de classification à des algorithmes. L'apprentissage était le plus rapide lorsque le niveau de difficulté entraînait un taux d'erreur de 15 %. Cela s'appliquerait-il aux humains, par exemple pour former un radiologue à examiner des clichés ?

LES DIALECTES DES OUISTITIS

Chez le ouistiti, comme chez d'autres animaux, les vocalisations servant à communiquer diffèrent d'une population à l'autre. Yvonne Zürcher, de l'université de Zurich, en Suisse, et ses collègues ont montré que des ouistitis placés dans une colonie autre que la leur apprennent à utiliser le dialecte local pour communiquer efficacement avec leurs nouveaux congénères. Cela suggère que les spécificités linguistiques chez ces singes ne sont pas d'origine génétique ou environnementale, mais sont socialement apprises.

VOYAGER 2 NOUS QUITTE

En 2012, la sonde spatiale *Voyager 1* a défrayé la chronique en quittant l'héliosphère, la « bulle » de l'espace sous l'influence magnétique des vents solaires. Donald Gurnett et William Kurth, de l'université de l'Iowa, viennent de montrer que sa jumelle *Voyager 2*, elle, a quitté l'héliosphère fin 2018. Les chercheurs ont exploité les données de la sonde pour étudier la densité du plasma au fil de son voyage. Ils ont noté une nette augmentation de cette densité en 2018 : en l'espace de moins d'une unité astronomique (environ 150 millions de kilomètres, la distance moyenne Terre-Soleil), cette densité a augmenté d'un facteur 10 à environ 120 unités astronomiques du Soleil ! Cette transition brutale indique la frontière de l'héliosphère, où le rayonnement cosmique, qui n'est alors plus bloqué par le vent solaire, crée un plasma plus dense. *Voyager 2* est donc le second objet fabriqué par des humains à quitter le Système solaire... ■

L. G.

D. Gurnett et W. Kurth, *Nature Astronomy*, vol. 3, pp. 1024-1028, 2019

QUAND LA PEINTURE VERTE BRUNIT

Dans de nombreuses peintures de la Renaissance, le vert éclatant a disparu pour devenir marron. Marion Alter, du CNRS et du Centre de recherche et de restauration des musées de France, et ses collègues ont élucidé le mécanisme de vieillissement en jeu. En comparant des échantillons de peinture exposés à la lumière et d'autres cachés sous le cadre, les chercheurs ont montré que les pigments à base de cuivre subissent une altération conjointe liée au rayonnement ultraviolet et au dioxygène. En présence de ces facteurs, des anions qui relient les ions Cu^{2+} sont remplacés par des paires d'ions oxygène. Le pigment vert prend alors une couleur brune.

Dans certains tableaux où la peinture était bouillie au préalable, les ions cuivre sont trop séparés les uns des autres pour être connectés par l'oxygène. Le vert se maintient alors dans le temps malgré l'exposition de la toile à la lumière. ■

MARTIN TIANO

M. Alter et al., *Inorg. Chem.*, vol. 58, pp. 13115-13128, 2019

UNE NÉCROPOLE DOMESTIQUE À NARBONNE



Sur cette épitaphe figurent les termes *Coll. Libertae*, signifiant « affranchi de la colonie ».

À Narbonne, les archéologues de l'Inrap s'agitent une fois de plus dans la boue. Ils tentent de restituer avec soin le fonctionnement intime de la nécropole romaine la plus vaste, et surtout la mieux conservée, découverte hors d'Italie. Pourquoi est-elle dans un si bon état ? Parce que la Robine, un ancien affluent de l'Aude, a régulièrement couvert ce vieux cimetière d'alluvions. Placées autour d'enclos maçonnés carrés auxquels on accédait par des sentiers, les sépultures sont à crémation dans 90 % des cas. De petits édifices carrés ou en forme de temple recouvrent certaines d'entre elles ; d'autres, plus simples, consistent juste en un lieu où une famille venait cuire des repas rituels et effectuer des libations à son défunt par l'intermédiaire d'un « conduit à libation », ménagé le plus souvent en retournant une amphore éculée sur l'intérieur de la tombe. Outre l'urne contenant les cendres et les os calcinés du défunt, la tombe contient des offrandes funéraires : pots de nourriture, fioles de verre à parfum, etc. Détail touchant, dans le cas des très jeunes défunts, ce mobilier funéraire comprend souvent un bracelet-amulette, un pendentif-amulette en forme de pénis, des jetons de jeu ou même un biberon en poterie.

L'impression d'ensemble est qu'une couche modeste de la population narbonnaise venait là se livrer à des rites familiaux. Laquelle ? La nécropole se trouve au croisement de deux routes qui menaient aux ports de la Narbonne romaine, et une épitaphe évoque un « affranchi de la colonie » (*voir la photo ci-dessus*). Il pourrait donc s'agir de la communauté constituée par les dockers, les administrateurs, les commis et autres « douaniers » – souvent esclaves – qui faisaient fonctionner le plus grand port de la Gaule romaine. ■

FRANÇOIS SAVATIER

Communiqué de l'Inrap : www.inrap.fr/exceptionnelle-necropole-antique-narbonne-14612