

SCIENCE

PHYSIQUE

POURQUOI

**LES TRICOTS SONT
SI ÉLASTIQUES**

NEUROSCIENCES

NE DORMIR

**QUE D'UN
DEMI-CERVEAU**

ASTROPHYSIQUE

RIORI, QUATRIÈME

**DÉTECTEUR D'ONDES
GRAVITATIONNELLES**

M 02687 - 506

DÉCEMBRE 2019
N° 506

PALÉOANTHROPOLOGIE

L'HOMME DE

DENISOVA

**Notre
cousin d'Asie
sort de l'ombre**

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI

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

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Stagiaire: Lucas Gierczak

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Maria Kerynuel

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Charlotte Calamer

Ingrid Leroy, Raphaël Queruel

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Secrétaire général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Séléna Bertelot

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: François Métry

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 Charlois,

Pauline Colinet, Audrey Dussutour, David Holmès,

Astrid Lamberts, Paul-Antoine Libourel,

Olivier Minazzoli, Laurent Naudon, Jérôme Novak,

Christophe Pichon, Romain Pirrachio, François Royer,

Jean Vannier

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

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 Troadec

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réabonnement:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting editor in chief: Curtis Brainard

Executive Vice President: Michael Plorek

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, 75004 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: 20 %

Impact sur l'environnement: Impact

sur l'eau: 0,007 kg/tonne



Certifié FSC

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 paléontologues, l'année 2010 restera dans les annales en raison de deux événements majeurs. Tout d'abord, elle a vu le décodage 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 décodage de l'ADN contenu dans un tout petit bout d'os, un fragment de phalange vieux de plus de 400 000 ans découvert dans la grotte de Denisova, en Sibérie. Et 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 racontons dans ce numéro. Pour la Science a invité à ce sujet Jean-Jacques Hublin (voir pages 28 à 26). 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. ■

S

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 : 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 cornu
- Une nécropole domestique à Narbonne
- Des magnétars nés de la fusion d'étoiles ?
- Pas de bouche chez les fourmis

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 22

AGENDA

P. 24

HOMO SAPIENS INFORMATIQUES

La hotte virtuelle du père Noël
Gilles Dowek

P. 26

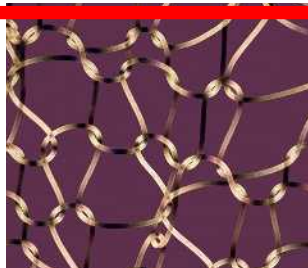
QUESTIONS DE CONFIANCE

Un cache-sexe qui brise les conventions
Virginie Tournay



En couverture :
D'après D. Gokham *et al.*, *Cell*, vol. 17, pp. 180-182, 2019.
© Shutterstock.com/Denis Magagnoli
© Shutterstock.com/life_in_a_box
Les 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, LE VEIL 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 exporté à l'étranger, alors qu'en consommant 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, sera-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 rhinocéros 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 Burdett, 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

PALEOANTHROPOLOGIE

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

Jean-Jacques Hublin

Il y a dix ans, des paleogeneticiciens 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 coquecots

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'impenetrable 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

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'« écrire » 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 qu'ils ont trouvé chez des bactéries. Celui-ci agit un peu comme un système immunitaire et

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. Elle est conçue 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 pure. 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 incision 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

David Liu et al., *Nature*, 21 octobre 2019

La prévalence des maladies rares évaluée

Près de 300 millions de personnes dans le monde souffrent d'une maladie rare. Les données sont compilées dans la base de données Orphanet pour estimer cette prévalence. Ana Bath, qui a dirigé l'étude, nous explique les enjeux de ces travaux.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

Quelles sont les maladies rares ?

Quelle est la définition d'une maladie rare ?

Une maladie rare, telle que la sclérodémie systémique ou la polyarthrite chronique de la main, 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'Institut 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 nécessite 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. De

sur 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 première 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 des 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.

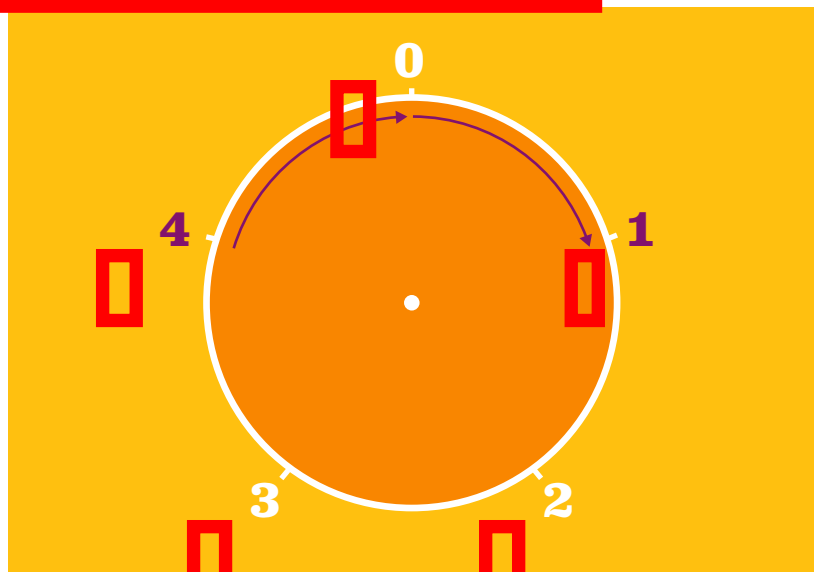
Les nombres premiers, à savoir les entiers divisibles seulement par 1 et par eux-mêmes, posent de nombreuses questions difficiles, voire non résolues. On sait en particulier, depuis Euclide, qu'il en existe une infinité. Mais qu'en est-il pour les paires de nombres premiers dont la différence est égale 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 d'entre eux 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

Will Sawin et Mark Shusterman, en ligne sur arXiv, septembre 2019

DES FOURMIS SPRINTÉUSES

Pour survivre à une chaleur et une sécheresse extrêmes, les fourmis du Sahara de l'espèce *Cataglyphis bombycinus* développent des vitesses de marche remarquables : jusqu'à 85,5 centimètres par seconde. Mesuré par l'équipe de Sarah Pfeiffer, de l'université d'Ulme en Allemagne, cette performance 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 Jena, 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

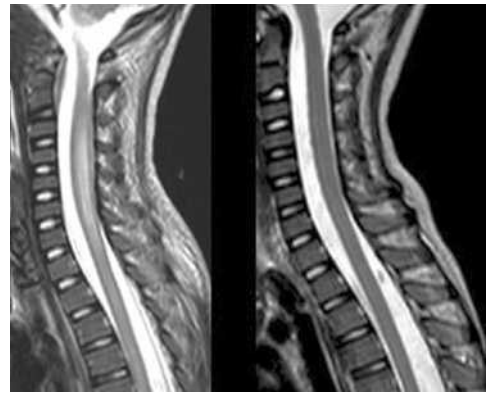
On savait que les fusions de deux étoiles à neutrons engendraient des éléments lourds, sans avoir pu les mettre en évidence. La température et la densité en neutrons, élevées lors de ces événements, créent en effet les conditions de leur synthèse. Darragh Watson, de l'université de Copenhague, et ses 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.

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 céphalo-spinal (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, ces



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

in.Brannen et al., *Nature Medicine*, 2019

NEUROSCIENCES

PREVENIR LES SÉDATIONS TROP PROFONDES

Au cours d'une anesthésie générale, une sédation trop forte peut entraîner divers troubles cognitifs post-opératoires, tels que confusion mentale ou troubles du sommeil. Serait-il possible de les prévenir ? David S. Limmy, chercheur du CNRS à l'Institut de biologie de l'École normale supérieure à Paris, et ses collègues ont montré qu'il est 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

Brannen et al., *Communications Biology*, 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 ignoreait 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.

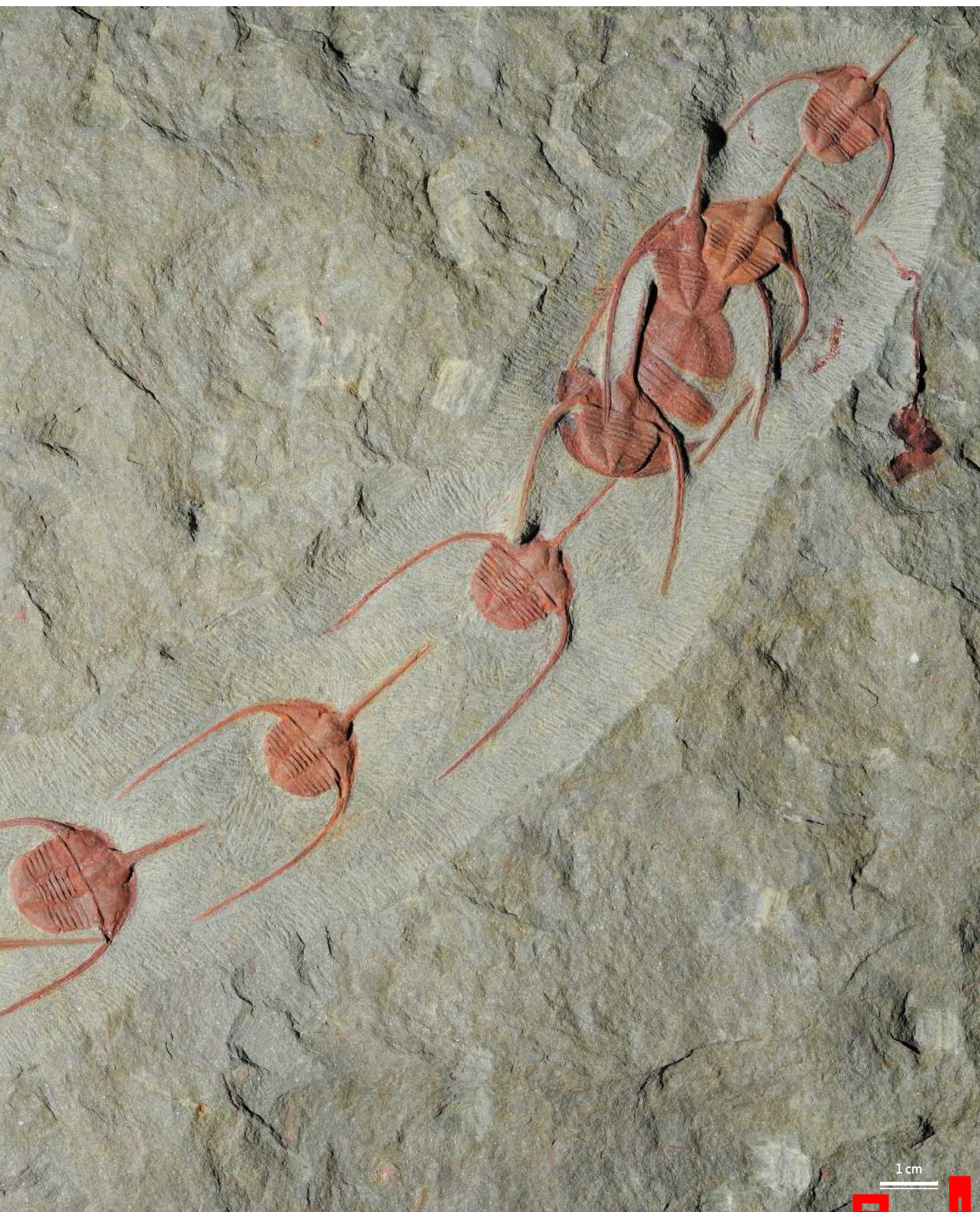
Trouvés au Maroc, les fossiles contiennent des groupes d'individus de l'espèce *Amplexiscus*. Leur particularité? Au lieu d'être disposés aléatoirement, ces trilobites constituent des formations bien organisées: ils pointent dans la même direction et sont à peu près régulièrement espacés. Il semble ainsi 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*,
2019, vol. 9, n° 1, p. 1-10





EXO BIOLOGIE

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 régnaient 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 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 assumé plusieurs 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

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. Datés d'environ 70 000 ans, les strates néandertaliennes de cet abri-sous-rocher 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.

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 INPOP 11b, 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

LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

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

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 Muséum du Quai Branly, commissaire de l'exposition *Patagonia, 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



Au Jardin des Plantes

Détails sur jardindesplantes.paris.fr

POUR LA

SCIENCE

GÉNÉTIQUE

LE GENE 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 dormaient en moyenne environ une heure de moins par nuit de 24 heures que les souris du groupe contrôle. Elles se montrent aussi plus résistantes à l'expression 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 diffé-



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 anormalement élevée 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 les temps de sommeil. ■

NOËLLE GUILLON

Yuanqing et al., *Science Translational Medicine*, 2014, 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 MOUSTES

Chez le moustu, comme chez d'autres animaux, les vocalisations servent à communiquer différemment d'une population à l'autre. Yvonne Zürcher, de l'université de Zurich en Suisse, et ses collègues ont montré que des moustes 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.

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. Shyrum Sved, 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 déréglée, 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 avec des rythmes anormaux, démontrant ainsi le rôle de l'horloge biologique.

Qu'une drosophile préfère le vert n'a 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

Shyrum et al., *Nature*, 2019

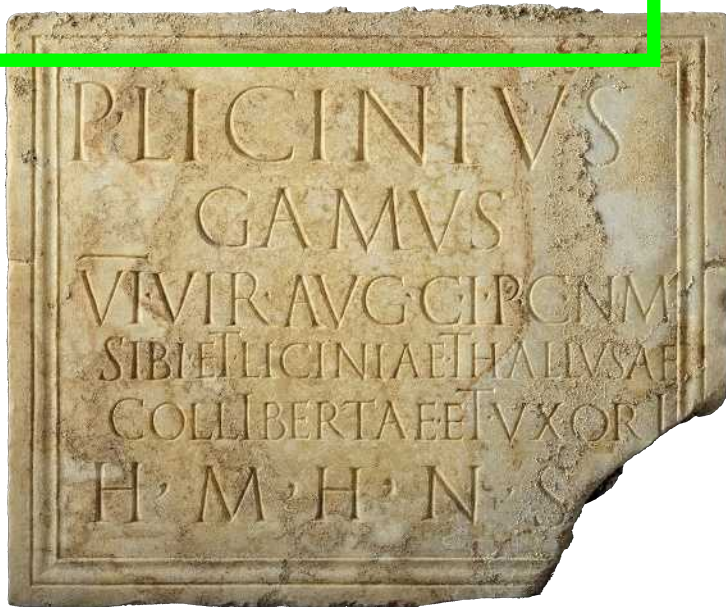
VOYAGER 2 NOUS QUITTE

En 2012, la sonde spatiale *Voyager 2* 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 Iowa, membres du mission qui a lancé *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*,

UNE NÉCROPOLE DOMESTIQUE À NARBONNE



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

QUAND LA PEINTURE VERTE BRUNIT

Dans de nombreuses peintures de la Renaissance, le vert éclatant a disparu pour devenir marron. Marion Alt, du CNRS et du Centre de recherche et de restauration des musées de France, et ses collègues ont étudié le mécanisme de vieillissement. 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

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 faire des repas frugaux 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. Le 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

M. Alt et al., *Inorg. Chem.*, 2019, 58, 13115-13128, 2019

Communication de l'Inrap: <https://www.inrap.fr/actualites/communicationnelle-necropole-antique-narbonne-14612>

ASTROPHYSIQUE

DES MAGNÉTARS NÉS DE LA FUSION D'ÉTOILES ?

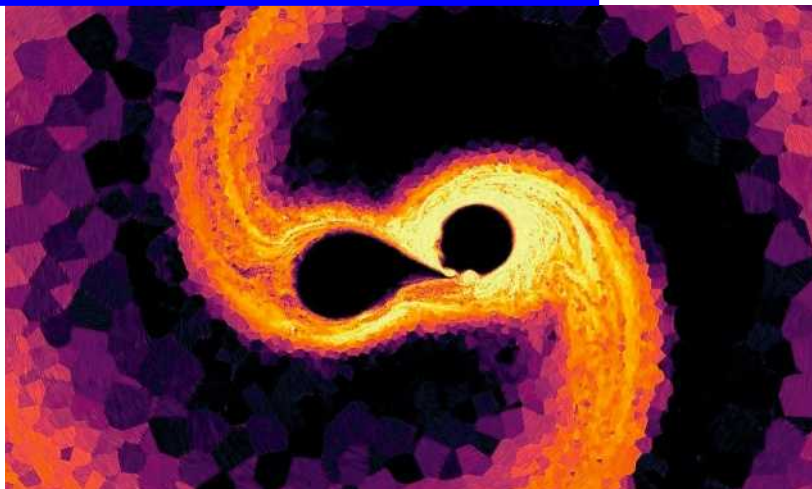
Une simulation de la fusion d'étoiles massives appuie l'un des mécanismes qui expliqueraient le champ magnétique intense de certaines étoiles à neutrons.

En astrophysique, beaucoup d'astres font rêver par leur démesure. Parmi eux : les magnétars, des étoiles à neutrons dotées d'un champ magnétique extrêmement intense, parfois des centaines de milliards de fois plus intense que celui du Soleil. Ils sont aussi responsables d'émissions électromagnétiques violentes et irrégulières dans l'espace interstellaire. Par exemple, le 27 décembre 2004, une bouffée de rayons gamma venue d'un magnétar de la constellation du Sagittaire, à 50 000 années-lumière de la Terre, a brièvement ionisé une partie de l'atmosphère terrestre. Comment de tels astres se forment-ils ? Fabian Schneider, de l'université de Heidelberg, en Allemagne, et ses collègues viennent d'effectuer des simulations numériques afin d'explorer l'un des scénarios envisagés.

On sait depuis longtemps que les étoiles les plus massives achèvent leur vie en super nova :

leurs couches extérieures sont éjectées vers l'espace tandis que leur cœur s'effondre formant parfois une étoile à neutrons, un astre très dense. Les astrophysiciens pensent aussi que si l'étoile originelle a un fort champ magnétique, celui-ci est amplifié par l'implosion de l'étoile en une étoile à neutrons, à cause de la diminution de son rayon. Ainsi, les étoiles massives présentant déjà un fort champ magnétique sont d'excellents candidats pour être de futurs magnétars. On pense en outre que ces étoiles massives à fort champ magnétique seraient nées de la fusion d'étoiles classiques, dépourvues de champ magnétique intense.

C'est ce qu'ont voulu confirmer Fabian Schneider et ses collègues en simulant la fusion de deux étoiles à champ magnétique très faible. Ils ont montré qu'au cours de la fusion, des milliards de matière stellaire donnent naissance à des champs magnétiques très intenses. Ces derniers sont conservés par l'étoile fille qui, plus tard, deviendra donc potentiellement un magnétar. Une partie de l'énergie mécanique des deux étoiles mères a donc été transformée en énergie de champ électromagnétique, multipliant l'intensité du champ par un facteur d'environ 10^{18} pour un champ final d'environ 10^4 teslas. L'étoile fille aura aussi gagné en température, en masse et en luminosité par rapport aux étoiles mères. Cela



Cette simulation montre la naissance d'une étoile telle que Tau Scorpii à partir de la fusion de deux astres. Il s'agit ici d'une vue en coupe de l'intensité du champ magnétique créé (champ intense dans les zones claires, faible dans les zones sombres).

10¹¹ TESLAS
TELLE EST
L'INTENSITÉ DU
CHAMP MAGNÉTIQUE
QUE PRÉSENTENT
LES MAGNÉTARS
LES PLUS PUISSANTS.
C'EST ENVIRON DIX
MILLIARDS DE FOIS
PLUS QUE LES
CHAMPS
MAGNÉTIQUES
CONTINUS LES PLUS
FORTS PRODUITS
PAR L'HOMME.

Le magnétar Tau Scorpii, par exemple, est ainsi moins âgée que ses voisines. Si l'étoile ainsi formée explose en supernova, les chercheurs s'attendent à ce que l'étoile à neutrons résultante présente un champ magnétique de l'ordre de 10^{10} ou 10^{11} teslas, des valeurs proches de celles observées pour les magnétars.

Plus précisément, Fabian Schneider et ses collègues ont ajusté les paramètres des deux étoiles mères (masses, vitesse de rotation, âge, rayon, etc.) pour que l'étoile fille, donnée par la simulation, ait les caractéristiques de Tau Scorpii, une étoile de la constellation du Scorpion ayant un fort champ magnétique. Ils ont donc simulé un scénario de naissance probable pour cette étoile qui est une « bleu tardive » (*blue straggler* en anglais), c'est-à-dire une étoile d'un amas stellaire beaucoup plus jeune et chaude que ses congénères, et paraissant donc plus jeune. Le scénario simulé prend bien compte des propriétés de Tau Scorpii. Cette dernière étant située à moins de 500 années-lumière de la Terre – un saut de saut à l'échelle astronomique –, il n'y a plus qu'à espérer qu'elle ne donnera pas un magnétar...

L. G.

F. Schneider et al., *Nature*, vol. 574, pp. 211-214, 2019

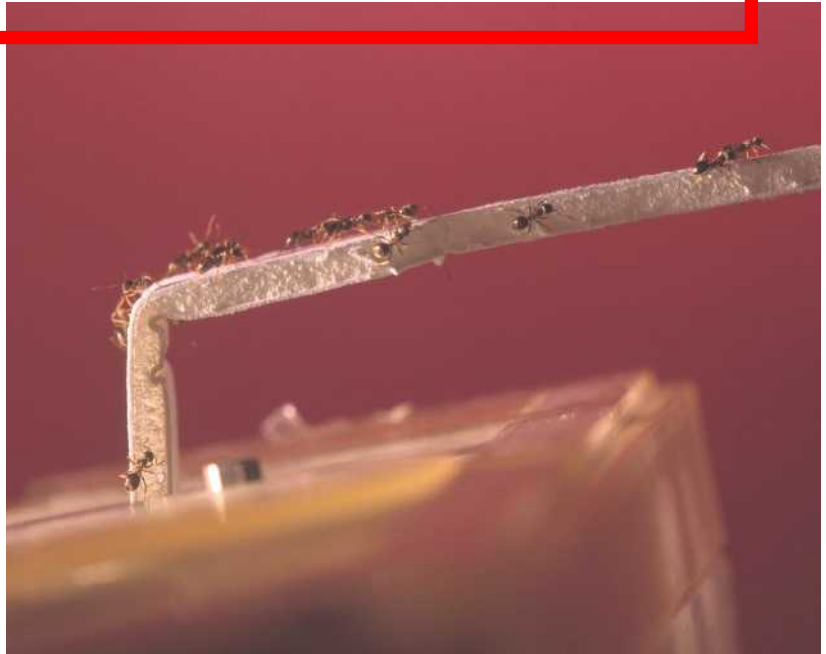
LES CYCLES DU CLIMAT EN QUESTION

Les variations du rapport isotopique oxygène 18/oxygène 16 dans les sédiments montrent qu'au Pléistocène (il y a 2 millions d'années à 12 000 ans), les glaciations sont d'abord succédé à intervalles de 40 000 ans, puis de 100 000 ans. Ce phénomène s'expliquerait par une diminution du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Mais les observations de l'équipe de Yuzhen Yan, de l'université de Princeton, mettent en doute cette explication. Ces chercheurs ont en effet mesuré les taux de dioxyde de carbone dans des bulles d'air préservées au sein de glaces arctiques âgées de plus de 1 million d'années, quand les cycles étaient de 40 000 ans – et ont constaté qu'ils étaient comparables aux taux ultérieurs. ■

F. S.

Yuzhen Yan et al., *Nature*,

PAS DE BOUCHONS CHEZ LES FOURMIS



Les fourmis font des allers et retours entre leur nid et une réserve de nourriture, ce qui permet aux chercheurs d'étudier leurs collisions et leurs vitesses, moyennes ou instantanées.

BIOLOGIE

APPRENTISSAGE ET MICROBIOTE

La flore intestinale, ou microbiote intestinal, joue de nombreux rôles vitaux pour notre organisme. Notamment, ces dernières années, plusieurs études ont établi des liens entre le cerveau et le microbiote. Les déséquilibres de ce dernier seraient impliqués dans l'apparition de maladies neurodégénératives telles que la maladie d'Alzheimer, de troubles psychologiques comme la dépression et des variations du comportement. Toutefois, les mécanismes sous-jacents sont mal connus. L'équipe de David Artis, de l'université Cornell aux États-Unis, a démontré chez la souris qu'une modification de la composition du microbiote intestinal accompagnée d'une diminution globale du nombre de bactéries engendrait des changements dans l'expression des gènes de cellules neuronales. Chez ces souris, on observe par ailleurs une baisse de quatre métabolites dérivés du microbiote et une perturbation des processus d'apprentissage. Ce qui suggère que ces métabolites influeraient sur le cerveau en y altérant l'expression de gènes. ■

W. R.-P.

Jinbo Chu et al., *Nature*,
n° 574, pp. 543-548, 2019

Les embouteillages en voiture sont parfois une épreuve quotidienne ; et, même à pied, les foules humaines denses sont lentes. Les fourmis, elles, font beaucoup mieux ! En effet, les colonies de fourmis, composées de dizaines de milliers d'individus, adaptent leur comportement à la densité du trafic pour gagner en performances. Laure-Anne Poissonnier, de l'université de Toulouse, et ses collègues ont scruté leurs déplacements pour comprendre comment.

Les chercheurs ont installé un pont entre une fourmilière et une réserve de nourriture, entre lesquelles les fourmis font des allers-retours. Dans cette situation, les collisions entre individus sont nombreuses. L'équipe a augmenté la densité de fourmis (en réduisant la largeur du pont par exemple) et a étudié comment évoluait le flux de ces insectes. Surprise : le nombre de collisions croît, mais les fourmis ne font pas d'embouteillages ! En effet, leur flux atteint une valeur maximale, mais sans diminuer ensuite, contrairement à celui des humains, qui décroît après une valeur maximale, jusqu'à s'annuler (c'est le « bouchon »). En outre, la vitesse moyenne des fourmis sur le parcours complet du pont atteint un maximum, contrairement à celle des humains qui, elle, décroît linéairement avec la densité. Cette observation *a priori* très surprenante s'expliquerait par une augmentation de la « vitesse de circulation libre » (la vitesse instantanée en dehors des collisions) avec la densité : les fourmis accélèrent pour compenser le temps perdu lors d'une collision. Ce comportement serait motivé par des concentrations plus fortes en phéromones lorsqu'il y a beaucoup de fourmis. Dépourvus de carapace protectrice, les humains seraient cependant mal avisés d'accroître eux aussi leur vitesse avec la densité... ■

L. G.

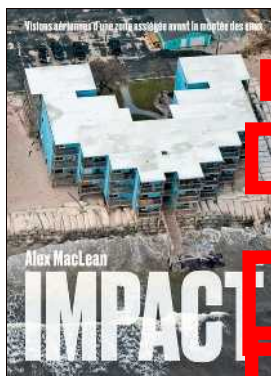
L.-A. Poissonnier et al.,
eLife, article 48945, 2019

ENVIRONNEMENT

IMPACT

Alex MacLean

La Découverte, 2019
336 pages, 55 euros

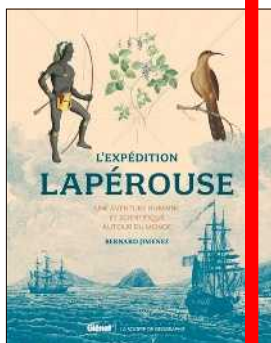
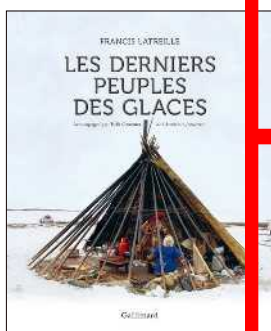
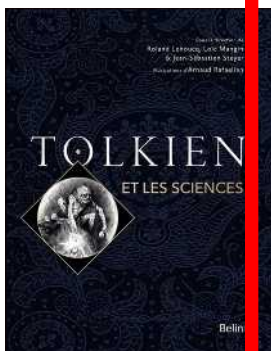


Le changement climatique ne cesse d'être évoqué, mais pas la montée des eaux. Parce qu'elle est encore relativement peu perceptible sans doute... Toutefois, l'auteur de ce beau livre, pilote d'avion, photographe et passionné d'environnement, s'est donné pour but de la montrer non par des courbes, des chiffres et des cartes, mais directement, par des vues aériennes. La préface a été écrite par Bill McKibben, journaliste primé et militant de l'environnement. Les zones survolées sont situées sur 3300 kilomètres de la côte est américaine (du Maine à la Floride) et sur 2600 kilomètres du golfe du Mexique (de la Floride au Texas), mais les phénomènes sont identiques sur le littoral atlantique ou méditerranéen de la France. Les prises de vues ont été réalisées avant ou après des catastrophes climatiques, comme l'ouragan Sandy, pour bien visualiser les risques puis les dégâts.

Les photographies sont spectaculaires et le texte rare, le message étant évident. Les magnifiques maisons en bord de mer, les marinas, les immeubles trop proches des plages sont manifestement condamnés à brève échéance. Les barrières de sable ou de brise-lames qui sont mis en place s'avéreront dérisoires contre les éléments naturels déchaînés et la montée prévisible des eaux. On réalise les pertes énormes à prévoir dans l'immobilier, mais aussi dans les infrastructures publiques comme les routes, les voies ferrées, les stations d'assainissement, sans parler des rêves brisés de ceux qui sont contraints d'abandonner leurs maisons.

Et pourtant, il ne s'agit peut-être que d'un préambule, puisque les dernières simulations envisagent non plus quelques millimètres ou centimètres d'augmentation du niveau des océans, mais 2 à 3 mètres à la fin du siècle.

PIERRE JOUVENIN
ÉTHOLOGUE ÉMÉRITE CNRS



SCIENCE ET LITTÉRATURE

TOLKIEN ET LES SCIENCES

Roland Lehoucq, Loïc Mangin
et Jean-Sébastien Steyer (dir.)

Belin, 2019
384 pages, 35 euros

Ce livre est beau et soigneusement édité et relu. En couverture son titre fait la part belle à l'anthropologie du célèbre auteur du *Hobbit* et du *Seigneur des anneaux*, décidée il y a près d'un demi-siècle. Mais l'originalité de l'ouvrage repose explicitement sur le «...et les sciences». Sous la direction de trois savants passionnés par le romancier britannique, près de quarante chercheurs, tous attachés à son œuvre romanesque, tirent de son univers des thèmes qui concernent de grands sujets des sciences humaines, naturelles ou physiques. Cette démarche singulière n'était pas sans risques. Le lecteur pouvait craindre que, sous le prétexte de vulgariser leur discipline, des fans nous entraînent vers du scientisme ou loin de l'univers féérique de Tolkien. Il n'en est rien: la démarche est maîtrisée de façon aussi rigoureuse qu'agréable et l'entreprise structurée.

Organisés en six thématiques, les chapitres regroupent une quarantaine de sujets aux titres attractifs pour l'amateur du Seigneur des anneaux mais lisibles pour le curieux attiré par l'originalité de cette entreprise éditoriale: «Langage et évolution», «Vestiges archéologiques et cités enfouies», «Le climat en Terre du milieu» ou un séduisant «Tolkien, cet ornithologue»... *In fine*, il serait injuste de ne pas saluer la beauté des illustrations d'Arnaud Rafaelian (dessins au trait) et, même si l'on est emporté par des songes ou une réflexion scientifique, de négliger la bibliographie thématique. Un beau cadeau en perspective, puisque Noël approche.

DOMINIQUE GARCIA
PRÉSIDENT DE L'INRA PARIS

LES DERNIERS PEUPLES DES GLACES

Francis Latreille
Gallimard, 2019
232 pages, 35 euros

Une aventure au cœur du cercle polaire, une quête d'une idée : Ancien-y, pourtant, et vous pourrez rencontrer, de l'est vers l'ouest et du nord au sud, les Inuites, les Samis, les Koriaks, les Yakoutes et les Dolganes. C'est ce qu'a fait le photographe Francis Latreille, pendant plus de trente ans.

Les lecteurs de Jules Verne, de Jean Malaurie, les admirateurs de Jean-Baptiste Charcot, de Robert Peary et de Paul-Émile Victor, comme Eric Orsenna, qui préface ce livre, retrouveront leurs sensations d'aventuriers devant les magnifiques paysages qui s'étalent en double page, les chamans dansants et les os de baleine plantés dans le sol. Mais ils seront vite dégrisés devant les portraits d'Inuits montés sur leurs quads, cigarette au bec, ou en découvrant ce Yakoute en admiration devant le portrait de Lénine. Déconcertés, ils apprendront que les jeunes Koriaks ont tous un smartphone, et que les petits Inuits vont à l'école avec leurs tablettes. C'est que le temps a passé, et que nous avons tout abîmé. Le réchauffement climatique fait resurgir les momies desséchées de mammoths, comme celui de ce jeune qui fascine cette enfant Nénète, dans une photo sublime. Leur monde s'écroule, leurs enfants refusent de mener la vie rude et pleine de sacrifices de leurs ancêtres. Et pourtant ils sourient. Ils dansent, ils font la fête, cajolent leurs rennes. Ils sauront s'adapter, comme les Inuits du Groenland, dont l'anthropologue Karen Hoffmann-Schickel, l'une des scientifiques dont Francis Latreille sollicite l'avis en fin de volume, nous raconte l'inébranlable optimisme.

Ce livre n'est donc pas un livre pour rêver sur un Grand Nord qui n'a jamais existé que dans notre imagination. C'est aussi une leçon de vie et d'espoir.

ROMAIN PICHAUD
ARCHÉOLOGUE ASSOCIÉ AU CNRS, MUSEUM D'ART ET D'HISTOIRE DE MONTPELLIER

L'EXPÉDITION LA PÉROUSE

Bernard Jimenez
Glénat, 2019
208 pages, 35 euros

L'auteur nous fait le voyage de Laperouse: Revivre l'extraordinaire aventure de l'expédition Laperouse devient possible en lisant ce livre.

depuis sa préparation jusqu'à la disparition des deux vaisseaux à Vanikoro, dans le Pacifique Sud.

L'auteur nous introduit au cœur des 220 marins et savants embarqués pour cartographier, observer les hommes, plantes et animaux, découvrir, expérimenter. D'escale en escale, on rencontre avec eux d'autres lieux, d'autres hommes, et on se sent comme partie prenante de leur communauté: aventure humaine, d'abord, comme l'indique le sous-titre. Départ pour de longs mois vers des destinations comportant beaucoup d'inconnues.

Même si les deux frégates étaient chargées de matériel scientifique de pointe, on a peine à imaginer aujourd'hui cette projection dans un monde à découvrir, à l'initiative du roi (Louis XVI), quand le premier courrier met 26 mois à parvenir à l'expédition. Cependant, en dépit des difficultés de communication, tout n'a pas été perdu lors du naufrage: beaucoup de résultats ont heureusement pu être transmis et exploités. Ainsi, le jeune Barthélemy de Lesseps, quittant l'expédition au Kamtchatka, a mis un an à traverser la Russie et à rentrer à Paris...

L'auteur nous fait assister à ces multiples découvertes en exploitant de nombreux documents d'époque et de nombreuses photos contemporaines. Il nous replonge ainsi sur les lieux mêmes où s'est enregistrée la mémoire de ce fabuleux périple, jusqu'aux enquêtes des années 2000 qui ont, en partie seulement, la lumière sur le naufrage. Bref, n'hésitez pas à embarquer!

NADINE GUIHOU
UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER



LA BIBLE DES CODES SECRETS

Hervé Lehning

Flammarion, 2019
464 pages, 25 euros

RSA, Vigenère, code de César, des Templiers par substitution, par chiffrement mécanique, quantique... L'histoire des codes est aussi celle

de la guerre, du commerce... amoureux! Cette bible des codes secrets permet de se cultiver facilement sur cet aspect très mathématique de la ruse humaine. On y lit beaucoup d'anecdotes historiques édifiantes, on y apprend les fondements de nombreuses méthodes de codage ainsi que celui de la sécurité – à savoir qu'il est illusoire de dissimuler l'algorithme de codage, et que c'est juste la clé qu'il faut savoir protéger.

LA LICORNE ET LES FIGURES INSOLITES DE LASCAUX

Denis Tautem

Tautem, 2019
84 pages, 15 euros

La grotte de Lascaux contient plusieurs figures animales et une représentation humaine énigmatique, dont les plus célèbres

Préhistorien spécialiste de Lascaux rattaché au Muséum national d'histoire naturelle, l'auteur fait le point sur les faits et les interprétations multiples qui ont été évoquées. De quoi ordonner ses doutes et mettre de l'ordre dans les impressions fortes et contradictoires que suscitent ces œuvres.

CE QUI EST SANS ÊTRE TOUT À FAIT

Étienne Klein

Actes Sud, 2019
176 pages, 18 euros

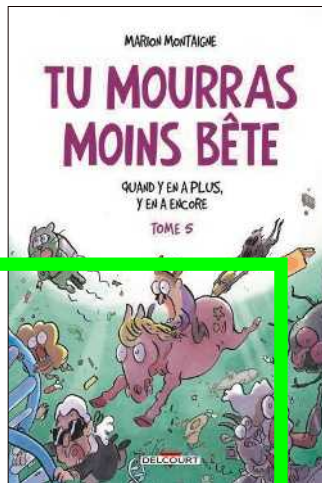
Alladine, une vieille voisine d'Étienne Klein, à la mémoire de qui est dédié cet élégant essai, l'invite un jour à faire le vide. Son conseil

d'une vieille rêverie sur toutes les facettes de cette riche notion, tant en physique qu'en philosophie que dans le langage courant. Ces facettes sont nombreuses, contradictoires et leur nombre a empêché Étienne Klein de faire tout à fait le vide, du moins dans sa tête, au moment où, à la fin de l'ouvrage, il nous abandonne à l'« effervescence sommeillante du vide quantique »!

POUR LYCÉENS ET AU-DELÀ

**IL MOURRAS MOINS BÊTE... TOME 5
QUAND Y EN A PLUS, Y EN A ENCORE**

Marion Montaigne
Delcourt, 2019
256 pages, 19,99 euros

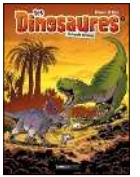


Marion Montaigne, l'autrice du blog du même nom, *Tu mourras moins bête... Mais tu mourras quand même!* (décliné en albums et en série animée diffusée sur Arte), compte de nombreux admirateurs dont, avouons-le, les journalistes de *Pour la Science*. Voici donc le dernier tome de la collection qui met en scène, comme d'habitude, l'inénarrable Professeur Moustache et son assistant Nathanaël, répondant aux questions posées via carte postale par de pseudolecteurs. L'éventail est large: À quand l'homme bionique? Les jeux vidéo rendent-ils violents? Pourquoi les insectes sont-ils autant poilus? Skynet est-elle une intelligence artificielle stupide? Mais aussi, c'est fichu comment, un clitoris? Les réponses sont à la fois fort bien documentées (une partie des références est donnée en fin d'ouvrage) et très drôles. L'impertinence du ton et les multiples références à l'actualité générale plairont surtout aux adolescents dégourdis qui, à n'en pas douter, mourront de rire (et moins bêtes). ■

DÈS 8 ANS

**LES DINOSAURES
EN BANDE DESSINÉE.
TOME 5.**

Plumeri et Bloz
Bamboo, 2019
48 pages, 10,95 euros



On ne se lasse pas des dinosaures. Arnaud Plumeri, scénariste férù de paléontologie depuis sa tendre enfance suit de près toutes les découvertes sur les terribles lézards: le cou de cygne du Halszkaraptor, la momie de Boreolopelta, les plumes du Yutyrannus... Puis avec la complicité du dessinateur Bloz, il les met en scène dans une série de gags désopilants qui rendent attachants ces fascinants rois du Mésozoïque. Comme le fameux T-Rex, qui ne faisait pas de bisous parce qu'il n'avait pas de lèvres... ■

DÈS 9 ANS

LE JOURNAL DE LÉONARD DE VINCI

Viviane Koenig
et Benoît Perroud
Belin Jeunesse, 2019
80 pages, 13,90 euros

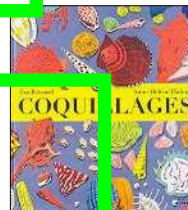


Un journal écrit à la première personne pour entrer dans la vie du célèbre Léonard. On sait sa vie d'artiste peintre, sculpteur, orfèvre, architecte... Mais surtout on perçoit l'inextinguible soif de comprendre qui anima toujours ce touche-à-tout génial qui «inventa» la brouette-compteur, l'ornithoptère et le char d'assaut; qui s'intéressa à la géologie, à l'astronomie, à la météorologie... Et à l'anatomie, quitte à enfreindre la loi en pratiquant la dissection de cadavres pour tenter de découvrir le fonctionnement des muscles. Un éloge de la curiosité. ■

À PARTIR DE 7 ANS

COQUILLAGES

Eva Bensard
Ill. : Anne-Hélène Dupray
La Martinière Jeunesse, 2019
64 pages, 16,90 euros



Les coquillages. Des animaux tout mous, les mollusques, qui se protègent avec un squelette externe: leur coquille. Il en existe de minuscules et d'énormes comme le tridacne géant, qui peut afficher 250 kg sur la balance et mesurer plus d'un mètre de long! Il y a des brouteurs d'algues et des gloutons qui avalent tout rond des poissons entiers en quelques secondes. Certains nagent avec leur pied, d'autres ont des dizaines de yeux. De leur coquille nacrée, tigrée, plissée, on fait des couteaux, des boutons, des sifflets, des bijoux. Et même de la monnaie. Bref une passionnante histoire aux multiples héros à découvrir dès que l'on sait lire. ■

À PARTIR DE 12 ANS

DANS LE SECRET DES LABOS

Jean-Yves Ducloux
Dupuis, 2019
192 pages, 23 euros



Les enquêtes aventureuses de Jean-Yves Ducloux, illustrateur passionné de sciences, dans quarante-cinq laboratoires de France mais aussi de Belgique et de Suisse. Avec ces reportages pleins d'humour, il s'agit moins de tout savoir sur les trous noirs, le temps atomique, le cerveau virtuel, les voitures écologiques ou les secrets de la musique contemporaine que de comprendre comment travaillent les chercheurs et quelles questions ils se posent. Visiter avec Jean-Yves le LHC, au CERN, Tara, le navire océanographique, la graineterie du Jardin des plantes tout comme les coulisses de l'opéra Bastille et les égouts de Paris... devrait susciter quelques vocations. ■

À PARTIR DE 14 ANS

HOMO SAPIENS

Antoine Balzeau
Ill. : Pierre Bailly
Le Lombard, 2019
88 pages, 10 euros

Quel homme sommes-nous ? D'où venons-nous ? Où allons-nous ? Le

paléontologue Antoine Balzeau et le dessinateur Pierre Bailly répondent avec humour et rigueur à ces éternelles questions sur lesquelles les sciences ont beaucoup à dire. Du rôle du hasard dans l'évolution aux génomes de Néandertalien qui survivent en nous, en passant par la couleur de la peau de nos ancêtres... les auteurs brosent une passionnante histoire de notre espèce. Sans écarter les questions ouvertes. Par exemple, pourquoi *Homo sapiens* est-il le seul homme à posséder un menton ? Eh bien on n'en sait toujours rien ! ■

DÈS 6 ANS

ANIMÉS AUX SAUVAGES. LES AVENTURIERS DE L'HIVER

Ill. : Jana K. Kudrnova
Quatre Fleuves, 2019
38 pages, 15,90 euros

De grandes et jolies cartes deables pour repérer où vivent le grand hamster, la tortue des steppes, le béluga ou le lagopède des saules. Et de petits textes truffés d'anecdotes étonnantes à commenter avec ses parents : comment la taupe de nos jardins paralyse les vers de terre, comment le porc-épic d'Amérique séduit sa belle, comment l'escargot de Bourgogne résiste à des froids de -40 °C, comment le pic épeiche casse les noix pour se nourrir... À lire au chaud pendant les longues soirées d'hiver.



POUR TOUTE LA FAMILLE

L'ODYSSÉE DU RENARD

François Moutou, Laurent Geslin
Salamandre, 2019
144 pages, 29 euros

Voici d'incroyables et magnifiques images de renards prises avec patience et passion par le photographe naturaliste Laurent Geslin. La vie de couil au poil rouquin et au regard doré est racontée par le vétérinaire François Moutou, grand connaisseur de cet animal, de ses particularités et de son mode de vie, qui l'amène aujourd'hui de la forêt vers la ville. Un livre à parcourir en famille : petits et grands tomberont sous le charme. ■



Pages réalisées par Cécile Lestienne

ET AUSSI



LES AVENTURIERS AU JARDIN BIO EXPLORENT LES SCIENCES

Frederic Aisan, Agathe Moreau
Terre Vivante et Plume de Carotte, 2019
108 pages, 14 euros

Voici une version fort sympathique du livre d'expériences. Un matériel plutôt facile à trouver :

chaussures... L'aide d'un adulte pour ne pas se blesser, et c'est parti pour toute une série de manip : mesurer la vitesse du vent, créer du brouillard, faire transpirer les plantes, fabriquer du plastique de pomme de terre, ou une pile avec un citron... Et même construire un composteur. Certaines de ces expériences sont faisables en appartement ou en classe. Mais le livre sera surtout utile aux chercheurs en herbe ayant un jardin.

PLANÈTE TERRE

Ill. : Bomboland
Quatre Fleuves, 2019
30 pages, 16,90 euros

Un beau livre objet composé de pages sculptées en relief et de volets à soulever pour explorer notre planète en trois dimensions. Si vous aimez les sciences, plongez au fond des cavernes, escalader les montagnes, découvrir les fonds marins, descendre les rivières, flotter sur les nuages, affronter les orages... Il y a même un glossaire pour rafraîchir la mémoire des parents.

APOLLO. L'HISTOIRE VISUELLE DE LA PLUS GRANDE AVENTURE HUMAINE

Zack Scott

Paranthèses, 2019
160 pages, 26 euros

Tout, tout, les jeunes lecteurs peuvent tout sur le programme Apollo. Ses 17 missions, ses

satellites, ses 300,000 tonnes de roches

De multiples cartes, schémas, plans, infographies racontent par le menu les caractéristiques de la fusée Saturn V, l'âge et le poids des astronautes, les 400 000 employés de la Nasa ou la consommation en carburant du crawler-transporter. Une entrée amusante et pédagogique dans le monde de la conquête spatiale.

PARIS

JUSQU'AU 9 AOÛT 2020

Cité des sciences et de l'industrie

www.cite-sciences.fr

Espions

En quoi consiste, au-delà des clichés et des fantasmes, le métier du renseignement et de ses agents, ou « officiers traitants » ? Cette exposition, qui a bénéficié du concours des services de renseignement français, permet de s'en faire une idée. En partenariat avec les producteurs de la série télévisée *Le Bureau des légendes*, la Cité des sciences et de l'industrie a conçu un parcours où le public entre dans la peau d'un officier traitant chargé d'une mission, à la suite de la détection d'un essai nucléaire de faible intensité effectué par un pays étranger – mission dont l'aboutissement consiste à fournir au président de la République une note de renseignement sous 48 heures. Des dispositifs audiovisuels guident le public et lui expliquent les étapes et les stratégies à suivre pour mener à bien la mission. Ce faisant, les diverses activités liées au renseignement sont mises en scène : surveillance des phénomènes sismiques suspects, écoutes téléphoniques, filatures par le contre-espionnage, interrogatoires, collectes de données à l'étranger, etc.

Des entretiens inédits avec des agents français (anonymes) en activité viennent décrire différents métiers, les contraintes et les discussions qu'ils ont sur la vie de la personne...



Parallèlement, deux fresques expliquent la nature des six services de renseignement français (DGSE, DRSD, DRM, DGS, DNR, DNE) et leurs homologues aux États-Unis, au Royaume-Uni, en Russie, en Israël et en Chine, éléments factuels et chiffres à l'appui.

ET AUSSI

Du 1^{er} au 8 décembre
Le Manswww.le-mans.fr

LE MANS SONORE

Le Mans organise sa première biennale internationale du son, avec expositions, colloques, concerts, performances, etc. La ville, pôle scientifique et technologique en acoustique, ambitionne de se hisser au rang de capitale du son.

Mardi 10 décembre 19 h

<http://www.musee-nantesmetropole.fr>

ÉPICES ET PARFUM

Une conférence d'Archie Le Guérin, anthropologue, philosophe et historienne, qui raconte l'histoire des épices et des parfums depuis l'Antiquité.

Jeudi 19 décembre, 12 h 30

www.univ-tlse3.fr

LE BLOB, OVNI DE LA BIOLOGIE

La biologiste Audrey Dussutour présente le « blob », alias *Physarum polycephalum*, organisme unicellulaire pouvant mesurer plusieurs mètres carrés et aux capacités étonnantes, découvertes récemment.

Jusqu'au 19 janvier 2020

SERIGNAN

JUSQU'AU 19 AVRIL 2020

Musée régional d'art contemporain

<http://mrac.saignes.fr>

La Mesure du monde



Dessins, peintures, vidéos, sculptures, installation, des œuvres d'environ vingt-cinq artistes de divers pays proposent un regard poétique sur la nature, ses mesures, ses textures, ses transformations... Une sorte d'inventaire, forcément partiel et subjectif, des matériaux et phénomènes naturels, du monde vivant, du corps humain.

LIEGE (BELGIQUE)

JUSQU'AU 2 FÉVRIER 2020

La Cité Miroir

www.citemiroir.be

Darwin, l'original



Qui était Charles Darwin et qu'a-t-il accompli ? Un itinéraire intellectuel et interactif. Il y apprendra notamment que le père de la théorie de l'évolution était aussi un humaniste, un antiesclavagiste et un pionnier de l'éthologie animale et humaine.

au Luxembourg, Paris
<https://bit.ly/2Vpak70>

UN VOYAGE DANS L'UNIVERS

Un ensemble de 80 grandes et belles photographies capte l'attention des passants et leur fait découvrir les programmes d'exploration spatiale passés, présents et futurs.

Jusqu'au 19 janvier 2020

www.musee-luxembourg.fr

Océan en voie d'illumination

Après *Espèces en voie d'illumination* l'hiver dernier, c'est au tour du monde marin de s'exhiber sous la forme de monumentales structures lumineuses, conférant une féerie nocturne à ce beau jardin parisien.

PARIS

DU 4 DÉCEMBRE 2019 AU 14 FÉVRIER 2020
Maison européenne de la photographie
www.mep19.org

L'Amazonie vue par Tommaso Protti



Le 10^e prix Carmignac du photojournalisme, en 2019, était consacré à l'Amazonie et aux enjeux liés à sa déforestation, sujet malheureusement rattrapé par l'actualité brésilienne. Le prix a été décerné à l'Italien Tommaso Protti, qui vit et travaille au Brésil. Entre janvier et juillet 2019, ce photographe a parcouru, en compagnie du journaliste britannique Sam Swire, des milliers de kilomètres à travers l'Amazonie brésilienne. Ses clichés illustrent et dénoncent les crises sociales et humanitaires qui frappent la région, ainsi que la destruction de la forêt et des phénomènes interdépendants. ■

PARIS

DU 4 DÉCEMBRE 2019 AU 1^{ER} JUIN 2020
Musée de l'homme
www.museedehomme.fr

Je mange donc je suis

Se nourrir est une activité quotidienne et vitale, qui de ce fait occupe une grande place dans notre univers physique, mental, social et culturel. À l'heure où les traditions alimentaires sont bousculées partout dans le monde, le musée de l'homme propose une exposition ambitieuse, qui vise à embrasser le thème de l'alimentation dans toutes ses dimensions ou presque. Le visiteur sera notamment confronté aux aspects religieux, identitaires, politiques et artistiques de l'alimentation. Par exemple, on découvrira comment mangeaient les hommes préhistoriques, on



apprendra que le gavage des femmes a existé et qu'il est encore pratiqué par certaines sociétés en Mauritanie, que les ignames représentent la chair des ancêtres chez les Aborigènes de Papouasie-Nouvelle-Guinée... Et comme il se doit, tout un volet de l'exposition est consacré aux enjeux éthiques, nutritionnels et environnementaux de la production alimentaire actuelle et future. ■

ÉPINAL

DU 10 NOVEMBRE 2019 AU 31 MAI 2020
Musée de l'image
www.museedelimage.fr



Loup! Qui es-tu?

Le loup fait un retour dans nos contrées depuis les années 1990, ce qui suscite des débats parfois violents. Une violence probablement due en partie à la place singulière qu'occupe cet animal dans la culture et l'inconscient collectif en Europe. Au travers de plus de 300 œuvres, essentiellement des estampes françaises des XVIII^e et XIX^e siècles, l'exposition fait découvrir comment le mythe du loup s'est construit et sur quelles bases la « peur du loup » s'est installée. ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 7 décembre
Bailly (Seine-et-Marne)
www.wanv.fr

ORNITHOLOGIE EN BASSÉE

Une journée ou une demi-journée d'observation des oiseaux en divers sites (plans d'eau, marais...) de la Bassée, région riche en boisements et zones humides.

Dimanche 8 décembre, 15 h
Domaine des Vaseix, Verneuil-sur-Vienne

<http://lne-asso.fr>
Tél. 05 55 48 07 88

LA CLÉ DES SOLS

Beaucoup d'animaux vivent dans le sol et leur diversité est grande. Ils assurent notamment la qualité des sols agricoles. Il est proposé de les découvrir.

Vendredi 13 décembre, 20 h 30
Ménétrolle (Ain et Vienne)

www.cpie-broceliande.fr
Tél. 02 97 22 74 62

CIEL D'HIVER

Deux heures de cheminement sur les hauteurs de la lande, pour ressentir la magie de la nuit, contempler le ciel, écouter des contes et légendes sur les constellations...

Samedi 14 décembre, 9 h
Château-Bernard (Isère)
www.lne-audax.org

Tél. 04 76 42 64 08

LE BOUQUETIN DES ALPES

Une demi-journée de randonnée pour bons marcheurs à la rencontre des bouquetins, dont c'est la saison des amours.

Samedi 14 décembre, 14 h
Prades-le-Lez (Hérault)
www.euziere.org

Tél. 04 67 59 54 62

STRATÉGIES VÉGÉTALES

Une balade d'après-midi pour observer de nombreux exemples, parfois étranges, d'adaptation de la flore à l'environnement où elle pousse.

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LA HOTTE VIRTUELLE DU PÈRE NOËL

À l'heure de la dématérialisation, CD et DVD
tendent à disparaître. Comment alors offrir albums
et films en cadeau ?



Les supports
matériels
de la musique
laissent la
place à des
formats
virtuels.
Dilemme :
peut-on offrir
un MP3 ou
de la musique
disponible en
flux continu ?

Avant de nous lancer dans les frénétiques courses de Noël, rappelons-nous l'époque pas si lointaine où avec quelques livres, quelques disques (vinyles ou compacts) et quelques films (cassettes vidéo, DVD, Blu-ray, etc.), nos hottes se remplissaient rapidement. Il devient aujourd'hui difficile d'offrir des disques ou des films, car les œuvres musicales et cinématographiques se propagent désormais par conduction, par propagation de l'information dans un support immobile, tel qu'un réseau, davantage que par convection (propagation de l'information par déplacement de son support, tel qu'un disque). Et si le livre résiste encore un peu, il est probable que quelques améliorations de l'ergonomie des liseuses et des tablettes lui feront à terme prendre le même chemin. Il nous reste certes la possibilité d'offrir de l'or, de la myrrhe et de l'encens ou, plus prosaïquement, des plantes vertes et des ours en peluche, mais la disparition des CD et des DVD a

grandement réduit la diversité des objets susceptibles d'être offerts en cadeau.

Cette disparition a également transformé l'intérieur de nos habitations : les piles de disques et les étagères de cassettes évoquent désormais inexorablement le xx^e siècle. Elle a aussi allégé les

La tendance naturelle d'un objet immatériel d'être un bien commun

valises dans lesquelles nous trimbalions jadis une trentaine de disques compacts à chaque voyage. Albums et films se dématérialisent donc, mais pourquoi un objet immatériel ne pourrait-il pas, lui aussi, être offert en cadeau ?

La raison la plus fréquemment invoquée est qu'un objet immatériel peut être dupliqué à coût nul. De ce fait, son prix, qui s'égalise avec son coût marginal, est

nul lui aussi. Et comme la notion de propriété d'un objet gratuit est absurde, celle de propriété d'un objet immatériel l'est également. Même si les lois cherchent à défendre la propriété, la tendance naturelle d'un objet immatériel est d'être un bien commun. Il n'y a donc aucun sens à offrir un objet gratuit, dont nous ne pouvons être propriétaire, à une personne qui ne peut le devenir. C'est ainsi presque une faute de goût d'offrir un disque à une personne qui peut le télécharger légalement, le pirater ou l'écouter en flux continu.

Mais il y a peut-être une seconde raison à cette impossibilité d'offrir un objet immatériel en cadeau. Les anthropologues, comme Marcel Mauss, insistent sur le fait que le rituel du don doit toujours s'effectuer en public, afin que tout le monde en soit le témoin. Cela interdit donc le don d'objets invisibles. C'est pourquoi, quand nous offrons en cadeau des billets d'avion ou des places de théâtre, nous les imprimons sur une feuille de papier, que nous mettons dans une enveloppe, au lieu de les envoyer par courrier électronique.

Le développement de l'informatique nous a conduits à dématérialiser beaucoup d'objets. Les œuvres musicales et cinématographiques, bien entendu, mais aussi, par exemple, les voitures, remplacées par l'utilisation de voitures partagées (transports en commun, voitures de transports avec chauffeur, voitures de location, etc.), et peut-être un jour les maisons, construites, au moins partiellement, par des imprimantes 3D. De ce fait, la notion de la propriété, naguère fondement de nos organisations sociales, perd de son importance. Et cela met en danger la notion même de cadeau, qui disparaîtra peut-être un jour.

Il nous faudra alors inventer d'autres moyens de célébrer Noël. Après tout, jusqu'au xvii^e siècle, personne n'avait entendu parler de ce rituel des cadeaux au pied du sapin. ■

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

26 novembre
La cryptologie décryptée

Cécile Pierrot, mathématicienne
et informaticienne, chercheuse à l'INRIA, Nancy.

3 décembre
Aux chiffres citoyens!

Ksenia Ermoshina, chercheuse en sciences
de l'information au centre Internet et Société
du CNRS.

10 décembre
Quand la cryptographie sera quantique

Eleni Diamanti, physicienne, chercheuse CNRS
à Sorbonne Université.

17 décembre
Dépasser le Bitcoin

Jean-Paul Delanaye, professeur en électricité
à l'université de Lille, chercheur au Centre
de recherche en informatique, signal
et automatique de Lille, CNRS.

cité

sciences
et industrie

la cryptologie fait sa révolution numérique

cycle de conférences

accès gratuit

— les mardis à 19h

Conférence citoyenne co-organisée avec l'Inserm

Le cœur des femmes et des hommes,
quelles différences? Les femmes
et les hommes n'ont pas les mêmes histoires
de cœur... Une meilleure prévention
les aiderait à prendre en main leur santé
cardiaque.

Avec:

Marie Christine Nègre, directrice de recherche
Inserm, Paris Centre de recherche cardiovasculaire;
Marie-Christine Boutron-Ruault, directrice
de recherche Inserm, épidémiologiste, Centre
de recherche en épidémiologie des populations;
Philippe Ménasché, cardiologue, Hôpital européen
Georges Pompidou, AP-HP.

santé en questions

conférences citoyennes accès gratuit
jeudi 5 décembre
19h-20h30

cité

sciences
et industrie

CO-ORGANISÉ AVEC **Inserm**

EN PARTENARIAT AVEC **casden** **PARIS**
AVEC LE SOUTIEN DE **La Recherche** **SCIENTES** **SCIENCE**

Accès gratuit dans la limite des places disponibles

informations cite-sciences.fr



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

UN CACHE-SEXE QUI BRISE LES CONVENTIONS

Voiler des statues, comme l'a fait récemment l'Unesco à Paris, c'est nier leur caractère artistique et faire fi de l'histoire de l'art.



« Le talent n'est jamais obscène. Ni à plus forte raison immoral », dit la parole de Raymond Poincaré, qui fut président de la République française, pourrait, à plus d'un siècle d'écart, répondre à la censure qu'a subie l'œuvre *In Memory of Me*, du plasticien Stéphane Simon. Lors des Journées du patrimoine 2019, ces sculptures inspirées de la statuaire grecque ont été exposées dans les locaux de l'Unesco, à Paris, mais avec les parties génitales cachées afin « de ne pas heurter certaines sensibilités ».

Ce rhabillage demandé par l'organisation internationale rappelle l'ajout de voiles sur les nus de Michel-Ange, des fresques de la chapelle Sixtine, à la fin de la Renaissance. Au-delà de la pudibonderie institutionnelle qui prête à sourire, l'événement constitue une remise en cause du canon esthétique, collectivement défini, du nu hérité de la Grèce antique. Une remise en cause qui éprouve la confiance structurelle de nos sociétés humaines, celle qui relie les hommes entre eux.

Qu'est-ce qui cimente nos sociétés et empêche leur désintégration dans le chaos et la guerre? L'intérêt individuel n'est pas suffisant pour expliquer cette glu sociale, comme l'illustre le « paradoxe du votant » selon lequel un citoyen a statistiquement plus de chances de mourir d'un accident de voiture en se rendant aux urnes que de voir son propre vote emporter la décision.

Le rapport collectif à l'histoire de l'art et à ce qui la fonde est effacé

dans le scrutin. Plusieurs théories expliquent ce comportement collectif : rationalité partagée sur des principes communs, acte de conformité sociale ou de communion civique. L'exercice de ce sentiment moniel républicain renvoie à un sentiment global d'appartenance qui repose sur des normes partagées.

Or celles de la création artistique participent de cette intégration sociale. En effet, les conventions esthétiques sont des normes sociales, c'est-à-dire des règles de comportement collectivement adoptées, comme l'a souligné le philosophe norvégien Jon Elster. Loin d'être arbitraires, elles posent les critères d'évaluation de la qualité artistique et les sanctions à ceux qui les violent. Bien sûr, de nouvelles conventions peuvent advenir lorsqu'elles promeuvent la créativité de façon différente ou plus féconde que la forme antérieure ne pouvait le faire.

L'esthétique n'est donc pas une expérience particulière ou un vécu psychologique, mais elle renvoie, comme l'indiquait le philosophe et collectionneur d'art américain Nelson Goodman, à une théorie générale des symboles. L'art repose sur la cohérence symbolique de ces œuvres. Ainsi, le nu de l'idéal esthétique grec symbolise l'excellence physique et psychique de l'homme, sans lien intentionnel avec la dimension charnelle des passions humaines.

Voiler des sculptures dénudées constitue donc une négation des conventions sur lesquelles la création artistique occidentale est fondée depuis la civilisation grecque. C'est leur substituer un système symbolique qui associe l'anatomie de ces productions statuariques à des chairs susceptibles d'être érotisées et sexualisées.

Dès lors, le rapport collectif à l'histoire de l'art et à ce qui la fonde est effacé, puisque la nudité des statues est prohibée comme le serait celle de n'importe quel individu dans l'espace public. En d'autres termes, le statut d'œuvre leur est symboliquement retiré, et il n'est alors pas étonnant que des visiteurs de l'exposition aient vu dans ces statues couvertes une publicité pour des sous-vêtements...

L'incompréhension résulte de cette confusion symbolique. Si l'ajout d'une culotte sur une statue peut paraître bien trivial, concluons sur les mots de Léonard de Vinci : « D'une chose légère peut naître un grand désastre. » ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation,

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET
15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE



ABONNEZ-VOUS AU PODCAST  DE L'ÉMISSION

Denisova notre cousin d'Asie sort de l'ombre

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...

L'ESSENTIEL

➤ En 2017, l'analyse génétique d'un morceau de phalange retrouvée dans une grotte de l'Altai a montré qu'il existait une troisième espèce humaine en Eurasie au Paléolithique : l'homme de Denisova.

➤ De nouveaux indices génétiques et des ossements – la plupart négatifs jusqu'à présent – commencent à donner figure à ces Denisoviens.

➤ Il semble qu'une même espèce ancestrale paléurasienne a conduit à deux espèces sœurs anatomiquement proches : les Néandertaliens à l'ouest et les Denisoviens à l'est.

L'AUTEUR



JEAN-JACQUES HUBLIN
dirige le département

Évolution humaine
de l'institut Max-Planck
d'anthropologie
évolutive, à Leipzig.
Depuis 2014, il est professeur
invité au Collège de France.

Cette Denisovienne a les traits
qu'une équipe de généticiens
de l'université hébraïque de
Jérusalem a tenté de coder
du génome des Denisoviens.

A Leipzig, la cafétéria de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionnaire bruisse souvent des rumeurs annonçant la publication d'une découverte majeure. Il

faut dire qu'elles se succèdent à un rythme étourdissant depuis la fondation de cet institut. Pour autant, l'année 2010 reste marquée dans les mémoires par une agitation exceptionnelle autour du bulletin des cruautés. Car 2010 fut d'abord l'année du décryptage du génome d'*Homo neanderthalensis*; puis celle de la découverte d'un type complètement nouveau d'homme fossile par des moyens jusqu'alors inédits : le séquençage de traces d'ADN dans un minuscule fragment d'os !

Depuis quelques années déjà, la grande aventure de la paléogénétique – c'est-à-dire de l'étude de l'ADN d'organismes du passé ancien – avait pris son essor à l'institut, conduite par mon collègue Svante Pääbo. Elle s'est d'abord concentrée sur une très petite portion du génome de l'homme de Néandertal avec l'analyse de l'ADN mitochondrial – l'ADN contenu dans les mitochondries, des organelles localisées en dehors du noyau cellulaire. Puis, pour la première fois, autour de Richard Green, David Reich et Svante Pääbo, une équipe de l'institut a décrypté les chromosomes d'*Homo neanderthalensis* puis publié en mai 2010 la découverte dans un article retentissant de la revue *Science*.

Retentissant, car décrypter l'ADN nucléaire ancien est longtemps resté une gageure. Après

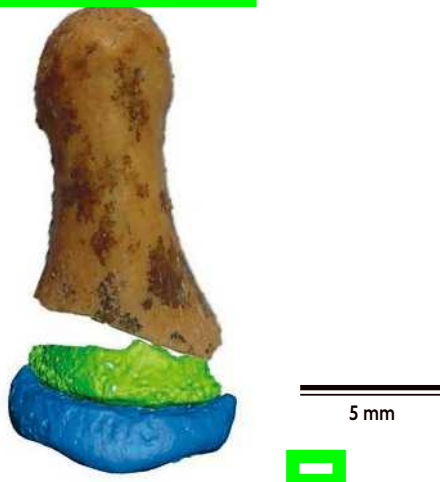
la mort d'un organisme, alors que la machinerie cellulaire s'est arrêtée, les rubans de l'ADN en effet se brisent en de multiples fragments, qui se mélangent très vite à des milliards d'autres provenant notamment des génomes d'une myriade d'organismes nécrophages (bactéries, champignons...) venus consommer le cadavre. Toutefois, après des années de recherches, les paléogénéticiens ont appris à trier puis à reconstituer la composition de cet ADN fossile (lire l'encadré Paléogénétique mode d'emploi page 32) à condition qu'il se soit conservé dans un milieu frais ou froid (en zone tropicale, il est vite dégradé et détruit au-delà de quelques millénaires).

Ainsi, en 2013, Ludovic Orlando, alors au Muséum d'histoire naturelle de Copenhague, a réussi avec l'équipe danoise à restituer le plus ancien ADN fossile connu, qui provient des restes gelés d'un cheval vieux de 700 000 ans découverts au nord-ouest du Canada. Par son climat, la Sibérie était également toute désignée pour la recherche de génomes anciens. En 2007, une équipe de l'institut, dont je faisais partie, a pu démontrer grâce à la paléogénétique la présence, il y a plus de 40 000 ans, de Néandertaliens dans une grotte de l'Altai sibérien (voir l'arbre phylogénétique page 32). Leur domaine géographique s'en était alors trouvé brutalement étendu de plus de 2 000 kilomètres vers l'est. C'est ainsi que nos collègues russes envoyèrent à Leipzig de nouveaux échantillons, et en particulier un morceau de phalange humaine, vieille de 52 000 à 76 000 ans et provenant d'un autre site de l'Altai en cours de fouille depuis de nombreuses années, celui de Denisova.

UN GROUPE FRÈRE DES NÉANDERTALIENS DANS L'ALTAÏ

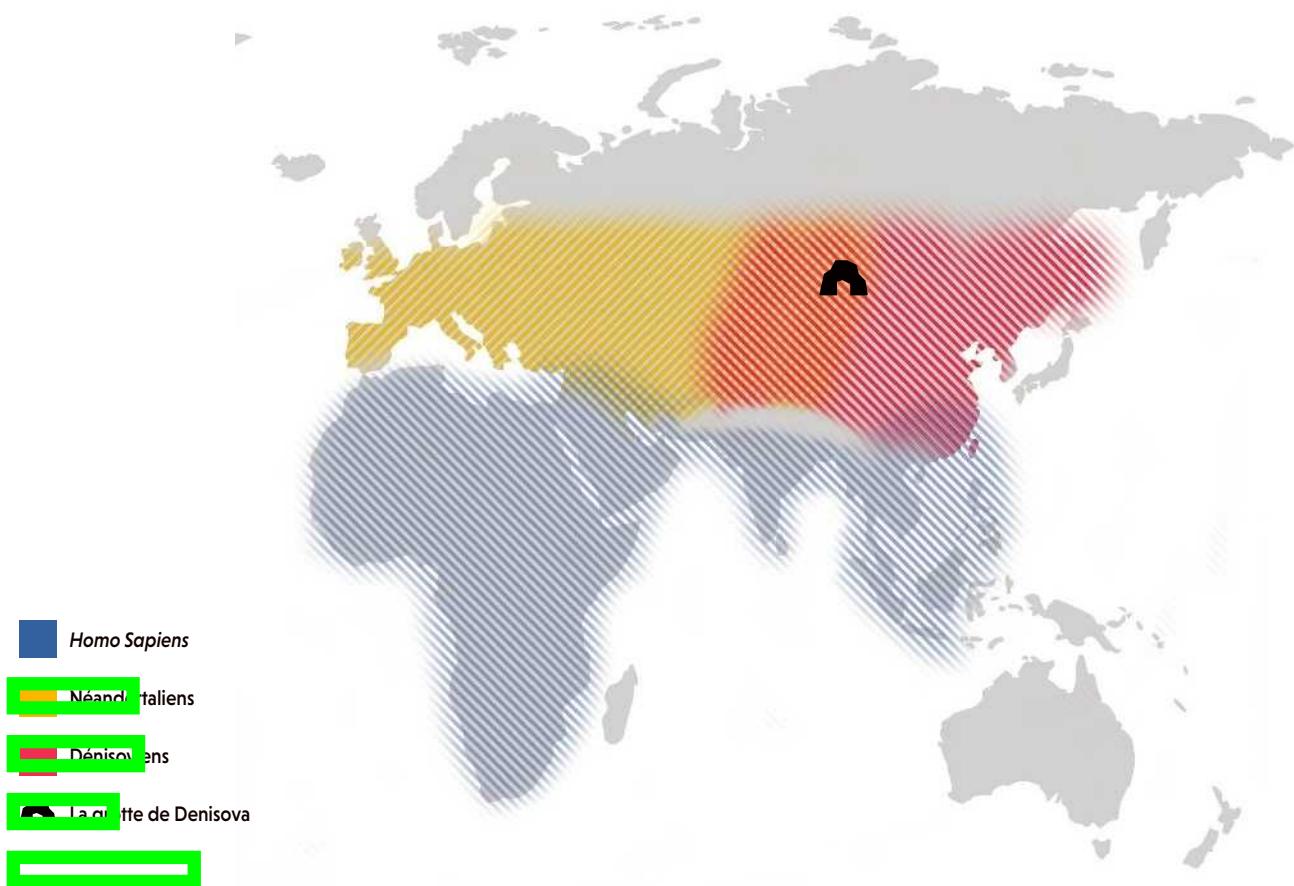
La grotte de Denisova est froide : 5 à 10 degrés l'été, -10 à -15 l'hiver, et l'ADN s'y conserve magnifiquement. Lorsque les paléogénéticiens de l'institut firent parler ce minuscule morceau d'os, il livra une histoire extraordinaire. Son ADN mitochondrial n'était ni celui d'un *Homo sapiens*, ni celui d'un Néandertal, c'était apparemment celui d'un être, dont la lignée avait, estimait-on, divergé de notre buisson évolutif il y a 1 million d'années environ.

L'ADN mitochondrial, rappelons-le, ne donne qu'une information très partielle, et parfois même trompeuse. Sauf cas tout à fait exceptionnel, ce bout de génome logé dans les mitochondries (les « centrales énergétiques » des cellules) n'est transmis que par la mère à sa descendance et surtout, il ne se recombine pas lors de chaque reproduction (ne se « mélange » pas avec le génome paternel). C'est ainsi que des lignées mitochondriales peuvent se perdre complètement, ou encore être



RECONSTITUTION D'UNE PHALANGE

En 2010, les paléogénéticiens de l'institut d'anthropologie évolutive de Leipzig ont découvert le génome de Denisova dans un petit morceau de cette phalange (borne bleue et verte). Récemment, une équipe de l'institut Jacques Monod de l'université de Bordeaux a reconstitué ce spécimen fossile à partir d'un autre fragment osseux provenant de la grotte de Denisova et ainsi reconstitué la célèbre phalange.



AIRES DE RÉPARTITION DES FORMES HUMAINES DANS L'ANCIEN MONDE

Les aires de répartition des **Dénisoviens**, **Néandertaliens** et **Homo sapiens**, avant que cette dernière forme ne se répande dans tout l'Ancien Monde. Les **Néandertaliens** et **Dénisoviens** ont été en contact à plusieurs reprises dans la région de la grotte de Denisova, située à la marge de leurs territoires respectifs. Il y a 70 000 ans, **H. sapiens** sont d'Afrique avant de rejoindre l'Asie.

transmises à une autre espèce lors d'un épisode d'hybridation. Mais l'année 2010 se clôture avec la nouvelle publication d'une équipe internationale conduite par Svante Pääbo, qui elle, décrit le génome presque entier de cet homme d'autant plus mystérieux que son anatomie restait inconnue. Ce pas fut décisif.

Car l'ADN nucléaire (celui des chromosomes logé dans le noyau cellulaire) de la phalange nommée Denisova 3 livra une information très riche. D'abord, ce « Dénisovien » était une Dénisovienne, une fillette encore loin de l'âge adulte d'après la taille de l'os. Surtout, la comparaison de son ADN nucléaire avec, d'une part, celui des hommes actuels et, d'autre part, celui des Néandertaliens, montrait qu'il s'agissait en fait d'un « groupe frère » de ces derniers. Les deux lignées s'étaient séparées l'une de l'autre il y a entre 473 000 et 380 000 ans, donc plus récemment que le point de divergence de ces formes eurasiennes avec la lignée africaine à l'origine des hommes actuels, daté aujourd'hui, d'après l'horloge moléculaire, autour de 650 000 ans.

Mais du côté des paléanthropologues, la frustration régnait : un bout de phalange est

un bien maigre fossile à étudier ! L'article de Richard Green et de ses collègues en 2010 présentait bien la description d'une molaire humaine découverte sur ce site en 2000 et jusque-là négligée. Mais, mis à part son volume extraordinairement grand, il y avait assez peu à en dire. Dès lors que son ADN mitochondrial la désigna comme dénisovienne, un jeune chercheur de mon département, Bence Viola, consacra toute son énergie à son étude anatomique. Sa morphologie était certes curieuse, mais il s'agissait d'une troisième molaire supérieure, une dent de sagesse >

Les Dénisoviens sont génétiquement un « groupe frère » des Néandertaliens

> dont la forme est assez souvent excentrique. Par la suite, les fouilleurs de la grotte de Denisova travaillant sous la direction d'Anatoli Derevianko et de Michael Shunkov ont identifié quelques autres vestiges très fragmentaires: une dent de lait fort usée, une autre molaire supérieure de grande taille ne montrant pas les traits habituels des dents de Néandertaliens ou d'*Homo sapiens*.

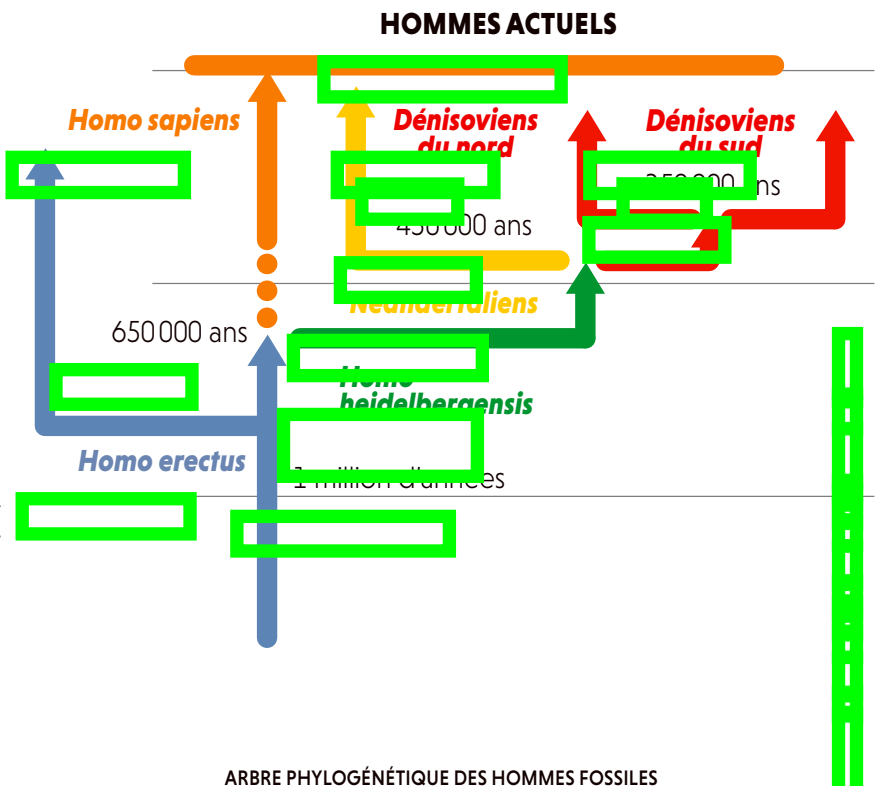
Depuis, Bence Viola, maintenant à l'université de Toronto, a présenté un morceau de paroi crânienne découvert dans la strate 11, qui recèle les restes des derniers Denisoviens, et Isabelle Grêvecœur, de l'université de Bordeaux, a analysé la morphologie des fragments réunis de la phalange fossile Denisova 3. Celle-ci ne montre pas l'élargissement caractéristique des phalanges néandertaliennes, mais une morphologie plus proche de celle des *Homo sapiens*. L'intérêt de ces découvertes réside surtout dans le fait qu'elles témoignent d'une longue occupation humaine de la grotte. L'agencement des niveaux archéologiques y a été souvent bouleversé par des conditions climatiques parfois extrêmes et les mélanges de couches sont fréquents. Cependant, la génétique comme les datations des sédiments indiquent que les Denisoviens ont vécu par intermittence pendant au moins une centaine de milliers d'années entre 50 000 et 250 000 ans.

HYBRIDATION

Un autre résultat important livré par l'analyse de l'ADN nucléaire dénisovien est que ses traces sont toujours présentes dans certaines populations actuelles. On n'en a pas trouvée dans les populations d'Afrique et d'Europe, et très peu dans les populations d'Asie continentale (de l'ordre de 0,2%). Mais la contribution dénisovienne peut représenter 3 à 5% du génome de certaines populations de Mélanésie et d'Australie. Les ancêtres des Papous et des Aborigènes australiens arrivés d'Afrique il y a plus de 50 000 ans, ont donc forcément dû rencontrer des Denisoviens sur leur chemin. Et le plus probable est que cette rencontre a eu lieu dans le sud ou le sud-est de l'Asie, il y a environ 50 000 à 100 000 ans (voir la carte page 31). Cela démontrerait que les Denisoviens avaient eu une répartition très étendue, que l'Altaï en représentait la marge plutôt que le centre. Cette position en zone frontière de la grotte de Denisova fut confirmée par la découverte par les fouilleurs russes de quelques restes néandertaliens dans le site. Au cours du dernier interglaciaire (entre 130 000 et 80 000 ans avant le présent), une réduction de la taille de la mer Caspienne, des températures hivernales plus clémentes et des conditions plus humides dans le centre de l'Asie ont permis aux Néandertaliens de s'étendre

considérablement vers l'est et d'atteindre l'Altaï. Là ils ont momentanément remplacé les Denisoviens et se sont même hybridés avec eux. Pour preuve, apportée par l'équipe de Svante Pääbo en 2019: un fragment d'os long vieux d'environ 90 000 ans trouvé dans le site, dernier reste d'une femme dont la mère était néandertalienne et le père dénisovien (même s'il devait aussi compter quelques lointains ancêtres néandertaliens).

La découverte de la mandibule de Xiahe: une histoire digne de «Tintin au Tibet»



Trois formes humaines (*H. sapiens*, *Néandertal* et *Dénisova*) ont rencontrées en Eurasie pendant le Pléistocène supérieur (120 000 à 20 000 ans avant le présent). *Néandertal* a évolué surtout à l'ouest de l'Eurasie, *Dénisova* surtout à l'est et en Asie du sud-est, où il a fondé une population distincte de celle du nord. Ces deux formes humaines sont issues de *Homo heidelbergensis*, lui-même issu de *Homo erectus*, *H. sapiens* est une espèce d'origine africaine récente.

Le contraste entre l'abondance d'informations génétiques et l'absence presque totale de données anatomiques sur les Dénisoviens était une situation totalement nouvelle dans le monde de la paléoanthropologie, une discipline historiquement construite sur une succession de trouvailles de fossiles spectaculaires depuis la première découverte d'un squelette d'homme de Néandertal en 1856. Mais, en réalité, une question s'est rapidement imposée aux paléoanthropologues: n'avions-nous pas déjà des Dénisoviens dans nos collections?

Pour la période allant de leur divergence des Néandertaliens, il y a environ 400 000 ans, jusqu'à l'arrivée d'*Homo sapiens* dans le nord de l'Asie vers 45 000 ans, il existe de nombreux fossiles humains en Chine. Longtemps, les tenants – chinois, pour la plupart – d'une origine locale des peuples d'Extrême-Orient les ont considérés comme des intermédiaires crédibles entre les *Homo erectus* (un *Homo* sorti d'Afrique il y a quelque 2 millions d'années) et les *Homo sapiens* de la région. Avec l'effondrement progressif de cette hypothèse de continuité régionale au profit de la théorie d'une origine africaine de notre espèce, on ne savait plus trop quoi en faire. Dès les premiers travaux sur les Dénisoviens, Chris Stringer du Muséum d'histoire naturelle de Londres et moi-même avons proposé ces fossiles, parfois très complets comme de très probables Dénisoviens. Mais faute de preuve par l'ADN on en était resté là.

UN DÉNISOVIENT EN ALTITUDE

Rebondissant en juillet 2016 pendant de courtes vacances, je trouvais dans mes courriers électroniques une série de photographies fort troublantes. Un court message d'une collègue chinoise, Dongju Zhang de l'université de Lanzhou, accompagnait les images d'une demi-mandibule fossile provenant du plateau tibétain. Ce courriel fut le point de départ d'une collaboration des plus passionnantes avec Dongju Zhang et son collègue Fahu Chen. La pièce était clairement non *sapiens*. Elle était très robuste, dépourvue de menton et portait des dents énormes.

L'histoire de sa découverte est digne des aventures de *Tintin au Tibet*. Recueillie dans les années 1980 par un moine bouddhiste dans une grotte sanctuaire non loin de la ville de Xiahe, elle a été remise au «sixième Cung-Thang Bouddha vivant» au lieu d'être réduite en poudre à des fins médicinales comme c'était habituellement le cas pour les ossements fossiles récoltés dans la grotte. Le dignitaire religieux conserva la pièce quelque temps avant qu'elle ne soit finalement remise à un géologue chinois de ses connaissances et conservée à l'université de Lanzhou. Son origine précise dans la grotte restait inconnue,



LA MANDIBULE DE XIAHE

La mandibule de Xiahe est le premier osile dénisovien substantiel jamais identifié. Il s'agit en fait d'une demi-mandibule, que les chercheurs ont reconstituée dans son ensemble et dessus par symétrie.



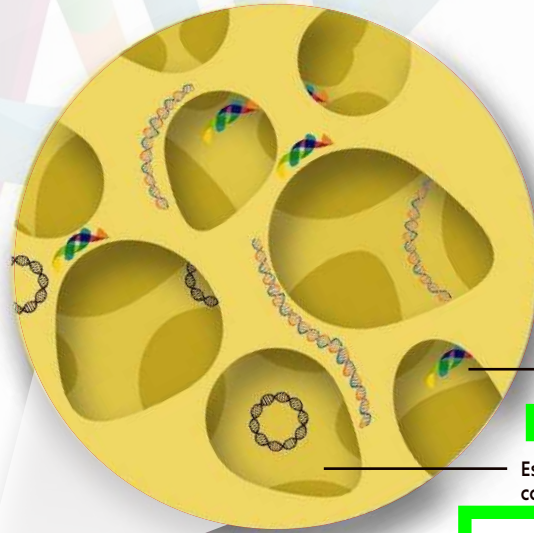
LA MANDIBULE DE PENGHU

La mandibule de Penghu, trouvée au fond de la mer de Chine, entre Taïwan et le continent, ressemble fortement à la mandibule dénisovienne de Xiahe. Elle est aussi très vraisemblablement dénisovienne.

mais heureusement l'os était encore inséré dans une gangue calcaire qu'il fut possible de dater grâce à la méthode de l'uranium-thorium. Les résultats donnèrent un âge de 160 000 ans. L'âge, la localisation géographique et les caractères morphologiques du fossile en faisaient un candidat idéal pour tester la présence des Dénisoviens en Chine.

Un des aspects extraordinaires de la découverte de Xiahe est que le karst de Baishiya où la pièce a été trouvée se situe à 3 300 mètres d'altitude. Jamais un homme aussi ancien n'avait été mis au jour à une telle altitude. On pensait jusqu'alors que seuls des *Homo sapiens* avaient pu coloniser le plateau tibétain, et seulement il y a moins de 40 000 ans. Qiaomei Fu, une paléogénéticienne de l'institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin, a d'abord tenté d'extraire de l'ADN ancien de la mandibule de Xiahe. Malheureusement sans succès, de sorte que nous nous sommes tournés vers une technique d'identification encore en développement, fondée sur les protéines. ➤

PALÉO-GENÉTIQUE MODE D'EMPLOI



1

PRÉPARATION D'UN ÉCHANTILLON OSSEUX

Un échantillon est prélevé par réduction en poudre de l'intérieur d'un os, afin d'obtenir un mélange de minuscules esquilles d'os contenant des fragments d'ADN ancien ou moderne (contaminant). La très grande majorité de l'ADN provient de champignons, bactéries et autres microorganismes du sol venus vivre dans le cadavre après la mort ; malgré toutes les précautions prises, des contaminations avec de l'ADN humain moderne, du manipulateur ou de personnes ayant été en contact avec l'os, sont aussi possibles.

6

IDENTIFIER L'ESPÈCE PAR L'ADN

D'autres algorithmes comparent le génome ainsi obtenu à divers génomes de référence afin de mesurer les distances génétiques entre populations. On s'intéresse en particulier au nombre de variations ponctuelles d'un génome à l'autre. En effet, plus ces variations, nommées SNP (pour *single nucleotide polymorphism*), sont nombreuses, plus les chances sont grandes que les individus comparés appartiennent à deux formes humaines distinctes. En général, le nombre de SNP différenciant deux individus d'une même espèce est faible (environ une variation sur 1000 chez *H. sapiens*), mais bien plus grand lorsqu'on compare l'ADN de deux espèces (environ une variation sur 250 entre une espèce humaine et le chimpanzé) ou de deux formes humaines (environ une variation sur 250 entre *Homo sapiens* et les Néandertaliens ou Denisoviens). Le nombre de SNP distinguant Néandertaliens et Denisoviens est également assez grand pour que l'on distingue ces deux formes. Ces mêmes SNP ont aussi permis de distinguer l'ADN des Denisoviens du nord (celui du fossile Denisova 1) de celui de Denisoviens du sud, passé dans les génomes des Papous et des Aborigènes d'Australie.

5

RECONSTITUTION DE L'ADN

Les algorithmes de puissants ordinateurs comparent les séquences obtenues à un ou plusieurs génomes de référence (par exemple le génome de *H. sapiens*) afin de reconstituer l'ancien génome. Ils s'appuient sur le fait que ces génomes présentent de grandes similarités. Peu à peu, les fragments de séquences s'assemblent comme un long puzzle linéaire où le nombre de redondances est un gage de fiabilité. Afin de ne pas confondre les séquences correspondant à de l'ADN ancien avec d'éventuels contaminants modernes, les algorithmes traquent aussi les endroits des séquences analysées où ils lisent T au lieu de C par rapport au génome de référence. Ces T sont des indices qu'il s'agit bien de séquences anciennes. Pourquoi ? Parce que lorsque l'ADN vieillit, les cytosines de l'extrémité des fragments ont tendance à se muier en une autre base, l'uracile U, mais l'amplificateur transforme systématiquement ces U en T. Ce sont ces T de remplacement qui prouvent que l'ADN est ancien.

Génome humain de référence

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

Séquences obtenues du génome ancien

TTCCAAAGCAT

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

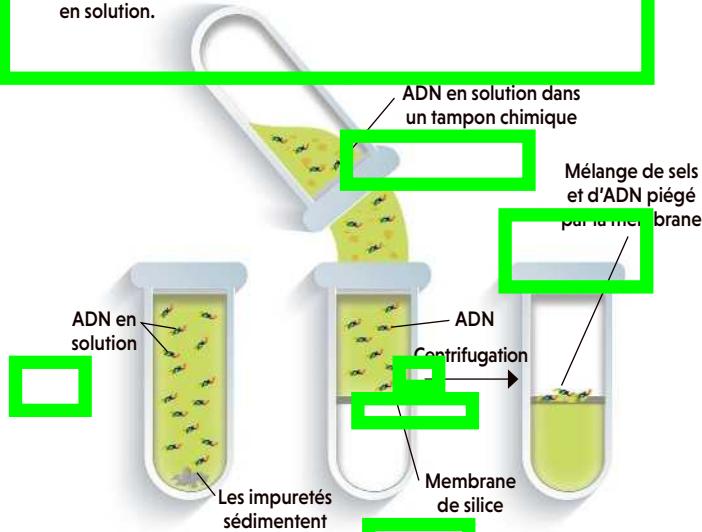
CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

CCACCAATAACTCATCATTCCATAGTGAATGGACAGTC

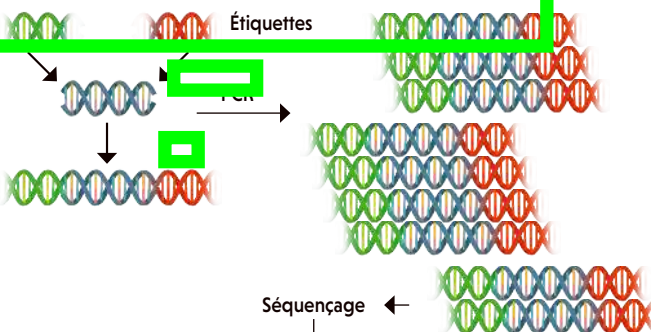
2 EXTRACTION CHIMIQUE DE L'ADN

La poudre est placée dans une solution enzymatique afin de dissoudre la matrice osseuse contenant l'ADN ancien. Après une centrifugation qui sépare l'ADN des restes osseux, on récupère l'ADN en filtrant la solution osseuse à travers une membrane de silice. On se sert chimiquement d'un alcool ajouté à la solution avant la filtration facilitent la récupération des fragments d'ADN, y compris les plus petits : une étape importante pour récupérer l'ADN ancien, qui, dégradé par le temps, est très fragmenté. Enfin, l'ADN est remis en solution.



3 PRÉPARATION DES FRAGMENTS

À l'aide de diverses manipulations génétiques, on flanque les fragments d'ADN avec des « étiquettes » (en rouge et vert), ces séquences connues qui indiquent le début et la fin des fragments et que le séquenceur sera capable de décrypter. Les fragments ainsi modifiés sont ensuite « amplifiés » : on en produit de multiples copies au moyen d'une réaction enzymatique de polymérisation en chaîne, ce qui permettra au séquenceur de les détecter.



GCTATCGGGTCACTATAAGATCGCAATGCGACTACTTATA
AGATGCGCTTAACGGTATCGCAACTTGCAGTGTGCTGCTAT
GCTATCGGGTCACTATAAGATCGCAATGCGACTACTTATA
AGCATCAATTGTAGATCGGGCCGGGATAATCATGTCCAC
GGAAGTACTGTAAAGATAATAATTAAGAGATGTGCTGCT
GCTGGTTCACGTAAAGGTCTCGCGCTA
CCTTAAGTAAGTGAGCGGTCGTG
ACATTATCCCTGATTTCTCACTACTATTAGTACTC
ACGGCGCAATTCACCAAGCCTTGTCTCGCCAGAATGC
CAGTCAGCATAAGGAAGAGCTCAAGGCAGGTCAACTCG
GAGGGTCACATGG

4 SÉQUENÇAGE

L'échantillon amplifié est alors séquencé : les fragments d'ADN sont traduits en successions de quatre lettres – A, T, G et C – correspondant à l'enchaînement de petites molécules constitutives de l'ADN (les bases azotées adénine, thymine, guanine et cytosine).

Un gène dénisovien permet aux Tibétains de vivre en altitude

> Certaines protéines, comme le collagène, ont en effet une longévité beaucoup plus grande que l'ADN. Et les molécules constituant le collagène sont constituées par une solide chaîne d'acides aminés dont la séquence est codée le long de l'ADN nucléaire. Or nous avons réussi à extraire des protéines dégradées de notre fossile. En comparant leur structure avec celle codée dans l'ADN des Denisoviens, un des membres de mon équipe, Frido Welker, a pu montrer en mai 2019 qu'elles leur étaient apparentées. Pour la première fois un Denisovien était identifié à plus de 2000 kilomètres de la grotte de Denisova.

Cette découverte permet de résoudre un mystère entourant l'origine d'un allèle du gène *EPAS1* répandu chez les habitants actuels du Tibet. La protéine qu'il code améliore le transport de l'oxygène dans l'organisme, et facilite ainsi la vie dans une atmosphère raréfiée en oxygène. Ce gène figurait dans la liste des quelques gènes hérités des Denisoviens par des populations asiatiques vivant en haute altitude. Pourtant la grotte de Denisova se trouve à une élévation de seulement 700 mètres et point n'était besoin de posséder ce gène pour y vivre. Xiahe apportait la solution : c'est en fait beaucoup plus au sud, aux confins de l'Himalaya que la sélection de ce trait s'était opérée chez les Denisoviens. Le nouveau fossile levait aussi une partie du voile sur la morphologie dénisovienne et sur tout permettait un rapprochement avec d'autres fossiles chinois. Notre étude a notamment souligné la forte ressemblance entre le fossile de Xiahe et une demi-mandibule récoltée au fond de la mer de Chine, entre Taïwan et le continent, celle de Penghu, dont tout porte à croire désormais qu'elle appartenait à un autre Denisovien. Les dimensions des deux fossiles sont très proches. Ces individus n'ont jamais développé de troisième molaire à la différence de la très grande majorité des spécimens humains anciens ; et, surtout, tous deux présentent un caractère très particulier : >

> une racine accessoire s'ajoutant à trois autres, dont deux fusionnées. Aujourd'hui, ce type d'enracinement d'une molaire est très rare en Europe, en Afrique, mais sa fréquence peut atteindre 40 % chez les Chinois et les Amérindiens (issus d'Asie du Nord). Ce pourrait être un caractère lui aussi hérité des Denisoviens. Certains autres détails anatomiques de la denture de Xiahe se retrouvent sur les dents découvertes dans un autre site chinois, celui de Xujiayao situé dans le nord de la Chine, à l'ouest de Pékin. Son âge est assez discuté mais il semblerait daté d'entre 370 000 à 260 000 ans. D'autres fossiles plus complets me semblent également à rapprocher de ce groupe: ils présentent de fortes capacités crâniennes, et l'on a reconnu sur eux des traits évoquant les Néandertaliens, sans toutefois pouvoir les attribuer à ce groupe. Il s'agit notamment des fossiles de Lingjing dans le comté de Xuchang (province du Henan), qui ont fait l'objet d'une publication en 2017. Il s'agit aussi, beaucoup plus récemment, du fossile de Maba, un crâne découvert en 1958 près de la ville de Shaoguan (province du Guangdong). Il s'agit encore de celui de Harbin découvert vers 1933 dans les sédiments de la rivière Songhua près de la ville chinoise de Harbin. Des formes à grand cerveau partageant certains caractères avec les Néandertaliens: pour moi, il s'agit bien à défaut de ce que l'on attend des Denisoviens.

LES DENISOVIENS DU SUD

Aujourd'hui, de plus en plus de paléoanthropologues acceptent notre proposition d'attribuer aux Denisoviens une bonne partie des hommes fossiles chinois. Mais qu'en est-il des peuplements anciens de régions situées plus au sud, celles où les ancêtres des Mélanésiens et des Aborigènes ont dû rencontrer des Denisoviens? Malheureusement hormis quelques dents, sur la nature humaine desquelles on s'interroge même, le sud-est asiatique n'a guère livré de fossiles qui documenteraient l'évolution des Denisoviens. Dès la mise en évidence d'ADN dénisovien dans des populations actuelles, on a tout de suite remarqué qu'en Mélanésie et en Australie, de nombreuses variations distinguent l'ADN dénisovien des populations actuelles de celui extrait des fossiles de la grotte de Denisova. En fait, l'analyse des génomes actuels montre assez clairement que les Denisoviens comprennent au moins deux branches principales. Ces deux branches se sont séparées depuis près de 350 000 ans, c'est-à-dire peu après la séparation de leur ancêtre commun avec la lignée néandertalienne. L'une des branches est celle des hommes de la grotte de Denisova et probablement d'une bonne partie des Denisoviens chinois, la seconde, méridionale

BIBLIOGRAPHIE

T.H. Hignam, **Faire parler les fossiles**, Pour la science n° 97, pp. 50-57, 2019.

S. E. Bailey et al., **Rare dental trait provides morphological evidence of archaic introgression in Asian fossil record**, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, n° 30, p. 14806, 2019.

F. Chen, et al., **A late**

Denisovan mandible from the Tibetan Plateau, *Nature*, vol. 569, n° 756, pp. 409-412, 2019.

J.-J. Hublin, **The Middle Pleistocene record**

On the ancestry of Neandertals, modern humans and others, *A companion to paleoanthropology*, in D. R. Begun (dir.), *A Companion to Paleoanthropology*, Wiley-Blackwell, pp. 517-537, 2013.

G. S. Jacobs et al., **Multiple deeply divergent**

Denisovan ancestors in Papuans, *Cell*, vol. 177, n° 4, pp. 1010-1021, 2019.

M. Meyer et al., **A high-coverage genome sequence from an archaic Denisovan individual**, *Science*, vol. 338, n° 6104, pp. 222-226, 2012.

V. Slon et al., **The genome of the offspring of a Neanderthal mother and a Denisovan father**, *Nature*, vol. 561, n° 7721, pp. 113-116, 2018.



LE CRÂNE DE HARBIN

Ce crâne trouve dans les sédiments de la rivière Songhua, à Harbin, la capitale de la province du Sahaliyan Ula, dans le nord de la Chine, pourrait aussi être celui d'un Denisovien. Ni Xijun, de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de l'Académie chinoise des sciences, y voit un homme néandertalien. Mais que sont les Denisoviens, sinon des *H. heidelbergensis* évolués en Asie?

est peu ou pas représentée pour l'instant dans le registre fossile. Chez des Japonais ou des Chinois actuels, on trouve des traces de ces deux sources d'ADN dénisovien, mais en très petite quantité: de l'ordre de 0,1% chacune. Chez les Aborigènes australiens ou les Mélanésiens, par contre, c'est seulement l'ADN de la branche des «Denisoviens du sud» qui est représentée, mais à un niveau nettement plus élevé: jusqu'à 4%. Une des implications de cette longue évolution indépendante de ces deux branches est que, du point de vue morphologique, les Denisoviens du nord et ceux du sud pourraient avoir été presque aussi différents les uns des autres qu'ils ne l'étaient des Néandertaliens. Les recherches actuelles s'orientent donc vers l'analyse des fossiles et des sites déjà connus en Chine, avec un accent tout particulier sur les techniques moléculaires: paléoprotéomique, recherche d'ADN ancien dans l'os, et dans les sédiments des sites. Mais elles redoublent aussi d'efforts sur le terrain, dans le sud et le sud-est de l'Asie, pour documenter ces Denisoviens du sud, dont l'aspect demeure encore un complet mystère. La paléoanthropologie de l'Asie a encore beaucoup à nous apprendre. ■

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL 1 AN

3 FORMULES

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

Votre cadeau : le livre *Une histoire de flou*
de Pierre Léna (74651805)



VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 102,80€

79€

Au lieu de 134,40€

99€

Au lieu de 194,40€

41% de réduction*

41% de réduction*

41% de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

A renvoyer accompagné de votre règlement :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pouirlascience@abopress.fr

P1G19NOE

OUI, je m'abonne

POUR LA SCIENCE

2 / J'indique mes coordonnées

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° : Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) :

Date d'expiration : Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) :

Signature obligatoire :

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE PAPIER
+ 12 n° du magazine papier
+ UN CADEAU

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
+ UN CADEAU

☐ FORMULE INTÉGRALE
• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne
+ UN CADEAU

D1A59EK7

P1A79EK7

I1A99EK9

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant la commande.

France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre *Une histoire de flou* pour 20,00 €.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par e-mail à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000 € - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APB 58.14 Z

L'ESSENTIEL

Grâce à leur structure en mailles, les tricotés sont des objets très élastiques.

> De ce fait, le principe du tricot intéresse les industriels, par exemple pour concevoir des matériaux composites ou pour concevoir des robots souples.

> L'étude de la force nécessaire pour étirer un tricot fait apparaître une loi statistique universelle, que l'on retrouve par exemple dans les séismes.

L'AUTEUR



SAMUEL POINCLoux
chercheur postdoctorant à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse

Élastique comme un tricot

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.

En général, quand un étudiant démarre une thèse de doctorat en physique, il doit d'abord assimiler l'état de l'art de son domaine de recherche (en lisant beaucoup d'articles), apprendre à utiliser l'équipement du laboratoire et peut-être effectuer quelques expériences préliminaires. Dans mon cas, il en a été tout autrement : j'ai commencé par regarder des vidéos sur YouTube afin d'améliorer ma technique de tricotage ! En effet, ma thèse avait pour sujet les propriétés mécaniques des étoffes tricotées et leur comportement quand on les étire.

Mon étude avait deux facettes, l'une théorique, dans laquelle je devais déterminer les équations qui décrivent au mieux le système, et l'autre expérimentale, pour laquelle je devais tester mécaniquement de véritables tricotés afin de guider et valider mes équations théoriques. J'avais cependant un petit problème : au moment

où j'ai accepté ce sujet de thèse, je savais à peine ce qu'était un tricot, et encore moins tricotier.

J'ai rapidement appris qu'il existe des différences à la fois structurelles et mécaniques entre un matériau tricoté (tel qu'un pull-over, une écharpe ou un bonnet) et une étoffe tissée (telle qu'une nappe, une chemise ou un jean). Ces différences sont faciles à mettre en évidence. Si vous tirez sur votre jean, le tissu se déforme à peine. En revanche, si vous tirez sur un pull en tricot, vous en augmentez facilement la longueur (jusqu'à la doubler) dans cette direction. L'élasticité d'un tricot apparaît aussi au grand jour si vous enveloppez un objet avec le textile : en s'étirant localement, un tricot s'adapte à des formes complexes et épouse parfaitement les surfaces. À l'inverse, un tissu qu'on essaye de plaquer sur une surface sphérique, par exemple, fera des plis.

Cette différence de comportements ne s'explique pas par la nature des fils utilisés ; un

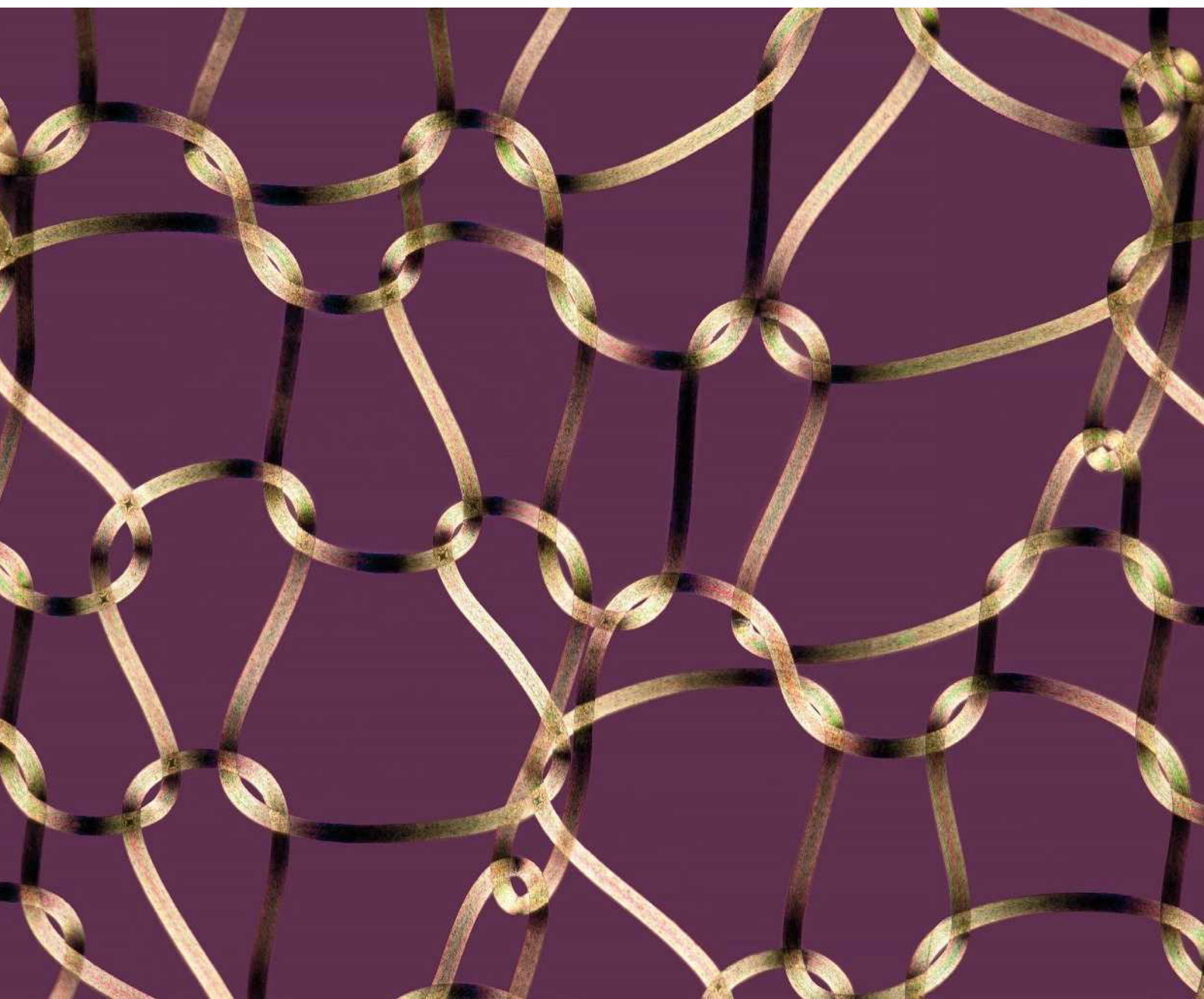


tricot et un tissu fabriqués avec le même type de fils présenteront aussi des propriétés opposées. En fait, le comportement mécanique est essentiellement dicté par les entrelacements des fils qui sous-tendent la structure du matériau. Ainsi, un textile tissé est constitué de deux groupes de fils qui s'entrecroisent à angle droit (voir la figure page 40). Quand on tire sur un tissu, l'effet est presque le même que si on tire sur le fil lui-même. L'élasticité du tissu est alors celle du fil.

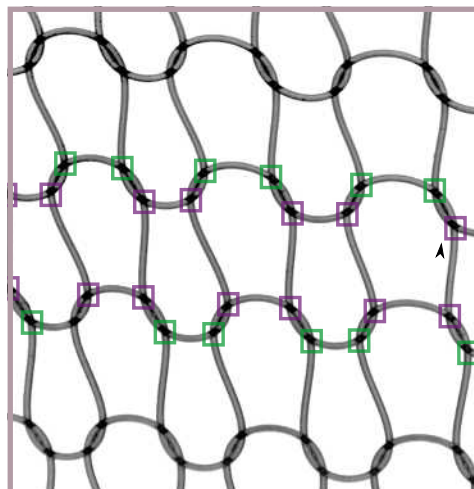
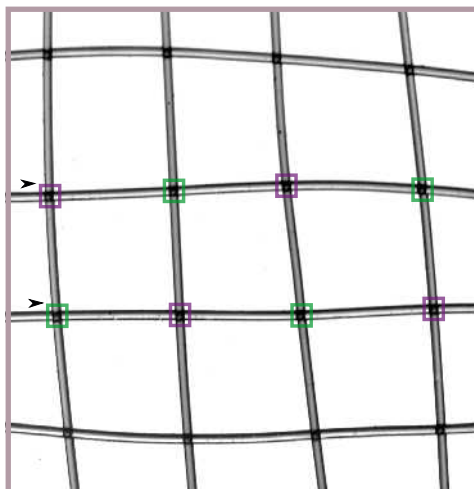
En revanche, les textiles tricotés sont généralement constitués d'un unique fil formant un réseau de boucles, qui constituent

les mailles du tricot. Tirer sur un tricot a donc pour effet de déformer les boucles, et non de tirer sur le fil lui-même. C'est cette structure d'entrelacs qui confère toute son élasticité au tricot, et cela même si le fil lui-même n'est pas élastique.

Bien évidemment, avec mes directeurs de thèse Mokhtar Adda-Bedia et Frédéric Lechenault, à l'École normale supérieure, à Paris, nous n'étions pas les premiers à nous interroger sur les déformations du tricot. Quiconque s'adonne au tricot a une certaine connaissance empirique de la structure et de la mécanique du tricot. L'industrie, et pas seulement dans le >



Les matériaux tissés et tricotés se comportent différemment à cause de la façon dont le fil est arrangé. Dans le tissu (à gauche), les fils sont rectilignes et se croisent perpendiculairement en passant alternativement au-dessus ou au-dessous (carrés violets ou verts) d'un autre. Dans un tricot, il n'y a qu'un seul fil qui fait des boucles, les « mailles ».



Le domaine de l'habillement, s'intéresse aux propriétés de ces étoffes. Par exemple, on utilise les matériaux tricotés pour renforcer des éléments composites dans les avions, les automobiles ou les trains. De plus, le tricotage a inspiré des travaux dans d'autres domaines, en mathématiques notamment. Par exemple, la mathématicienne Sarah-Marie Belcastro, de l'université du Massachusetts, à Amherst, aux États-Unis, illustre et étudie des surfaces mathématiques à topologie et géométrie complexes en les tricotant (voir *Pour la Science* n° 429).

Les chercheurs et les ingénieurs dans le domaine émergent de la « robotique molle » exploitent aussi les propriétés du tricot. En effet, il est possible de créer des milieux et des systèmes déformables dont il est facile d'ajuster les propriétés en exploitant les principes du tricot. Ainsi, en 2019, Katia Bertoldi, de l'université Harvard, aux États-Unis, et ses collègues ont conçu un gant robotisé intégrant des actionneurs pneumatiques textiles.

Les premières études sur la mécanique du tricot ont débuté dans les années 1960. Inspirées par les outils du génie mécanique de l'époque, ces recherches consistaient à modéliser la position exacte du fil dans une maille afin de déterminer comment ce fil se déforme sous l'effet d'une légère traction. Ces travaux ont livré des équations intéressantes, mais elles ne décrivaient qu'une maille, et pas l'ensemble du textile.

PLUS DE RÉALISME DANS LES FILMS

Plus récemment, c'est le développement de l'infographie (jeux vidéo, films d'animation, effets spéciaux, etc.) qui a motivé de nouveaux travaux reposant sur une approche numérique. L'objectif était de produire des représentations réalistes des vêtements portés par les personnages animés. En 2012, Cem Yuksel, de l'université de l'Utah, aux États-Unis, et ses collègues ont inauguré cette approche en développant un modèle entièrement numérique qui a pour point de départ le fil et qui remonte jusqu'au tricot dans sa globalité. Cela se traduit par un rendu très réaliste, mais l'approche numérique ne fournit pas d'expressions analytiques des constantes mécaniques du textile, ni ne renseigne sur les rôles joués par les paramètres structurels (par exemple la taille de la maille) et les paramètres du matériau (comme la rigidité du fil).

Le but de ma thèse était donc de mettre en place une méthode qui se situe à mi-chemin entre les travaux qui décrivent analytiquement une seule maille et ceux de l'approche numérique globale, afin de mieux comprendre comment les différents éléments du tricot contribuent à ses propriétés élastiques. Était-il possible de formuler des équations pour décrire directement les propriétés mécaniques du textile entier tout en définissant le rôle des paramètres individuels?

J'ai été rapidement confronté à deux problèmes très différents. Tout d'abord, malgé les



Avec cette machine à tricoter, l'auteur a produit des maillages très simples avec un fil de nylon.

tutoriels sur Youtube et les précieux conseils de ma grand-mère, mes premiers tricotés étaient affreux et inutilisables pour les besoins de la recherche. Ensuite, le nombre de paramètres en jeu dans les tricotés ordinaires est très grand, parce que même les fils les plus classiques sont eux-mêmes des objets incroyablement compliqués, constitués de plusieurs fibres assemblées de façon peu régulière.

Afin de remédier aux limites de mes compétences en tricotage, j'ai contacté une école d'art voisine, qui, par chance, avait un atelier équipé de machines à tricoter manuelles et de métiers à tisser. Et surtout, le chef de l'atelier a eu l'amabilité de m'expliquer comment réaliser un tricot parfait. Avec ce savoir en poche (et une machine à tricoter d'occasion datant des années 1970 que nous avons achetée pour le laboratoire), j'étais enfin en mesure de produire des tricotés assez réguliers pour être utilisés dans nos expériences.

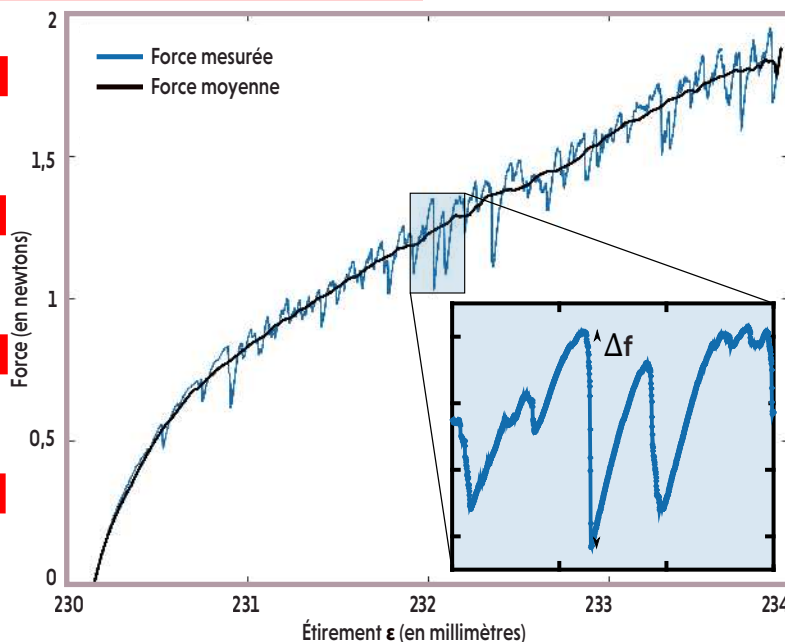
Pour résoudre le second obstacle, nous avons fait ce que font tous les physiciens : nous avons simplifié le problème autant que possible afin qu'il ne reste que les paramètres essentiels. Nous savions que ce qui définit un tricot est le réseau des points de croisement des fils, et nous avons commencé par choisir le fil le plus simple possible, du fil de pêche en nylon. Nous avons alors fait un tricot très lâche afin que le fil ne soit pas trop déformé (des courbures trop fortes auraient entraîné des déformations plus complexes à modéliser). Résultat : nous avions un matériau sans doute un peu osé s'il s'était agi d'en faire un vêtement, mais un bon point de départ pour notre étude. Ce tricot était assez simple pour être décrit à l'aide d'un nombre limité de facteurs (dont éventuellement quelques paramètres numériques) : l'élasticité du fil, la structure imposée par le motif d'entrelacs et la friction du fil sur lui-même aux points de croisement.

ÉLASTICITÉ ET TREMBLEMENTS

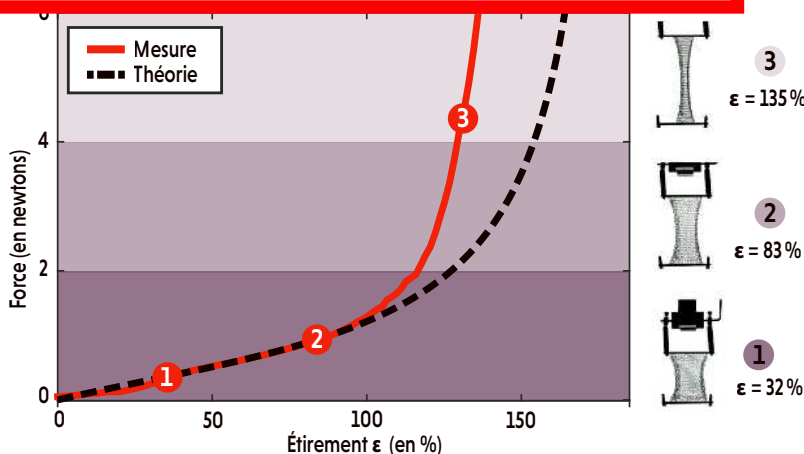
Afin d'évaluer la réponse mécanique de notre tricot, nous avons mesuré la force appliquée pour l'étirer, et nous avons pris des photos pour évaluer la déformation locale au niveau des mailles. Le résultat de la force à appliquer en fonction de l'étirement (voir la figure ci-contre, en haut) n'était pas aussi simple que nous l'avions anticipé. La réponse mécanique du tricot avait deux caractéristiques, l'une liée à l'élasticité et l'autre à du bruit. La composante élastique était simple à identifier et correspond à une augmentation régulière de la force à appliquer pour accroître l'étirement. En revanche, la réponse bruitée (de petites perturbations venant se superposer à la réponse élastique) était aléatoire et il fallait donc l'envisager d'un point de vue statistique.

Une fois ces deux composantes identifiées, nous les avons étudiées séparément.

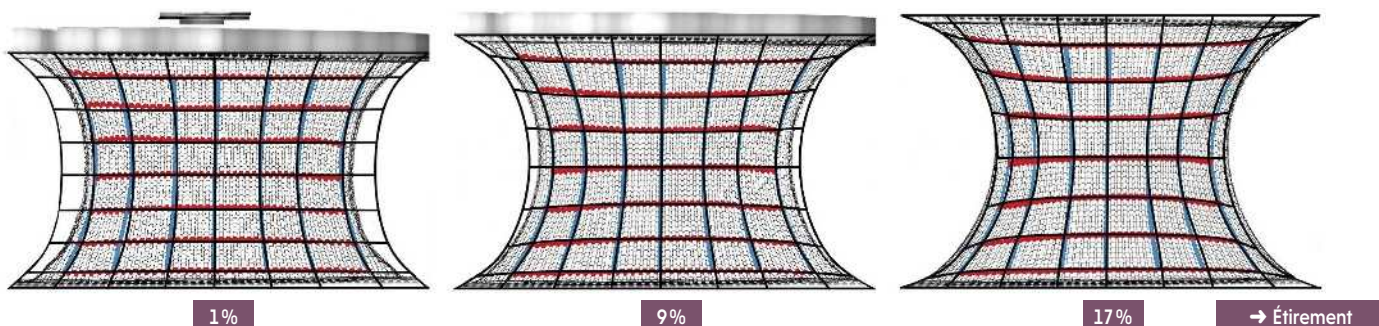
L'élasticité d'un tricot découle naturellement de celle du fil et des boucles périodiques du réseau de mailles, mais nous devions définir comment ces facteurs interagissent. Concrètement, nous avons déterminé comment l'énergie élastique du fil varie lorsque le tricot est déformé. Au lieu de fonder notre modèle sur le fil lui-même, comme dans les études mécaniques précédentes, nous avons considéré le tricot comme un réseau de >



La force appliquée en fonction de l'étirement du tricot caractérise le comportement mécanique du matériau. La réponse globale (en bleu) se décompose en deux parties, une composante moyenne (en noir) et des fluctuations. La première est liée à l'élasticité de la structure. Les propriétés de la seconde (dans le zoom), qui présente une série d'accroissements lents entrecoupés d'une baisse brutale, sont typiques de frottements.



Tant que l'étirement est inférieur à environ le double de la longueur initiale du tricot, le modèle théorique de l'auteur (en noir) rend parfaitement compte des observations (en rouge). Pour un étirement plus important, la force est sous-estimée, car le modèle ne prend pas en compte l'étirement et la compression du fil lui-même.



Quand on suit le comportement spécifique des mailles (certaines lignes rouge et en bleu) pour différents étirements et que l'on compare au modèle (en noir), le résultat est plutôt satisfaisant.

Mais à faible étirement, les mailles latérales sont mal restituées à cause du phénomène d'enroulement que l'on observe parfois sur des pulls : les mailles moins contraintes sur les extrémités des manches tendent à s'enrouler sur elles-mêmes.

> sous-unités, à savoir les mailles. Cette approche à l'échelle intermédiaire, entre le fil et le tricot, simplifie le problème parce qu'une maille est caractérisée seulement par la distance et l'orientation des mailles voisines, et non par toute la trajectoire du fil. La difficulté est d'exprimer l'énergie du fil en fonction de la géométrie de la maille.

Quand on étire notre tricot simplifié, le fil se déforme surtout en se courbant, parce que l'étirement du fil lui-même a un coût énergétique beaucoup plus élevé. Et la courbure du fil est étroitement liée à la forme de la maille. Par exemple, plus une maille est petite, plus la courbure du fil croît ; et l'énergie associée augmente en conséquence. On a donc une relation simple entre l'énergie et les paramètres du réseau de mailles. Par ailleurs, si on considère le fil comme inextensible, un lien très simple relie la taille de la maille et la longueur du fil dans celle-ci. Si une maille est étirée dans toutes les directions, la longueur de son fil augmente. Et, comme la longueur totale du fil est constante, si le tricot est étiré dans une direction, la déformation doit être compensée par un rétrécissement dans une autre direction.

À partir de ces remarques, nous avons établi une formule mathématique donnant la réponse mécanique d'une maille, et, par extension, celle du tricot où toutes les mailles sont déformées de la même façon. Le modèle rend parfaitement compte de la réponse élastique d'un tricot étiré (voir la figure page 41, en bas), et cela jusqu'à deux fois sa longueur initiale. Mais quand on étire au-delà, les mailles ne peuvent plus se resserrer latéralement, car elles sont limitées par l'épaisseur du fil. Ce dernier commence alors à s'étirer et se comprimer, type de comportement que notre modèle ne prend pas en compte. Par conséquent, celui-ci sous-estime la force de traction pour un étirement très important.

L'hypothèse de mailles qui se déforment toutes de la même façon suffit pour rendre compte du comportement global du tricot. Mais

il est plus réaliste d'admettre que la déformation est hétérogène, c'est-à-dire que toutes les mailles du tricot ne se déforment pas de façon identique. Pour modéliser cette situation, nous avons gardé la même approche que précédemment, mais nous avons dû imposer une contrainte supplémentaire : la déformation d'une maille ne peut se faire indépendamment de ses voisines. Les mathématiques se compliquent alors un peu parce que la géométrie des mailles n'est plus décrite par de simples nombres, mais par des fonctions qui varient selon la position de la maille dans le textile. En se limitant à de faibles déformations du tricot, les équations restent résolubles et fournissent une prédiction de la forme globale du textile et des mailles individuelles. Dans une expérience où nous avons étiré le tricot de façon à produire des déformations très hétérogènes (voir les figures ci-dessus), nous avons constaté un bon accord entre les mesures et notre modèle.

DU BRUIT DANS LE TRICOT

Revenons maintenant au bruit aléatoire, la seconde composante qui se manifeste lorsqu'on étudie la force à appliquer pour étirer un tricot. En analysant de près cette composante, nous avons remarqué que les fluctuations suivent un comportement particulier : elles augmentent lentement et de façon linéaire avec l'étirement avant de subir une chute soudaine et importante. Ce bruit n'est pas lié à notre dispositif de mesure (dont la sensibilité est 100 fois supérieure à celle nécessaire pour mesurer ces fluctuations) ; il est donc intrinsèque au tricot. Quelle est son origine ? Il est lié à la friction du fil. Quand on pousse un objet sur une surface, les frottements s'opposent à la force de poussée. Si celle-ci est inférieure à une valeur critique, le frottement domine et l'objet reste immobile ; au-dessus de ce seuil, la poussée prend le dessus et l'objet commence à glisser.

Ce phénomène de frottement avec un seuil est à l'œuvre à chaque point de croisement du fil avec lui-même dans les mailles du tricot. Quand vous tirez sur le tricot, certains contacts vont brusquement glisser quand le rapport des forces de poussée et de frottement atteint la valeur critique. On explique ainsi l'augmentation lente de la force entrecoupée de basses

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

BIBLIOGRAPHIE

F. Connolly et al., *Free-free composites for rapid design and manufacturing of soft wearable robots*, *Extreme Mechanics Letters*, vol. 27, pp. 52-58, 2018.

S. Poincloux et al., *Stretching dynamics in the mechanical response of knitted fabrics*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, article 058002, 2018.

S. Poincloux et al., *Geometry and elasticity of a knitted fabric*, *Phys. Rev. X*, vol. 8, article 021075, 2018.

S. M. Belcastro, *La tricot mathématique*, Pour la Science, n° 29, juillet 2013.

C. Yuksel et al., *Stitch mechanics for modeling knitted clothing with yarn-level detail*, *ACM Transactions on Graphics*, vol. 31(3), article 37, 2012.

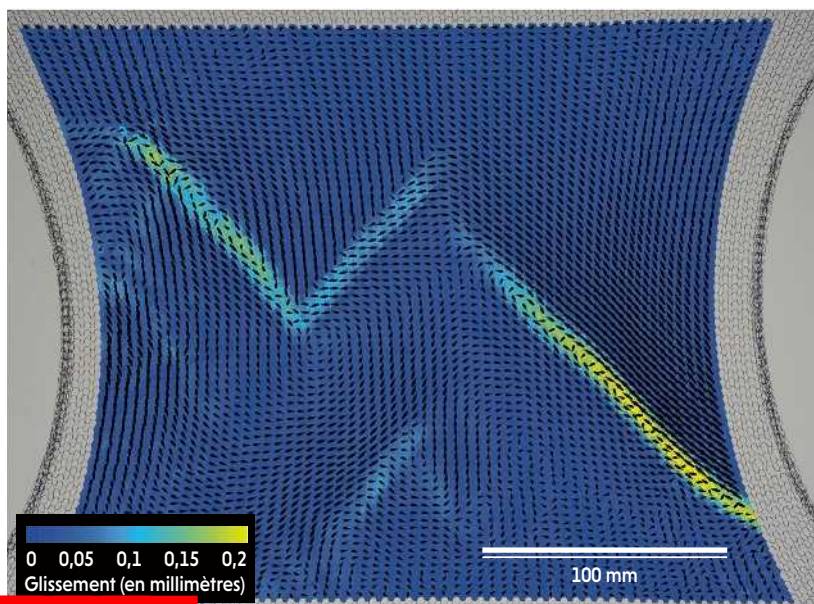
rapides: celles-ci correspondent au glissement soudain des points de contact et à la diminution associée de la résistance à la traction.

Les décrochements de la force présentent des amplitudes différentes, car un glissement ne correspond pas à un unique point de contact, mais à un ensemble de points plus ou moins nombreux qui glissent en même temps. Cette simultanéité est liée au fait que les mailles ne sont pas isolées les unes des autres, mais au contraire toutes connectées et reliées par le même fil. Pour repérer les points qui glissent lors d'un décrochage, nous avons pris des séquences de photos de tricot avec des étirements de 0,1% – une valeur insuffisante pour induire une déformation globale visible, mais assez importante pour déclencher un glissement de certains contacts. Les groupes de mailles qui glissent en même temps forment des ensembles très allongés (voir la figure ci-contre).

Comme nous l'avons dit, pour caractériser le bruit dû au glissement des points de contact, nous avons adopté une approche statistique. Nous avons examiné la distribution de probabilité de l'amplitude des décrochements, c'est-à-dire que nous avons répertorié tous les épisodes de glissement et nous avons noté de combien la force d'étirement baissait à chaque fois. Nous avons constaté qu'il y a de nombreuses petites baisses et très peu de baisses importantes. La distribution est globalement décrite par une loi de puissance (c'est-à-dire que la densité de probabilité est proportionnelle à l'amplitude de la baisse de la force élevée à une puissance donnée). Une conséquence de cette loi de puissance est ce qu'on appelle l'invariance d'échelle, qui signifie que certaines propriétés des événements de glissement sont indépendantes de leur taille.

Cette propriété est caractéristique du *crackling noise* («crépitements»), à savoir une réponse intermittente que présentent de nombreux systèmes, où des phases de charge lente sont interrompues par des événements soudains. L'exemple le plus connu est celui des zones sismiques: quand deux plaques tectoniques en contact se déplacent en sens opposés (par exemple la plaque Pacifique et la plaque Nord-américaine), elles sont souvent dans une situation de blocage à cause de l'importance des frottements. De l'énergie de compression s'accumule progressivement, et lorsque les forces correspondantes surmontent les frottements, un glissement brusque survient et se traduit par un tremblement de terre.

En 1956, les géophysiciens Charles Richter et Beno Gutenberg ont proposé une loi statistique empirique qui décrit le nombre de séismes par unité de temps dans une région donnée en fonction de l'amplitude du séisme. Cette distribution de probabilité suit une loi de puissance. Parmi les autres exemples de



L'analyse de la photo d'un tricot subissant un étirement très faible de 0,1% permet de voir que les mailles ont glissé au moment où la force d'étirement a vaincu les frottements. On observe clairement des mouvements d'ensemble.

crackling noise, on trouve le bruit du papier froissé, le bruit du crépitements d'un feu, le moment où une avalanche se déclenche, la production de pop-corn, etc. Tous ces phénomènes présentent le même profil statistique que les glissements de notre tricot.

SÉISMES, ROBOTS ET PULL-OVERS

Ainsi, l'étude des propriétés mécaniques du tricot a des liens surprenants avec des sujets très lointains comme la conception de matériaux pour des avions, la robotique et l'architecture ou comme l'étude statistique de phénomènes tels que les séismes. Il est particulièrement intéressant de retrouver une loi statistique universelle dans le tricot. Ce matériau permettrait-il de mieux comprendre l'origine de cette universalité, voire d'offrir une façon simple de l'étudier en laboratoire (en tous cas bien plus accessible et contrôlable que les séismes)? Lors des travaux que j'ai menés avec mes collègues, la façon dont nous avons modélisé le phénomène a été cruciale. Il a été nécessaire de simplifier le système (comme dans toute démarche de recherche). Mais si nous l'avions trop simplifié, nous aurions peut-être fait disparaître des aspects intéressants. Par exemple, si nous avions négligé le frottement, comme nous l'avions initialement envisagé, nous serions passés à côté du phénomène de crépitements.

L'étape suivante de nos recherches consistera à introduire davantage de complexité, pas à pas et de façon contrôlée, par exemple en jouant sur le type de maille (car il y a de nombreuses façons de tricoter ces mailles) ou sur les propriétés du fil. Et quand nous serons enfin parvenus à démêler toutes les subtilités du tricot, je serai peut-être en mesure de tricoter un beau pull pour ma grand-mère! ■



© Reuters/Sylvain Cherkau - Stock.adobe.com

Dans de nombreux pays tropicaux en développement, la majeure partie du poisson pêché est soit exportée pour la consommation, soit transformée localement pour produire de la farine de poisson, laquelle est ensuite exportée et utilisée pour nourrir les poissons d'élevage. C'est ce qui attend ces sardinelles dans une usine de Nouadhibou, le port principal de Mauritanie.

L'ESSENTIEL

Dans les pays tropicaux en développement, le poisson constitue la principale source de micronutriments pour la majorité des gens.

> Néanmoins, ces populations souffrent de carences alimentaires sévères.

> Pourtant, dans certains de ces pays, les prises de pêche seraient suffisantes pour répondre à leurs besoins, si elles n'étaient pas exportées...

L'AUTEUR



DANIEL PAULY
professeur à l'Institut pour les Océans et la pêche de l'Université de la Colombie-Britannique à Vancouver, au Canada

Les effets pervers du commerce du poisson

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.

Manger du poisson est bon pour la santé. Le poisson est une source de micronutriments qui aident à prévenir les maladies liées aux carences alimentaires, l'une des principales causes de mortalité infantile dans le monde. La consommation de poisson pêché localement permettrait-elle de réduire l'incidence de ces maladies dans les pays touchés par ce problème? Il manquait des données pertinentes pour répondre à cette question. Une équipe menée par Christina Hicks, du centre pour l'environnement de l'université de Lancaster, au Royaume-Uni, et du centre pour l'étude des récifs coralliens de l'université James-Cook, en Australie, a évalué le contenu nutritionnel de 367 espèces de poissons pêchés dans 43 pays. Dans chaque pays, les chercheurs ont examiné le lien entre les nutriments disponibles dans les prises de pêche et la prévalence des maladies associées à des carences nutritionnelles dans les communautés vivant à moins de 100 kilomètres de la côte. Ils ont publié leurs résultats dans le journal *Nature*.

SIX MICRONUTRIMENTS ESSENTIELS

Christina Hicks et ses collègues se sont concentrés sur six micronutriments essentiels : le calcium, le fer, le zinc, le sélénium, les oméga-3 et la vitamine A. Ils ont également étudié la teneur en protéines. À l'aide de données déjà disponibles, les chercheurs ont créé un modèle permettant de prédire la concentration de chacun de ces nutriments dans différentes espèces de poissons. En exploitant ces bases de données sur les prises de pêche réalisées entre 2010 et 2014, ils ont rassemblé des informations sur la quantité et le type de poissons pêchés dans la zone économique exclusive (ZEE) de chaque pays – les eaux côtières sur lesquelles il détient des droits de pêche souverains. Christina Hicks et ses collègues ont alors utilisé leur modèle pour estimer les nutriments disponibles à partir de ces prises et ainsi déterminer la répartition mondiale des nutriments issus de la pêche. Les poissons tropicaux offrent par exemple des concentrations plus élevées de calcium, de fer et de zinc que ceux des autres régions du globe.

Dans les pays tropicaux en développement, le poisson n'est pas, en général, un simple complément sain à un éventail déjà riche de produits alimentaires. Au contraire, pour des millions de gens vivant dans ces régions, il apporte les micronutriments et protéines absents d'une alimentation qui, sans lui, serait déséquilibrée. Il en constitue même la principale source pour la majorité d'entre eux. Les

protéines provenant de la pêche complètent le contenu nutritionnel des régimes alimentaires typiques de ces pays, où les calories proviennent principalement d'aliments tels que le maïs ou le riz.

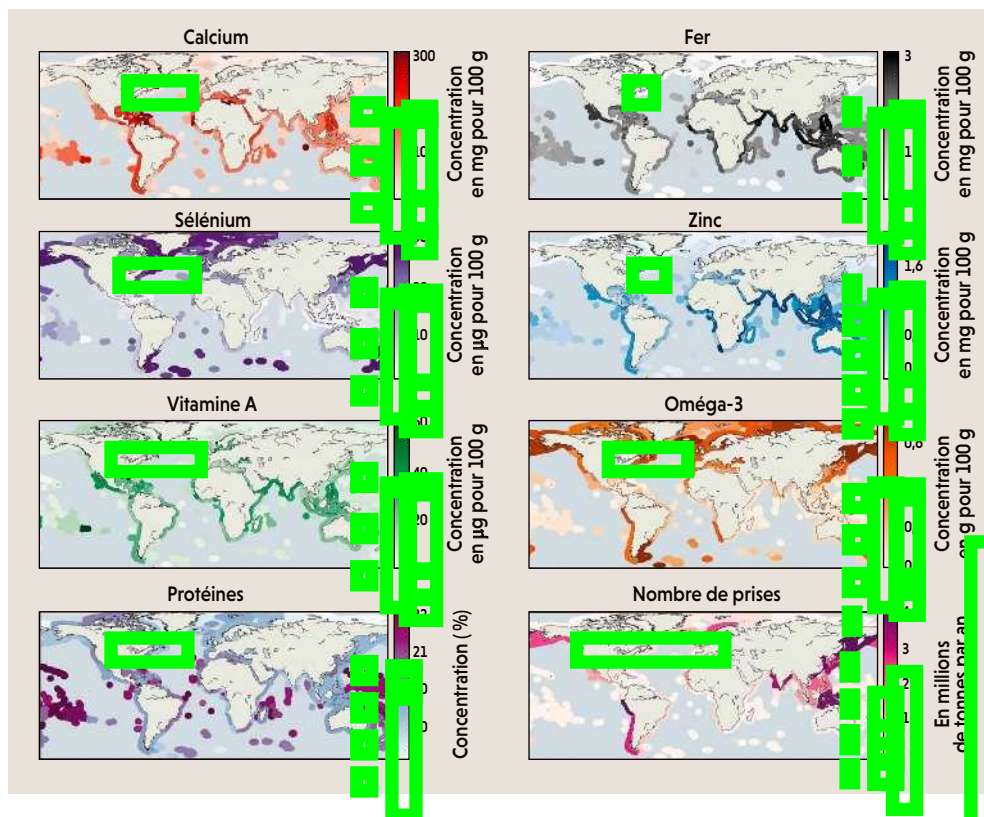
DES PRISES DE PÊCHE SUFFISANTES POUR LES BESOINS LOCAUX

Les données de Christina Hicks et de ses collègues montrent que, dans certains de ces pays, les prises de la pêche devraient être suffisantes pour répondre aux besoins en micronutriments des populations. Par exemple, plus de 75% de la population namibienne est menacée de carence en calcium, alors même que sont pêchés en Namibie suffisamment de

L'équipe a évalué le contenu nutritionnel de 367 espèces de poissons pêchés dans 43 pays

En Mauritanie, la pêche artisanale peine à nourrir les populations.





Dans la zone économique exclusive de ce pays côtier, Christina Hicks et ses collègues ont évalué les concentrations en divers nutriments et en protéines dans les poissons locaux, et les ont mises en regard des prises globales de pêche.

poissons pour remédier à cette situation. Parfois même, conserver pour la consommation locale ne serait-ce qu'une fraction des quantités totales de poisson pêchées aurait un impact considérable sur la santé publique. C'est particulièrement vrai pour les enfants de moins de 5 ans, à un stade crucial de leur développement où les carences en micronutriments ont de graves conséquences. Pour 22 des 43 pays étudiés dans ces travaux, moins de 20% des quantités de poissons pêchés fourniraient assez de micronutriments essentiels pour répondre aux besoins de tous les enfants de moins de 5 ans.

Non seulement les pénuries de micronutriments nuisent à la santé publique, mais ce problème se répercute aussi sur le PIB. Il est donc logique que les gouvernements des pays en développement situés sous les Tropiques – ainsi que les organisations internationales d'aide au développement telles que les Nations unies – fassent tout leur possible pour encourager la consommation locale du poisson pêché dans les zones économiques exclusives de ces pays. Et pourtant, la majeure partie des politiques de développement économique, y compris celles de ces pays eux-mêmes, visent à promouvoir les exportations de poisson pour répondre à la demande insatiable des pays occidentaux et d'Asie orientale.

La surpêche a d'abord frappé les eaux bordant les pays développés avant de s'étendre aux autres pays. Par exemple, les prises des

pêcheries de l'Atlantique Nord ont culminé en 1975, alors que la pêche mondiale a atteint un sommet en 1996. Les interdictions et les quotas imposés aux régions surexploitées ont poussé les pays concernés à se fournir en poisson ailleurs. De nos jours, une grande partie des produits halieutiques des régions en développement sont soit pris par les pêcheurs locaux et exportés, soit pêchés par des flottes étrangères qui, en payant un droit symbolique pour accéder aux zones économiques exclusives des pays en développement, fournissent directement leur propre marché. De telles actions contribuent à la pénurie de micronutriments dans de nombreux pays en développement.

PÉNURIE DE SARDINELLES AU SÉNÉGAL

Les pays de la côte nord-ouest de l'Afrique sont peut-être les plus touchés. La pêche qu'y pratiquent les flottes de l'Union européenne, de la Russie et de l'Asie de l'Est – et les exportations massives de poisson vers l'Union européenne – y ont entraîné une pénurie de poissons locaux et l'augmentation de leur prix, ce qui a rendu le poisson de plus en plus inaccessible aux consommateurs locaux. Au Sénégal, l'un des pays que Christina Hicks et ses collègues ont étudiés, la sardinelle, riche en micronutriments, est un aliment de base depuis des siècles. Un film documentaire de 2016 intitulé *An Ocean Mystery: The Missing*

Ce texte est une traduction de l'article « How the global fish market contributes to human micronutrient deficiencies », publié sur *Nature.com* le 25 septembre 2019

LES MILLE ET UNE VIES DE DANIEL PAULY

C'est en 1971 que Daniel Pauly, alors étudiant en écologie marine à l'Institut océanographique de Kiel, en Allemagne, découvre l'océan. Sa mission : réunir des données sur les pêcheries de la lagune de Sakumo, sur la côte du Ghana. Un jour sur deux, le jeune homme dévore toute la documentation locale disponible. Les autres jours, il arpente à pied la lagune, d'une profondeur moyenne de 50 centimètres. Peu à peu, il visualise toutes les espèces en présence, leurs interactions et le rôle des pêcheries. À l'époque, les pêcheries locales sont artisanales et servent à nourrir

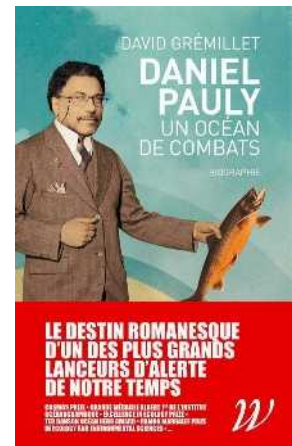
les populations, et, dans son rapport, Daniel Pauly effectue une série de propositions pour les développer.

En 1978, cependant, lors d'une mission d'une autre ampleur aux Philippines, en visitant cette fois à construire une théorie des pêcheries du Sud-Est asiatique, Daniel Pauly découvre un tout autre paysage, dominé par des pêcheries industrielles tournées vers l'exportation, au détriment des populations locales. Situation qu'il ne manque pas de dénoncer à l'époque. Depuis, il n'a cessé de révéler l'impact de la surpêche sur les écosystèmes marins et les populations locales, que ce soit en Asie, en Afrique ou en Amérique du Sud. C'est ainsi qu'en 2016, après une décennie passée à confronter tous les documents possibles pour chaque pays côtier du globe – publications, rapports portuaires, archives coloniales, imagerie satellite des infrastructures de pêche –, son équipe, avec l'aide de nombreux experts locaux,

a obtenu, pour la première fois, une estimation des prises réelles de pêche (quantités et types de poisson) dans le monde de 1950 aux années 2010.

C'est grâce à ces données que Christina Hicks et ses collègues ont pu déterminer quels poissons étaient susceptibles d'apporter quels nutriments aux populations des pays côtiers en développement. Elles ont par ailleurs révélé que les prises globales réelles de pêche étaient bien plus importantes que ne le rapportait la FAO, l'organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (elles ont atteint 130 millions de tonnes en 1996, contre 86 millions de tonnes selon la FAO), et qu'elles déclinaient bien plus vite qu'on ne le pensait non pas grâce à une meilleure réglementation, mais à cause d'un appauvrissement des ressources...

Et ce n'est qu'un petit aperçu du combat que Daniel Pauly mène depuis toujours, comme le montre David Grémillet, océanographe



et directeur de recherche au CNRS, dans son ouvrage *Daniel Pauly, un océan de combat* (Wildproject, 2019). Né en 1946 d'une ouvrière française et d'un GI américain, le biologiste franco-canadien a vécu mille et une vies dès l'enfance que David Grémillet a su capter et transmettre avec une passion communicative.

MARIE-NEIGE CORDONNIER

> *Catch* montre comment des femmes sénégalaises fument les sardinelles, les sèchent et les transforment à la main, avant que ces poissons soient transportés par camion vers l'intérieur du pays, où ils sont la source principale, abordable de micronutriments et de protéines animales. Le chef des travailleurs interviewés dans ce film explique que ce serait une catastrophe si l'approvisionnement en sardinelles était interrompu.

SOUS L'EMPRISE CHINOISE

Depuis, cette catastrophe redoutée a commencé à se produire. À la grande consternation des populations locales, plus de 40 usines industrielles de transformation de poissons ont été construites, principalement par des entreprises chinoises, le long de la côte du Sénégal et dans les pays voisins. Ces usines transforment la sardinelle et d'autres petits poissons en farine de poisson, un produit pour l'alimentation animale. De nombreuses pêcheries, qui fournissaient traditionnellement les marchés régionaux en sardinelles destinées à la consommation locale, approvisionnent désormais des usines de farine de poisson. Celles-ci exportent leurs produits principalement vers la Chine, le plus grand importateur mondial de farine de

poisson, où elle sert à nourrir les poissons d'élevage.

Les consommateurs avisés font souvent attention à manger du poisson « pêché de façon durable ». Ce qualificatif un peu flou recouvre l'idée que ces poissons ont souffert le moins possible et que leurs stocks sont gérés de façon à assurer le maintien des populations. Si ces poissons proviennent d'élevages piscicoles, comme c'est le cas pour la plupart des saumons commercialisés, on considère aussi que c'est une bonne chose, car on pense en général que l'aquaculture réduit la pression sur les populations sauvages. Toutefois, l'exploitation de la sardinelle pour la fabrication de farine de poisson ne réduit pas la pression sur les poissons sauvages. En outre, elle prive les populations des pays en développement de poissons locaux auparavant abordables, et ce pour favoriser la production de poissons d'élevage coûteux, principalement consommés dans les pays riches.

Lorsque nous réfléchissons au poisson que nous devrions manger, puisque le poisson est bon pour nous, il est temps que nous définissions ce que recouvre ce « nous ». Le travail de Christina Hicks et de ses collègues montre une voie possible pour prévenir les maladies dues aux carences alimentaires : mettre en regard les problèmes de disponibilité du poisson. ■

BIBLIOGRAPHIE

- C. C. Hicks et al., *Harvesting global fisheries to tackle micronutrient deficiencies*, *Nature*, vol. 574, pp. 95-98, 3 octobre 2019.
- D. Grémillet, *Daniel Pauly, un océan de combats*, Wildproject, 2019.
- D. Pauly et D. Zeller, *Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining*, *Nat. Commun.*, vol. 7, article 10244, 2016.

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les Théma sont une collection de hors-séries numériques.

Chaque numero contient une selection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection Théma découvrez aussi



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

L'ESSENTIEL

des ondes gravitationnelles, grâce à trois observatoires, révolutionne l'étude des trous noirs et des étoiles à neutrons.

Un quatrième observatoire japonais, au Japon, devrait entrer en fonction l'été à la fin avril 2020.

Il sera le premier observatoire de ce type à être installé

sous terre et maintenu à une basse température. Certaines des techniques mises en œuvre seront réutilisées pour la génération suivante d'observatoires.

L'AUTEUR



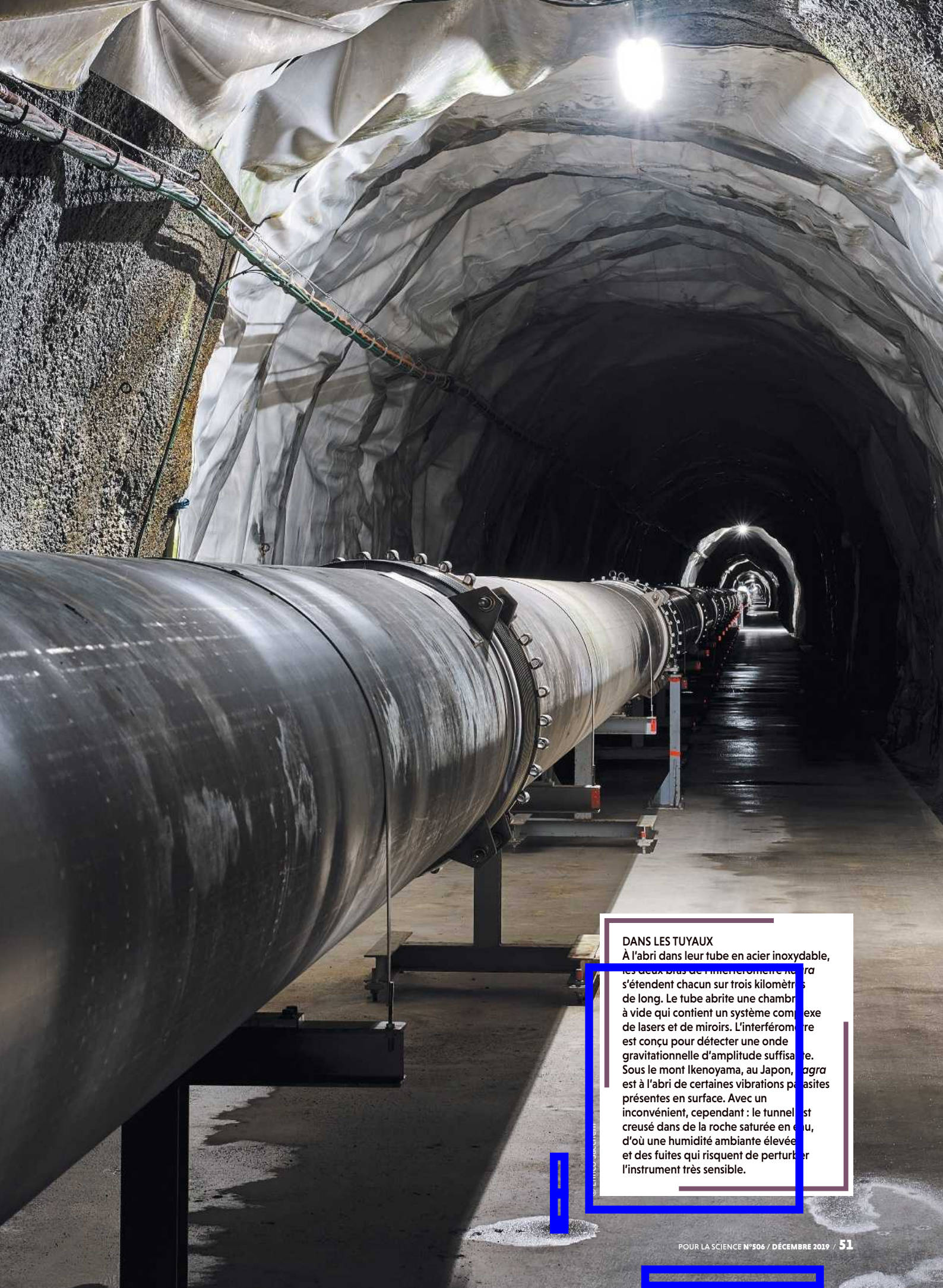
LEE BILLINGS
rédacteur senior à
Scientific American pour
la physique et le spatial

Kagra, l'éveil du géant sous la montagne

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

Les ondes gravitationnelles – ces vibrations de l'espace-temps produites par une coalescence de trous noirs, une collision d'étoiles à neutrons, une explosion de supernova, etc. – ont déclenché une révolution dans le domaine de la recherche en astrophysique. Observées pour la première fois en 2015, un siècle après avoir été prédites par Albert Einstein, ces discrètes ondulations ont déjà révélé de nombreux détails sur les objets exotiques qui les produisent. Par exemple, l'étude des ondes gravitationnelles a fourni la première preuve directe de l'existence des trous noirs, a conduit à une nouvelle estimation de la vitesse d'expansion de l'Univers et a montré que les étoiles à neutrons sont la source principale de l'or, du platine et de divers autres éléments lourds dans l'Univers.

Grâce à ces vibrations de l'espace-temps, les chercheurs espèrent un jour sonder les premiers instants après le Big Bang d'une façon tout à fait unique. Mais avant d'atteindre un tel objectif, la prochaine étape dans la traque des ondes gravitationnelles se cache dans les tunnels sombres d'un complexe souterrain, à plus de 200 mètres sous le mont Ikenoyama dans la préfecture de Gifu, au centre du Japon. Une équipe internationale de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens met actuellement la dernière main à un projet qui a démarré il y a près de dix ans: le détecteur d'ondes gravitationnelles de >



DANS LES TUYAUX

À l'abri dans leur tube en acier inoxydable, les deux bras de l'interféromètre se s'étendent chacun sur trois kilomètres de long. Le tube abrite une chambre à vide qui contient un système complexe de lasers et de miroirs. L'interféromètre est conçu pour détecter une onde gravitationnelle d'amplitude suffisante. Sous le mont Ikenoyama, au Japon, l'observatoire est à l'abri de certaines vibrations parasites présentes en surface. Avec un inconvénient, cependant : le tunnel est creusé dans de la roche saturée en eau, d'où une humidité ambiante élevée et des fuites qui risquent de perturber l'instrument très sensible.

> Kamioka (*Kagra*). Celui-ci devrait bientôt entrer en fonction. L'objectif est de rejoindre les trois autres observatoires déjà opérationnels dans le monde – les deux détecteurs jumeaux d'*Advanced Ligo*, à Hanford, dans l'État de Washington, et à Livingston, dans l'État de Louisiane, aux États-Unis, et *Advanced Virgo*, près de Pise, en Italie – et qui seront dans une phase d'acquisition de données entre la fin de l'année 2019 et avril 2020.

Quand une onde gravitationnelle atteint la Terre, la position et l'orientation des détecteurs sont cruciales pour en tirer un maximum d'information. Ainsi, grâce à sa situation géographique, au Japon, mais aussi à son orientation relative à celle de *Ligo* et *Virgo*, *Kagra* réalisera des mesures indépendantes et complémentaires des autres observatoires. En combinant les données de tous les instruments, il sera possible d'améliorer l'efficacité de détection et la sensibilité globale de l'ensemble des détecteurs.

UN QUATRIÈME DÉTECTEUR À L'ÉCOLE DU COSMOS

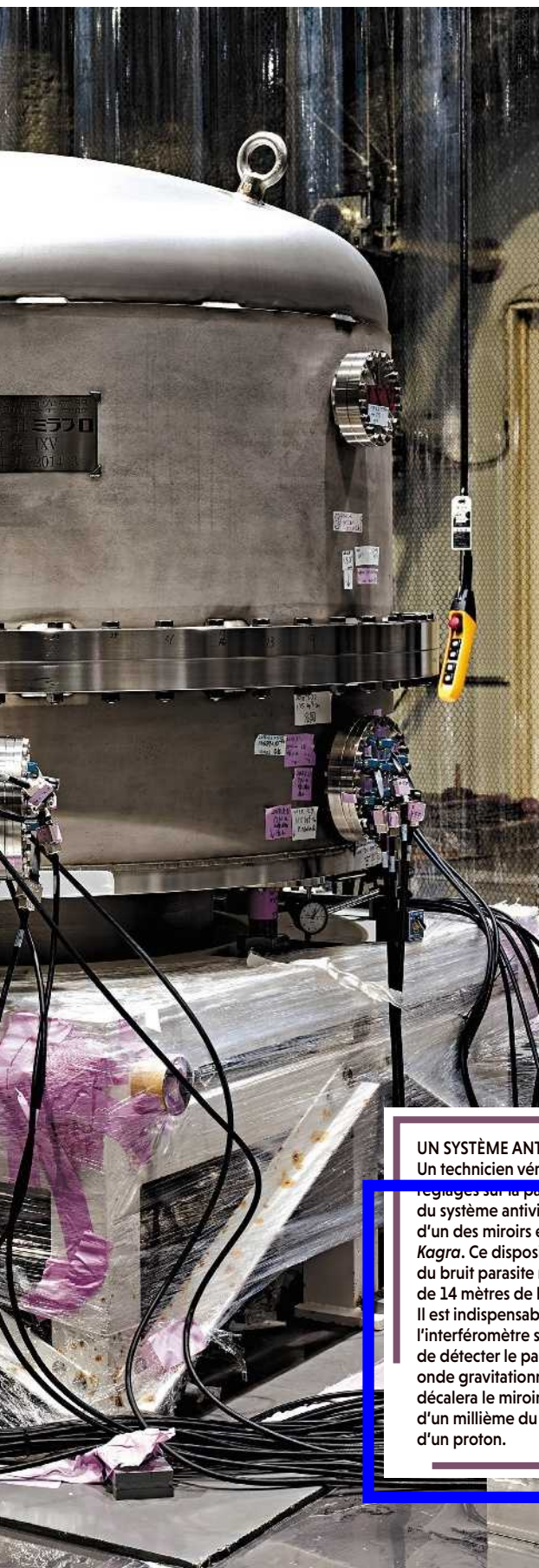
Ce quatrième détecteur sera en mesure d'observer des signaux d'ondes gravitationnelles plus faibles. Il sera aussi capable d'indiquer la position dans le ciel de la source des signaux avec une précision assez grande pour transmettre les coordonnées aux télescopes classiques, qui pointeront dans la bonne direction pour recueillir les éventuelles émissions électromagnétiques de ces événements (en particulier dans les coalescences impliquant des étoiles à neutrons). En combinant les mesures de tous les interféromètres, les chercheurs estimeront aussi avec une plus grande fiabilité l'orientation du système binaire lors de la coalescence et l'axe de rotation des trous noirs ou des étoiles à neutrons, des informations cruciales pour calculer les caractéristiques du système binaire.

Pour détecter les vibrations de l'espace-temps, *Kagra* utilise la même technique que *Ligo* et *Virgo*: l'interférométrie laser. Dans cette approche, un faisceau laser est réfléchi par des miroirs suspendus aux extrémités de deux chambres à vide en forme de longs tuyaux. Ces chambres mesurent plusieurs kilomètres de longueur et sont orientées perpendiculairement pour former un L géant. Le laser mesure en continu et de façon très précise la distance entre les miroirs. Or quand une onde gravitationnelle traverse le dispositif, elle comprime et étire l'espace-temps, faisant ainsi varier alternativement la taille des bras de l'interféromètre.

L'interféromètre est sensible à ces altérations, qui sont infinitésimales – plus petites que la taille d'un proton. Mais pour atteindre une telle précision, il est indispensable



© Enrico Sacchetti



UN SYSTÈME ANTIVIBRATIONS
Un technicien vérifie les derniers réglages sans la partie supérieure du système antivibrations d'un des miroirs en saphir de Kagra. Ce dispositif d'isolation du bruit parasite mesure près de 14 mètres de hauteur. Il est indispensable pour que l'interféromètre soit en mesure de détecter le passage d'une onde gravitationnelle : celle-ci décalerait le miroir de moins d'un millième du diamètre d'un proton.

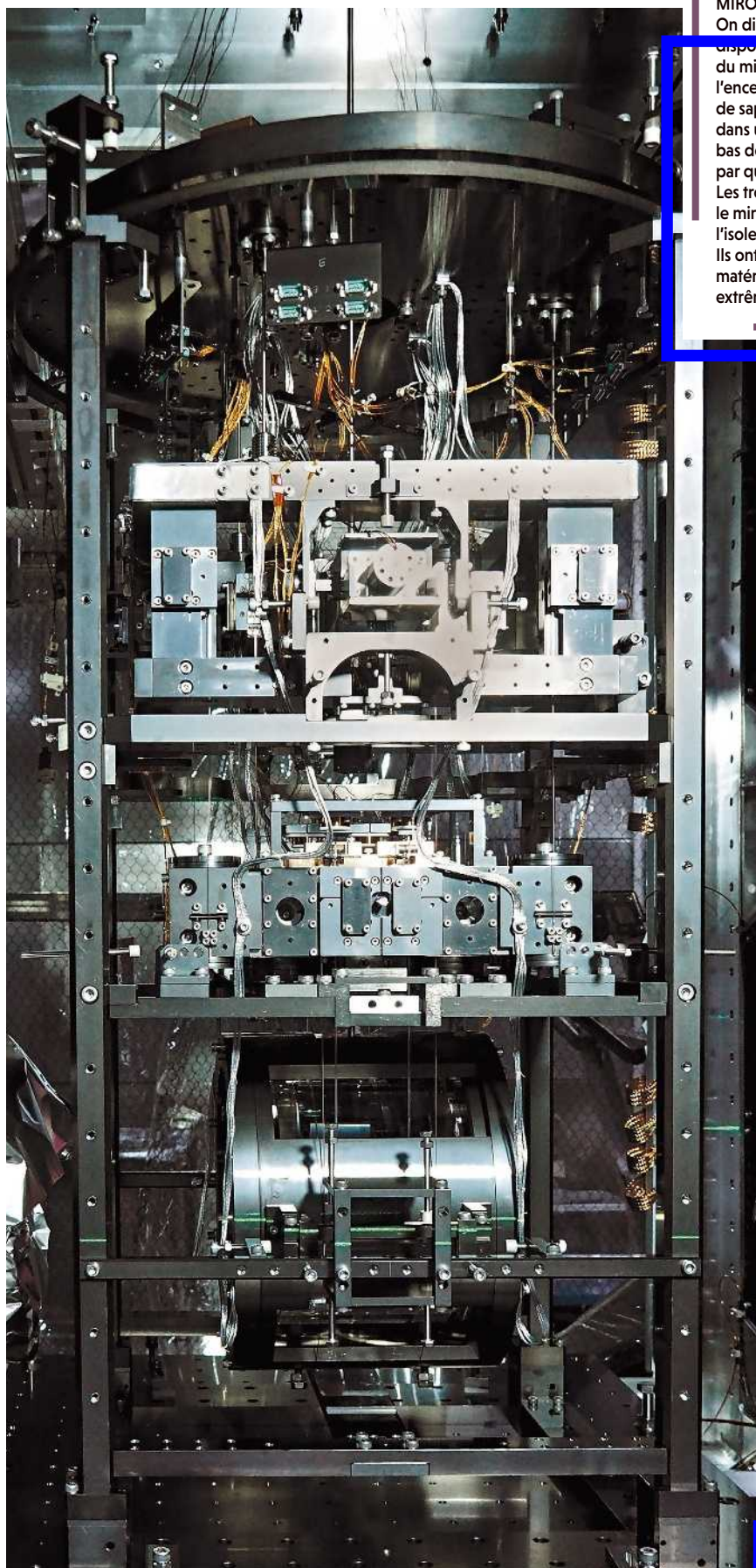
d'éliminer toute autre perturbation: les mouvements sismiques du sol, ceux produits par le ressac sur la côte, les vibrations de la circulation routière et de la nature environnante, et même l'agitation des atomes à la surface des miroirs du dispositif. Distinguer un authentique signal dû au passage d'une onde gravitationnelle de tout autre bruit est un défi immense. Mais grâce à des améliorations techniques constantes, *Ligo* et *Virgo* ont réussi à détecter plus d'une dizaine d'événements parmi un bruit de fond permanent.

UN INTERFÉROMÈTRE GÉANT, ENTièrement SOUTERRAIN ET À REFOUDDISSEMENT CRYOGÉNIQUE

L'expérience *Kagra* se distingue des autres observatoires par deux aspects majeurs. *Kagra* sera le premier interféromètre laser géant à opérer entièrement en sous-sol, à l'abri de la cacophonie du bruit de fond se propageant à la surface de la Terre. Cette expérience est aussi la première à utiliser un système de refroidissement cryogénique pour les miroirs, dont chacun est constitué d'un cristal de saphir poli de 23 kilogrammes. Cette technique devrait réduire considérablement l'agitation thermique des atomes des miroirs et ainsi augmenter la sensibilité de l'instrument. Ainsi, alors que les miroirs de *Virgo* et *Ligo* sont maintenus à température ambiante, ceux de *Kagra* seront plongés à une température de -253°C (20 kelvins).

En principe, avec ces deux atouts, *Kagra* devrait être en mesure de détecter des sources d'ondes gravitationnelles bien plus faibles que les autres interféromètres. Mais ces avancées ont aussi des inconvénients. Le dispositif de refroidissement maintient les miroirs à basse température, mais ses propres vibrations introduisent un bruit de fond supplémentaire dans les mesures. Les infiltrations d'eau de pluie ou de fonte de neige s'invitent régulièrement dans les tunnels de *Kagra*, ce qui oblige les équipes à installer des bâches en plastique afin de protéger les équipements sensibles. Et malgré ces précautions, l'humidité ambiante obligera peut-être les équipes à interrompre les mesures pendant les saisons pluvieuses.

Mais si tout se déroule comme prévu, *Kagra* contribuera aux futures grandes découvertes dans le domaine des ondes gravitationnelles. Et l'expérience démontrera l'efficacité des techniques qui seront certainement utilisées dans la génération suivante d'observatoires à travers le monde. Pour découvrir ce nouvel observatoire hors du commun, nous vous présentons ici quelques photographies des derniers préparatifs avant que *Kagra* se lance dans la traque aux ondes gravitationnelles. ■



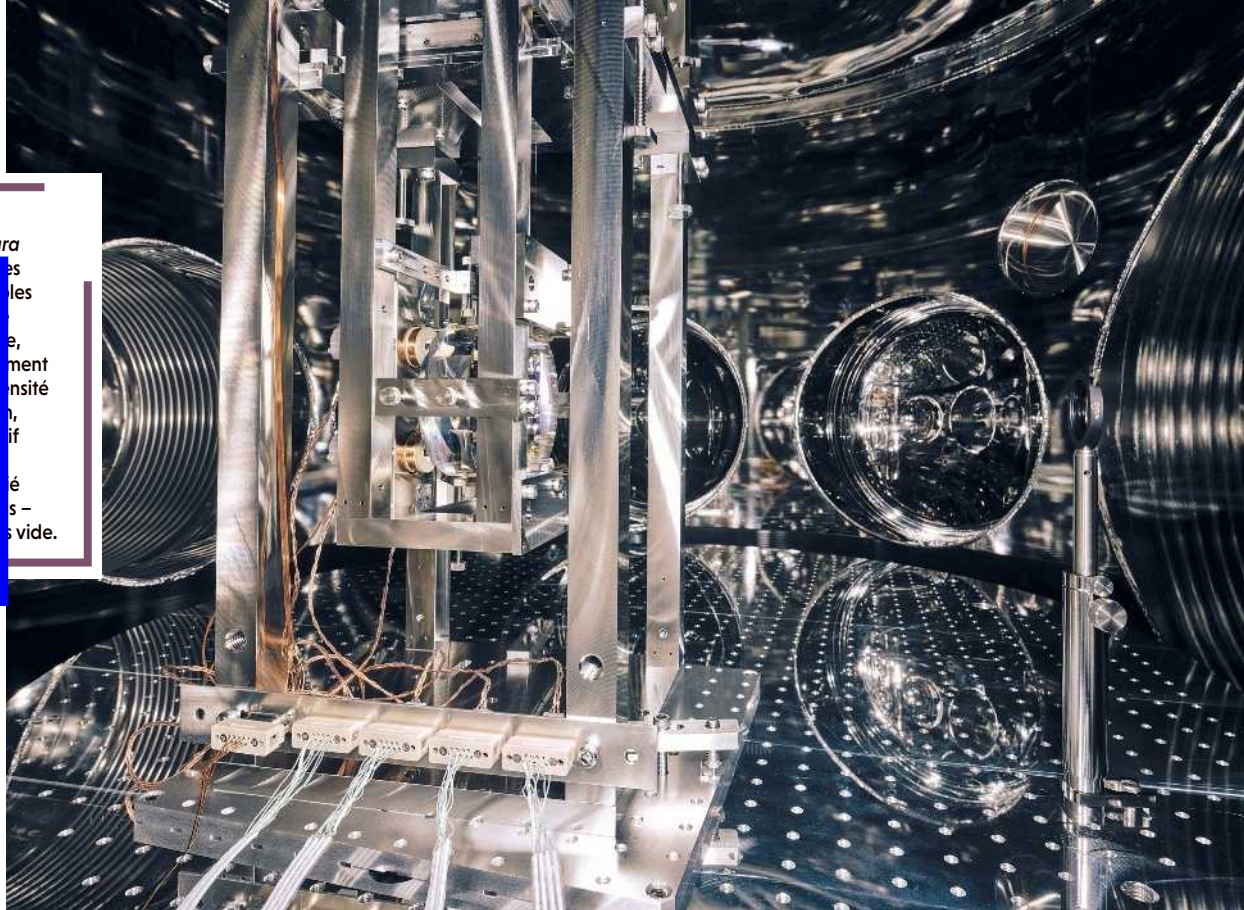
MIROIR, MON BEAU MIROIR
On distingue ici une partie du dispositif complexe de suspension du miroir avant son installation dans l'enceinte cryogénique. Le miroir de saphir, vu de côté, est maintenu dans une enceinte cylindrique en bas de l'assemblage. Il est suspendu par quatre fils, également en saphir. Les trois étages qui surmontent le miroir ont été conçus pour l'isoler des mouvements sismiques. Ils ont été construits dans des matériaux qui résisteront au froid extrême de l'enceinte cryogénique.

MAINTIEN AU FROID
Un technicien vérifie le miroir et son système de suspension avant de l'installer dans l'enceinte cryogénique. Lorsque l'ensemble sera isolé, le miroir sera refroidi à une température proche du zéro absolu. L'objectif est de limiter l'agitation thermique des atomes de la surface du miroir, qui altère les mesures de l'interféromètre.



UN FAISCEAU ÉTROIT
Pour que les lasers de *Kagra* enregistrent précisément les déplacements imperceptibles des miroirs lors du passage d'une onde gravitationnelle, il faut contrôler le plus finement possible la position et l'intensité du faisceau laser. À cette fin, le laser traverse un dispositif similaire à un télescope (ci-contre), lui-même associé à un dispositif antivibratoire – l'ensemble étant placé sous vide.

© Enrico Sacchetti



BIBLIOGRAPHIE

Collaboration *Kagra*,
Interferometric gravitational wave detector, *Nature Astronomy*, vol. 3, pp. 35-40, 2019.

B. Mours (entretien avec),
Avec les ondes gravitationnelles, nous verrons l'Univers comme nous ne l'avons jamais vu », *Pour la Science*, n° 462, avril 2016.

B. P. Abbott et al.,
Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116(6), article 061102, 2016.

D. Buskulic et L. Villain,
La réception des ondes gravitationnelles, *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

L'ESSENTIEL

En 1991, on s'est aperçu que les gènes pouvaient passer d'une bactérie à une autre, sans que l'une descende de l'autre.

> Vers les années 2000, ce phénomène, nommé transfert horizontal, des biologistes ont vu un sérieux obstacle

à la construction de l'arbre du vivant.

> Pourtant, le transfert horizontal se révèle un outil précieux pour préciser cet arbre et le dater.

LES AUTEURS



ÉRIC TANNIER
chercheur

de l'INRAE, UMR 1213
Rhône-Alpes
à Villeurbanne



BASTIEN BOUSSAU
chercheur du CNRS

au laboratoire de
biométrie et
biologie évolutive,
université de Lyon



VINCENT DAUBIN
directeur de

recherche au CNRS
dans le même
laboratoire



Quand les branches de l'arbre du vivant s'entremêlent

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...

« **D**arwin was wrong » – « Darwin avait tort » – Tels sont les mots que l'on a pu lire le 21 janvier 2009 en couverture du magazine britannique *New Scientist*, accompagnés d'un sous-titre catégorique : « Cutting down the tree of life » – « Abattre l'arbre du vivant ». En cause, le transfert horizontal de gènes, c'est-à-dire la capacité des organismes vivants d'assimiler de l'information génétique d'autres individus que leurs parents.

Découvert dans les années 1920, ce phénomène a depuis bouleversé la biologie de multiples façons. On s'est aperçu qu'il permet à des microorganismes de s'adapter à de nouveaux environnements, par exemple en leur fournissant des gènes de résistance aux antibiotiques ou la capacité de vivre à très haute température. Les biologistes ont aussi appris à le manipuler, ce qui leur a ouvert la possibilité de modifier des organismes vivants à leur guise. Surtout, il remet radicalement en cause le modèle de descendance avec modification proposé par Charles Darwin en 1859 dans *L'Origine des espèces*, où le naturaliste britannique pose

la métaphore de l'arbre du vivant, traçant les liens généalogiques entre les espèces.

Ces vingt dernières années, l'idée s'est propagée d'une incompatibilité entre l'existence du transfert horizontal et l'entreprise de construction de cet arbre du vivant – d'où le titre provocateur de *New Scientist*. Pourtant, aujourd'hui, nous découvrons qu'au contraire le transfert horizontal apporte à cet arbre une précision et une ampleur que la seule hérédité verticale ne permettait pas. À condition toutefois, de disposer de méthodes capables de lui donner sa juste place...

ÉVOLUTION ET HÉRÉDITÉ. UN MARIAGE DIFFICILE

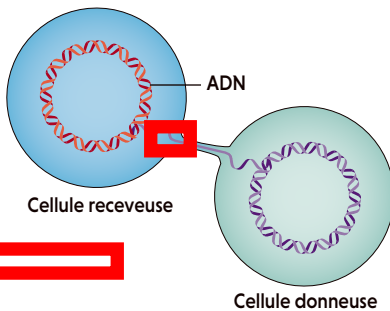
L'évolution et l'hérédité sont aujourd'hui si étroitement imbriquées dans leur étude et dans leur enseignement, qu'on oublie facilement que leur association n'a pas toujours été évidente. Dans *L'Origine des espèces*, Darwin avait proposé un mécanisme d'évolution des organismes vivants par la sélection naturelle, c'est-à-dire la propagation, au fil des générations d'une population, de traits favorables à la reproduction. Mais durant des décennies, l'arbre du vivant de Darwin jusqu'au début du xx^e siècle,

L'arbre du vivant ressemble plus à un buisson aux innombrables ramifications, comme l'illustre cette sculpture au cœur de l'exposition permanente « Espèces, la maille du vivant », du musée des Confluences, à Lyon. Un buisson dont les branches auraient parfois des connexions, sous la forme de transferts de gènes...

LES MÉCANISMES DE TRANSFERT HORIZONTAL

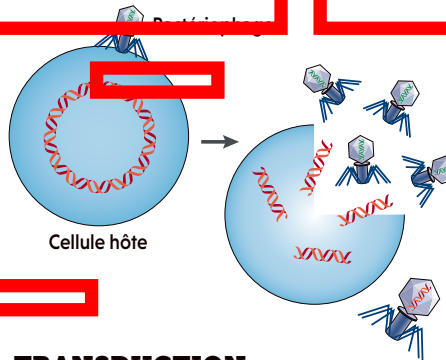
Le transfert horizontal de gènes, c'est-à-dire le passage de matériel génétique entre organismes non apparentés, se produit de multiples façons, principalement chez les microorganismes, mais aussi chez les animaux et les plantes. Les trois mécanismes les plus connus chez les microorganismes sont la conjugaison, la transduction et la transformation (voir les figures ci-dessous). Mais d'autres systèmes favorisent le transfert de gènes, comme la fusion de deux organismes, l'introgession (voir ci-dessous) ou la symbiose, c'est-à-dire l'association durable de plusieurs

organismes jusqu'à, parfois, n'en former qu'un. Chez les organismes multicellulaires, on a repéré plusieurs cas de transfert de gènes. Les herbes du genre *Alloteropsis*, par exemple, ont acquis à plusieurs reprises, durant les 10 derniers millions d'années, des gènes d'autres herbes qui ont modifié leur photosynthèse. Un transfert de gène est aussi responsable de la présence sporadique d'une protéine antigène chez le hareng, l'éperlan et le corbeau de mer, et a permis à ces poissons de s'adapter à la vie en eau glacée. Néanmoins, les mécanismes à l'origine de ces transferts sont beaucoup moins clairs.



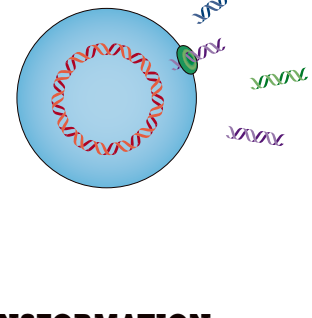
CONJUGAISON

Ce mécanisme est propre aux bactéries et à certains eucaryotes unicellulaires. Chez les bactéries, une cellule donneuse établit un contact avec une cellule receveuse à l'aide d'une excroissance nommée le « pilus », perce sa membrane et transfère du matériel génétique dans cette dernière. Une variante est la fusion cellulaire, où deux cellules établissent un contact et forment un pont entre elles, qui leur permet d'échanger du matériel génétique de façon bidirectionnelle.



TRANSDUCTION

Des virus – des bactériophages chez les bactéries – sont responsables de ce phénomène. Ces virus infectent les cellules en injectant leur matériel génétique (en bleu), ce qui conduit les cellules infectées à produire de nouvelles particules virales. Il arrive alors que certaines particules transportent de l'ADN de l'hôte (en rouge) au lieu de l'ADN viral. Parfois même, les particules virales ne reconnaissent plus leur propre ADN et ne deviennent plus que des agents de transfert de gènes d'hôte en hôte.

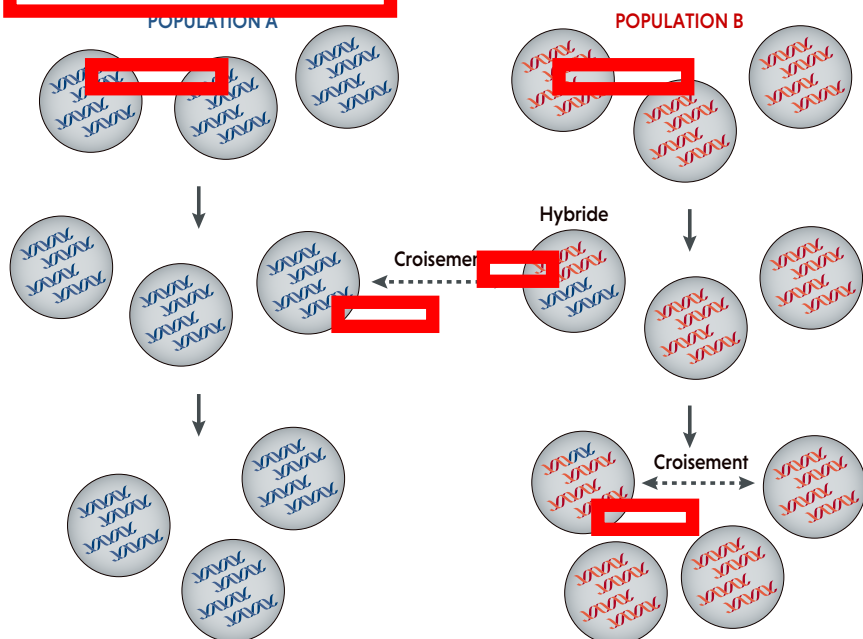


TRANSFORMATION

Rencontrée elle aussi chez les bactéries, la transformation est le premier mécanisme de transfert de gènes observé, celui que le biologiste britannique Frederick Griffith a découvert en 1928. Une bactérie ou une archee récupère de l'ADN présent dans l'environnement et l'intègre dans son génome.

INTROGRESSION

L'introgession se produit parfois à la suite d'une hybridation – le croisement de deux organismes d'espèces différentes (les populations A et B ci-contre). Cette hybridation conduit à un descendant « hybride », portant de l'ADN des deux populations. Si l'hybride se croise avec l'une des deux populations mères (ici la population B), il arrive que seul un petit bout du génome de l'autre population reste dans sa descendance. Ce mécanisme est fréquent chez les plantes, mais il pourrait aussi avoir joué un rôle dans le développement du cerveau humain : en 2006, une équipe de l'université de Chicago a proposé que le gène *microcephalin*, qui régule la taille du cerveau durant le développement, serait issu d'une introgession survenue entre *Homo sapiens* et une population humaine ancestrale, peut-être *H. neanderthalensis*...



> aucun mécanisme connu de l'hérédité ne semblait compatible avec une telle idée. Darwin lui-même paraissait enlisé dans cette contradiction. Il avait tendance, à la fin de sa vie, à relativiser l'importance du mécanisme de la sélection naturelle, qu'il avait inventé.

Aucune théorie de l'hérédité ne s'accordait à celle de l'évolution

Les théories de l'hérédité se sont succédées, et aucune ne s'accordait avec la théorie de l'évolution. L'hérédité de «mélange», où les caractères se fondent lors de la reproduction, ne laissait aucune prise solide à la sélection. Pas plus que la «pangenèse», une théorie construite par Darwin, qui privilégiait l'hérédité des caractères acquis (différentes parties de l'organisme auraient contribué à la formation de «gemmules», lesquelles auraient été les points de départ du développement de l'embryon).

La génétique mendélienne naissante ne semblait pas plus prometteuse: les mutations étaient vues comme des changements mineurs, contredisant l'idée d'une évolution par sélection progressive de petites variations. On parle parfois d'«éclipse du darwinisme» pour désigner ce tournant du ^{xx}e siècle où les théoriciens de l'évolution et ceux de l'hérédité ont travaillé parallèlement, incapables de produire une théorie commune. Ce n'est que dans la première moitié du ^{xx}e siècle que la «synthèse néodarwinienne» a accompli la réconciliation en posant les bases de la génétique des populations, l'étude de la dynamique des variations génétiques au sein d'une population.

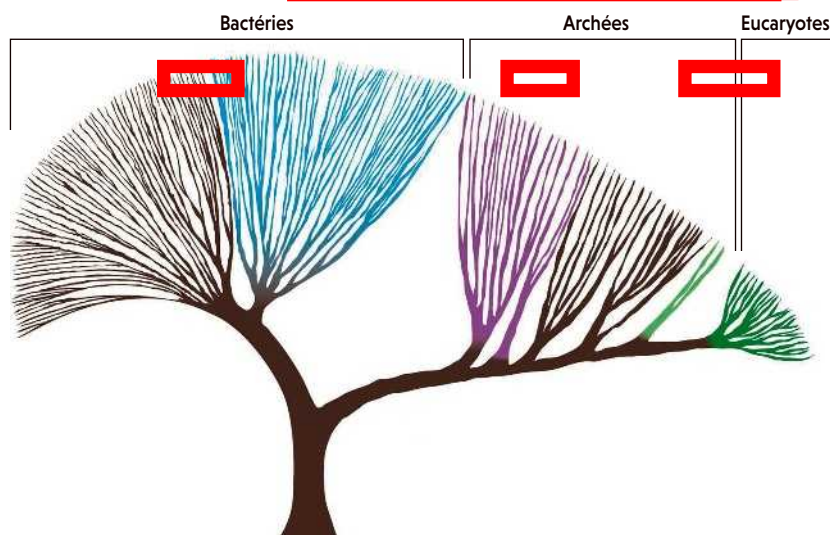
Mais, alors même que les architectes de la synthèse travaillaient à l'intégration de l'évolution et l'hérédité dans une même théorie, d'autres germes de discorde étaient en train de naître. Sans mesurer encore son importance pour l'évolution, le biologiste britannique Frederick Griffith découvrait en 1928 la «transformation». Ce mécanisme de l'hérédité semblait échapper au schéma de la descendance avec modification, sur lequel se fonde la génétique des populations. Dans son expérience, Griffith a administré à des souris deux souches de bactéries de l'espèce *Streptococcus pneumoniae*, sous différentes conditions. Une souche, virulente, provoquait une pneumonie mortelle; l'autre non. S'il tuait par la chaleur les bactéries

de la souche virulente avant de les injecter, les souris survivaient: preuve que seules les bactéries virulentes vivantes étaient capables de les tuer. Mais s'il injectait aux souris une mixture contenant des bactéries virulentes mortes et des bactéries non virulentes vivantes, alors les souris développaient la pneumonie mortelle. En d'autres termes, à partir des débris de bactéries virulentes, les bactéries inoffensives avaient récupéré un élément qui leur avait conféré, de manière permanente, la virulence.

La nature de cet élément, que Griffith nomma «principe transformant», fut découverte en 1944 lors d'une autre expérience fondatrice qui a révélé l'importance de l'ADN dans l'hérédité. À cette époque, l'ADN était déjà bien connu, mais sa constitution (une succession de quatre petites molécules – des «nucléotides» notés A, T, G et C), paraissait beaucoup trop simple pour qu'il joue un rôle dans l'hérédité. On pensait qu'il contribuait à l'architecture des chromosomes, visibles au microscope. Le biologiste américain Oswald Avery et ses collaborateurs ont montré qu'une enzyme qui dégrade l'ADN, ajoutée à l'expérience de Griffith, empêche les bactéries d'acquiescer la virulence. Ce faisant, ils ont défini l'ADN comme le facteur principal de l'hérédité.

L'ADN. LIVRE DE RECETTES OU DOCUMENT HISTORIQUE?

Ainsi, le rôle de l'ADN, qui est de transmettre «verticalement» l'information génétique de parents à enfants, a été mis en évidence par une expérience qui utilise la transformation, c'est-à-dire sa transmission >



L'arbre du vivant reconstruit par la phylogénie moléculaire ne cesse de changer notre vision de la biodiversité. Aux extrémités des branches se trouvent les espèces actuelles. Les branches symbolisent les lignées d'espèces ancestrales. Les nœuds représentent des événements de diversification à partir d'un ancêtre commun. Les organismes multicellulaires visibles à l'œil nu par les humains (plantes, animaux) représentent une petite partie de la diversité des eucaryotes. Le point de départ de cet arbre est incertain, car il n'existe pas d'espèce externe permettant de le déterminer.

> « horizontale », entre organismes sans lien d'ascendance (voir l'encadré page 58). On pourrait y voir juste un paradoxe amusant, mais cela révèle deux facettes d'une pièce, par définition difficiles à voir simultanément. Comme au XIX^e siècle avec l'hérédité et l'évolution, deux domaines scientifiques distincts se sont développés à partir de ces deux facettes. L'un, la biologie moléculaire, est construit sur l'utilisation en laboratoire des mécanismes naturels de transfert horizontal. L'autre, l'évolution moléculaire, s'appuie sur l'hypothèse de la stricte transmission verticale de l'ADN pour construire l'histoire évolutive des organismes et des espèces. Le premier implique les mécanismes de l'hérédité, l'autre les mécanismes de l'évolution.

D'un côté de la pièce, l'ADN est vu comme le livre de recettes permettant la construction et le fonctionnement d'un organisme. Pour le déchiffrer, la possibilité de transfert horizontal est utilisée quotidiennement dans les laboratoires de biologie moléculaire. Chez des organismes aussi divers que bactéries, plantes, levures ou mammifères, il sert à isoler des gènes, tester leurs effets, purifier leurs produits, modifier les génomes, « améliorer » les plantes et animaux d'intérêt agricole. Pour connaître la séquence des protéines ou des gènes, c'est-à-dire l'arrangement en longues suites linéaires de leurs composés (les acides aminés pour les protéines, les nucléotides pour l'ADN). En regardant l'ADN comme un élément fonctionnel, les biologistes ne pouvaient ignorer l'importance de ces mécanismes de transfert horizontal, étant donné leur diversité et la facilité avec laquelle ils pouvaient les manipuler.

Pour les évolutionnistes impliqués dans la construction d'un arbre du vivant, le transfert horizontal était plutôt l'élément à écarter. De ce côté-ci, l'ADN est avant tout ce qui est transmis, avec modifications, de parents à descendants depuis les origines de la vie. C'est un document pour l'histoire. Depuis les années 1960, les biologistes ont accumulé les données et progressivement mis au point des méthodes pour les exploiter.

L'analyse comparative des séquences d'ADN a ainsi transformé notre vision de la diversité et de l'histoire du vivant. On comparait un petit nombre de gènes essentiels supposés exempts de transfert, présents chez l'ensemble des organismes vivants, en attribuant leurs similitudes à des histoires communes et leurs différences à une appartenance à des groupes taxonomiques distincts. On découvrait et organisait ainsi la biodiversité microbienne en grands domaines, certains totalement inconnus jusqu'alors. Le transfert horizontal était l'apanage d'autres parties du génome, qu'il était préférable d'ignorer. À co-

L'arbre du vivant paraissait un concept dépassé, impossible à construire

prix, un arbre du vivant, décrivant l'histoire du monde vivant à travers les relations de parenté entre toutes les espèces connues, prenait forme. Le développement parallèle de ces deux domaines à partir des années 1950, l'un tenant pour négligeables les bases fondamentales de l'autre, a fait ressurgir la tension entre évolution et hérédité sous une autre forme, au tournant du XXI^e siècle.

GLOSSAIRE

SÉLECTION NATURELLE

Propagation des traits favorables à la reproduction dans une population d'organismes vivants. Ce mécanisme importe dans leur évolution explique notamment l'adaptation à l'environnement.

GÉNÉTIQUE DES POPULATIONS

Étude de la dynamique des variations génétiques dans une population d'organismes vivants. Cette discipline a permis de réconcilier la génétique, qui explique l'apparition et la transmission des variations, et la sélection naturelle, qui explique leur propagation dans les populations.

PHYLOGÉNIE

Étymologiquement proche d'« origine des espèces », ce terme désigne l'écriture de l'histoire évolutive du monde vivant à l'aide des relations de parenté entre organismes actuels. Comme pour les arbres généalogiques, ces relations se décrivent sous la forme d'arbres – des objets abstraits représentant la diversification des espèces ou des gènes comme des ramifications. L'arbre du vivant est celui qui décrit les relations entre toutes les espèces vivantes.

UNE SECONDE CRISE DARWINIENNE

En effet, les incompatibilités des présupposés des deux parties ont des conséquences pour chacune d'elles. D'un côté, ignorer l'évolution pour comprendre le fonctionnement des génomes comporte des dangers. Par exemple, en 2003, dans la continuité du projet *Génome humain*, qui avait abouti au séquençage d'un génome humain entier, le projet international *Encode* a entrepris de répertorier l'ensemble des activités biochimiques liées à l'expression du génome humain. Ses résultats, publiés en 2012, ont révélé que 80% du génome était actif, et nombre de personnes en ont déduit un peu vite que 80% de notre génome était fonctionnel. Or avoir une activité biochimique ne signifie pas forcément être fonctionnel, c'est-à-dire avoir un rôle dans le fonctionnement de l'organisme. Au fil de l'évolution, il arrive que des gènes perdent leur fonction mais gardent une activité biochimique, ou que des fragments d'ADN acquièrent une activité biochimique par hasard, sans acquérir de fonction pour autant...

D'un autre côté, les évolutionnistes cherchant à construire l'arbre du vivant ont vu le nombre de gènes exempts de transfert horizontal se réduire à néant au fur et à mesure que les données génétiques de nouvelles espèces devenaient disponibles. C'est ainsi qu'au début des années 2000, la prise de conscience de l'importance du transfert horizontal a presque provoqué une deuxième éclipse de la théorie darwinienne. Comme au siècle précédent, l'incohérence entre les hypothèses sur lesquelles repose la théorie de l'évolution et les

observations venant des mécanismes de l'hérédité a d'abord été vue comme une impasse du paradigme darwinien. L'arbre du vivant paraissait un concept dépassé, et la possibilité de le construire une illusion, puisque les branches de cet arbre se limitaient à l'hérédité verticale et ne capturaient pas toute l'histoire des gènes.

Pourtant, une réconciliation est possible entre le transfert horizontal et l'arbre du vivant. À contre-courant des appels à changer radicalement de paradigme, diverses équipes ont proposé d'intégrer le transfert horizontal dans les études phylogénétiques au lieu de l'écarter. C'est le cas, par exemple, de Peter Gogarten, de l'université du Connecticut, qui a émis cette idée dès le début des années 2000. Mais pour la mettre en œuvre, il a fallu d'abord développer des méthodes capables d'identifier précisément les transferts de gènes. C'est la tâche à laquelle notre équipe d'une petite dizaine de chercheurs et doctorants s'est attelée depuis 2010.

Aujourd'hui, un nombre grandissant d'équipes utilisent ces méthodes pour construire l'histoire évolutive des génomes de bactéries ou d'archées, mais aussi pour comprendre les liens évolutifs entre les organismes complexes et leur microbiote (l'ensemble des microorganismes qui les peuplent). Ce faisant, ces équipes ont révélé la force potentielle du transfert horizontal comme un outil pour la phylogénie, l'étude des relations de parenté entre organismes, plutôt que comme son fossoyeur. Les méthodes se construisent à partir d'un concept inventé dans les années 1970, la «réconciliation phylogénétique» (voir l'encadré ci-contre).

Imaginons qu'il y a quelques millions d'années un organisme, qu'on appellera «organisme receveur», intègre dans son génome, par exemple par transformation, un gène d'un organisme d'une espèce distante, le donneur. Puis imaginons qu'aujourd'hui nous soyons capables de savoir que cet événement évolutif a eu lieu, grâce aux traces qu'il a laissées dans les séquences génomiques actuelles, détectées par les méthodes de réconciliation. Nous avons mis en évidence trois types d'information que ce transfert est susceptible de nous apporter sur l'histoire de la vie.

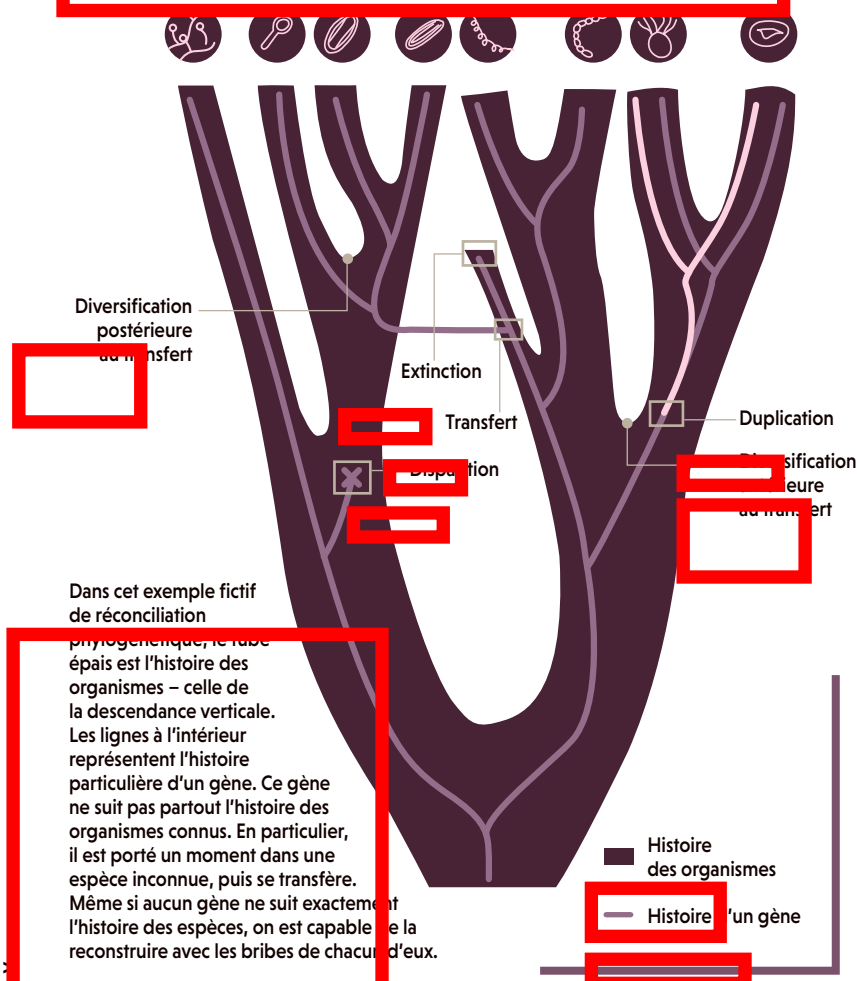
ORIENTER DANS LE TEMPS LE RECONCILIATION

Pour construire l'arbre du vivant, on recherche les caractères partagés entre organismes, lesquels sont donc attribuables à un héritage de leur ancêtre commun. Sur chacune des branches de l'arbre, qui représente une lignée d'espèces ancestrales, on identifie ainsi des changements qui caractérisent ses descendants. Pour les caractères morphologiques, il est souvent possible de connaître les états

LA RÉCONCILIATION PHYLOGÉNÉTIQUE

La réconciliation phylogénétique est une méthode qui permet, entre autres, de reconstituer l'histoire des gènes à partir des traces qu'ils ont laissées sur les séquences d'ADN des organismes actuels. De fait, il est fréquent que différentes portions d'un génome aient des histoires différentes. C'est ce qu'on a révélé les arbres de gènes reconstruits en combinant les séquences des gènes retrouvés dans des génomes. Ils expliquent ces différences. En particulier, au fil de l'évolution, des portions de génomes peuvent être perdues, dupliquées ou transférées entre espèces plus ou moins distantes. En modélisant explicitement les événements comme les disparitions, les duplications, et les transferts de gènes, là où les approches précédentes ne voyaient que du conflit, les méthodes de réconciliation montrent que chaque gène apporte son anecdote sur la grande histoire du génome qui le contient. En quelque sorte, la réconciliation explique comment dessiner l'arbre d'un gène à l'intérieur de l'arbre des espèces, en invoquant quand nécessaire des événements particuliers (voir la figure ci-dessous).

Publiées dans les années 1980, les premières méthodes de réconciliation ne prenaient en compte que les duplications et les disparitions de gènes. Elles ont ensuite été améliorées pour comprendre les relations évolutives entre des espèces symbiotiques, c'est-à-dire pour comparer deux arbres d'espèces vivant en interaction. Peu à peu, ces méthodes sont complexifiées pour prendre en compte la diversité au sein des populations et le transfert horizontal. Aujourd'hui, nous disposons de méthodes probabilistes qui permettent d'estimer le degré d'incertitude associé aux histoires de gènes : on calcule la probabilité qu'un transfert ait eu lieu dans le passé en examinant les scénarios alternatifs et leur vraisemblance, pour se faire une idée de la plausibilité du résultat.



> primitifs (ancestraux) des caractères, ce qui permet d'orienter l'arbre dans le temps. L'aile des oiseaux, par exemple, dérive du membre antérieur des dinosaures. L'avantage de la phylogénie moléculaire, qui examine non pas des traits morphologiques, mais les gènes, est qu'elle permet de comparer l'ADN d'organismes difficilement comparables dans leur morphologie. Son inconvénient, en revanche, est qu'il est en général impossible d'orienter dans le temps les changements survenus au niveau moléculaire. Des quatre nucléotides constituant l'ADN, aucun ne peut être a priori considéré comme primitif ou dérivé. Les phylogénies moléculaires ne sont donc pas naturellement orientées dans le temps et, pour donner un point de départ à l'histoire, on

recourt à des espèces qui doivent être à la fois proches et sans ambiguïté externes au groupe étudié. Deux conditions qui sont parfois difficiles à concilier.

Le transfert horizontal, s'il est modélisé et pris en compte dans les méthodes phylogénétiques, est utilisable comme toute autre mutation de l'ADN pour construire l'arbre. Mais contrairement aux autres mutations, il implique une direction particulière de l'histoire: le receveur est l'ancêtre du groupe d'espèces qui possèdent le gène acquis.

Grâce au transfert, on dispose par conséquent d'une nouvelle source d'information pour orienter les phylogénies, sans faire appel à d'autres données que les génomes dont on veut décrire l'histoire. Nous avons validé cette

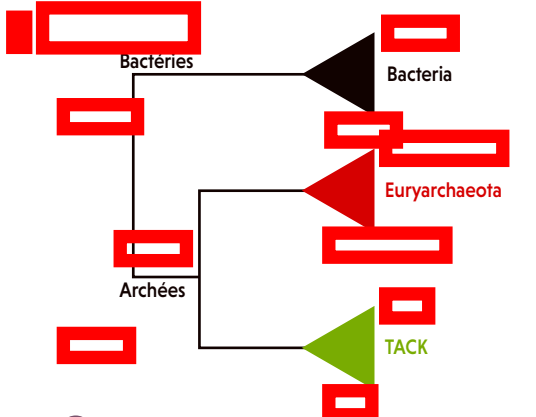
LES ARCHÉES: UN ARBRE MOUVANT

Les archées sont un des trois grands domaines du vivant, aux côtés des bactéries et des eucaryotes (les organismes dont les cellules ont un noyau comme les animaux et les plantes). On prenait ces microorganismes pour des bactéries jusqu'à ce que l'étude des séquences de leur ADN les apparentât plutôt aux eucaryotes. Depuis,

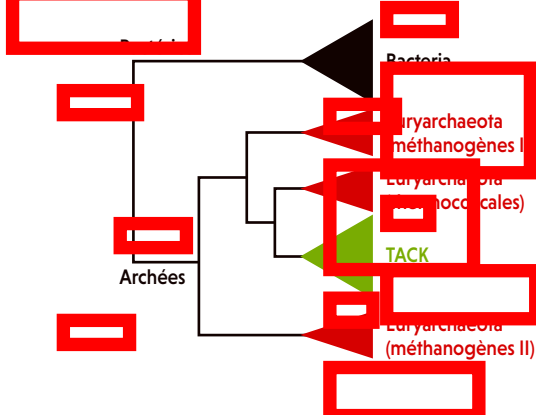
plusieurs équipes ont construit des arbres de parenté des archées, notamment en 2015 (ci-dessous à gauche), mais comme on découvre encore régulièrement de nouvelles sortes d'archées, leur classification évolutive est toujours en construction et ne cesse... d'évoluer. En 2017, une phylogénie

(à droite) prenant en compte le transfert de gènes et deux autres familles d'archées, les DPANN et les archées d'Asgård (les plus proches parentes des eucaryotes dans l'arbre du vivant), a permis de dresser un premier portrait de l'ancêtre des archées: la racine du groupe serait située entre les archées DPANN et les autres.

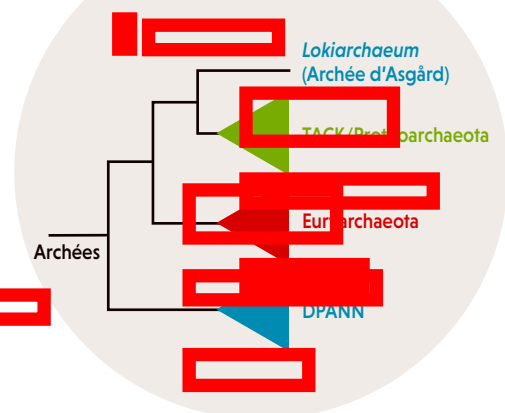
a Arbre 1 de 2015



b Arbre 2 de 2015



c Arbre de 2017



Dans les phylogénies de 2015 (a et b), les biologistes ont construit la racine de l'arbre à l'aide d'éléments hors du groupe: des bactéries.

En comparant les séquences d'ADN de différentes archées et de bactéries, Céline Petitjean, de l'université Paris-Sud, à Orsay, et ses collègues ont abouti à un arbre à deux grandes familles d'archées: les Euryarchaeota et les TACK (a), tandis que Kasie Raymann, à l'institut Pasteur, à Paris, et ses collègues, ont obtenu un arbre où les Euryarchaeota sont scindés (b). Cependant, l'arbre de 2017 de Tom Williams (c), à l'université de Bristol, et ses collègues, construit à l'aide du transfert de gènes, suggère que les Euryarchaeota ne sont pas scindés. Or seules des archées de cette famille produisent du méthane (archées méthanogènes). L'ancêtre de toutes les archées n'était donc pas forcément méthanogène...

nouvelle approche sur la plupart des grandes lignées de bactéries en montrant qu'elle permet de retrouver les mêmes résultats qu'avec les espèces externes. Pour des cas où c'était notoirement difficile, la méthode a permis de proposer une nouvelle manière d'interpréter l'histoire des organismes. C'est le cas notamment pour les archées (le troisième grand domaine du vivant aux côtés des bactéries et des eucaryotes), ce qui a permis à Tom Williams et ses collègues, de l'université de Bristol, au Royaume-Uni, en collaboration avec l'un de nous (Bastien Boussau), de proposer en 2017 que l'ancêtre des archées était anaérobie (voir l'encadré page ci-contre). Nous travaillons actuellement à étendre cette approche à l'arbre du vivant, qui, par définition, contient toutes les espèces connues, ce qui rend impossible l'utilisation d'espèces externes.

DATER L'ARBRE DU VIVANT

Le transfert contient même une information chronologique beaucoup plus précise : l'organisme receveur a nécessairement vécu soit en même temps que le donneur, soit après lui. Habituellement, les informations temporelles sur l'histoire de la vie viennent principalement des fossiles, datés à l'aide des méthodes issues de la géologie. Si besoin, on complète l'étude avec des méthodes d'horloge moléculaire, fondées sur le nombre de mutations dans l'ADN (on suppose que les mutations aléatoires surviennent à une certaine fréquence). Toutefois, cette stratégie a des limites.

Certes, le registre fossile est abondant pour les organismes macroscopiques, comme les animaux et les plantes, mais même en présence d'un fossile daté, relier ce dernier à un groupe particulier de l'arbre du vivant peut se révéler compliqué. La situation est pire pour les organismes microscopiques, car leurs fossiles sont soit inexistants, soit très difficiles à comparer aux organismes actuels sur la base des seules caractéristiques morphologiques. Il est donc souvent impossible de les rattacher à des groupes d'organismes connus.

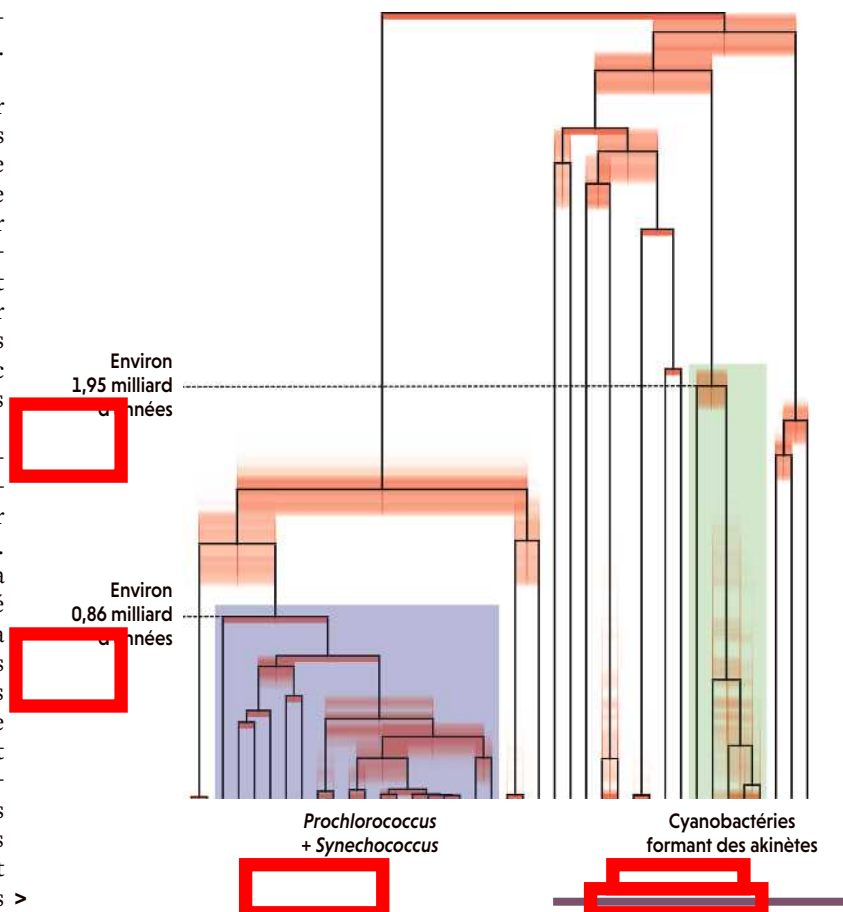
Le transfert, lui, est ubiquitaire, et abondant principalement chez les microbes. Ici, là même chez qui manquent les fossiles pour avoir des informations chronologiques. Chaque transfert repéré est l'équivalent de la découverte d'un fossile, directement placé sur l'arbre du vivant. En 2018, notre équipe a ainsi montré, dans des groupes d'organismes aussi divers que des cyanobactéries, des archées ou des champignons, que le signal de datation associé au transfert est abondant et qu'il permet d'établir une chronologie complète de la diversification des espèces. Les informations temporelles restent relatives (un groupe est plus ancien qu'un autre) et difficiles à ancrer dans une échelle de temps

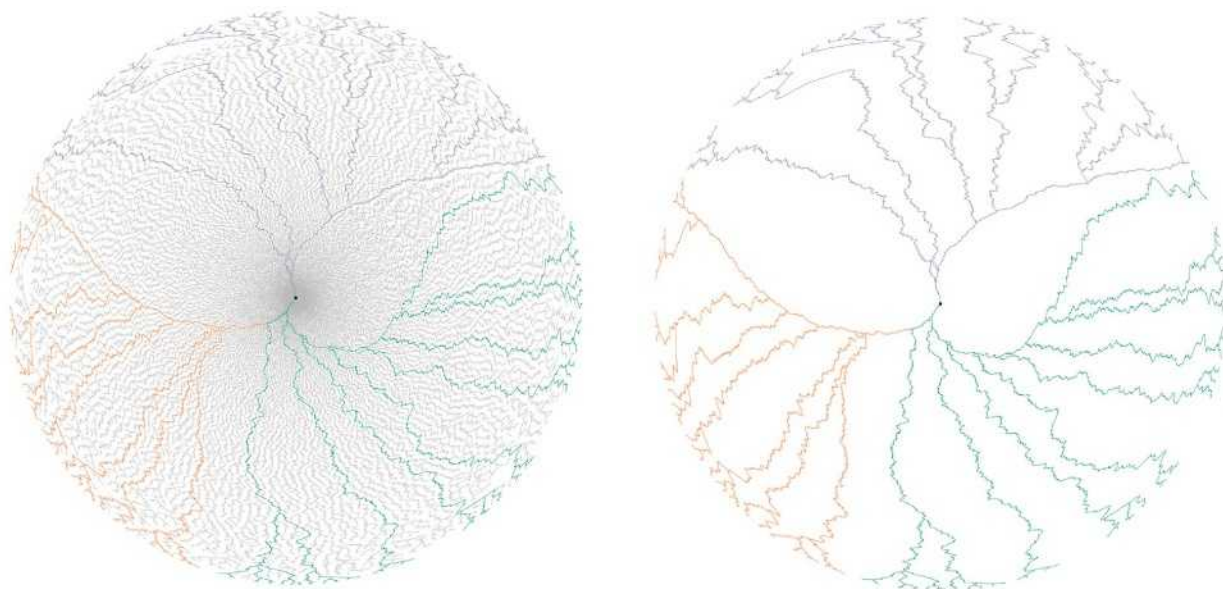
DATER

L'ARBRE DES CYANOBACTÉRIES

Traquer les transferts de gènes au sein d'un groupe d'organismes peut aider à dater les différentes branches de l'arbre du vivant, en particulier par rapport aux autres. En 2018, les auteurs et leurs collègues ont utilisé cette méthode pour étudier la phylogénie des cyanobactéries. À partir de quarante génomes de ces bactéries, ils ont examiné la probabilité de chaque gène de s'être dupliqué, transféré ou d'avoir disparu. Ils ont ainsi abouti à un arbre où les dates relatives de diversification donnent des informations sur

l'histoire des cyanobactéries et leur rôle dans la composition de l'atmosphère terrestre (ci-dessous). Les dégradés de rouge représentent l'incertitude sur l'ordre chronologique des embranchements. Moins le rouge est intense, plus l'incertitude est grande. Le groupe des *Prochlorococcus* et *Synechococcus* (en bleu), l'un des plus abondants aujourd'hui dans les océans, serait ainsi apparu il y a environ 860 millions d'années, soit tardivement par rapport aux autres groupes de cyanobactéries comme celles (en vert) capables de former des cellules dormantes ou akinètes.





Deux visions de l'arbre du vivant obtenues par des simulations, orientées du centre vers les extrémités : à gauche, un arbre qui contiendrait toutes les espèces ayant existé sur Terre ; à droite, la partie que l'on peut construire à partir des espèces actuelles connues, en l'absence de fossiles et de transferts de gènes.

absolu (en millions d'années). Néanmoins, elles sont généralement cohérentes avec des méthodes d'horloge moléculaire.

Chez les cyanobactéries, les nombreux transferts de gènes identifiés suggèrent que le groupe des *Prochlorococcus* et des *Synechococcus*, qui rassemble les organismes les plus abondants à l'heure actuelle dans les océans, responsables d'une part significative de la production d'oxygène par photosynthèse, serait apparu tardivement par rapport aux autres groupes de cyanobactéries (voir l'encadré page 63). Les méthodes d'horloge moléculaire tendaient à leur attribuer une origine ancienne, mais la vitesse d'évolution de ces organismes rend difficile l'utilisation de ces méthodes, ce qui suggère que, dans ce cas, la datation par l'étude des transferts de gènes est plus fiable.

UN HÉRITAGE DES ESPÈCES DISPARUES

L'analogie entre un transfert et un fossile ne s'arrête pas à leur utilisation pour la datation. Ils peuvent tous deux porter une trace des espèces éteintes. Sur la base du registre fossile, on estime à plus de 99% la proportion des espèces ayant vécu sur Terre et qui n'ont pas de descendants aujourd'hui. Quand on fait l'histoire du monde vivant à partir des espèces actuelles, en remontant dans le temps et en suivant la trace de leurs ancêtres, on n'a accès qu'à une infime partie de l'écosystème passé (voir la figure ci-dessus). Sans compter qu'on est loin de connaître toutes les espèces actuelles. Notre seule information sur ces espèces disparues est faite de fossiles.

Si nous connaissons les dinosaures, qui ont peuplé la Terre pendant des millions d'années,

c'est parce qu'ils ont laissé des traces fossiles. Et s'ils ont laissé des traces fossiles, c'est parce

qu'ils sont gros et que leurs tissus se fossilisent bien, comme les os. Des organismes microscopiques, de loin les plus abondants et les uniques occupants de la Terre durant l'essentiel de son histoire, nous n'avons quasiment aucune trace... sauf celle des transferts. En effet, si la détection d'un transfert nécessite que l'organisme receveur ait des descendants actuels, le donneur a toutes les chances de provenir d'une espèce éteinte. L'existence d'un transfert fait qu'elle n'a pas tout à fait disparu : sa contribution aux génomes actuels est une preuve de son existence. En détectant un grand nombre de transferts d'un même donneur inconnu, on pourrait donc déceler une espèce disparue, ou une grande lignée qui aurait eu une importance pour les écosystèmes pendant de longues périodes, et dont on n'a pas d'autre trace. Cette possibilité théorique est connue de la communauté scientifique depuis quelques années, mais personne n'y a encore réussi à la mettre en pratique.

LA PISTE DU MICROBIOTE

On a peut-être crié un peu vite à l'incompatibilité entre l'entreprise phylogénétique et le transfert horizontal. Sans prétendre que la réconciliation que nous proposons ait le plein de la synthèse néodarwinienne, qui avait rassemblé de grands pans de la connaissance pour construire une théorie reliant l'évolution et l'hérédité, nous soutenons que le transfert est, pour la construction des arbres, leur orientation, la datation et la connaissance des espèces éteintes, un allié décisif – un nouveau registre fossile. De fait

BIBLIOGRAPHIE

A. A. Davin et al., *Gene transfers blur the tree of life*, *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 2, pp. 904-909, 2018.

T. A. Williams et al., *Integrative modeling of gene and genome evolution roots the archaeal tree of life*, *PNAS*, vol. 114(23), pp. 4602-4611, 2017.

H. Le Guyader, « L'arbre du vivant caduque et torét », *Pour la Science*, n° 460, pp. 26-30, 2016.

S. M. Soucy et al., *Horizontal gene transfer : building the web of life*, *Nat. Rev. Genet.*, vol. 16, pp. 472-482, 2015.

G. J. Szöllösi et al., *Lateral gene transfer from the dead*, *Syst. Biol.*, vol. 62(3), pp. 386-397, 2013.

L. Duret et S. Charlat, *Éloge de l'arbre peuplé*, Dossier *Pour la Science*, n° 461, pp. 10-17, 2013.

S. S. Abby et al., *Lateral gene transfer as a support for the tree of life*, *PNAS*, vol. 109(13), pp. 4962-4967, 2012.

la réconciliation entre transfert horizontal et évolution ne vise pas seulement à les faire cohabiter, mais à les faire s'enrichir l'un l'autre. Loin d'oblitérer la possibilité de construire une histoire du vivant en utilisant la phylogénie, le transfert horizontal lui apporte précisément ce qui lui manquait.

Beaucoup de possibilités issues de ces données restent à exploiter. Par exemple, toute forme d'hérédité non verticale est susceptible d'apporter le même type d'information: la transformation, mais aussi l'hybridation, l'introgresion, la symbiose, ou encore les transferts de parasites ou d'organismes symbiotiques (*voir l'intervu page 58*)... De plus, si les macroorganismes transfèrent probablement moins leurs gènes, ils portent eux-mêmes souvent des microbes parasites ou symbiotiques qui, eux, se transfèrent d'un individu à l'autre ou transfèrent leurs gènes. Ces microbes sont donc eux-mêmes des sources potentielles d'information sur l'histoire des plantes ou des animaux. Tout récemment, une équipe de l'institut de technologie du Massachusetts a ainsi détecté, à l'aide de notre méthode, les transferts de bactéries du microbiote intestinal des mammifères au cours de leur histoire.

Les transferts nous renseignent aussi sur les relations géographiques et écologiques

Pour la construction des arbres, le transfert de gènes est un nouveau registre fossile

entre espèces ou populations passées, puisqu'un transfert nécessite une proximité entre le donneur et le receveur. Trois doctorants dans notre équipe explorent certains de ces aspects: pour étudier l'histoire des populations humaines sur la base des échanges de gènes entre leurs parasites, pour établir des chronologies de diversification ou pour retrouver des lignées encore inconnues. D'autres équipes dans le monde commencent aussi à utiliser ces méthodes de réconciliation avec des objectifs variés. Ces recherches menées parallèlement mèneront-elles à une nouvelle crise? Nul ne le sait encore... ■

Les lois du HASARD

- 120 pages pour découvrir les lois du hasard en mathématiques, biologie, physique, etc
- En vente chez votre marchand de journaux ou sur boutique. pouirlascience.fr





L'ESSENTIEL

Pendant le sommeil, les sens perdent le contact avec l'environnement et les mouvements du corps s'estompent. Les activités cérébrales de base étant interrompues pendant plusieurs heures, un animal qui dort constitue une proie facile.

> Chez certains animaux, ce problème est résolu par

leur capacité à dormir avec la moitié de leur cerveau, tout en restant vigilants avec l'autre. Cet entre-deux porte le nom de sommeil unihémisphérique.

> L'étude du sommeil unihémisphérique aide à comprendre le sommeil et sa fonction, voire les troubles du sommeil humain.

L'AUTEUR



GIAN GASTONE MASCETTI
neurophysiologiste
à l'université de Padoue,
en Italie, et professeur
émérite.

Ne dormir que d'un demi-cerveau

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

L'une des caractéristiques les plus frappantes des organismes vivants, tant animaux que végétaux, est la façon dont leur physiologie et leur comportement se sont adaptés pour suivre l'alternance du jour et de la nuit. Chez les animaux, une horloge cérébrale synchronisée avec les signaux de l'environnement engendre des changements biologiques variant sur un cycle d'environ vingt-quatre heures – des rythmes circadiens (du latin *circa* et *diem*, signifiant respectivement « environ » et « un jour »).

Le cycle éveil-sommeil est un rythme circadien typique. L'éveil est caractérisé par une activité sensorielle et locomotrice; au cours du sommeil, les sens perdent le contact avec leur environnement et les mouvements sont atténués. Cette perte périodique de conscience apparaît de façon évidente sur les enregistrements électroencéphalographiques (EEG) : le sommeil profond s'y traduit par des oscillations lentes et de grande amplitude. L'éveil, en

revanche, s'y manifeste par des oscillations rapides et de faible amplitude. Cependant, le sommeil demeure en grande partie un mystère. Pourquoi un animal se déconnecte-t-il ainsi de son environnement en interrompant ses activités sensorielles et motrices de base pendant plusieurs heures, période durant laquelle il devient plus vulnérable aux prédateurs? La question se pose avec plus d'acuité chez les mammifères aquatiques, qui ont besoin comme les autres mammifères de respirer et de maintenir la température de leur corps durant leur sommeil.

Fait remarquable, chez certains animaux ce problème a été résolu par le développement d'une capacité de dormir avec la moitié de leur cerveau tout en restant éveillés avec l'autre – un comportement connu sous le nom de sommeil unihémisphérique à ondes lentes. D'autres encore s'engagent dans un sommeil unilatéral dans certaines circonstances, mais maintiennent leurs deux hémisphères au repos si nécessaire. Des mammifères marins, des oiseaux et >

> peut-être des reptiles entrent ainsi dans un état mi-éveillé mi-endormi, gardant parfois un œil ouvert pendant ces intervalles. Et comme nous le verrons, on a même découvert récemment une forme similaire de sommeil unihémisphérique chez les humains.

Le demi-sommeil offre aux chercheurs une fenêtre fascinante sur le sommeil. En effet, tandis que l'on étudie l'hémisphère dormant, l'autre peut servir de contrôle lors des expériences. Et si l'on comprenait la capacité qu'ont certains animaux de vivre normalement malgré un tel manque relatif de sommeil, peut-être aurait-on des idées pour mieux traiter les troubles du sommeil humain, qui, souvent, affectent davantage l'un des deux hémisphères du cerveau.

ENDORMI, MAIS PAS TOUT À FAIT

L'étude du sommeil unihémisphérique a démarré en 1964. John Lilly, un chercheur américain controversé, remarqua que les dauphins n'ont qu'un seul œil fermé au cours de leur repos quotidien; il suggéra alors que ces mammifères marins étaient capables de dormir en utilisant un seul côté du cerveau. Lilly supposait que quand ils dorment, les dauphins sont encore en mesure d'observer et d'écouter leur environnement. Mais des expériences plus rigoureuses ont été nécessaires pour déterminer ce qui se passe dans le cerveau des cétacés.

Les cétacés – baleines, dauphins et marsouins – font toujours l'objet d'études sur le sommeil unihémisphérique. Ces animaux conservent deux caractéristiques physiologiques de leurs ancêtres qui vivaient sur la terre ferme: des poumons pour respirer et des mécanismes qui maintiennent une température corporelle presque constante dans l'eau (thermorégulation). Et il semblerait que dormir d'un seul hémisphère cérébral leur ait permis de garder ces traits en milieu aquatique.

Depuis la fin des années 1970, Lev Mukhametov, de l'Institut d'écologie et d'évolution A. N. Severtsov, à l'Académie russe des sciences, et ses collègues ont examiné plus profondément que Lilly ne l'avait fait, ce qui se passe dans le cerveau des cétacés. L'équipe de Lev Mukhametov a beaucoup étudié le sommeil chez les grands dauphins (les dauphins du genre *Tursiops*). Dans les enregistrements EEG, les chercheurs ont constaté qu'un hémisphère du cerveau des animaux était dans un état de sommeil lent, tandis que l'autre était éveillé. Ils n'ont que rarement observé le sommeil dans les deux hémisphères (ce qu'on appelle le sommeil bihémisphérique à ondes lentes), et ils n'ont enregistré aucun signe clair de sommeil paradoxal, type de sommeil très largement associé au rêve.

Pendant le sommeil unihémisphérique, la moitié éveillée du cerveau d'un dauphin

contrôle la nage et la remontée en surface pour respirer. Comme Lilly l'avait supposé sur la base d'une observation sommaire, l'œil ouvert de l'animal, lié à l'hémisphère cérébral éveillé – celui du côté opposé –, permet à un dauphin d'être attentif à d'éventuels prédateurs et de nager à l'unisson avec ses compagnons, tandis que l'autre moitié du cerveau est au repos. En 1999, Dawn Goley, à l'université d'État de Humboldt, aux États-Unis, a observé – tout comme Guido Gnone, de l'Aquarium de Gênes, en Italie, et ses collègues en 2001 – que lorsque les dauphins nagent en groupe, l'œil ouvert d'un membre du groupe assure le contact visuel avec les autres. Si un partenaire se déplace de l'autre côté, l'activité des yeux s'inverse.

Les dauphins sont également confrontés à des eaux froides qui les exposent à d'importantes pertes de chaleur. Garder un hémisphère du cerveau éveillé pendant le sommeil permettrait à ces animaux de maintenir leur température en remuant fréquemment les nageoies et la queue de façon à nager et évoluer près de la surface. Ces observations ont été rapportées en 2004 par Praneshri Pillay et Paul Mager, tous deux alors à l'université du Witwatersrand, en Afrique du Sud.

On sait que chez les cétacés et d'autres animaux, le cycle global sommeil-éveil est régi par les interactions de multiples structures cérébrales, dont le tronc cérébral, l'hypothalamus et le télencéphale basal. Ce qui régule plus précisément le sommeil unihémisphérique reste une énigme, mais on dispose de quelques indices. Ainsi, en 2012, David Kedziora et ses collègues, à l'université de Sydney, ont élaboré un modèle mathématique du sommeil unihémisphérique destiné à représenter les habitudes de sommeil des dauphins.

Dans ce modèle, les sous-structures de l'hypothalamus de chaque hémisphère – les noyaux ventrolatéraux préoptiques – s'échangent des messages qui régulent le moment du sommeil de chaque hémisphère. Il en ressort que des signaux inhibiteurs transmis entre les deux hémisphères seraient capables d'autoriser l'un des deux côtés à dormir pendant que l'autre reste éveillé. Des structures profondes du cerveau, telles que les commissures postérieures du tronc cérébral, seraient également impliquées (les commissures postérieures sont très grandes chez les dauphins, d'où leur rôle supposé dans la gestion de ce sommeil atypique). Le modèle de l'université de Sydney offre aux neuroscientifiques une piste pour explorer les mécanismes du sommeil unihémisphérique.

Les cétacés ont évolué à partir d'un ancêtre terrestre commun avec les hippopotames et d'autres mammifères à sabots. Le passage d'un milieu terrestre à un milieu aquatique s'est fait

progressivement et a peut-être comporté une phase semi-aquatique qui a entraîné des ajustements physiologiques et comportementaux importants. Par conséquent, le comportement de sommeil des cétacés représente un exemple singulier d'adaptation à un nouvel environnement qui démontre un compromis entre le besoin de sommeil et celui de survivre.

D'autres animaux font des compromis similaires. Ainsi, chez les phoques (la famille des phocidés) sont apparues diverses solutions évolutives au problème étroitement lié de la

respiration et du sommeil dans l'eau et sur la terre ferme. Par exemple, les phoques du Groenland et les éléphants de mer évitent complètement le sommeil unihémisphérique.

Le cas des otaries à fourrure du Nord (*Callorhinus ursinus*, de la famille des otariidés), cependant, est différent. En 2017, Oleg Lyamin, de l'Institut d'écologie et d'évolution A. N. Severtsov, a signalé que contrairement aux dauphins, qui semblent rarement présenter un sommeil bihémisphérique et peut-être jamais un sommeil paradoxal (à mouvements oculaires rapides), ces otaries exhibent plusieurs types de sommeil. Notamment, elles pratiquent les sommeils unilatéral, bilatéral et paradoxal, qu'elles soient en milieu aquatique ou à terre.

Lorsqu'elles sont dans l'eau et qu'elles dorment d'un sommeil unihémisphérique, les otaries à fourrure adoptent une position qui leur permet à la fois de dormir, de respirer et de surveiller les prédateurs qui s'approchent : elles s'allongent sur un côté avec une nageoire dans l'eau et remuent continuellement celle-ci tout en gardant leurs trois autres nageoires dans l'air afin de réduire les pertes de chaleur. Ce faisant, elles maintiennent leurs narines hors de l'eau, de façon à respirer. L'hémisphère cérébral du côté opposé à celui de la nageoire mobile (et de l'œil ouvert) est éveillé, ce qui permettrait à l'otarie de réaliser des commandes motrices pour nager et maintenir sa posture. Sur la terre ferme, le sommeil unihémisphérique permettrait à ces animaux de repérer d'éventuels prédateurs et de se coordonner avec leurs compagnons, mais cela ne les aiderait pas en matière de contrôle de la respiration, de régulation de la température corporelle ou de coordination des mouvements.

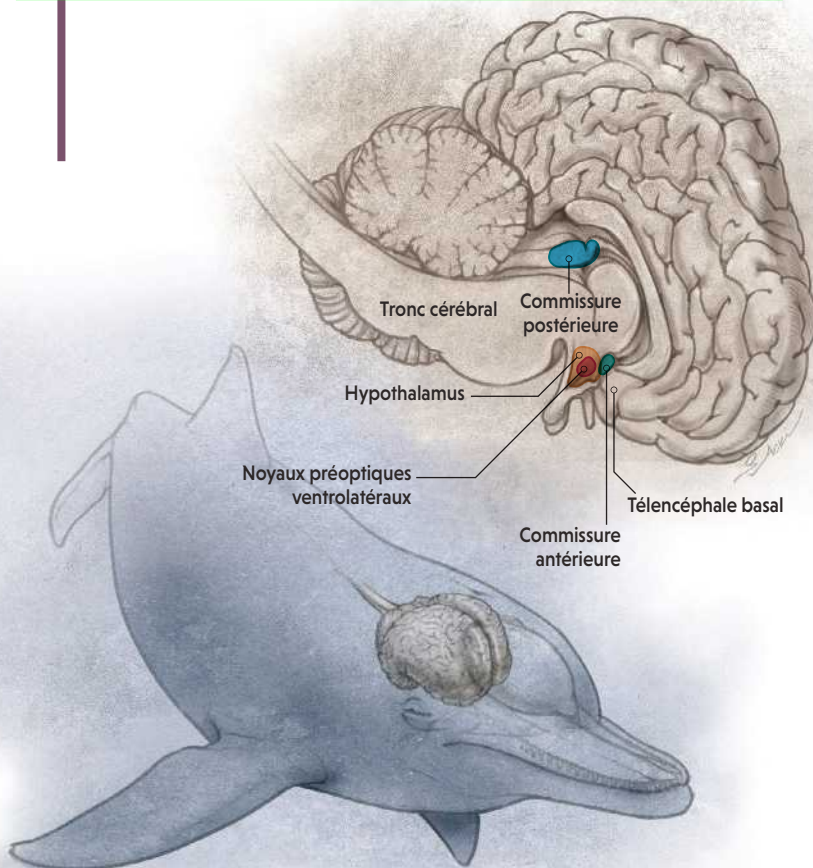
UN ÉQUILIBRE ENTRE REPOS ET VIGILANCE

Certains oiseaux aussi assurent un équilibre entre les besoins de repos et de vigilance en s'engageant dans un sommeil unihémisphérique (parfois, le sommeil unilatéral est combiné à du sommeil bilatéral et à du sommeil paradoxal). En 1996, Jadwiga Szymczak, alors à l'université Nicolaus Copernicus, en Pologne, a enregistré la présence d'ondes lentes dans l'électroencéphalogramme d'un seul hémisphère cérébral chez le merle noir. Et en 2001, Niels Rattenborg, alors à l'université d'État de l'Indiana, aux États-Unis, et ses collègues ont constaté la même chose chez des pigeons.

De façon similaire, Niels Rattenborg avait constaté en 1999 que les canards colverts étaient attentifs aux éventuelles menaces en dormant unilatéralement. Chez les individus qui gardaient un œil ouvert quand ils étaient en périphérie d'un groupe, la part de sommeil

À MOITIÉ ALLUMÉ, À MOITIÉ ÉTEINT

Diverses régions du cerveau, dont le tronc cérébral, l'hypothalamus et le télencéphale basal, interagissent pendant le cycle sommeil-éveil. Chez les dauphins, une coordination minutieuse entre les hémisphères gauche et droit du cerveau permet à un côté de dormir pendant que l'autre se repose. Selon un modèle conçu en 2012 à l'université de Sydney, les noyaux ventrolatéraux préoptiques de l'hypothalamus de chacun des deux hémisphères s'échangeraient des messages, lesquels détermineraient quel côté doit dormir pendant que l'autre reste vigilant. Les commissures postérieures du tronc cérébral faciliteraient également ce processus de communication.



> unihémisphérique était une fois et demie plus élevée que chez ceux occupant une position plus centrale. Ces canards «sentinelles» ouvraient l'œil du côté extérieur au groupe. Mark Elgar, aujourd'hui à l'université de Melbourne, en Australie, rapportait dans une étude de 1989 que la vigilance diminue lorsque le groupe s'agrandit et lorsque l'animal se rapproche de son centre.

Durant leurs longs voyages sans escale, les oiseaux migrateurs utilisent également diverses stratégies de sommeil. En 2016, N. C. Rattenborg, désormais à l'institut Max-Planck d'ornithologie à Seewiesen, en Allemagne, et son équipe ont étudié les sommeils unilatéral et bilatéral chez les frégates du Pacifique (*Fregata minor*) pendant leurs vols au-dessus de l'océan, qui duraient jusqu'à dix jours. Lors d'un épisode de sommeil unilatéral, l'EEG a montré l'éveil de l'hémisphère cérébral du côté opposé à celui d'un virage en vol, indiquant que l'œil ouvert regardait où le groupe se dirigeait. De plus, Thomas Fuchs, alors à l'université d'État de Bowling Green, aux États-Unis, a découvert en 2006 que la grive à dos olive (*Catharus ustulatus*) compense le manque de sommeil pendant le vol de nuit en augmentant la durée totale de son sommeil grâce à des microsiestes pendant la journée ou, lorsqu'elle est perchée, en fermant un œil.

ET NOUS AUTRES HUMAINS ?

Quant aux humains, ils n'ont pas de sommeil unihémisphérique classique, mais ils ont parfois l'expérience de quelque chose qui s'en rapproche. Masako Tamaki et ses collègues à l'université Brown, aux États-Unis, ont réalisé des enregistrements EEG sur des personnes passant la nuit dans un environnement qui leur était non familier. Les résultats publiés en 2016, montraient des ondes lentes indicatives de sommeil profond dans l'hémisphère droit et des ondes lentes superficielles dans l'hémisphère gauche, signe d'une plus grande vigilance. D'ailleurs, l'hémisphère gauche était plus facilement excité par des stimulus extérieurs que le droit. Cette asymétrie, dénommée «effet de la première nuit» disparaît la deuxième nuit. Elle semble préserver la vigilance dans un endroit non familier, et rappelle celle des mères qui se réveillent facilement lorsqu'elles entendent des pleurs ou d'autres bruits identifiés comme provenant de leurs bébés.

Nous autres humains ressentons parfois le manque de sommeil après la première nuit hors de chez soi. Mais les autres animaux qui dorment toujours d'un demi-cerveau semblent bien adaptés à leur routine. Ceux qui présentent un sommeil unilatéral passent moins de temps à dormir que ceux qui s'engagent dans le sommeil bilatéral ou dans le sommeil

paradoxal. Leur capacité de nager, de voler, de s'alimenter ou d'interagir avec leurs congénères n'en est pas moins intacte.

Les dauphins, par exemple, sont éveillés près des deux tiers de leur journée. Le reste du temps, ils dorment d'un sommeil unilatéral, les

Chez les humains, l'«effet de la première nuit» se rapproche du sommeil unilatéral

deux hémisphères s'échangeant du temps de sommeil. Pendant leur sommeil, leur corps semble bien récupérer, malgré l'absence de sommeil paradoxal. En 1997, Lev Mukharbatov et ses collègues rapportaient que les dauphins dont on étudiait le sommeil semblaient toujours en bonne santé. En captivité, où les scientifiques pouvaient les observer de près, les dauphins apprenaient et mémorisaient des tâches complexes.

Quant aux frégates, leur durée totale de sommeil était fortement réduite pendant le vol, mais cela ne les empêchait pas de maintenir un niveau élevé d'attention et de bonnes performances de vol au cours de leurs longs voyages. De même, les canards colverts sentinelles perdent du sommeil, mais sans que cela altère leur comportement. D'autres guetteurs les relaieront le jour suivant.

Le sommeil unihémisphérique continue de fasciner les chercheurs parce qu'il illustre les diverses stratégies apparues au fil de l'évolution pour que les animaux aient leur dose quotidienne de repos. L'intérêt suscité par les expériences de terrain a même fait de cette particularité un outil de laboratoire pour explorer le rôle du sommeil dans le développement du cerveau juste après la naissance.

Ainsi, en 1999, mon groupe au département de psychologie générale de l'université de Padoue, en Italie, a découvert que des poussins de poule (*Gallus gallus*) venant de naître dormaient beaucoup plus avec l'hémisphère gauche au cours de la première semaine suivant leur éclosion. Durant cette période, ils utilisaient préférentiellement ce même hémisphère lors de l'apprentissage de stimulus – des motifs

BIBLIOGRAPHIE

O. I. Lyamin et al., Sleep patterns in a marine seal, *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 24, pp. 144-151, 2017.

N. C. Rattenborg et al., Evidence that birds sleep in mid-flight, *Nature Communications*, vol. 7, article 12468, 2016.

G. G. Mascetti, Unihemispheric sleep and asymmetric sleep: Behavioral, neurophysiological, and functional perspectives, *Nature and Science of Sleep*, vol. 8, pp. 221-238, 2016.

D. J. Kedziora et al., Physiology-based quantitative modeling of unihemispheric sleep, *Journal of Theoretical Biology*, vol. 314, pp. 109-119, 2012.

O. I. Lyamin et al., Cocean sleep patterns in a marine mammal, *Neuroscience & Biobehavioral Review*, vol. 32(8), pp. 1451-1484, 2008.

et des couleurs – que leur jeune cerveau traitait pour la première fois. Le sommeil semblait donc jouer un rôle dans l'organisation de ce qu'ils venaient d'apprendre.

Le sommeil de l'hémisphère droit s'est accru chez les poussins à mesure que les activités telles que l'analyse spatiale et le traitement de nouveaux événements ont prévalu de ce côté là au cours de la deuxième semaine. Lorsque nous avons entraîné des poussins à une tâche de discrimination de couleurs, ils ont ensuite manifesté plus de sommeil unilatéral gauche (l'œil droit fermé et l'hémisphère gauche endormie), parce que l'hémisphère gauche était dominant dans l'apprentissage des couleurs.

À l'inverse, lorsqu'on leur demandait de choisir l'un des quatre récipients placés dans un coin de leur enclos (ils devaient choisir le récipient comportant un trou sur le dessus, qui contenait une récompense alimentaire), les poussins se servaient, pour cette tâche d'apprentissage spatial, de l'œil gauche. Quand ils en ont eu assez, les poussins ont dormi davantage de l'hémisphère droit (l'œil gauche fermé) pour que ce côté cérébral, spécialisé dans ce type de tâche, se repose.

L'hémisphère le plus actif, qu'il soit engagé dans un sommeil unilatéral ou bilatéral, a passé

relativement plus de temps à dormir, et donc à récupérer. Pendant ce temps, l'œil ouvert du côté de l'hémisphère non dominant a pu les relays et surveillé l'environnement. En fait, le déplacement d'un objet sombre au-dessus de la cage au cours du sommeil unilatéral provoquait le réveil immédiat des poussins, qui étaient alors effrayés et émettaient des appels de détresse. La vigilance était restée intacte, mais elle n'avait pas empêché le sommeil d'être un moment privilégié pour faire le tri des expériences sensorielles intenses vécues par les oiseaux durant leurs premiers jours dans un monde nouveau.

En fin de compte, l'étude d'animaux qui dorment d'un demi-cerveau seulement pourrait nous aider à comprendre l'énigme biologique que représente le sommeil. Voici les troubles humains du sommeil: l'apnée du sommeil et d'autres pathologies ont parfois des effets plus importants dans un hémisphère cérébral que dans l'autre. Tous ces travaux aident en tout cas à comprendre comment une espèce animale trouve un équilibre entre les bienfaits du repos et la nécessité de se protéger des prédateurs. Dormir d'un seul côté du cerveau est une réponse brillante à ce dilemme. ■

TEDx Saclay
x = independently organized TED event

28
nov. 2019
Massy
OPÉRA

Résonances
Paris-Saclay



<https://tedxsaclay.com/videos>

Abonnez-vous à notre newsletter et participez activement au prochain TEDx !

tedxsaclay.com

PARIS SACLAY
Communauté d'agglomération

NOKIA

BANQUE POPULAIRE VAL DE FRANCE
ADDITIONNER LES FORCES
MULTIPLIER LES CHANCES

casden

i connecteurs
PARIS - SACLAY

À la poursuite du dragon de Komodo

En 1927, William Burden, un jeune explorateur américain, relate 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...

Alors qu'il survolait la mer de Florès dans son petit biplan, un aviateur hollandais perdit le contrôle de celui-ci à la suite d'une avarie moteur. Il n'eut d'autre choix que de négocier un atterrissage forcé sur l'île de Komodo toute proche. S'extirpant du cockpit, il découvrit alors, stupéfait, un groupe de « lézards » énormes se prélassant sur le rivage... L'on était en 1912, au temps des indésirables hollandaises, et avec d'autres rumeurs, la mésaventure supposée de notre aviateur allait catalyser les énergies qui mèneraient à la découverte, par l'Occident, du varan de Komodo. Aujourd'hui, l'île est devenue un lieu prisé des touristes : chaque année, plus de 100 000 personnes foulent son sol dans l'espoir d'y observer l'un des quelque 2 448 individus de cette espèce qui y vivent encore selon l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Au point que l'administration provinciale des îles de la Sonde, dont fait partie Komodo, a décidé, il y a quelques mois, d'interdire l'accès de l'île au tourisme pour au moins un an à partir de janvier 2020.

Pourtant, l'engouement de l'Occident pour le varan de Komodo n'a pas été immédiat.

En 1912, le littoral de Komodo n'était pas fréquenté en permanence par les pêcheurs. Il a donc fallu un certain nombre de jours pour que l'écho des tribulations du pilote parvienne à Java. Qui plus est, de telles histoires de rencontres avec des monstres « antédiluviens » se heurtaient là-bas à un scepticisme certain. Seul un homme prêtait attention à ce genre de récit : il s'agissait du zoologiste Pieter Ouwens, qui dirigeait le musée et le jardin botanique de la charmante cité de Buitenzorg (Bogor). Il faut dire que dès décembre 1910, l'un de ses correspondants, le lieutenant van Steyn van Hensbroek, administrateur colonial de la région de Komodo, l'avait informé de la présence possible d'un varan géant sur l'île en question, ainsi qu'à Florès. L'animal était dénommé par les autochtones *Buaya darat* (« crocodile de terre » en Indonésien), ce qui allait dans le sens d'une identification à un varanidé : en effet, depuis toujours, diverses ethnies ont assimilé les varans à des crocodiles terrestres. L'informateur d'Ouwens avait même profité d'une visite officielle à Komodo pour collecter des données supplémentaires sur l'énigmatique « reptile ». Un pêcheur de perles surtout, du nom d'Ulderson, lui fournit maints détails au sujet de l'espèce : ces animaux, qui creusaient des sortes de »

1:2,5

L'ESSENTIEL

Le monde n'a découvert l'existence des varans de Komodo qu'en 1912.

> Tombés dans l'oubli pendant la Première Guerre mondiale.

Ces « lézards » géants sont revenus sur le devant de la scène en 1927 grâce à un jeune explorateur américain, William Burden.

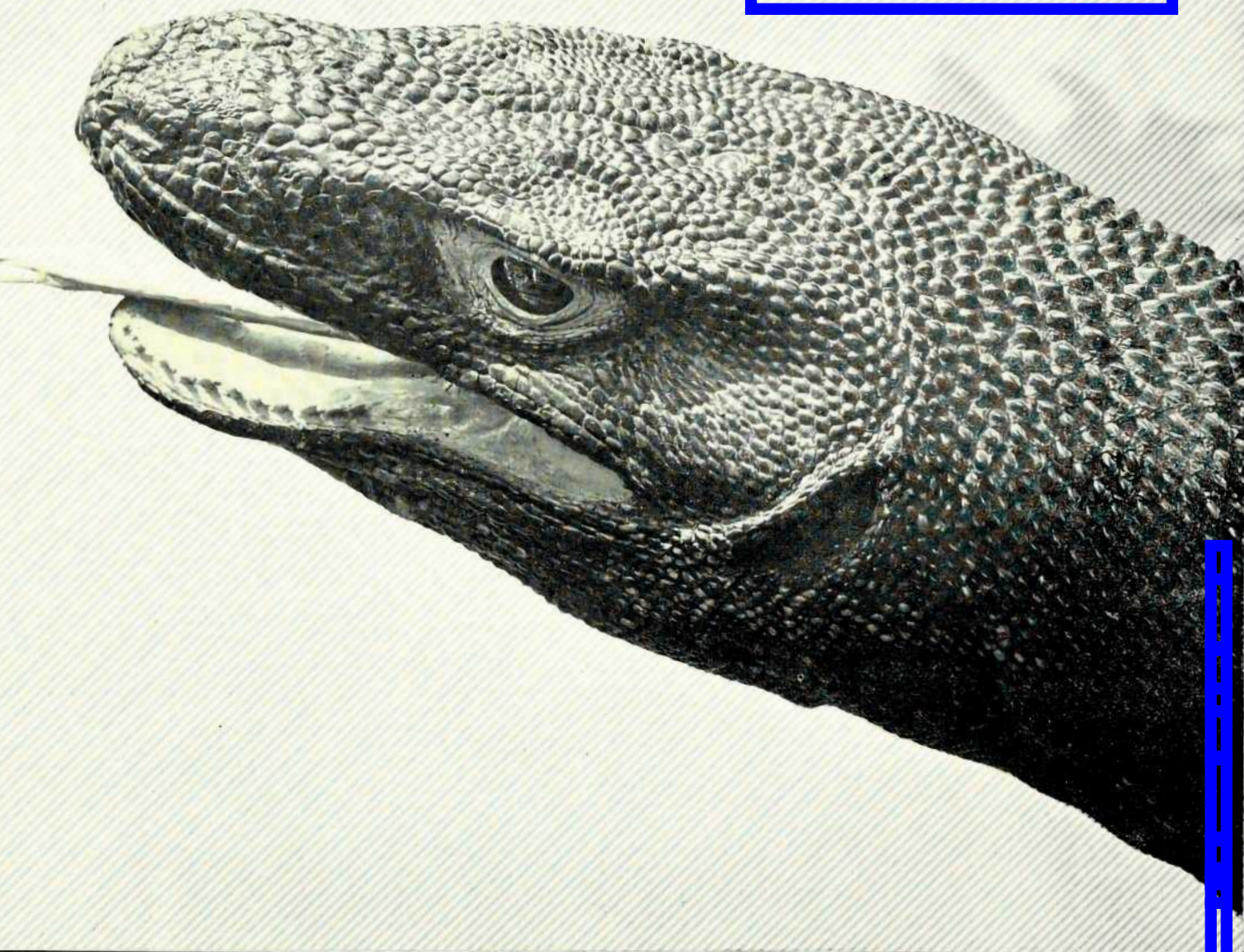
> L'île de Komodo et ses monstres antédiluviens, si proches du « monde perdu » de Conan Doyle, ont alors vite suscité l'engouement jusqu'à Hollywood.

L'AUTEUR



BENOÎT GRISON
enseignant-chercheur
de l'UFR Sciences
et Techniques,
à l'université d'Orléans

Fasciné par le varan de Komodo, le zoologiste néerlandais Pieter Ouwens en fit une description précise dès 1912, à l'aide de cinq spécimens qui avaient été envoyés. La photographie montre l'un d'eux.



© P.A. Ouwens, On a large Varanus species from the Island of Komodo, 1912

> «terriers» dans les zones de chaos rocheux, atteindraient les dimensions spectaculaires de six à sept mètres... Lors de son séjour, van Hensbroek fut assez heureux pour se procurer une peau de la créature, qui fut envoyée à Buitenzorg.

Tout cela semblait bel et bien confirmer la tradition orale, et Pieter Ouwens décida qu'il était temps de se procurer des spécimens entiers du grand «lézard». Grâce à l'aide des insulaires et des autorités, il n'en obtint pas moins de cinq, dont deux individus juvéniles capturés vivants. Si bien qu'Ouwens put procéder à la description de la nouvelle espèce sous le nom de *Varanus komodoensis* à la fin de l'année 1912. Il s'avéra que les assertions relatives à la taille atteinte par les varans de Komodo étaient très exagérées, les mâles de ces animaux ne pouvant dépasser 3,50 mètres de long pour 200 kilogrammes, au maximum. Cela ne constitue certes pas des mensurations record au sein des varanidés, puisque le varan néoguinéen de Salvadori peut atteindre pour sa part 4 mètres. Cependant, les deux tiers de la longueur exceptionnelle de ce dernier sont dus à son appendice caudal; chez le Komodo, la queue ne représente que 50% de la taille totale. Quant à la distribution de la «bête», il devint bientôt clair, qu'outre Florès et Komodo, celle-ci habitait aussi les îles proches de Padar, Rinca, Gili Dasami, Gili Motang, voire Longos.

Le major Ouwens fut bien le premier scientifique occidental à comprendre qu'une espèce nouvelle de très grand varanidé résidait dans cette région. Cela lui valut d'ailleurs d'être décoré par la couronne des Pays-Bas, sans que son travail n'obtienne le retentissement mérité. De fait, le premier conflit mondial, qui n'allait pas tarder à éclater, fit quelque peu oublier le varan géant en Occident.

KING KONG VERSUS «DRAGON DE KOMODO»

Cependant, les autochtones commençaient à considérer ces étonnantes «reptiles» comme emblématiques de leur patrimoine naturel: le sultan de Bima, qui était aussi celui de Komodo, interdit en 1915 la chasse au grand varan, lequel excitait la convoitise des maroquiniers – tanner sa peau était de toute manière irréaliste, vu des multiples plaques osseuses, ou ostéodermes, que contient celle-ci chez l'adulte !

De façon quelque peu paradoxale, c'est un jeune naturaliste et explorateur new-yorkais, William Douglas Burden, qui relança l'intérêt des autorités coloniales hollandaises pour l'espèce et sa protection. À l'issue de son séjour à Komodo en 1926, celles-ci reprirent en main la gestion de la faune de l'île, réduisant les prérogatives du sultan. Burden, géologue de formation, fut séduit par l'évocation des varans géants d'Indonésie lors des cours de l'un de ses

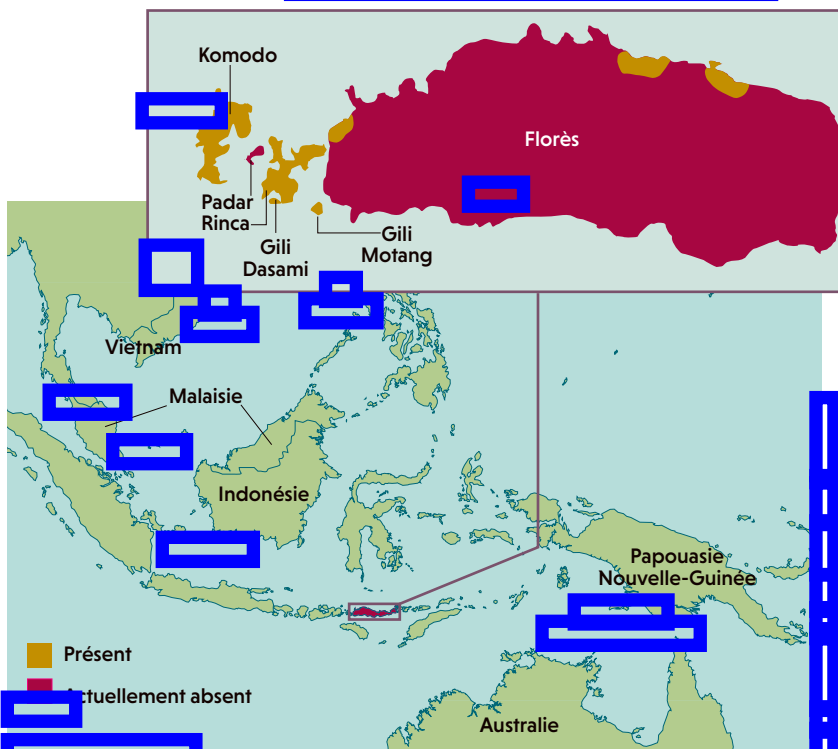


Le major Pieter Ouwens, zoologiste et officier des Indes néerlandaises

Le premier Occidental à s'intéresser réellement aux varans de Komodo.

professeurs, Gladwyn K. Noble: cet herpétologue tenait en effet ces derniers pour d'authentiques «fossiles vivants» – une notion scientifique obsolète de nos jours. Doté d'une fortune substantielle (il faisait partie de la famille des magnats Vanderbilt), Burden décida de financer sur ses fonds propres une expédition à Komodo. Noble lui apporta le soutien scientifique du Muséum américain d'histoire naturelle, lui adjoignant un spécialiste des «reptiles», le docteur Emmett Reid Dunn. Le voyage de l'équipe Burden aux Indes néerlandaises fut un complet succès: outre un film, l'expédition permit de ramener trois spécimens vivants de *Varanus komodoensis*. Deux individus furent accueillis dans le parc zoologique du Bronx. Hélas, aucun de ces animaux ne survécut, mais naturalisés, des spécimens furent mis en valeur au sein d'un superbe diorama du Muséum américain, restituant leur biotope.

C'est grâce à William Burden que le varan de Komodo devint une «superstar» animale, accédant au statut d'espèce «mythifiée». Dans le livre de 1927 où il relate son expédition, notre aventurier qualifie le premier le grand varan indonésien de «dragon». Quant à l'île de Komodo, avec sa trentaine de kilomètres de long et sa haute chaîne volcanique, elle est désignée non sans audace comme constituant un «monde perdu»! Des multiples écosystèmes qu'elle abrite, l'explorateur retient surtout les épaisses forêts, qu'il qualifie de



Aujourd'hui, le varan de Komodo est encore présent sur plusieurs îles de la Sonde, en Indonésie, dont celle éponyme.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *Especies*, après parution dans son n° 32, pp. 40-47, juin 2019, <https://especies.org>.



«préhistoriques»... L'image fantasmagique du «monde perdu» ici évoquée renvoie bien sûr au roman éponyme de Conan Doyle, publié plus d'une décennie auparavant, l'année même de la description du varan géant de la Sonde.

Après cela, il ne faut nullement s'étonner que tous les grands zoos occidentaux aient souhaité négocier l'achat de «dragons de Komodo» auprès du gouvernement colonial néerlandais. Ainsi, le zoologiste allemand Oskar Heinroth en obtint un pour l'aquarium de Berlin dès 1927 et, en 1934, le célèbre capteur d'animaux «Wild Bill» Harkness fut également mandaté par le zoo de Saint-Louis pour ramener un spécimen du précieux animal, avant qu'il ne parte en quête du grand panda. La noblesse britannique elle-même s'enthousiasma des varans géants : c'est ainsi que Lord Moyne cingla en 1936 vers Komodo, avec quelques amis conviés sur son yacht ; ils purent en braver trois «dragons» à bord, destinés au zoo de Londres, mais l'un d'eux eut tôt fait de s'échapper pour regagner le rivage.

L'aura mythique qu'avait conférée William Burden aux varans de la Sonde ne tarda guère à enflammer l'imagination des artistes. Le film réalisé à Komodo, outre qu'il renfloua les caisses du département «reptiles» du Muséum américain, attira bientôt l'attention d'un jeune cinéaste, Merian C. Cooper. Celui-ci, documentariste à l'origine, préparait avec son compère Ernest B. Schoedsack un «film à monstre» hollywoodien qui allait devenir le célèbre *King Kong* (1933). L'idée initiale de Cooper

était d'aller filmer le gorille en Afrique centrale, puis de ramener d'Indonésie des images de «dragons» dans leur habitat. Lui et son collègue auraient alors combiné ces vues pour donner au spectateur l'illusion d'un «combat de titans» entre grand singe et varan. Mais Willis O'Brien, grand pourvoyeur d'effets spéciaux, les fit bientôt renoncer à cette idée. Il n'en demeure pas moins que la version aboutie de *King Kong* reste marquée du sceau de la mythologie du varan de Komodo. Si ce dernier est remplacé par des dinosaures, Skull Island, de nature volcanique, ressemble par ses paysages aux «îles des dragons» et le personnage de l'héroïne incarnée par Fay Wray est inspiré pour partie de la sémillante Catherine Burden, mise en scène par son époux dans leur documentaire d'exploration.

UNE FÉROCITÉ SURFAITE

Très tôt, en vertu de son statut fantasmé de «monstre préhistorique», le «dragon de Komodo» est décrit comme un terrible prédateur. Le Komodo est certes vorace, engloutissant plus de 80% de ses proies, mais, dans la nature, il tend à autoréguler son comportement alimentaire, ne serait-ce qu'en raison de la lenteur de sa digestion (il est significatif que les mâles dépassant 160 kilogrammes aient tous été des spécimens captifs). Carnivore opportuniste, il se nourrit aussi bien de cerfs sambar, de sangliers, de bovins ou de chèvres que d'œufs d'oiseaux et de tortues à l'occasion ; parfois, le cannibalisme est pratiqué au >

Les côtes de l'île volcanique de Komodo.



© Jon Chia / Wikimedia Commons



> détriment des jeunes par les animaux plus âgés.

Ce varan géant a même été tenu pour un « mangeur d'hommes » potentiel. Il est vrai que depuis cinquante ans, plusieurs dizaines de personnes ont été mordues par des « dragons de Komodo ». Des touristes imprudents ont pu pâtir de l'« habitude » à l'homme de quelques individus... qui craignent moins notre espèce que naguère. L'on ne peut de toute façon pas exclure qu'un être humain isolé, affaibli, puisse devenir la proie d'un varan géant et il est vraisemblable que nos cousins, les hominiens, dans de Florès (autour de 1 mètre de hauteur seulement !), qui vivaient sur cette île jusqu'à il y a 50 000 ans de cela, aient pu finir dans le stomac des « dragons » de temps à autre. Leurs grandes dents plates, recourbées et finement crénelées, sont redoutables. Si la taille de la proie est modérée, le varan vise le cou, alors que pour un bœuf, il s'attaquera plutôt aux pattes. Bien que le « dragon de Komodo » puisse faire des sprints de 20 kilomètres par heure, il privilégie l'approche matoise de ses proies et, finalement, ce sont les sens de notre chasseur qui restent ses meilleurs atouts.

UN ODO RAT REMARQUABLE

Certes, l'audition du varan de Komodo n'est pas exceptionnelle. En effet, l'on a pu montrer qu'il ne perçoit pas les graves et les aigus : son spectre auditif ne s'étend en valeurs de fréquence qu'entre 400 et 2000 hertz. Mais d'autres sens la compensent amplement. Malgré un champ visuel assez restreint, le Komodo est doté

Les trois varans de Komodo que l'explorateur américain Douglas Burden avait rapportés de son expédition n'ayant pas survécu, ils furent empaillés et présentés au Muséum américain d'histoire naturelle sous la forme d'un diorama les représentant dans leur milieu naturel.

d'une vision colorée et d'une perception fine des mouvements – ce qui suppose un traitement cérébral de « haut niveau » des informations visuelles. Surtout, son olfaction est remarquable, constituant un instrument de prédiction efficient : il serait d'ailleurs plus juste de parler de « chémoréception de contact » que d'un simple odorat. Le « dragon » en quête d'un repas balance sans cesse la tête latéralement, sa grande langue bifide et jaunâtre entrant en contact avec les molécules odorantes présentes dans l'air. Ensuite, les deux pointes de la langue viennent se placer contre l'organe de Jacobson, situé en avant de la fosse nasale : ce « détecteur olfactif » permettra au varan de connaître la direction de sa proie, ce en fonction de la concentration différentielle des molécules sur les deux branches linguales. L'organe de Jacobson favorisera même la détection d'une victime potentielle à quelques kilomètres de distance, quand le vent lui est propice.

Le varan géant s'en prend assez fréquemment à de grands herbivores malades. Il faut dire que ses mâchoires n'ont pas la puissance de celles des crocodiliens : en effet, les adducteurs de celles-ci ne jouent qu'un rôle mécanique assez limité quand le « dragon » exerce des tractions sur sa proie tout en la maintenant prisonnière de sa morsure. Souvent, quand celle-ci est de grande taille, la victime lacérée par le



Initialement, le film *King Kong* de 1933 devait comporter un combat de mains entre le grand singe et un varan de Komodo.

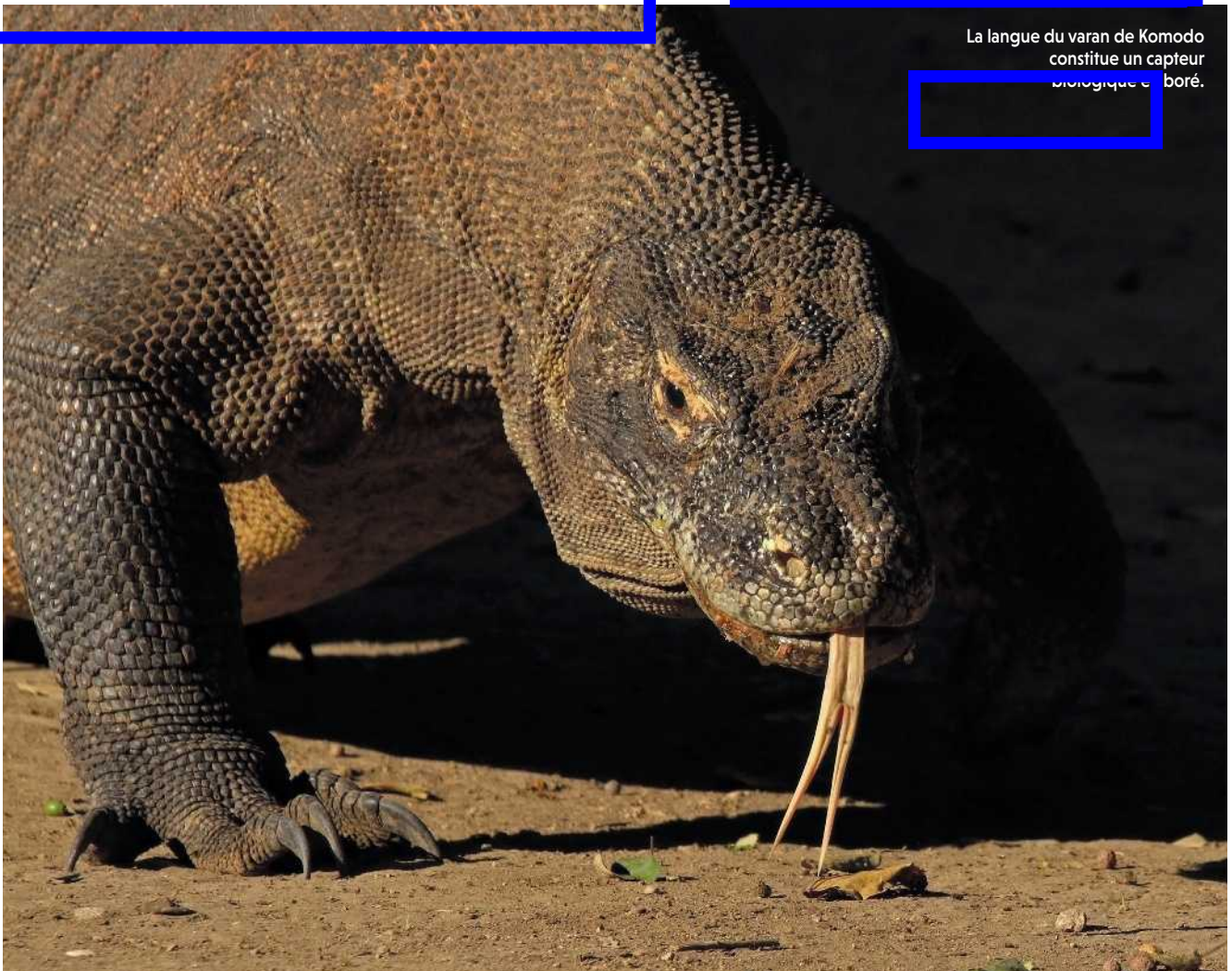
Komodo parvient à prendre la fuite. Mais, en s'infectant, les plaies suppurantes sont toujours susceptibles de causer la mort de l'animal. À partir des années 1980, l'idée selon laquelle la bouche des varans géants hébergeait en permanence une dizaine d'espèces bactériennes hautement pathogènes s'est imposée : ces germes étaient susceptibles, dans le cas de blessures étendues, de créer à terme une septicémie chez la proie... Il est clair que si cette

hypothèse scientifique détenait un tel pouvoir de séduction, c'est qu'elle évoquait également le thème du souffle fétide du dragon, cher à la pensée mythique.

Dès 2005, le biologiste Bryan Fry et ses collègues du laboratoire de l'université de Melbourne ont battu en brèche la « théorie bactérienne », en mettant en évidence une émission de venin par le Komodo lors de la morsure – jusqu'alors, on croyait que chez les « lézards », seules quelques espèces américaines d'hélodermes étaient venimeuses. Puis le même Bryan Fry localisa (via un examen d'imagerie par résonance magnétique) les glandes à venin, situées dans la mandibule, et il s'avéra que les toxines et anticoagulants produits par ces dernières abaissent la pression sanguine et favorisent l'hémorragie de la victime. Qui plus est, en 2013, le chercheur australien a cultivé des échantillons salivaires et gingivaux de Komodo en laboratoire et n'y releva aucune souche virulente de microbe. En outre, des immunologistes ont montré ultérieurement que le sang des varans géants contenait de nombreuses

Leurs grandes dents plates, recourbées et finement crénelées, sont redoutables

La langue du varan de Komodo constitue un capteur biologique élaboré.



L'ÉTONNANTE DIVERSITÉ DES VARANIDS



Le varan de Salvadori *Varanus salvadorii*, endémique de la Nouvelle-Guinée.

Apparue en Asie au Crétacé supérieur, la famille des varanidés est représentée aujourd'hui en Afrique, en Asie, ainsi que dans l'écozone australasienne. Il existe plus de quatre-vingts espèces de varans : ces « lézards » sont généralement d'une taille considérable, avec une queue triangulaire, une langue bifide rétractile et un cou délié. Amputée, leur queue ne peut se régénérer. La majorité des varans est carnivore ou insectivore : les milieux investis sont variés, allant du désert à la forêt en passant par l'élément aquatique, ou encore les savanes. Ainsi, si le varan de

Komodo préfère les biotopes de prairie, celui de Mertens, d'Australie, est amphibie, tandis que le *Varanus salvadorii* indo-malais grimpe avec aisance dans les arbres. Quant au varan du Nil, il est à son aise dans des milieux diversifiés, le facteur limitant étant ici l'eau disponible. Toutes les espèces sont ovipares. Fait notable, les « dragons de Komodo »

se sont révélés capables, en captivité, de reproduction sans mâle (parthénogenèse). On découvre encore de nouveaux varanidés. En 1983, alors que l'herpétologue allemand Wolfgang Böhm visionnait un documentaire sur le Yémen, il identifia à l'écran un varan appartenant à une espèce inconnue. Grâce à ses collègues, il finit par s'en

procurer des spécimens, l'animal étant baptisé *Varanus yemenensis*. Plus récemment, en 2010, sur l'île de Luçon (Philippines), on découvrit un grand varan frugivore, le *Varanus bitatawa*. Enfin, la même année, ce fut au tour du varan sago (*Varanus coor*), propre à l'île de Sanana, dans les Moluques, de faire son entrée dans nos classifications zoologiques.

> protéines antimicrobiennes efficaces contre des bactéries responsables d'infections.

DES ORIGINES ENFIN ELUCIDÉES

Le squelette du « dragon de Komodo » est déformé latéralement, comme chez les varanidés à tendance amphibie, et c'est un fait que *Varanus komodoensis* est un bon nageur. Cependant, avec son équipe, l'écologue Tim Jessop a pu montrer que le « dragon » était aussi une créature « terrestre ». Éloigné de son territoire, l'animal fera en sorte de le rejoindre... sauf si l'expérimentateur l'a déplacé sur une autre île : il restera alors sur place sans tenter d'effectuer un retour à la nage. Ce moyen de déplacement a pourtant joué à coup sûr un rôle important quand, dans un passé géologique récent, ces animaux ont investi les petites îles de la Sonde. Il est vrai que jusqu'il y a 10 000 ans de cela, les différentes îles occupées aujourd'hui par le varan géant ont été géographiquement reliées, en fonction des variations du niveau de la mer. Mais la paléontologie nous apprend que le varan de Komodo est apparu en Australie, il y a quelque 4 millions d'années, et qu'il y a coexisté avec son proche parent le *Varanus priscus*, un géant de 7 mètres de long disparu au Pléistocène. Par la suite, il a atteint

les îles de la Sonde (via Timor), il y a 900 000 ans, et finit par disparaître de son habitat australien 600 000 ans plus tard. Les « dragons » n'ont donc pas évolué vers le gigantisme en fonction d'une adaptation insulaire après avoir gagné l'Indonésie : d'aucuns avaient pourtant supposé, à tort, qu'ils auraient acquis leurs dimensions actuelles sur Timor et Florès, en devenant les prédateurs spécialisés d'éléphants nains disparus, du genre *Stegodon*.

Près de 6 000 individus vivent actuellement dans le parc national de Komodo. Outre la consanguinité, leur espèce est désormais menacée par les trafiquants qui capturent des spécimens pour la confection de remèdes traditionnels de la médecine chinoise. Il reste à espérer que le varan de Komodo ne rejoindra pas un jour la liste déjà longue des grands disparus des faunes insulaires... Ce qui est loin d'être acquis : fin septembre, le ministère indonésien des Affaires maritimes a décidé de ne plus interdire l'accès à l'île de Komodo. Sous la pression des populations de l'île – environ 2000 habitants, qui avaient appris que la fermeture de l'île au tourisme devait s'accompagner de leur délocalisation –, il a annoncé qu'il restreindrait simplement le nombre de visiteurs. ■

BIBLIOGRAPHIE

- A. L. Lind et al., *Genome of the Komodo dragon reveals adaptations in the cardiovascular and chemosensory systems of monitor lizards*, *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 3 (8), pp. 1241-1252, 2019.
- B. G. Fry et al., *A central role for venom in predation by *Varanus komodoensis* (Komodo Dragon) and the extinct giant *Varanus (Megalania) priscus**, *PNAS*, vol. 106 (22), pp. 8969-8974, 2009.
- G. Mitman, *Cinematic nature history, popular culture, and the American Museum of Natural History*, *Isis*, vol. 84 (4), pp. 637-661, 1993.
- W. D. Burden, *Dragons of Komodo*, *Fieldiana*, 1927.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DES MAINTENANT!**



N° 505 (nov. 19)
réf. PI.505



N° 504 (oct. 19)
réf. PI.504



N° 503 (sept. 19)
réf. PI.503



N° 502 (août 19)
réf. PI.502



N° 501 (juillet 19)
réf. PI.501



N° 500 (juin 19)
réf. PI.500



N° 499 (mai. 19)
réf. PI.499



N° 498 (avr. 19)
réf. PI.498



N° 497 (mar. 19)
réf. PI.497



N° 496 (févr. 19)
réf. PI.496



N° 495 (jan. 19)
réf. PI.495



N° 494 (déc. 18)
réf. PI.494

À retourner accompagnée de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI** Je commande des numéros de Pour la Science, à l'abonnement en 5 sites

1 / JE RÉPORTE CI-DESSOUS LES PRÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €
2^e réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €
3^e réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €
4^e réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €
5^e réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €
6^e réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €

TOTAL À RÉGLER : 59,40 €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/07/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

nos services et grandes et de vos choix en matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom :
Prénom :
Adresse :
Code postal Ville :
Téléphone
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science
☐ Carte bancaire
N°
Date d'expiration
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)
Signature obligatoire :

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR

BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul

P.86 Art & science

P.88 Idées de physique

P.92 Chroniques de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

P.98 À picorer

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

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.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite

et chercheur au
laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)



Jean-Paul Delahaye a notamment publié : **Les mathématiques se plient au jeu**, une sélection des chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

L'usage des nombres réels en physique et plus généralement dans les sciences a pour origine la géométrie, avec sa conception idéalisée des points d'une droite, d'un plan ou de l'espace. Les nombres réels, dont la structure constitue ce qu'on dénomme « le continu », possèdent de formidables propriétés. En voici quatre.

Entre deux nombres réels x et y , tel que $x < y$, il y a toujours le nombre réel $(x + y)/2$ et une infinité d'autres, dont tous ceux donnés par la formule $(nx + my)/(n + m)$ où n et m sont deux entiers positifs :

$$x = (nx + mx)/(n + m) \\ < (nx + my)/(n + m) < (ny + my)/(n + m) = y.$$

– Si une suite de nombres réels $x_1, x_2, x_3, \dots$ est croissante et majorée (tous les x_i sont inférieurs à un nombre fixé M), alors elle converge vers une limite qui est un nombre réel. Cette propriété permet de savoir qu'il existe un nombre réel x dont le carré est 2; on le note $\sqrt{2}$. Cette seconde propriété est importante, car la première propriété qu'ont aussi les nombres rationnels (les quotients de deux entiers) ne permet pas de démontrer qu'un tel nombre existe; d'ailleurs, $\sqrt{2}$ n'est pas un nombre rationnel.

– Les opérations d'addition et de multiplication entre nombres réels ont des propriétés simples et bien commodes, qui en font ce que les mathématiciens nomment un « corps ». On a ainsi $x + y = y + x$, $x(y + z) = xy + xz$ et bien d'autres égalités utiles.

– La relation d'ordre sur les nombres réels est totale, c'est-à-dire que deux nombres

distincts x et y étant donnés, l'un domine l'autre: on a soit $x < y$, soit $y < x$.

Ces propriétés ont servi de base pour le calcul différentiel et les réels constituent un outil commode pour représenter l'espace physique (chaque point est déterminé par trois nombres réels), pour décrire le temps, les masses, les vitesses, et plus généralement les grandeurs physiques: on formule les lois de la nature en utilisant les nombres réels. La plupart des physiciens utilisent ces nombres sans se poser de question. Pourtant, ils créent une situation insatisfaisante sous plusieurs aspects.

LES UNITÉS IGNORÉES ET LA PRÉCISION LIMITÉE

David Ruelle, membre de l'Académie des sciences, dit que les réels du physicien sont différents de ceux du mathématicien à cause de deux points de divergence grave:

« (a) Les nombres utilisés en physique ont une dimension. Cela signifie qu'ils correspondent à une mesure faite en une unité donnée, par exemple le centimètre pour une longueur, le degré Celsius ou le kelvin pour une température, le centimètre par seconde pour une vitesse, etc. [...] Une formule physique qu'un mathématicien considérerait convenable pourrait être fermement rejetée par un physicien pour une incorrection concernant les unités. (b) Les nombres utilisés en physique ne peuvent être définis qu'avec une précision limitée, car ils proviennent de mesures opérées en utilisant une unité qui n'est définie qu'avec une précision limitée et dans le cadre de théories à l'application

CE QUI N'A PAS DE SENS POUR UN PHYSICIEN

Les nombres réels utilisés en physique ont des propriétés que les mathématiciens jugent

pourtant, n'ont pas vraiment de contrepartie physique. En voici quelques illustrations.

On mesure les distances et les durées avec des nombres réels, alors que ceux-ci ne sont jamais connus qu'avec une précision finie (rarement plus de 10 décimales). Les autres décimales, en quelque sorte cachées, ont-elles un sens ? Ce n'est pas certain, mais alors pourquoi se référer au continu des nombres réels pour parler de distance et de durée ?

L'ensemble des nombres réels n'est pas dénombrable, ce qui signifie, tout simplement, que l'intervalle des nombres réels entre 0 et 1 : on ne peut pas mettre les entiers en correspondance un à un avec ces nombres. Cette propriété des nombres réels, importante pour les mathématiciens, n'a aucune traduction en physique.

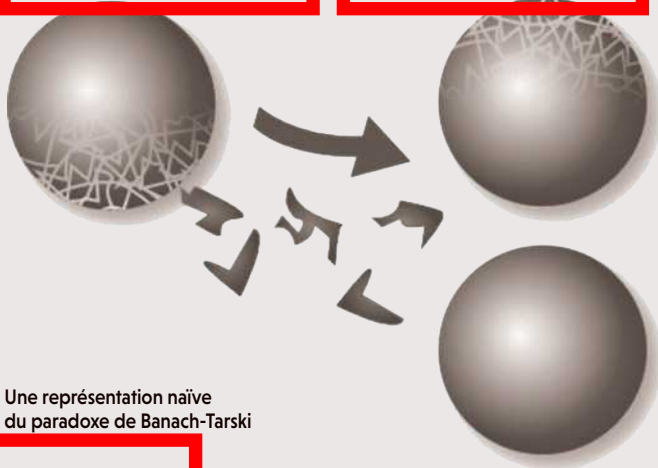
L'axiome du choix implique qu'à toute collection E d'ensembles non vides, par exemple $E = \{ \{a, b\}, \{a, b, c\}, \{b, c\} \}$,

correspond au moins un ensemble de choix C ayant un élément commun avec chaque ensemble de E . L'axiome paraît évident, mais il engendre des situations gênantes. Pour notre exemple, $C = \{2, b, z\}$ convient. Cependant, à partir de l'idée que l'espace est défini par des triplets de nombres réels, on déduit de l'axiome du choix qu'une boule de rayon 1 se décompose en cinq ensembles de points, que l'on peut déplacer sans les déformer pour recomposer deux boules de rayon 1. Ce paradoxe de la multiplication miraculeuse des boules, nommé « paradoxe de Banach-Tarski » (voir www.madore.org/~david/math/bantar.pdf), n'a évidemment aucune traduction dans le monde physique et il s'oppose à l'intuition la plus élémentaire que nous avons de l'espace et à la loi de conservation de la masse.

L'espace mathématique de la géométrie euclidienne s'étend infiniment loin, alors que les physiciens et cosmologistes n'affirmeront rien de définitif sur cette question pour l'espace physique.



Stefan Banach (1892-1945) était un mathématicien polonais. Ses travaux ont surtout porté sur l'analyse fonctionnelle, dont il est l'un des fondateurs.



Une représentation naïve du paradoxe de Banach-Tarski



Alfred Tarski (1901-1983) était un logicien et philosophe polonais. Il a vécu et travaillé aux États-Unis depuis le début de la seconde guerre mondiale, en 1939.

limitée. Il s'ensuit que l'affirmation mathématique «un nombre réel est rationnel, ou irrationnel» n'a pas de sens pour un physicien.»

Ajoutons qu'un mathématicien accorde une grande importance à l'idée que l'infinité des nombres réels est plus grande que l'infinité des nombres entiers et des nombres rationnels, alors que pour le physicien cela ne correspond à rien de concret.

UNE PHYSIQUE ÉLÉGANTE, MAIS INEXACTE!

Le physicien et mathématicien Roger Penrose, professeur émérite à l'université d'Oxford, exprime aussi ses doutes: «Les nombres réels se réfèrent à une idéalisation mathématique plutôt qu'à une quantité physique objective et réelle. Le système des nombres réels n'a la propriété, par exemple, qu'entre deux >

2

LA QUESTION
DU DÉTERMINISME

La mécanique classique est généralement considérée comme déterministe. L'idée de ce déterminisme a été magistralement exprimée par Pierre-Simon de Laplace :

« Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, seraient présents à ses yeux. »

Selon Nicolas Gisin, ce déterminisme provient d'une utilisation trompeuse des nombres réels. Ce physicien de l'université de Genève propose de considérer que les nombres réels décrivant l'état initial d'un système physique ne sont fixés que partiellement (c'est-à-dire avec quelques chiffres significatifs) et que ce n'est que plus tard, au cours de l'évolution du système, que les chiffres donnant plus de précisions se déterminent progressivement, et cela d'une manière aléatoire. Cette version non déterministe de la mécanique classique est empiriquement équivalente à la version usuelle. Symétriquement, Nicolas Gisin insiste sur l'existence de versions déterministes non réfutées de la mécanique quantique, théorie que l'on considère en général comme intrinsèquement indéterministe. Finalement, pour lui et d'autres philosophes des sciences, la question du déterminisme n'est pas une question scientifique.

> quelconques d'entre eux, si proches soient-ils, il en existe un troisième. Si nous continuions à diviser l'intervalle physique entre deux points, nous atteindrions finalement des échelles si petites que le concept même de distance cesserait d'avoir du sens. On considère qu'à l'échelle de la gravitation quantique, environ $1/10^{26}$ de la taille d'une particule subatomique, ce serait le cas. [...] Les nombres réels sont choisis en physique pour leur utilité mathématique, leur simplicité et leur élégance, et aussi parce qu'ils s'accordent sur un grand intervalle avec les concepts physiques de distance et de temps, [...] mais ils ne sont pas en accord avec les concepts physiques sur toutes les échelles.»

LA CARTE N'EST PAS LE TERRITOIRE

Toutefois, pour le physicien et philosophe des sciences français Hervé Zwirn, la difficulté est levée quand on distingue ce que l'on représente et ce qui est représenté : le modèle mathématique n'est pas la réalité modélisée. Il ajoute : « Les nombres réels ne sont pas des objets

physiques qui existent dans l'espace, ils ne sont que des modes de représentation qui permettent de se référer à des objets physiques. » Pour lui, il n'y a donc pas de problème grave lié à l'utilisation des nombres réels en physique.

Cependant, en utilisant les nombres réels en physique, on opère une surreprésentation de la réalité : les concepts mathématiques utilisés sont bien plus riches en information que ne l'est la réalité visée. D'habitude, c'est le contraire ! On modélisera par exemple un réseau routier par un graphe mathématique qui contient moins d'informations que le réseau véritable. De même, les neurones formels sont des simplifications discrètes et finies de la complexité biologique des neurones biologiques.

Récemment, Nicolas Gisin, physicien à l'université de Genève, a dénoncé l'une des conséquences de l'utilisation des nombres réels en physique.

On oppose souvent la mécanique classique et la mécanique quantique en affirmant que la première est déterministe alors que la seconde



Pierre-Simon, marquis de Laplace (1749-1827), portrait de Jean-Baptiste Paulin Guérin.



TOUS LES CHIFFRES IMPORTENT

En physique classique, on utilise des nombres réels pour représenter les variables physiques. On considérera

par exemple la fonction continue f vérifiant $f(x) = 2x$ si x est compris entre 0 et $1/2$, et $f(x) = 2(1-x)$ si x est compris entre $1/2$ et 1, pour représenter

l'évolution de la coordonnée longitudinale d'un point quand on applique la transformation du boulanger à une pâte qui est allongée puis repliée en deux sur elle-même de manière répétée (on itère l'application de la fonction f à la coordonnée initiale).

L'étude de cette transformation détermine si illustre l'importance de tous les chiffres du nombre réel x dominant la coordonnée d'un point

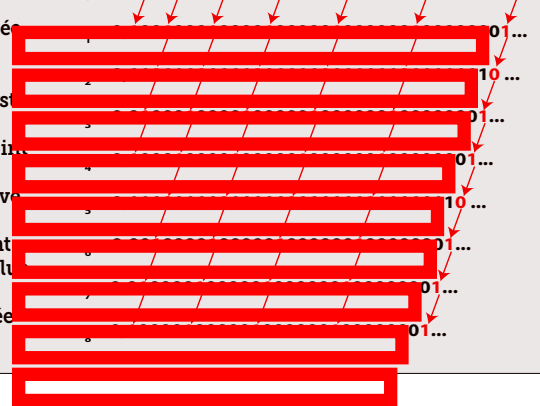
initial quand on suit sa position lors de la manipulation répétée du boulanger. On observe le phénomène de la « montée des chiffres » : les chiffres les plus loin dans le développement en base 2 de x prennent progressivement de plus en plus d'importance en s'approchant de la virgule. Prenons par exemple pour coordonnée initiale le nombre x_0 , qui, écrit en base 2, est

$x_0 = 0,01001000100001000001000000100000001...$

La suite des nombres $x_n = f(x_{n-1})$ donnant

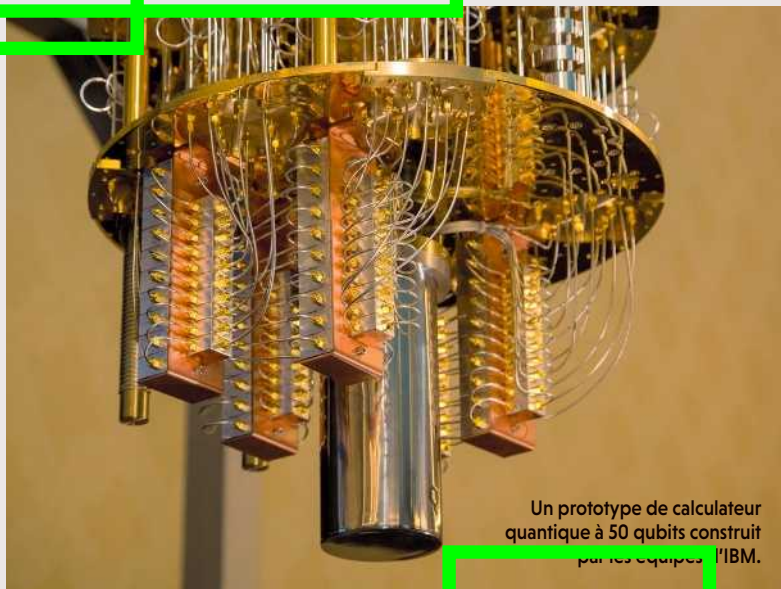
sa position quand on applique successivement la transformation du boulanger est représentée ci-dessous.

$x_0 = 0,01001000100001000001000000100000001...$



4

LES CALCULATEURS QUANTIQUES



Un prototype de calculateur quantique à 50 qubits construit par les équipes IBM.

Depuis vingt-cinq ans, on mène des travaux sur les systèmes de calcul quantique. Ceux-ci, en théorie, seraient capables de calculer plus rapidement

Ils utilisent des bits quantiques, ou qubits, au lieu de bits. L'idée repose sur la possibilité de mener, grâce à la superposition quantique, des calculs parallèles en grand nombre et revient à considérer qu'il n'y a pas de limite à l'exactitude de la théorie quantique, même quand elle contredit le principe de densité finie de l'information, lui-même lié à la méfiance que les nombres réels doivent nous inspirer.

L'objectif de la « suprématie quantique » est de mener avec un

ordinateur quantique un calcul

impossible avec un ordinateur classique. Il aurait récemment été atteint par Google, mais l'exploit est contesté par les chercheurs d'IBM. Même si l'objectif est atteint, des chercheurs font remarquer que les méthodes envisagées ne produiront rien d'utile, car elles concernent des calculs spécialisés de densités de probabilité qui n'ont pas d'intérêt pratique. Nul n'a prouvé que les recherches concernant les ordinateurs quantiques n'aboutiront pas, mais divers spécialistes, dont Sabine Hossenfelder, physicienne

théoricienne à l'institut d'études avancées de Francfort, expliquent qu'il faut rester prudent. Elle conclut : « Quand verrons-nous un ordinateur quantique avec des millions de qubits ? Personne ne sait. Le problème est qu'il est peu probable que les approches dominantes à l'heure actuelle puissent s'adapter pour changer d'échelle. [...] On ne sait pas comment dépasser quelques centaines de qubits. C'est à la fois un problème d'ingénierie et un problème de coût. Cela explique pourquoi, ces dernières années, on a beaucoup parlé des ordinateurs NISQ (*noisy intermediate scale quantum computers*). Il s'agit en réalité d'un terme inventé pour faire croire aux investisseurs que l'informatique quantique aura des applications pratiques au cours des prochaines décennies. Même s'il est possible qu'on sache prochainement faire fonctionner des NISQ, personne ne sait en tirer quelque chose d'utile. Je ne suis pas très optimiste sur le fait que les ordinateurs quantiques auront bientôt des applications pratiques. Je crains que l'informatique quantique ressemble à la fusion nucléaire ; c'est-à-dire qu'elle reste toujours prometteuse, mais ne fonctionne jamais vraiment. »

> plus vite que la lumière, il semble que les physiciens soient prêts à reconnaître qu'un volume fini d'espace ne peut pas contenir une quantité infinie d'informations.

Les informaticiens Pablo Arrighi, de l'université d'Aix-Marseille et Gilles Dowek, de l'Inria et de l'ENS Paris-Saclay, défendent cette idée d'un principe de densité finie d'information et considèrent qu'il devrait être affirmé clairement, comme celui de la vitesse limitée.

UNE DENSITÉ FINIE D'INFORMATION

Bien sûr, un tel principe empêcherait de croire que la position d'une particule et sa vitesse soient déterminées par des nombres réels dont l'infinité de décimales contient potentiellement une infinité d'informations. Pablo Arrighi et Gilles Dowek proposent une expérience de pensée : « Imaginons une quantité infinie d'informations exprimée sous la forme d'une suite illimitée de 0 et de 1 ; nous pouvons voir cette séquence comme les chiffres d'un nombre réel et écarter les mâchoires d'un pied à coulisse d'une distance correspondant à ce nombre. Cela placerait une quantité infinie d'informations dans un volume fini. Bien sûr, nous avons tous appris que cette idée est absurde et que la distance entre les mâchoires d'un pied à coulisse est fixée avec une précision finie de trois ou quatre chiffres. Il est surprenant que l'affirmation qu'une grandeur physique est toujours définie avec une précision finie n'ait jamais reçu le statut de principe en physique. »

L'idée de ce principe de densité finie d'information, si on savait le rendre précis, aurait une incidence sur les pronostics que l'on fait concernant les capacités futures des ordinateurs quantiques. Le mode de fonctionnement de ces ordinateurs sur lesquels des recherches se poursuivent depuis plus de vingt-cinq ans est la superposition quantique : on obtient dans un volume fini d'espace une grande puissance de calcul en superposant les états quantiques d'un système qu'on fait calculer et qui mène plusieurs calculs en parallèle. Cette possibilité de superposer les calculs est envisagée sans limite et conduirait en théorie à pouvoir dépasser les capacités de calcul des systèmes fondés sur la physique classique.

On sait ainsi comment s'y prendre pour tirer de la mécanique quantique un algorithme fonctionnant en temps polynomial (c'est-à-dire rapidement) pour factoriser les nombres entiers. Cet algorithme conçu par l'Américain Peter Shor en 1995 n'a pas d'équivalent classique connu. Certains systèmes cryptographiques, dont le système RSA notamment utilisé pour les cartes bancaires, s'appuient sur la difficulté de la factorisation. On craint donc que leur sécurité soit mise prochainement en danger.

Pourtant, dès 2003, le logicien Leonid Levin, professeur à l'université de Boston, a exprimé

des réserves sur ce que l'on peut attendre des ordinateurs quantiques. Pour lui, croire aux pouvoirs colossaux des ordinateurs quantiques, c'est croire à la possibilité de la manipulation physique de nombres comportant une très grande quantité de décimales, et c'est donc presque croire à l'existence physique des nombres réels et à la capacité de placer dans un espace fini une quantité illimitée d'informations.

À propos de la mise en œuvre de l'algorithme de Shor, Leonid Levin écrivait : « Le problème majeur réside dans l'idée que les équations quantiques de base restent valides avec plusieurs centaines, voire plusieurs millions, de décimales, car c'est là que résident les chiffres significatifs des amplitudes quantiques pertinentes. Or nous n'avons jamais vu de loi physique valable sur plus d'une dizaine de décimales et, en physique, la prise en compte de nouvelles décimales supplémentaires exige en général de repenser et approfondir les concepts de base d'une théorie ».

Pablo Arrighi insiste au sujet de la mécanique quantique sur la séparation en deux du principe de densité finie d'information : il y a d'un côté l'idée qu'il serait impossible que trop de qubits (bits quantiques) soient présents dans un même dispositif contenu dans un volume fini, et il y a de l'autre l'affirmation des limites aux nombres de décimales des nombres réels utilisés par nos théories (y compris la mécanique quantique).

Aujourd'hui, la réalisation d'ordinateurs quantiques progresse et on réussit avec eux à factoriser des entiers de 7 chiffres. Le nombre 56153 a ainsi été factorisé par un système quantique, avec pour résultat 233×241 . Le record atteint en 2018 semble être $4088419 = 2017 \times 2027$. Reste que les ordinateurs classiques sont pour l'instant bien supérieurs aux ordinateurs quantiques; par exemple, ils factorisent assez facilement des entiers de 100 chiffres. Les lents progrès du côté quantique ne font qu'augmenter la crainte pour la cryptographie dans l'immédiat. Un rapport de l'Académie des sciences des États-Unis paru en 2019 (voir la bibliographie) décrit la situation des recherches en calcul quantique; il est venu refroidir l'enthousiasme excessif des médias en indiquant par exemple qu'il n'y a rien à craindre en cryptographie, au moins pour les dix années à venir.

Même si l'on ne peut pas statuer sur l'objection de Leonid Levin, peut-être faut-il s'interroger sur le principe de densité finie d'information : concerne-t-il la mécanique quantique et sous quelle forme précisément?

Puisque les nombres réels utilisés en physique sont dangereux et sources d'illusions, comment les éviter?

Du côté des mathématiques, plusieurs options se présentent. Plutôt que d'utiliser des nombres réels, on pourrait n'utiliser que des nombres rationnels (nombres quotients de deux

entiers). Il serait gênant cependant de ne plus avoir le nombre $\sqrt{2}$!

On pourrait agrandir un peu cet ensemble de nombres en ajoutant tous les nombres algébriques, qui sont les solutions d'équations polynomiales à coefficients entiers. Notre $\sqrt{2}$ serait alors un nombre acceptable... mais pas le nombre π qui est non algébrique (transcendant). On pourrait considérer tous les nombres calculables, c'est-à-dire définissables par algorithmes. Cette fois, π serait dans le corps de ces nombres calculables, qui est dénombrable : il y a autant d'éléments qu'il y a de nombres entiers. Le corps des nombres calculables a d'assez bonnes propriétés et on a étudié sérieusement l'idée d'en faire une base pour la physique, par exemple dans le livre *Computability in Analysis and Physics*, de Marian Pour-El et Ian Richards (Cambridge University Press, 1989 et 2013).

Hélas, avec ces approches, il reste vraiment qu'entre deux nombres, il y en a toujours une infinité d'autres. Il n'y a pas non plus de limite à la quantité d'informations contenue dans ces nombres. De plus, l'analyse mathématique que l'on construit avec eux est sensiblement plus compliquée que l'analyse classique. D'où un faible intérêt de la part des physiciens.

LIMITER L'USAGE DES NOMBRES RÉELS?

Du côté des physiciens, diverses approches qui limitent l'usage des nombres réels ont été tentées. La plus importante est sans doute la théorie de la gravitation quantique à boucles dont Carlo Rovelli, à l'université de Marseille, est un promoteur (voir *Pour la Science de juin 2019*). La théorie résulte de la volonté de concilier la notion d'espace-temps de la relativité générale et la mécanique quantique. Elle propose avec sérieux l'idée d'un espace discret. Le formalisme mathématique des réseaux de spin, des graphes portant localement une information finie et dont les nœuds forment l'espace, évite en un sens les volumes finis ayant une densité infinie d'information. Il constitue donc un bon début de réponse aux problèmes évoqués, même si ce n'est pas le but principal de la théorie.

Une conséquence de cette conception de l'espace est qu'en se contractant, les trous noirs finiraient, à cause de la non-divisibilité infinie de l'espace, par rebondir et devenir des trous blancs (voir *Pour la Science d'août 2019*), que l'on tente aujourd'hui d'observer.

Disposerons-nous bientôt d'une théorie utilisable et efficace, proposant des outils mathématiques raisonnables pour modéliser la réalité physique et évitant les pièges des modèles à contenus excessifs d'informations? Nous l'ignorons, mais ce n'est pas impossible. Et dans ce cas, cela prouverait le bien-fondé des soucis que ressentent de nombreux physiciens et philosophes. ■

BIBLIOGRAPHIE

Quantum computing. Progress and prospects, National Academies Press, 2019 (<https://doi.org/10.17226/25196>).

N. Gisin, Indeterminism in physics, classical chaos and Bohmian mechanics. Are real numbers really real?, David Bohm Centennial Symposium, London, Oct. 2017, 2019 (<https://arxiv.org/pdf/1803.06824.pdf>).

P. Arrighi et G. Dowling, The principles of a finite theory of information, dans H. Zenil, *Irreducibility and Computational Equivalence*, Springer, pp. 127-134, 2015.

C. Rovelli et F. Vidotto, Covariant loop quantum gravity. An elementary introduction to quantum gravity and spinfoam theory, Cambridge University Press, 2014.

D. Ruelle, Are real numbers the same for physicists and mathematicians?, 2012 (<https://bit.ly/31rJ3SW>).

L. Levin, Polynomial time and extravagant models, Problems of Information Transmission, vol. 39 (1), pp. 92-103, 2003.

R. Penrose, L'esprit, l'ordinateur et les lois de la physique, Dunod, 1997.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

NOUS AURONS DES COQUELICOTS

Un jardin-mandala aux motifs inspirés des logos de compagnies agrochimiques met en valeur les «mauvaises herbes» devenues résistantes aux herbicides.

En octobre 2019, on apprenait que le nombre de requêtes visant le groupe allemand de chimie Bayer, via sa désormais filiale Monsanto, a explosé aux États-Unis. Plus de 43 000 procédures contre le glyphosate, l'herbicide vedette de la firme, et ses possibles effets cancérogènes ont été recensées. Parallèlement, les appels à l'abandon de tous les pesticides de synthèse se multiplient et s'intensifient. Par exemple, près d'un million d'individus ont signé celui de l'association Nous voulons des coquelicots. Nécessité fera peut-être loi, tant les herbicides semblent perdre peu à peu leur raison d'être.

En effet, depuis le milieu des années 1970 et les débuts du recours intensif aux pesticides, le nombre de «mauvaises herbes» résistantes aux herbicides employés à leur rencontre ne cesse de croître, de façon exponentielle. En 2019, l'International Survey of Herbicide Resistant Weeds en comptait 505 dans le monde, dont 52 en France. De ces plantes, l'artiste allemande Eva-Maria Lopez a fait le matériau de l'œuvre qu'elle présente dans le cadre de l'exposition OuVert au Transpalette, à Bourges.

Sous la houlette des commissaires Jens Hauser, chercheur à l'université de Copenhague, et Aniara Rodado, chorégraphe et doctorante à l'École polytechnique, l'événement met en scène plusieurs dizaines d'artistes qui s'attaquent à la grande tendance actuelle de *green washing*, cette volonté de tout «verdifier» en espérant ainsi compenser les dégâts faits à la nature par notre civilisation. C'est un malentendu, car le vert ne correspond qu'aux longueurs d'onde invisibles au végétal puisque simplement réfléchies. Prudence donc avec le vert! Ainsi,

Le jardin-mandala *We resist*, composé de plantes résistantes aux herbicides dont les motifs sont la fusion des logos de Bayer et de Monsanto.

Adam Brown, maître de conférences à l'université d'État du Michigan, met au cœur de son installation le pigment «vert de Paris», toxique car à base d'arsenic, très prisé aux XVIII^e et XIX^e siècles dans les papiers peints (et même les bonbons!) pour retrouver un semblant de nature dans les intérieurs des citadins au moment de la révolution industrielle.

Le vert privilégié par Eva-Maria Lopez est aussi à manier avec précaution. Que fait-elle exactement? Elle élabore des jardins-mandalas avec des plantes résistantes aux herbicides selon des motifs rappelant les différents logos des sociétés commercialisant ces produits. Celui





Croquis de l'un des jardins-mandalas du projet *I Never Promised You a Green Garden*, incluant les logos des sociétés Bayer, Monsanto, BASF, Syngenta...



installé à Bourges, nommé *We resist*, est une fusion des logos de Bayer et de Monsanto, en écho au rachat du second par le premier en juin 2018. La disposition du jardin, très symétrique, renvoie aux créations de l'architecte paysagiste français André Le Nôtre à qui l'on doit notamment le parc et les jardins de Versailles. Étonnamment, parmi les 14 espèces choisies, plusieurs ont des vertus médicinales. C'est le cas du bleuet *Centaurea cyanus*, de la camomille sauvage *Matricaria chamomilla*, du coquelicot *Papaver rhoeas*.

Toutes ces plantes ont acquis leur résistance dans des milieux fortement traités par des herbicides exerçant une

importante pression de sélection, comme des espaces urbains, des voies ferrées.

Les cas de résistance, détectés aujourd'hui dans près de 70 pays, concernent 157 principes actifs appartenant à 23 des 26 classes d'herbicides reconnus. C'est dire l'ampleur du phénomène. L'ivraie raide *Lolium rigidum*, une graminée annuelle abondante en Australie, résisterait à douze classes d'herbicides, un record.

Le jardin *We resist* s'inscrit dans un projet plus vaste intitulé *I Never Promised You a Green Garden* («Je ne vous ai jamais promis un jardin vert»), où des jardins de plus grande ampleur, incluant les logos d'autres sociétés, seront plantés. L'idée

est de sensibiliser le public à l'importance d'une flore diversifiée et d'une agriculture plus saine, conformément à l'appel de Nous voulons des coquelicots. De toute façon, avec les phénomènes de résistance qui essaient, nous en aurons! ■

Exposition «OuVert» au Transpalette, à Bourges, jusqu'au 18 janvier 2020.
Programme complet: www.perspective.ct.org



L'auteur a publié:
Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science...
(Belin, 2018)

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

DES VOLANTS PLEINS D'ÉNERGIE

On utilise depuis longtemps des volants d'inertie pour stocker de l'énergie. Ces dispositifs constituent aujourd'hui des alternatives crédibles aux batteries.

Qu'y a-t-il de commun entre un tour de potier datant de 8000 ans, les machines à vapeur du XIX^e siècle et les derniers modèles de véhicules de formule 1 ? Ces machines comportent toutes un volant d'inertie, dispositif qui stocke de l'énergie sous la forme d'énergie cinétique de rotation. Aujourd'hui, les volants d'inertie sont capables de délivrer des puissances bien plus importantes que les batteries électriques. Et outre le stockage d'énergie, on les utilise aussi pour réguler des fluctuations de puissance mécanique ou électrique. Comment fonctionnent-ils et quelles sont leurs limitations ?

POUR FAIRE ROULER UN BUS OU UNE FORMULE 1

Commençons par un exemple, celui des Gyrobus. Ces véhicules développés dans les années 1950 par la société suisse

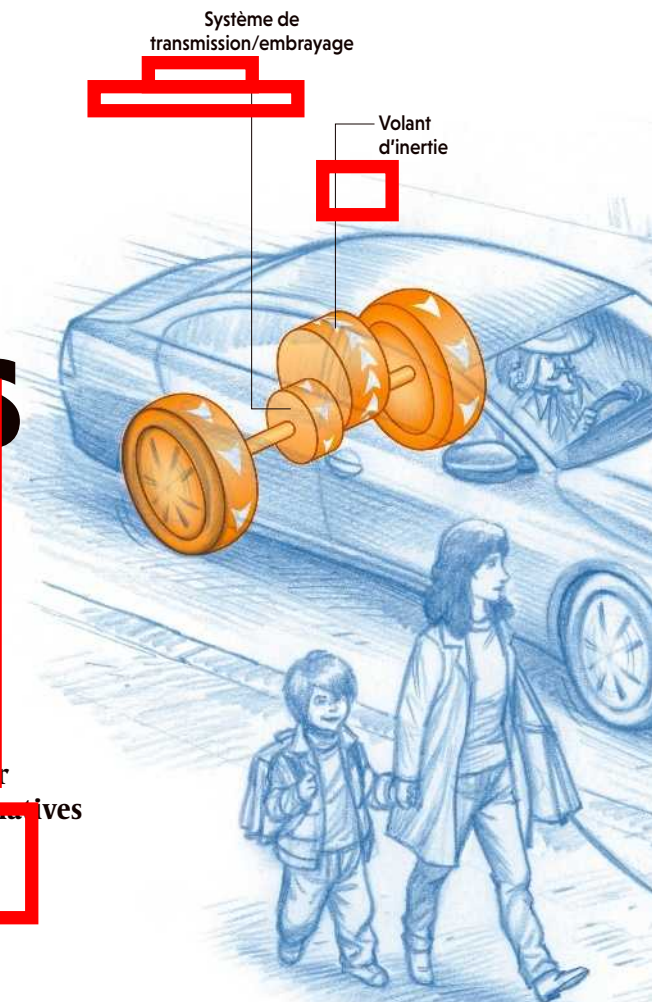
Oerlikon, ont été utilisés pendant environ sept ans dans quelques villes à travers le monde. Entre deux arrêts, leur seule source d'énergie pour se propulser était un volant d'inertie de 1,6 mètre de diamètre et d'une masse de 1,5 tonne tournant autour de son axe à une vitesse de 3000 tours par minute.

L'énergie cinétique de cette masse en rotation est égale à la moitié du produit du « moment d'inertie » – qui caractérise la répartition et l'éloignement de la masse autour de l'axe – par le carré de la vitesse de rotation. Elle est ici de 23 mégajoules, soit l'énergie mécanique délivrée par un moteur diesel consommant 1,5 litre de gazole. Durant le trajet, l'énergie stockée dans le volant était convertie en énergie électrique pour alimenter le moteur électrique du bus, ce qui lui procurait une autonomie de 6 kilomètres, tout adaptée au transport urbain.

En contrepartie, le volant ralentissait à mesure que le bus avançait. C'est

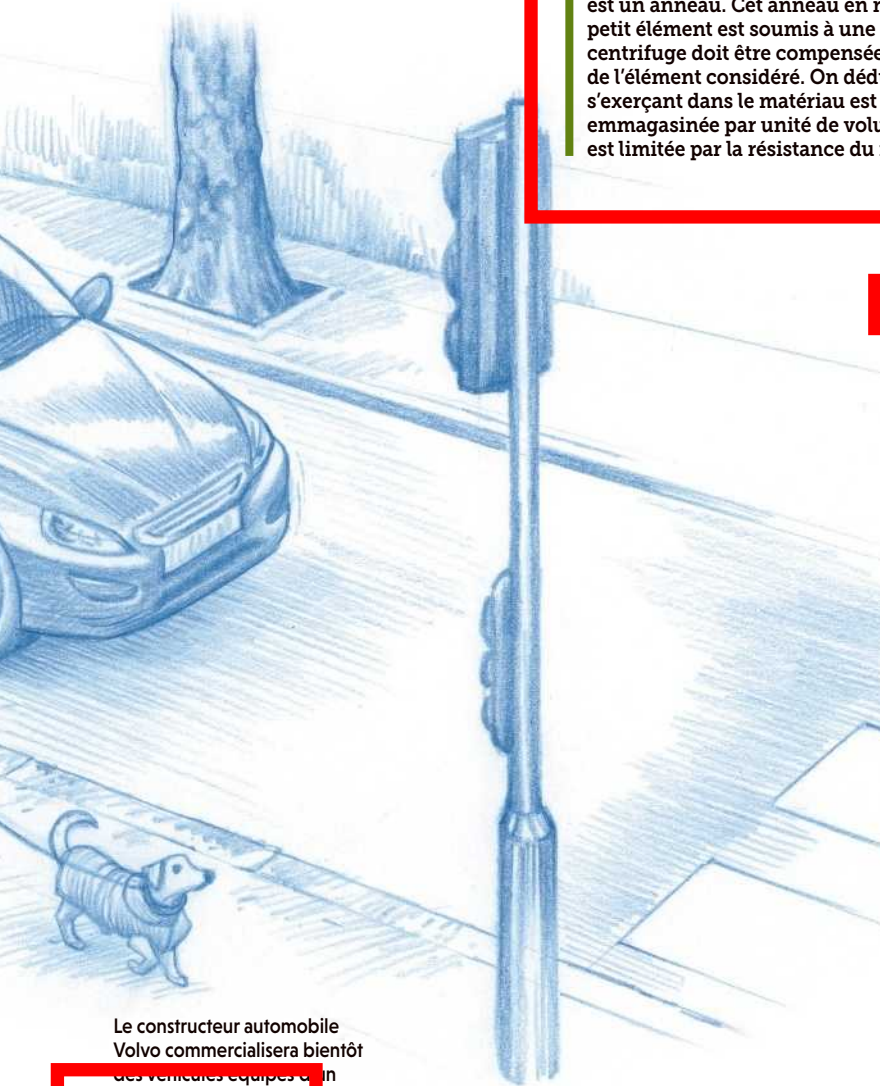
pourquoi, à certains arrêts, le bus se connectait à une borne électrique (déjà !) qui relançait le volant d'inertie jusqu'à sa vitesse maximale. La durée de la recharge (parfois de 3 à 4 minutes) et le danger potentiel que représentait cette roue massive tournant à grande vitesse ont conduit à l'abandon de ce système de propulsion.

En revanche, on retrouve de lourds volants d'inertie pour réguler les fluctuations rapides de production ou de consommation dans un réseau électrique. C'est par exemple le cas des centrales électriques construites par la société Beacon Power, aux États-Unis, qui



DU LASSO AU VOLANT D'INERTIE

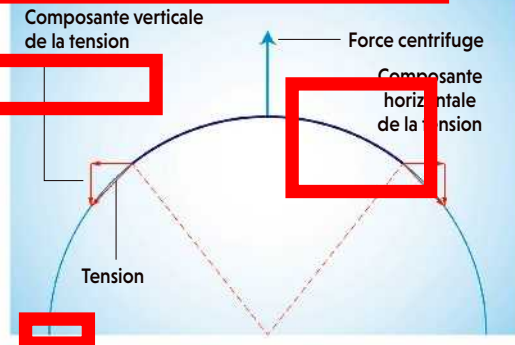
Pour comprendre les forces internes agissant dans un volant d'inertie en rotation, on peut raisonner de façon simplifiée en considérant le volant comme un cylindre formé d'un grand nombre de cylindres annulaires et concentriques très minces. On examine alors les forces au sein d'un tel cylindre annulaire, qui, vu de dessus, est un anneau. Cet anneau en rotation est similaire à la corde d'un lasso, dont chaque petit élément est soumis à une force centrifuge et à la tension de la corde. La force centrifuge doit être compensée par les tensions s'exerçant aux deux extrémités de l'élément considéré. On déduit de cette compensation que la contrainte de traction s'exerçant dans le matériau est égale au double de l'énergie cinétique de rotation emmagasinée par unité de volume du matériau, et donc que cette densité d'énergie est limitée par la résistance du matériau.



Le constructeur automobile Volvo commercialisera bientôt des véhicules équipés d'un volant d'inertie, comme le sont déjà des voitures de formule 1.

fournissant jusqu'à 20 mégawatts. Elles contiennent plusieurs dizaines de modules, dont chacun contient un rotor de 0,91 mètre de diamètre pesant 1,1 tonne et entraîné jusqu'à 16 000 tours par minute. Ces vitesses de rotation sont si élevées que l'ensemble est placé dans une chambre à vide et tenu par une suspension magnétique pour éviter tout contact direct. En fonctionnement, l'énergie de chaque module est de l'ordre de 30 kilowattheures, soit 100 mégajoules, et la puissance qu'il peut restituer est ajustable: de 50 kilowatts pendant 35 minutes en continu jusqu'à des pics de 180 kilowatts pendant 2 ou 3 minutes.

Ces dispositifs ont plusieurs avantages par rapport aux batteries. D'une part, les transferts d'énergie sont systématiquement plus rapides, pour une énergie disponible par unité de masse à peu près équivalente (50 à 100 wattheures par kilogramme). D'autre part, ces dispositifs se détériorent moins vite que les batteries lors des cycles de charge et de décharge, d'où une durée de vie supérieure (plus de 100 000 cycles, contre moins de 10 000 pour une batterie). Enfin, l'impact environnemental est faible, les matériaux utilisés étant bien moins toxiques que ceux des batteries électrochimiques.



Comment adapter ces systèmes à des utilisations embarquées où l'on doit viser la légèreté? Comme on ne peut pas augmenter la masse, il suffit de faire tourner plus vite! Une fois réglés les délicats problèmes de vibrations et d'équilibrage, reste un élément limitant: la cohésion de la matière, puisque la force centrifuge, si elle est trop intense, disloquera le matériau.

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

> Regardons ce qui se passe pour un anneau mince en rotation (une analyse plus générale aboutirait à la même conclusion). Pour comprendre la nature des contraintes mécaniques dans le matériau, une bonne image est celle du lasso avec sa corde en forme d'anneau (voir l'encadré page précédente). À cause de la rotation, chaque petit morceau de la corde subit une force centrifuge, dirigée vers l'extérieur, proportionnelle au produit du rayon de l'anneau par le carré de la vitesse de rotation. Cependant, la forme de la corde est déterminée par la tension qui y règne tout du long. En imposant l'équilibre des forces centrifuge et de tension, on détermine cette dernière ainsi que la contrainte dite « de traction », homogène à une pression, qui s'exerce dans la corde.

RÉSISTANCE DU MATÉRIAU À LA TRACTION

On trouve que la contrainte de traction est égale au produit de la masse volumique du matériau par le carré de la vitesse, c'est-à-dire à deux fois la densité volumique d'énergie cinétique. Il s'ensuit qu'à volume donné, l'énergie maximale stockable dans un anneau en rotation (et plus généralement un volant d'inertie) est limitée par la contrainte de traction maximale que supporte le matériau, donc par sa résistance mécanique. Elle ne dépend pas, ce qui est inattendu, de la masse volumique ou de l'inertie (la masse) du volant.

Il est ainsi avantageux d'utiliser un matériau d'une bonne résistance mécanique et peu dense, auquel on pourra imprimer une rotation plus rapide qu'avec un matériau plus dense. On préférera donc la fibre de carbone (1,6 tonne par mètre cube), qui résiste à une contrainte de 4900 mégapascals, à l'acier (8 tonnes par mètre cube), qui cède à 1450 mégapascals : les densités d'énergie maximale sont de 3 mégajoules par kilogramme pour la fibre de carbone et de 0,18 mégajoule par kilogramme pour l'acier.

ET AU CISAILLEMENT

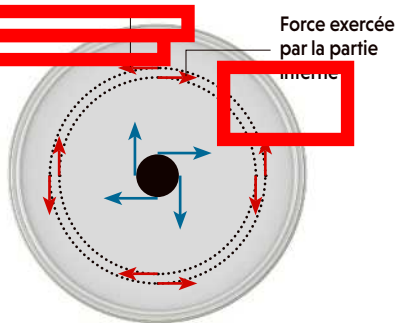
Pourquoi alors ne pas utiliser exclusivement de la fibre de carbone, légère et résistante ? Parce qu'il faut exercer un couple important sur le volant pour l'accélérer ou le freiner. Cela se fait à partir de l'axe central, chaque couronne du volant exerçant sur la couronne suivante, vers l'extérieur, une force qui la met en mouvement, et ainsi de suite de proche en proche. Cela se traduit par l'apparition, dans tout le volume du volant, d'une autre contrainte, dite de cisaillement, qui

CISAILLEMENT DANS LE VOLANT

L'accélération ou le freinage d'un volant d'inertie s'effectue en exerçant un couple sur son axe (flèches bleues). Les forces correspondantes se transmettent alors de proche en proche, de l'axe à la périphérie. Elles sont tangentielles et décroissent mesure que l'on s'écarte de l'axe. Il leur correspond une contrainte de cisaillement qui est maximale près de l'axe (on a représenté ici par des flèches rouges les contraintes de cisaillement s'exerçant sur une mince couronne cylindrique). C'est pourquoi on conçoit des volants d'inertie dont la partie centrale est en acier, bien résistant au cisaillement, tandis que la partie périphérique est en matériau composite, bien résistant aux contraintes de traction (qui augmentent avec la distance à l'axe).



Force exercée par la partie
externe à la couronne



est maximale près de l'axe et qui diminue jusqu'à s'annuler à la périphérie (voir l'encadré ci-dessus).

Or les matériaux composites résistent bien à la traction, mais très mal au cisaillement. On conçoit donc des volants d'inertie dont la partie centrale est en acier, pour un transfert efficace de puissance entre l'axe et la roue, tandis que cette partie centrale est entourée d'un matériau composite résistant bien aux contraintes de traction et supportant donc des vitesses de rotation très élevées.

Les volants rapides les plus performants ont ainsi une densité d'énergie maximale de 0,7 mégajoule par kilogramme, bien supérieure à celle de l'acier et désormais comparable à celle des batteries au lithium-ion. C'est le cas des volants d'inertie conçus en 2006 et destinés aux voitures de formule 1 pour récupérer l'énergie lors des freinages et la redonner lors des accélérations.

Par exemple, dans un modèle de chez Flybrid, un cylindre de 20 centimètres de diamètre, en acier et en fibre de carbone, tourne à 64500 tours par minute et emmagasine près de 0,6 mégajoule. Ces performances sont en fait limitées par le règlement de la formule 1, qui interdit aux volants d'inertie de dépasser une puissance de 60 kilowatts. On envisage cependant leur utilisation dans les voitures de tourisme dès 2020. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. E. Amiryarek et R. Pullen, *Energy storage systems, technologies and their application*, Applied Sciences, vol. 7(3), article 286, 2017.

M. Hedlund et al., *Hybrid energy storage for automotive applications*, Energies, vol. 8(10), pp. 10636-10663, 2015.

M. Krack et al., *Robust design for high speed flywheel energy storage systems*, in R. Carboni (dir.), *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids*, InTech, 2011.

n° 34 : décembre 2019

Le moustique tigre histoire d'une conquête



Vente en kiosque,
par abonnement
et par correspondance

Sur notre nouveau site

especes.org

vous pouvez désormais

commander nos numéros,

consulter les sommaires,
les compléments d'articles,
les actualités de la revue...



La revue de vulgarisation scientifique
entièrement dédiée aux sciences
de la vie et de la Terre

Revue trimestrielle publiée
par l'association Kyrnos publications
association.kyrnos@gmail.com

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

L'IMPÉNÉTRABLE VENIN DU SERPENT À SONNETTES

Les crotales de Mojave, une espèce américaine de serpent à sonnettes, n'ont pas toujours le même venin, sans que l'on sache vraiment quels sont les critères de sa sélection...

Les recherches menent parfois les scientifiques vers des contrées inattendues. Qui aurait pensé que la recherche médicale sur les venins des serpents conduirait les biologistes vers une curiosité de l'évolution? C'est pourtant ce qui s'est produit lorsqu'il s'est intéressé aux venins des serpents à sonnettes.

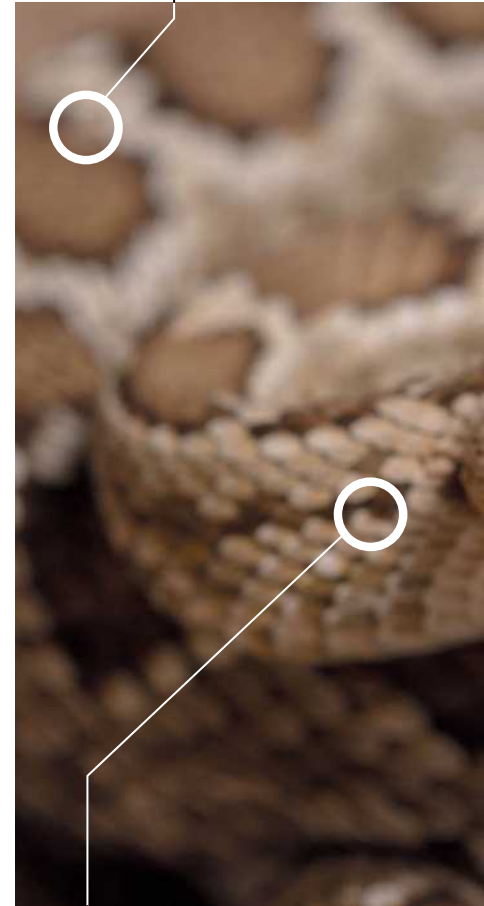
Depuis longtemps, on étudie les venins afin de produire des antidotes en cas de morsure. De plus, depuis une vingtaine d'années, on sait que certains de leurs molécules ont des actions très spécifiques sur la communication entre neurones. Diverses équipes les utilisent donc aussi pour progresser dans la compréhension des mécanismes moléculaires de la transmission nerveuse.

Dans ce contexte, les crotales (ou serpents à sonnettes), des vipérids du

continent américain, sont très étudiés, car ce sont eux qui infligent les principales morsures. En effet, dotés de robustes crochets, ils inoculent de puissants venins constitués de plusieurs dizaines de molécules toxiques, avec une relativement grande variabilité. En les examinant, les biologistes ont découvert que, chez les crotales, il existe deux grands types de venins, correspondant à deux stratégies de morsure. Le venin de type A, hautement létal, est caractérisé par la présence de phospholipases A₂, des enzymes neurotoxiques qui agissent très rapidement en paralysant la proie. Le venin de type B, moins toxique, contient des métalloprotéinases, des enzymes qui ont une activité protéolytique et hémorragique.

La distribution de ces types de venins dans la phylogénie des crotales (l'arbre de parenté des différentes espèces) est

La « sonnette » est appelée cascabelle. À chaque mue (entre une et trois fois par an), un anneau y est ajouté.



Les crotales de Mojave (à ne pas confondre avec les crotales d'Amérique) sont parmi les serpents les plus venimeux, mais leur morsure est moins douloureuse que celle des autres espèces nord-américaines.



Hervé Le Guyader
a récemment publié :
**L'Aventure de
la biodiversité**
(Belin, 2018).

EN CHIFFRES

41

On connaît 41 espèces de crotales.
Elles vivent toutes en Amérique.

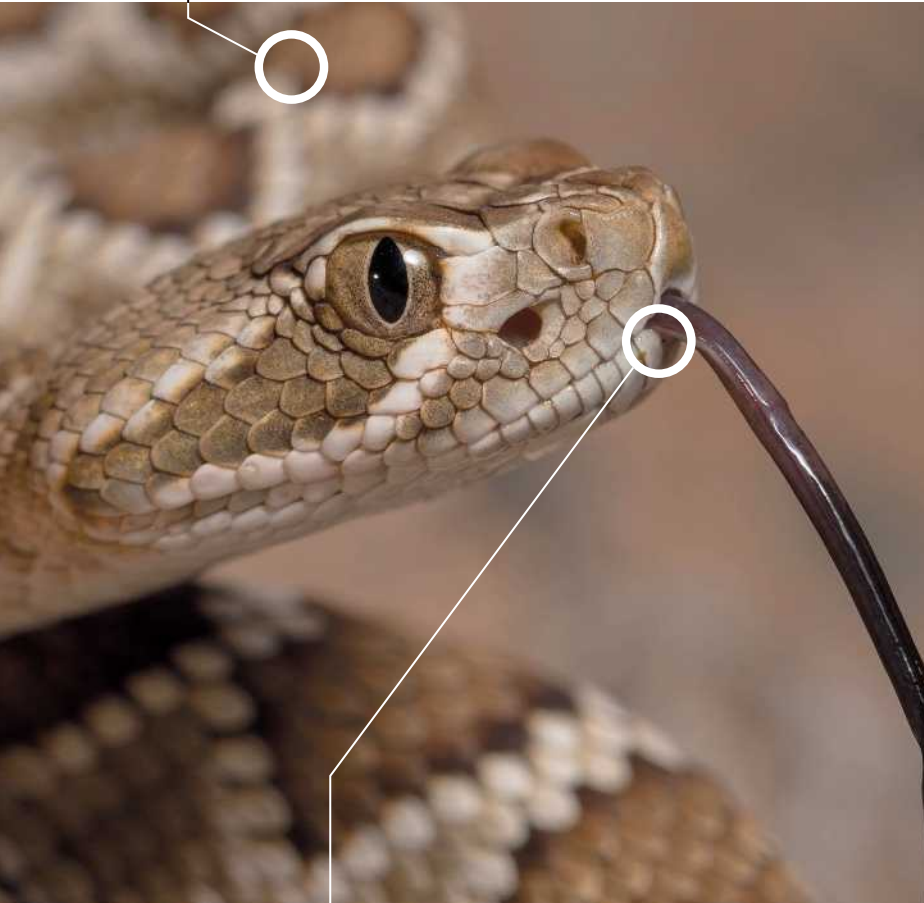
96

Dans le venin de type A,
on a répertorié 96 gènes codant
des protéines (contre 100 de type B).

ENVIRON
0,3 MG/KG

La dose létale chez la souris est
de 0,22 à 0,46 mg/kg pour le venin A
et 2 à 6 mg/kg pour le venin B.
En général, une morsure suffit
à tuer la souris, que le crocodile injecte
le venin A, le B ou un mélange des deux.

Les femelles sont
vivipares. Elles portent
entre 2 et 17 petits.



Les crotales de Mojave
à venin de type A
sont les crocodiles
plus robustes.

très irrégulière, deux espèces appa-
rues pouvant présenter des types diffé-
rents. On a tout d'abord pensé que chaque
espèce était homogène et que tous les
individus d'une même espèce avaient le
même type de venin. L'hypothèse, com-
munément admise était que ces venins
étaient corrélés aux proies, le type A ap-
partenant pour les petits mammifères, le type B
plutôt pour les lézards. Mais le crocodile
de Mojave (*Crotalus scutulatus*) a brouillé
les cartes.

UN CROTALE, DEUX VENINS

Ce serpent américain est l'un de ceux
que les zoologistes étudient depuis

longtemps. Quelle n'a pas été leur sur-
prise de découvrir qu'à l'intérieur de cette
espèce, il pouvait y avoir des animaux à
types de venin différents! On distinguait
en effet des individus de type A, de type B,
et même de type A + B.

Sur des critères morphologiques, les
zoologistes avaient par ailleurs décrit
deux sous-espèces de crotales de Mojave:
C. s. salvini se trouve dans le Mexique tan-
dis que *C. s. scutulatus* est répartie plus au
nord. Tout naturellement, une équipe
américano-mexicaine, autour de
Christopher Parkinson, de l'université de
Clemson, en Caroline du Sud, s'est inté-
ressée à la structure des populations et a
recherché de possibles corrélations entre
les types de venins et l'environnement.
Les animaux se distribuent du nord au
sud suivant quatre populations distinctes
(voir l'encadré). Si la plus méridionale, de
la sous-espèce *salvini*, ne comprend que
des serpents de type A, les trois autres
populations sont hétérogènes. De plus,
celle qui borde la sous-espèce *salvini* com-
prend des individus de type A + B.

LE RÔLE DE LA TEMPÉRATURE

Très vite, l'équipe résout le problème
des animaux de type A + B. Ce ne sont pas
des serpents mieux outillés que les autres,
mais des hybrides qui ne présentent
aucun avantage sélectif (sinon, ils auraient



Crotale de Mojave
(*Crotalus scutulatus*)
Longueur : environ 1 m (max. 1,4 m)

> envahi la population). Reste l'énigme des populations de type A et de type B. Une étude fine de l'environnement révèle que le facteur le plus important est la température, le type B préférant un climat plus modéré. Mais le point le plus décisif concerne l'échelle géographique de l'étude. À part la sous-espèce *salvini*, chacune des trois autres populations est hétérogène : il faut donc aller à une échelle plus fine pour trouver la corrélation avec l'environnement. En d'autres termes, le type de venin est sélectionné à l'échelle de micropopulations. Mais à cette échelle, la température est-elle vraiment un critère de sélection ou seulement corrélée à un critère inconnu?

UN COMPLEXE DE GÈNES

Une autre équipe internationale, autour de Wolfgang Wüster, de l'université de Bangor, au Royaume-Uni, s'est tout récemment penchée sur ce problème. L'étude a d'abord porté sur la génomique. L'équipe a ainsi observé que la présence ou l'absence de 14 toxines est corrélée non pas à l'expression ou non de certains gènes, mais à la présence ou l'absence des gènes correspondant aux toxines. De plus, dans le génome, nombre de ces gènes sont liés et forment des complexes sur les chromosomes. Curieusement, ces liaisons sont détruites dans le génome des animaux de type A + B. La sélection naturelle aurait donc favorisé les gènes assemblés en complexe.

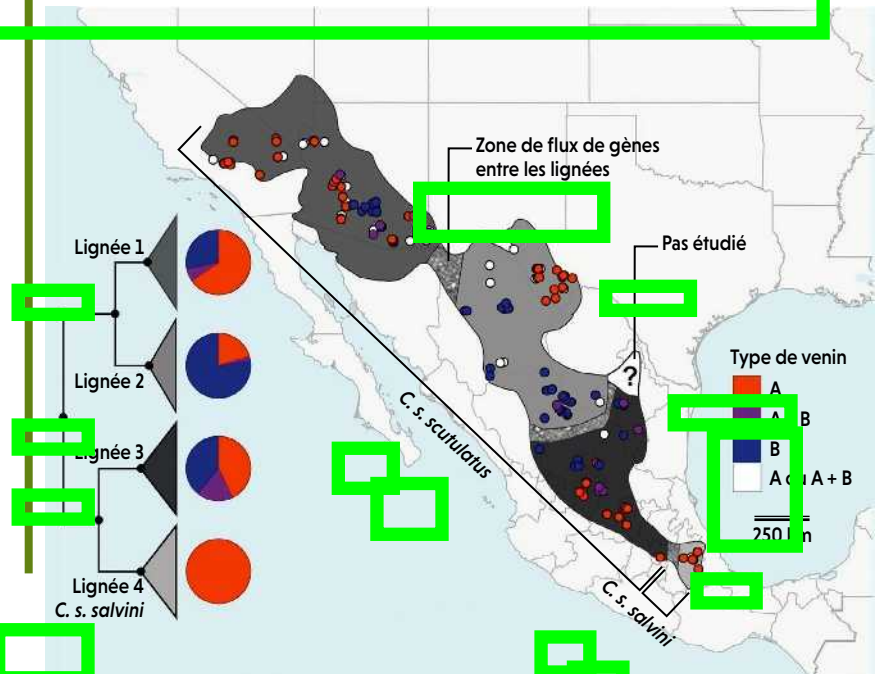
L'équipe de Wolfgang Wüster s'est aussi intéressée à l'hypothèse selon laquelle les deux types de venin seraient associés à des proies différentes. Elle a ainsi déterminé la composition des repas d'une cinquantaine de serpents. Ils se nourrissent majoritairement de rongeurs (78%), mais aucune corrélation n'apparaît entre le type de proie (rongeur ou lézard) et le type de venin.

ET TOUJOURS LA TEMPÉRATURE

Par ailleurs, l'équipe a recherché des corrélations avec des variables décrivant l'environnement et, comme celle de Christopher Parkinson, elle a observé que la température était le facteur déterminant. Son étude, plus fine, montre que les zones où vivent les animaux de type B sont caractérisées par de plus grandes fluctuations thermiques diurnes, des hivers plus doux et une moindre variation saisonnière des précipitations. Mais quelle est la véritable pression de sélection? Un ou plusieurs facteurs, à leur tour corrélés à la température? Les chercheurs

DES VENINS À LA CARTE

Si l'on rencontre les crotales de Mojave dans les zones désertiques allant du sud de la Californie et du Nouveau-Mexique jusqu'au sud du Mexique, la sous-espèce *C. s. salvini* n'apparaît qu'au Mexique, à l'extrême sud de l'aire de répartition. Plus au nord, trois lignées, séparées géographiquement, appartiennent toutes à la sous-espèce *C. s. scutulatus*. Mais alors que les serpents *salvini* ont tous un venin de type A (en rouge), les serpents *scutulatus* arborent des venins A, B (en bleu) ou A + B (en violet).



se trouvent dans une situation intellectuelle étonnante : du fait de l'hétérogénéité spatiale ainsi décrite, ils sont capables de prédire le type de venin des serpents... mais la véritable pression de sélection reste toujours un mystère.

Comment résoudre le problème? Une première piste consiste à revenir à des comparaisons entre espèces, peut-être plus faciles à étudier que les micropopulations du crotale de Mojave. C'est ainsi que l'équipe de Sean Carroll, à l'université du Wisconsin, a séquencé les complexes de gènes de toxines des crotales de Mojave, mais aussi d'autres espèces proches, comme le crotale du Pacifique Sud (*Crotalus oreganus helleri*), vivant en Californie, et le crotale des bois (*Crotalus horridus*), de l'est du continent nord-américain. Mais tout est si compliqué qu'il a été impossible de savoir si le polymorphisme actuel du crotale de Mojave est le résultat d'un polymorphisme ancestral ou le fruit d'une hybridation d'espèces... comme celle, démontrée, entre les crotales de Mojave et du Pacifique Sud! Gageons que l'ajout de nouvelles espèces, allié à de nouvelles études d'écologie, fournira la solution du mystère. ■

BIBLIOGRAPHIE

- G. Zancott et al., When one phenotype is not enough : Divergent evolutionary trajectories govern venom variation in a widespread rattlesnake species, *Proc. R. Soc. B*, vol. 286, article 20182735, 2019.
- T. Jackson et al., Snake venom in context : neglected clades and concepts, *Front. Ecol. Evol.*, vol. 7, article 332, 2018.
- J. L. Strickland et al., Evidence for divergent patterns of local selection driving venom variation in Mojave rattlesnakes (*Crotalus scutulatus*), *Scientific Reports*, vol. 8, article 17622, 2018.
- N. L. Dowell et al., Extremely divergent haplotypes in two rattlesnake gene complexes encode alternative venom types within rattlesnake species, *Curr. Biol.*, vol. 28, pp. 1016-1026, 2018.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE NOËL

LIBRE

3 FORMULES

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à **pourlascience.fr**

actus, dossiers, archives depuis 1996

Votre cadeau : le livre *Une histoire de flou*
de Pierre Léna (74651805)



VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€

PAR MOIS

6,50€

PAR MOIS

8,20€

PAR MOIS

BULLETIN D'ABONNEMENT

A renvoyer accompagné de votre règlement :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

☒ OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique

PAG19NOE

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier
+ UN CADEAU

4,90€

PAR MOIS

DPV E90K5

FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier
+ UN CADEAU

6,50€

PAR MOIS

PPV SE50K12

FORMULE INTÉGRALE

• 12 n° du magazine (papier et numérique)
• 4 Hors-série (papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne
+ UN CADEAU

8,20€

PAR MOIS

IPV E20K12

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Tél. :

E-mail :@.....
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable...

<https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre. Les numéros de Pour la Science pour 2020 et les numéros de Pour la Science 2021 sont pour 4,90 € et 6,50 €.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise pas vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – AF 58147

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92727426900

N° de référence unique de mon bulletin (RUB)

4 / MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

L'AUTEUR

HERVÉ THIS
physicochimiste,chercheur au Centre
international de gastro-physiologie
moléculaire AgroParisTech et à l'Inra, à Paris

UNE NOUVELLE SAUCE : LES JAUNES AU BEURRE

Une obscure publication de 1910 contenait une curieuse**recette de «sauce béarnaise». Elle conduirait à une préparation
 inédite... qui mérite un autre nom !**

Les livres de cuisine anciens sont pleins de pépites dans leur gangue : à des idées culinaires justes, à des recettes sans difficulté, s'ajoutent des précisions qui relèvent au mieux de la pensée magique, mais aussi des informations parfaitement fausses, toute une série de données douteuses... plus les données dont on n'a aucune idée d'un statut de vérité.

Par exemple, est-il vrai qu'un bouillon de liège dans la corbeille à fruits évite la présence de petites mouches ? Que le beurre noir est différent quand on verse le vinaigre dans le beurre noir ou le beurre noisette dans le vinaigre ?

Les questions restent innombrables, et les surprises sont au détour de presque chaque expérimentation. Lors d'un séminaire de gastronomie moléculaire, nous avons identifié une recette publiée dans un obscur livre de cuisine de 1910. Dans les 760 *recettes de cuisine pratique*, par les « Dames Patronnes de l'Œuvre du Vêtement de Grammont », nous avons eu avec étonnement le détail d'une sauce intitulée « Sauce béarnaise très fine », qui ne correspondait pas à ce que l'on a toujours nommé sauce béarnaise – à savoir une préparation que l'on obtient en réduisant du vinaigre avec des échalotes, puis en ajoutant du jaune d'œuf et du beurre, que l'on cuit jusqu'à épaississement, avant d'ajouter de l'estragon, du sel, du poivre.

Bien sûr, il existe des variantes de la sauce béarnaise, mais pas jusqu'au point qui était indiqué dans le livre : « Battre le jaune d'œuf fortement pendant un quart d'heure. Ajoutez-y un peu de la fois un morceau de beurre gros comme un œuf

La sauce béarnaise
(ci-contre) est épaissie
par cuisson. Pas la
nouvelle sauce...



que vous avez, l'abord ramolli à la bouche du four. Battez encore pendant vingt minutes, et ajoutez-y une cuillerée de soupe de vinaigre à l'estragon et une pincée de persil haché, salez poivrez. »

PAS D'ÉCHALOTES NI DE CUISSON

On voit qu'il y a du jaune d'œuf, du beurre, pas d'échalotes, mais du vinaigre et de l'estragon... et pas de cuisson. Il y avait de quoi noter cette étrange recette et la garder précieusement afin de la tester. Les expérimentations ne nous ont pas déçus, mais avant d'en donner le résultat, observons que personne, dans le groupe d'expérimentateurs, n'avait initialement une idée de ce que cela donnerait.

Les « précisions culinaires » doivent toujours être testées dans les conditions qui sont données par leurs auteurs, nous avons scrupuleusement suivi la recette, et le battage s'est fait manuellement, comme en 1910.

Tout d'abord, le battage du jaune (nous avons utilisé deux jaunes) a conduit à leur foisonnement et à leur blanchissement. Jusque-là, pas de surprise : comme

quand on fait le ruban d'une crème anglaise (mais sans sucre), le fouet a poussé des bulles d'air dans les jaunes. Puis nous n'avons pas mis le beurre à la bouche du four, parce qu'il faisait chaud, mais nous avons ajouté le beurre en quatre fois... et nous avons obtenu comme une « crème au beurre » des pâtisseries, mais non sucrée. L'ajout de vinaigre a ensuite donné un goût intéressant qui, effectivement, rappelait la béarnaise, mais pour une sauce qui s'en distinguait notablement. Une préparation absolument délicieuse ! ■

LA RECETTE

- 1 Dans un cul-de poule, mettre deux jaunes d'œuf.
- 2 Au batteur électrique, fouetter jusqu'à l'apparition d'une couleur blanche.
- 3 Tout en battant, ajouter régulièrement du beurre (50 grammes à la fois, en quatre fois).
- 4 Ajouter deux cuillerées de vinaigre à l'estragon où l'on a dissous du sel et du poivre (on peut remplacer le vinaigre par du jus de citron).

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

85,5 CM/S

C'est la vitesse de pointe que développent les fourmis du Sahara de l'espèce *Camponotus glyphis* pour survivre à la chaleur et à la sécheresse extrêmes de leur environnement.

KOMODO

Sur l'île de Komodo, en Indonésie, il n'y aurait que 2 448 varans (ou dragons) du même nom, selon l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Afin de protéger l'espèce, les autorités ont pendant un temps envisagé de fermer l'île au tourisme. Le projet vient d'être abandonné.

P. 44

« L'exploitation de la sardine pour la fabrication de farine animale prive les populations des pays en développement de poissons locaux auparavant abordables »

DANIEL PAULY
professeur à l'université de Colombie-Britannique, au Canada

P. 100

505

C'est le nombre de « mauvaises herbes » résistantes aux herbicides dans le monde en 2019, selon l'International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Ce nombre est en constante augmentation.

P. 2

COCKTAIL MORTEL

Les crotales de Molave, une espèce de serpent à sonnettes, présentent deux types de venins selon les individus. Dans le venin de type A, 96 gènes codent des toxines ; dans celui de type B, ce sont pas moins de 115 gènes. Néanmoins, le venin de type B est moins toxique (la dose mortelle est plus élevée).

P. 3

PANGÉNÈSE

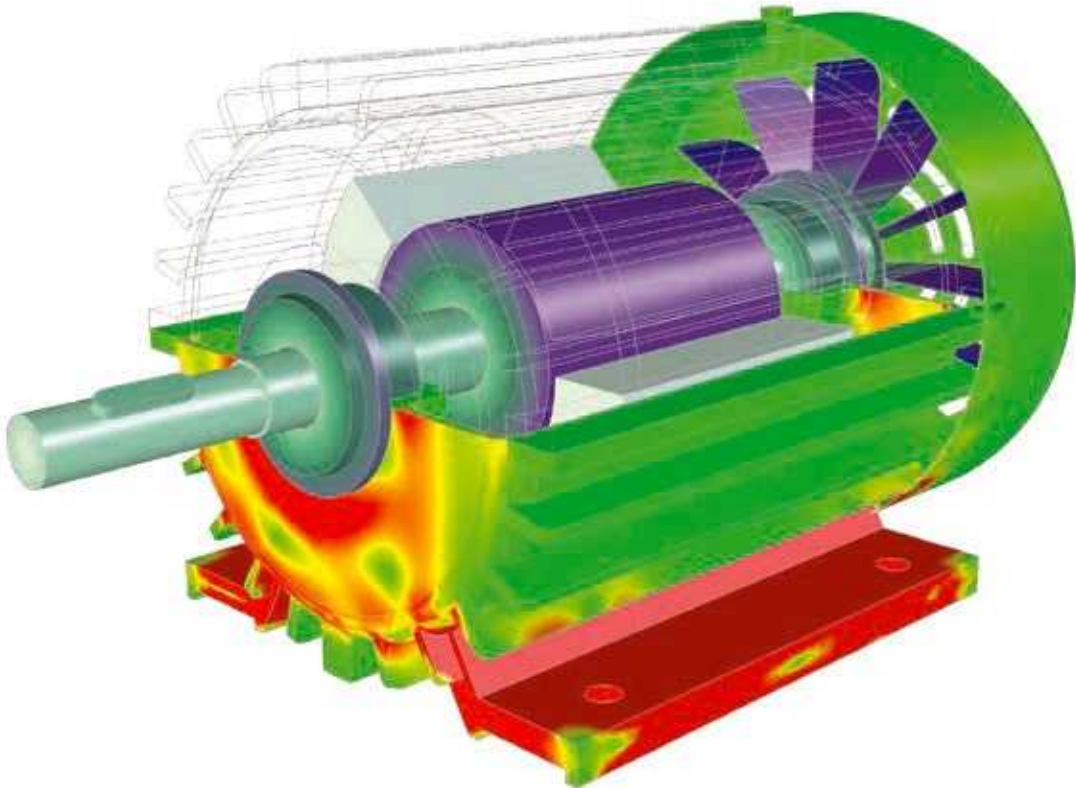
Selon cette théorie de l'hérédité, construite par Darwin au ^{xix}^e siècle (et rejetée de nos jours), différentes parties de l'organisme auraient contribué à la formation de « gemmules », lesquelles auraient servi de point de départ au développement de l'embryon.

P. 7

4%

C'est la part de la population mondiale, soit 500 millions de personnes, qui souffre d'une maladie rare d'origine génétique. Plus de 6 000 milliers de ces maladies sont recensées sur la base de données Orphanet. Une maladie dite « rare » touche au plus 5 personnes sur 10 000, selon la définition réglementaire européenne.

Inventé au 19^{ième} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes-nous arrivés et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses