

JUIN 2018
N° 488

LA DÉBÂCLE DE L'ARCTIQUE ENFIN CHIFFRÉE

D'intrigants signaux venus des confins du cosmos



CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS #4

Entrez dans les coulisses
de la recherche



#4 en vente en librairie
et Relay le 3 mai

200 pages / 12,50 €



www.carnetsdescience-larevue.fr



CNRS EDITIONS

POUR LA
SCIENCE

www.pourlascience.fr

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

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Jonathan Morin

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy

Revisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Chef de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Direction financière: Cécile André

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Jean-Alix Barrat, Maud Bruguère, Francis Codron,

Daphné Dambournet, Frédéric Grosshans,

Lucas Guillemot, Évelyne Host-Platret, Céline Le Bohec,

Juliette Mignot, Xavier Muller, Christophe Pichon,

Olivier Sandre, Zhou Xu

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

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

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://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 ; Benjamin Boutonnet

Tél.: 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou

francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus

dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans

les livres édités par « Pour la Science », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction,

d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque

et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire

intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de

l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue

des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org

E
DITO



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

UNE FAMILLE SUPPLÉMENTAIRE DANS L'ASTROZOO

Le cosmos est peuplé d'objets et de phénomènes d'une extraordinaire variété. Planètes, astéroïdes, géantes rouges, naines brunes, naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs, supernovæ, sursauts gamma, galaxies, quasars, nébuleuses, lentilles gravitationnelles... la liste est longue! Et à cela s'ajoute la diversité que l'on trouve au sein de chacune de ces familles... Aussi les astrophysiciens sont-ils loin de manquer de travail — pour peu qu'ils aient des postes, bien sûr.

Et comme si ce n'était pas suffisant, de nouvelles trouvailles viennent de temps en temps élargir encore leurs horizons. C'est ce qui s'est passé il y a environ une décennie avec une découverte fortuite: celle d'une brève bouffée d'ondes radio, dénichée dans des données enregistrées quelques années auparavant par un radiotélescope australien. Duncan Lorimer et Maura McLaughlin font partie des pionniers de cette aventure scientifique. Ils nous racontent ici les circonstances de leur découverte et les difficultés qu'a suscitées son interprétation (voir pages 30 à 37).

Les deux chercheurs nous expliquent aussi comment d'autres événements similaires ont été détectés au cours des années suivantes. Ces «sursauts radio rapides», dont une trentaine ont été enregistrés à ce jour, ont ainsi attiré l'attention d'un nombre croissant d'astrophysiciens. Lesquels s'efforcent notamment de comprendre leur origine: quelles sont les sources, apparemment très distantes et très puissantes, de ces émissions radio qui ne durent que quelques millisecondes?

Plusieurs hypothèses, parfois fort hardies, sont en lice. Quoi qu'il en soit, un nouveau champ de recherche est né. Et, avec la découverte des sursauts radio rapides, l'astrodiversité a encore augmenté, pour le plus grand plaisir des naturalistes du cosmos. Contrairement à la biodiversité qui, elle, est à la peine, au grand dam des naturalistes tout court. ■

SOMMAIRE

N° 488 /
Juin 2018

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Plus de 200 virus à ARN découverts chez des vertébrés
- Espèces charismatiques: des images à monnayer?
- Un maser continu à température ambiante
- Imagerie: des étoiles aux cellules *in vivo*
- 1,7 milliard d'étoiles sous l'œil de Gaia
- Le nombre chromatique du plan vaut au moins 5
- Le courant Atlantique Nord a faibli de 15%
- Comment le cerveau libère de l'espace mémoire
- La télomérase cartographiée

P. 22

LES LIVRES DU MOIS

P. 24

AGENDA

P. 26

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Casser un robot sera-t-il un crime?
Gilles Dowek

P. 28

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Des alertes empoisonnées
Gérald Bronner



En couverture :
© Solarseven/Shutterstock.com

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



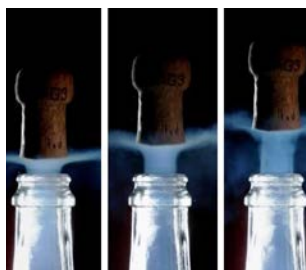
P. 38

ARCHÉOLOGIE

DU MOUTON À POILS AU MOUTON À LAINE

Wolfram Schier

Quand et où les populations humaines ont-elles commencé à élever des moutons pour leur laine? De nombreux indices montrent que la sélection et la domestication de moutons laineux ont débuté au V^e millénaire, voire avant, dans les villages néolithiques d'Asie occidentale.



P. 46

PHYSIQUE

LE FUGACE NUAGE BLEU DU CHAMPAGNE

Gérard Liger-Belair,
Daniel Cordier
et Jacques Honvault

Débouchez une bouteille de champagne stockée à 20 °C et filmez la scène au ralenti: on constate l'apparition, pendant quelques millisecondes, d'un panache bleuté dans le sillage du bouchon. Ce phénomène a désormais son explication.



P. 52

PALEONTOLOGIE

«TRIX, LE PREMIER T. REX JAMAIS EXPOSÉ EN FRANCE»

Entretien avec Ronan Allain

Pendant tout l'été, le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, expose Trix, une femelle tyrannosaure découverte dans le Montana. Le commissaire scientifique de l'exposition nous raconte la vie de cet hypercarnassier du Crétacé.



P. 58

MÉDECINE

COMMENT LES CELLULES S'ENFLAMMENT

Wajahat Z. Mehal

Quel est le point commun entre la goutte, la maladie d'Alzheimer et la stéatose hépatique? Il n'y en a pas, aurait-on répondu il y a quinze ans. Mais depuis, on a découvert que, dans toutes ces maladies, une même structure moléculaire entretient une inflammation chronique.



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

CLIMATOLOGIE

LA GRANDE DÉBÂCLE DE L'ARCTIQUE

Jennifer A. Francis

La banquise de l'océan Arctique fond à des vitesses record, et elle pourrait disparaître en été dès 2040. Or les glaces boréales contribuent à la stabilité du climat de tout l'hémisphère Nord. Sans elles, les épisodes climatiques extrêmes risquent donc de s'intensifier.



P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

LES ANNÉES FOLLES DU MUSÉE DE L'HOMME

Christine Laurière

Le musée de l'Homme fête ses 80 ans. Né des cendres du musée d'ethnographie du Trocadéro, à Paris, il a mis, à une époque empreinte de colonialisme, les cultures du monde au cœur de la culture occidentale.

À LA UNE



P.30

ASTROPHYSIQUE

D'OÙ VIENNENT LES SURSAUTS RADIO RAPIDES?

Duncan Lorimer et Maura McLaughlin

Découverts il y a tout juste dix ans, les sursauts radio rapides sont émis par des phénomènes cosmiques très puissants et lointains. Quelle est leur origine? On l'ignore encore, mais des observations récentes nous informent sur l'environnement où ils se sont produits.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

INTELLIGENCES ARTIFICIELLES: UN APPRENTISSAGE PAS SI PROFOND!

Jean-Paul Delahaye

Les systèmes de reconnaissance automatique ont d'étonnantes faiblesses. Exploiter ces failles permet de s'amuser, mais aussi d'améliorer les procédures d'apprentissage... ou de concevoir de nouvelles attaques malveillantes.



P.86

ART & SCIENCE

Un paysage plus vrai que nature

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Le nec plus ultra de la chute libre

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES

DE L'ÉVOLUTION

Escherichia coli: l'évolution en marche

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Gels homogènes... en apparence!

Hervé This

P.98

A PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos
P.22 Livres du mois
P.24 Agenda
P.26 *Homo sapiens informaticus*
P.28 Cabinet de curiosités
sociologiques

VIROLOGIE

PLUS DE 200 NOUVEAUX VIRUS À ARN DÉCOUVERTS CHEZ DES VERTÉBRÉS



Les virus à ARN des amphibiens (ici une salamandre), des poissons et des reptiles étaient jusqu'ici inconnus ou presque. L'analyse de ceux repérés donne un aperçu sur 500 millions d'années d'évolution de ces microorganismes.

Une étude à grande échelle a permis d'identifier 214 nouveaux virus à ARN ; et de montrer que les virus de ce type ont coévolué avec leurs hôtes depuis un demi-milliard d'années.

Les virus à ARN, dont l'information génétique est codée sous forme d'ARN et non d'ADN, intéressent vivement les chercheurs : cette classe est en effet surreprésentée parmi les virus émergents et réémergents hautement pathogènes tels qu'Ebola et Zika. Comme les maladies associées seraient essentiellement transmises à l'homme par des oiseaux et des mammifères (on parle de zoonoses), l'effort de recherche sur les virus à ARN a porté essentiellement sur ces animaux. Mais on occultait ainsi tout un pan du monde animal, notamment les

invertébrés et des vertébrés comme les poissons, les amphibiens et les reptiles.

Les équipes d'Edward Holmes, à l'université de Sydney, en Australie, et de Yong-Zhen Zhang, du Centre chinois pour le contrôle et la prévention des maladies, à Pékin, ont comblé une part des lacunes en identifiant plus de 200 virus à ARN chez ces vertébrés. « Un travail impressionnant », juge Étienne Simon-Lorière, spécialiste de l'évolution des virus à ARN à l'institut Pasteur, qui n'a pas participé à l'étude. « Les mêmes équipes avaient publié l'année dernière une étude similaire chez des invertébrés,

insectes et autres arthropodes. Là, ils enrichissent encore notre connaissance de la virosphère. »

Pour 186 espèces de vertébrés (poissons, amphibiens et reptiles) collectées en Chine, Yong-Zhen Zhang et ses collègues ont analysé le transcriptome, c'est-à-dire tous les ARN contenus dans les cellules de plusieurs organes. En comparant les séquences obtenues avec celles de virus connus, les chercheurs ont identifié 214 nouveaux virus. Ils ont également montré que ces virus sont très diversifiés, puisqu'ils appartiennent à presque toutes les familles de virus à ARN qui infectent les mammifères. Par exemple, certains sont de la même famille que le virus Ebola.

On connaît par ailleurs très mal l'histoire évolutive des virus. Profitant d'un

nombre relativement important de nouveaux virus à ARN repérés, les chercheurs ont comparé certains marqueurs et utilisé des outils statistiques pour situer dans le temps l'apparition de ces virus.

Ils ont ainsi construit des arbres phylogénétiques. Ces arbres montrent une évolution en miroir de celle de leurs hôtes : les virus à ARN ont coévolué avec les espèces qu'ils infectent. « C'est la force de cette étude : elle ouvre une fenêtre sur le passé, dans un univers où nous n'avons accès à aucun fossile ni trace ! », commente Étienne Simon-Lorière. Elle donne du poids à l'hypothèse d'une existence très ancienne des virus à ARN, ancienneté suggérée par le fait que certains ont été retrouvés chez des organismes unicellulaires ou des invertébrés.

L'évolution des vertébrés a débuté il y a environ 525 millions d'années avec l'apparition de plusieurs classes de poissons, suivie par celle des amphibiens, des reptiles et des mammifères. Pour Yong-Zhen Zhang et ses collègues, les virus à ARN des mammifères proviennent probablement des virus des poissons et ont suivi les animaux qui sont sortis de l'eau.

Plus en détail, l'analyse évolutive montre, en plus de cette coévolution, des exemples de passages d'un virus d'une espèce hôte à une autre. « Ce processus résonne avec ce qui se passe lors des zoonoses. Mais attention, cela ne permet pas de prédire de futurs sauts d'espèces, surtout pas entre les animaux considérés dans cette étude et l'homme. De tels sauts sont fort peu probables car les virus en question sont quand même très différents de ceux qui nous infectent », précise Étienne Simon-Lorière. Les sauts sont plus probables entre espèces de la même classe, entre deux mammifères par exemple.

L'étude ouvre néanmoins plusieurs pistes de recherche. Qu'est-ce qui explique que tel virus soit pathogène pour une espèce et non pour une autre ? Quelles sont les conséquences de l'importante évolution de l'organisation du génome de ces virus ? La diversité révélée promet aussi d'être largement sous-estimée. « Les virus identifiés n'ont pu l'être que par comparaison avec des séquences d'ARN viral déjà connues, dont ils sont suffisamment proches », rappelle Étienne Simon-Lorière. ■

NOËLLE GUILLON

M. Shi et al., *Nature*, vol. 556, pp. 197-202, 2018

Espèces charismatiques : des images à monnayer ?

Lions, girafes, pandas, etc., sont en partie victimes de leur succès. Leur omniprésence dans les films d'animation, sur des affiches et les logos des marques donne l'impression que ces animaux sont moins menacés qu'ils ne le sont réellement. Franck Courchamp nous explique l'origine de ce biais de perception et propose une solution.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

FRANCK COURCHAMP
écologue du CNRS
au laboratoire Écologie,
systématique
et évolution, à Orsay

Comment l'idée est-elle venue d'étudier le lien entre animaux charismatiques et leur conservation ?

Une opinion répandue est que les animaux charismatiques bénéficient de plus d'efforts de conservation. Avec mes collègues, nous avons voulu approfondir cette question du rapport entre l'image de ces animaux et ce que le public pense de la menace d'extinction qui pèse sur eux. J'ai commencé à m'intéresser à ce problème en 2011 et la première étape a été de définir lesquels sont ces animaux charismatiques.

Comment avez-vous procédé ?

J'ai commencé par créer un site internet, en quatre langues, où je demandais aux visiteurs de lister ces animaux. Nous avons obtenu près de 5 000 réponses exploitables. Puis j'ai posé la même question à des écoliers en Angleterre, en Espagne et en France. Ensuite, nous avons recensé les animaux qui figurent sur les affiches des zoos, dans les films d'animation... Les dix animaux les plus charismatiques sont le tigre, le lion, l'éléphant, la girafe, le léopard, le panda, le guépard, l'ours polaire, le loup et le gorille. Cette liste n'est pas surprenante en soi. Ce qui l'est beaucoup plus, c'est la perception qu'ont les gens du danger d'extinction encouru par ces animaux.

Le décalage est-il important ?

A l'exception du loup, toutes ces espèces sont menacées à un degré assez élevé. Mais à la question : « Cette espèce est-elle en danger ? », les réponses sont souvent erronées. Dans le cas de la girafe, 60 % des personnes interrogées pensent que l'espèce n'est pas menacée, alors que la girafe de Nubie a perdu 97 % de sa population en 35 ans. Même pour l'éléphant, dont la préservation fait pourtant l'objet de beaucoup de

communication, une personne sur trois pense que cet animal n'est pas en danger.

Comment interprétez-vous ce biais de perception ?

Ces résultats m'ont interpellé. Si l'on voit autant ces animaux autour de nous, nous devrions bien les connaître et donc savoir que, par exemple, l'éléphant pourrait disparaître d'ici à 50 ans, le lion et le tigre d'ici à seulement 20 ans. Or ce n'est pas le cas. Selon nous, le fait de voir autant de pandas et autres animaux charismatiques dans les médias donne l'impression que ces espèces ne sont pas si en danger que cela. Des volontaires, en France, ont comptabilisé combien d'images de ces animaux ils repéraient en une semaine. Ils ont vu en moyenne 4,4 lions par jour. Ils croisent donc en moyenne, sur une année, deux à trois fois plus de lions qu'il n'y en a dans toute l'Afrique de l'Ouest.

Quelle solution proposez-vous ?

Aujourd'hui, les moyens dédiés à la conservation ne sont pas à la hauteur de l'urgence. Si nous ne sommes pas capables de sauver le roi des animaux, alors il y a peu d'espoir pour une fleur d'Amazonie ou un invertébré des récifs coralliens. Une piste serait de mettre en place une sorte de « droit à l'image » pour les espèces charismatiques. En effet, de nombreuses entreprises utilisent celles-ci dans leur logo et profitent de leur charisme. Ce qui contribue à désensibiliser la population aux risques d'extinction qu'elles encourrent. En s'acquittant d'un « droit à l'image », ces entreprises soutiendraient des actions de conservation. Cela serait même bénéfique pour leur réputation. D'ailleurs, certaines, sur la base du volontariat, ont déjà lancé de telles initiatives avec le programme *Save your logo* ; c'est le cas de Lacoste ou Maaf Assurances. L'étape d'après serait de discuter avec des juristes et d'autres acteurs de la société civile pour étendre et généraliser cette idée. ■

F. Courchamp et al., *PLoS Biology*, vol. 16(4), e2003997, 2018

PHYSIQUE

UN MASER CONTINU À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Les masers, des sources très pures de microondes, seront-ils bientôt exploités à grande échelle ? Un prototype fonctionne enfin à température ambiante.

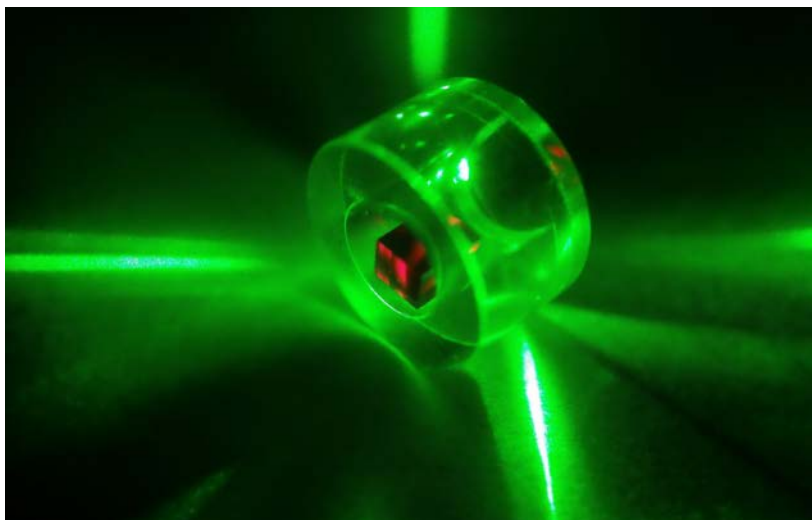
Le maser, similaire au laser sauf qu'il émet des microondes, date de 1954. Ce dispositif n'a cependant été que peu utilisé, car ceux que l'on a inventés fonctionnent à des températures cryogéniques, c'est-à-dire proches du zéro absolu. D'où l'intérêt du travail de l'équipe de Jonathan Breeze, de l'Imperial College de Londres, qui vient de créer un maser fonctionnant en continu et à température ambiante !

En 2012, les mêmes chercheurs avaient déjà démontré qu'un maser à pentacène (un hydrocarbure aromatique de formule brute $C_{22}H_{14}$) fonctionnait à température ambiante, mais le dispositif ne produisait que des flashes d'un millièmètre de seconde environ; du reste, si ce maser avait fonctionné en continu, le cristal de pentacène aurait probablement fondu.

Pour obtenir son nouvel émetteur maser, l'équipe de Jonathan Breeze a utilisé un diamant synthétique que l'on a fait croître dans une atmosphère riche en azote. Les chercheurs ont alors éliminé certains atomes de carbone du diamant à l'aide d'un faisceau d'électrons à haute énergie, afin d'y créer des lacunes; le chauffage du diamant a ensuite provoqué l'appariement de ces lacunes avec des atomes d'azote, ce qui a créé le type de défaut que voulaient les chercheurs: des défauts azote-lacune, contenant deux électrons non appariés (libres dans la lacune). Les niveaux d'énergie de ces défauts sont exploitables pour produire une émission dans le spectre des microondes: moyennant un ajustement de ces niveaux, il est possible de produire une émission maser par pompage optique, une technique couramment utilisée pour produire une émission laser ou maser.

Le pompage optique consiste à fournir aux électrons une énergie lumineuse suffisante pour les exciter de leur état fondamental (l'état de moindre énergie) vers un niveau d'énergie supérieur adéquat. Reçue en continu, l'énergie lumineuse pousse alors les électrons à se désexciter vers un niveau d'énergie intermédiaire (ici tel qu'ils émettront un photon microonde) – un mécanisme nommé émission stimulée.

Pour obtenir le système adéquat de niveaux d'énergie, les chercheurs ont manipulé l'état fondamental des défauts azote-lacune à l'aide d'un champ magnétique appliqué le long de l'un



Un diamant contenant certains défauts émet des micro-ondes quand on l'éclaire à l'aide d'un laser vert. La lumière rouge aussi émise est une fluorescence parasite.

de leurs quatre axes. Cela leur a permis d'utiliser comme énergie lumineuse un laser de longueur d'onde proche de 532 nanomètres (donc de couleur verte) et d'obtenir le rayonnement maser recherché. Afin de concentrer l'énergie des microondes ainsi émises, les chercheurs ont placé le diamant émetteur au centre d'un anneau de saphir. Transmise à l'extérieur du dispositif par une antenne, l'émission, obtenue à température ambiante, est continue et d'une fréquence de 9,2 gigahertz. Modifier cette fréquence est possible en faisant varier le champ magnétique.

Actuellement, des masers cryogéniques sont utilisés dans les communications spatiales et en radioastronomie, où leur qualité de signal est indispensable. Toutefois, comme ils sont compliqués à mettre en œuvre, les chercheurs s'attendent à ce que leur maser les remplace bientôt. Selon eux, le nouveau maser pourrait aussi trouver toute une gamme d'applications allant de l'imagerie médicale aux scanners corporels dans les aéroports; et jouer un rôle central en améliorant les capteurs servant à détecter les explosifs à distance, voire les ordinateurs quantiques... ■

FRANÇOIS SAVATIER

J. D. Breeze et al., *Nature*,
vol. 455, pp. 493-496, 2018

AUX SOURCES DU NIL

Quand le Nil est-il devenu un grand fleuve continental ? Pour le savoir, Laura Fielding, de l'université Lancaster, au Royaume-Uni, et ses collègues ont analysé les sédiments déposés dans le delta du Nil. Les chercheurs datent ainsi les premiers dépôts de près de 31 millions d'années. Les propriétés de ces sédiments indiquent aussi que le Nil prenait sa source sur les plateaux éthiopiens, d'où part aujourd'hui le Nil Bleu, et non des régions plus à l'ouest où naît le Nil Blanc.

COMMUNIQUER AVEC DES TAMBOURS

Le peuple Bora, installé à la frontière du Pérou et de la Colombie, utilise des tambours nommés manguarés pour communiquer sur des kilomètres de distance. Julien Meyer, de l'université Grenoble-Alpes, et ses collègues ont analysé cette technique. Ils ont notamment montré que la durée des pauses entre les coups indique le nombre de consonnes et de voyelles, mais surtout que des marqueurs rythmiques distinguent les mots. Ce langage tambouriné imite ainsi les tons et le rythme de la parole.

L'ATTAQUE DU PARESSEUX GÉANT

Cet animal, aujourd'hui disparu, devait être une proie dangereuse du fait de sa taille et de ses longues griffes. Pourtant, cela ne dissuadait pas les hommes de s'y attaquer il y a 10 000 ans. C'est le constat de l'équipe de Matthew Bennett, de l'université de Bournemouth, au Royaume-Uni. Elle a découvert, dans un désert du Nouveau-Mexique, un ensemble de traces de paresseux géants et de pas humains laissés dans de la boue maintenant figée. La disposition des empreintes montre des postures défensives de l'animal et des intentions agressives des humains, peut-être pour tuer ce gibier de choix.

MANGER MOINS ET VIVRE VIEUX

La restriction calorique chronique consiste à manger une ration alimentaire réduite, mais équilibrée, à partir de l'âge adulte et tout au long de la vie. Des travaux avaient montré les effets bénéfiques de la restriction calorique chronique sur la longévité de nombreuses espèces à courte durée de vie, comme les vers, les mouches ou les souris. Toutefois, ses effets sur la longévité et les capacités motrices ou cognitives des humains et d'autres primates restaient encore peu connus.

Grâce à une étude menée sur dix ans, Fabien Pifferi, du CNRS et du Muséum national d'histoire naturelle, et ses collègues ont constaté qu'un groupe de lémuriens dont les chercheurs avaient réduit de 30 % la ration alimentaire quotidienne avaient une longévité supérieure de près de 50 % à celle de leurs congénères, sans présenter d'altération de leurs capacités motrices et cognitives. Par ailleurs, les animaux à l'alimentation restreinte souffraient moins de pathologies liées à l'âge, comme le cancer ou la néphrite chronique. L'atrophie de la substance blanche (ensemble des fibres des neurones du cerveau) était quant à elle ralentie. En revanche, une légère perte de substance grise (corps cellulaires des neurones du cerveau) a été observée, sans



Les microcèbes, lémuriens nocturnes et endémiques de l'île de Madagascar, vivent mieux en mangeant moins.

qu'elle se traduise dans les performances cognitives des lémuriens. Les chercheurs ne l'expliquent pas encore.

Une autre étude, dirigée par Leanne Redman, du centre de recherche biomédical Pennington, aux États-Unis, conduite sur des humains jeunes et en bonne santé, a révélé que ceux d'entre eux qui avaient réduit leur apport calorique quotidien de 15 % voyaient leur métabolisme ralentir et la production de radicaux libres, dont l'accumulation dans les cellules entraînerait le vieillissement, diminuer. ■

ALINE GERSTNER

F. Pifferi et al., *Communications Biology*, vol. 1, article n° 30, 2018 ; L. Redman et al., *Cell Metabolism*, vol. 27, pp. 805-815, 2018

BIOPHYSIQUE

UN FLUIDE DE MANCHOTS

En groupe, les animaux présentent une organisation structurée parfois très ordonnée. C'est le cas, par exemple, des manchots royaux (*Aptenodytes patagonicus*) pendant la période d'incubation et de garde du jeune poussin de moins d'un mois. Ces animaux se regroupent pour former des colonies denses comprenant jusqu'à 500 000 couples. Grâce à des images et des vidéos prises durant plusieurs années sur les îles Crozet et Kerguelen, Richard Gerum, de l'université d'Erlangen-Nuremberg, en Allemagne, et ses collègues du CNRS, des universités de Strasbourg et de Montpellier et du centre scientifique de Monaco, ont modélisé ces rassemblements qui présentent des caractéristiques similaires à celles d'un liquide.

Ce comportement de la colonie offre le meilleur compromis possible entre la densité et la



Vus du ciel, les manchots royaux sont assez régulièrement espacés, comme des molécules dans un liquide.

flexibilité. Si la densité était moindre, il faudrait plus d'espace pour accommoder tous les manchots. Et une densité trop forte rendrait difficiles les déplacements au sein du groupe pour remplir les trous ou réagir à une menace. ■

S. B.

R. Gerum et al., *Journal of Physics D*, vol. 51, 164004, 2018

EN IMAGE

IMAGERIE: DES ÉTOILES AUX CELLULES IN VIVO

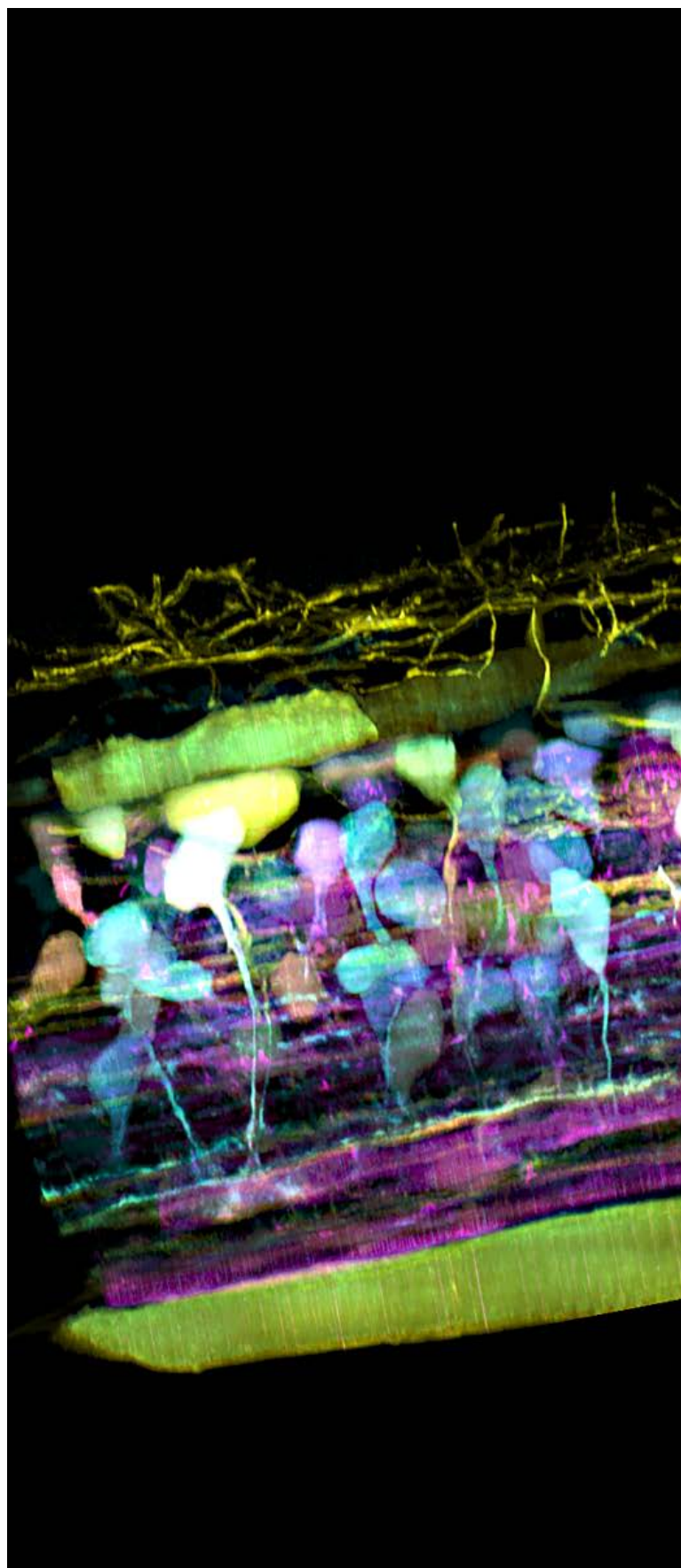
Pour les spécialistes de l'imagerie microscopique, l'un des grands défis est d'observer des cellules vivantes en trois dimensions au sein de leur environnement en s'assurant qu'ils n'en altèrent pas les conditions. De nombreuses techniques existent, mais elles ne sont pas toujours satisfaisantes. Elles sont parfois trop lentes pour suivre des processus rapides, comme c'est le cas avec la microscopie confocale, ou provoquent un stress et des dommages dans les tissus observés du fait d'un apport d'énergie trop important.

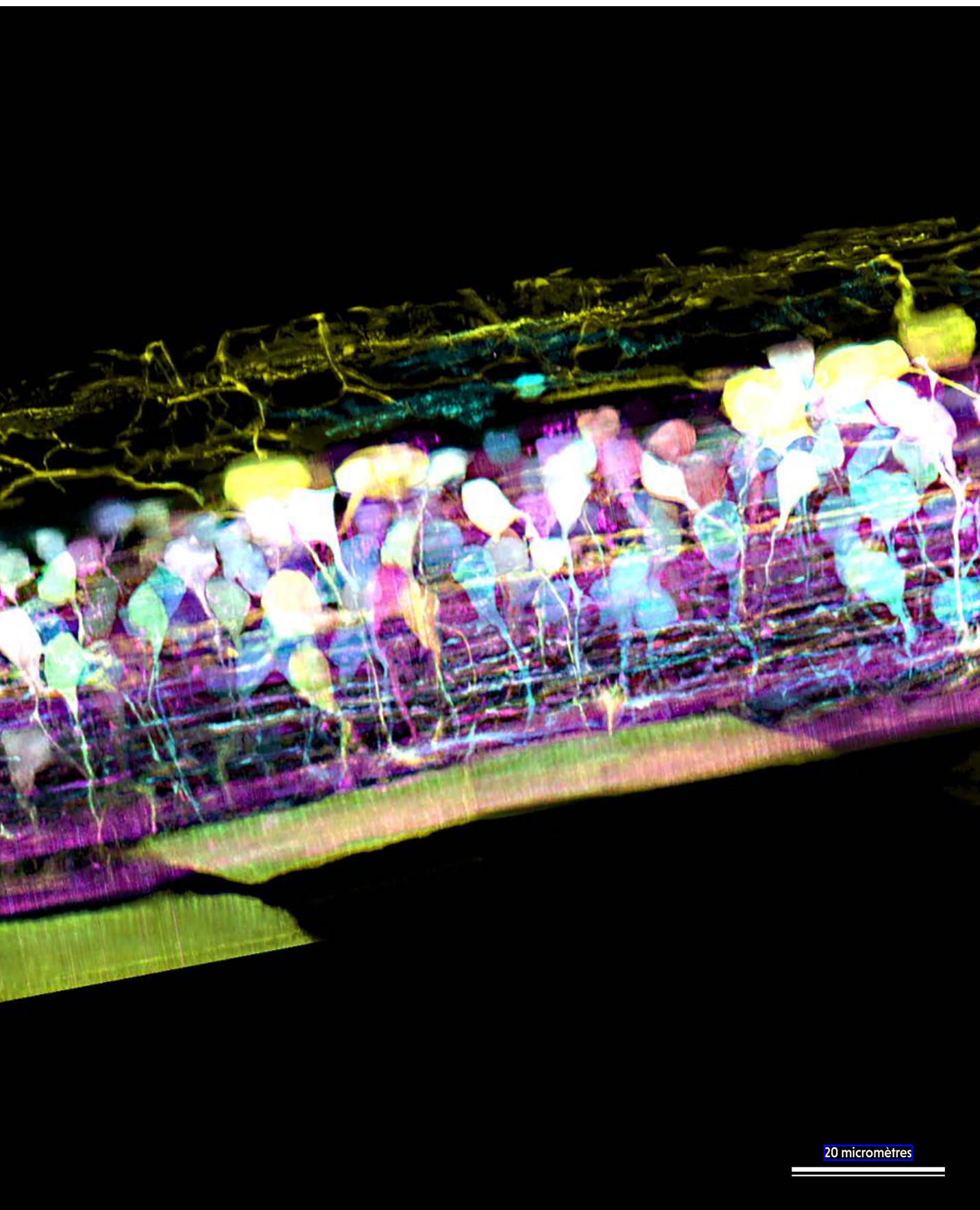
En combinant deux techniques, la microscopie à nappe de lumière en réseau et l'optique adaptative, l'équipe d'Eric Betzig, de l'institut médical Howard-Hughes, aux États-Unis, a obtenu des images et des vidéos d'une grande précision de nombreux processus biologiques chez le poisson-zèbre: la migration d'une cellule cancéreuse, les déplacements d'un macrophage dans l'oreille interne, le développement de la moelle épinière et la différenciation de nouveaux neurones dans un embryon (*image ci-contre*), etc.

La microscopie à nappe de lumière en réseau est une technique non invasive qui permet de reconstruire une image d'un volume avec une très bonne résolution spatiotemporelle. Cependant, la lumière, en traversant des milieux d'indices de réfraction différents, subit des aberrations qui rendent l'image floue. Eric Betzig, à l'origine de cette technique d'imagerie, a eu l'idée de l'associer à l'optique adaptative. Cette méthode est mise en œuvre dans certains télescopes pour corriger les aberrations de la lumière des étoiles dues aux perturbations atmosphériques. Les corrections sont effectuées grâce à un miroir déformable, en temps réel. Le dispositif final de l'équipe d'Eric Betzig est encore volumineux et occupe une table de trois mètres de long. Mais les chercheurs étudient déjà différentes pistes pour en réduire la taille. ■

S. B.

T.-L. Liu *et al.*, *Science*, vol. 360, eaaq1392, 2018.
Vidéos du projet: http://bit.ly/PLS488_Microscope





20 micromètres

PHYSIQUE

DES NOMBRES BIEN ALÉATOIRES

Produire des nombres aléatoires est d'importance capitale pour les techniques cryptographiques, car ces dernières sont fondées sur des clés de chiffrement, de longues chaînes de 0 et de 1. Si ces clés ne sont pas générées de façon parfaitement aléatoire, un pirate informatique serait éventuellement capable de percer leur logique; il pourrait alors les reconstituer et accéder aux données.

Depuis plusieurs années, les cryptologues s'intéressent à un domaine où l'aléatoire et l'imprévisible font loi: la physique quantique. Dans ce cadre, une équipe du NIST (l'institut américain des étalons et de la technologie) vient de présenter une méthode permettant de produire des nombres bien aléatoires.

Peter Bierhorst et ses collègues ont conçu un dispositif où l'on mesure la polarisation (la direction du champ électrique) de photons. Une source y émet des paires de photons dont les polarisations sont intriquées, c'est-à-dire étroitement corrélées par un phénomène quantique. La direction de la polarisation mesurée pour un photon est ensuite traduite en un bit 0 ou un bit 1. Et la valeur mesurée du bit est garantie aléatoire si la paire de photons est quantiquement intriquée. Or les chercheurs ont calculé, à partir des corrélations d'un



Les propriétés de la physique quantique sont exploitées pour générer des suites aléatoires de 0 et de 1.

ensemble de paires, que seule une petite part des bits générés a un caractère vraiment aléatoire. Les autres seraient éventuellement le résultat d'un processus non quantique, où l'aléatoire n'est pas garanti.

Les chercheurs ont alors associé à leur dispositif un extracteur d'aléa, un outil courant en cryptographie qui prend un grand nombre de bits pour en donner un plus petit, mais dont le caractère aléatoire est fortement augmenté. L'équipe de Peter Bierhorst a ainsi pu générer des chaînes de 1024 bits presque parfaitement aléatoires. ■

DONOVAN THIEBAUD

P. Bierhorst et al., *Nature*, vol. 556, pp. 223-226, 2018

ENVIRONNEMENT

ANNÉE NOIRE POUR LE CORAIL

La vague de chaleur record de 2016 a été la plus sévère pour la Grande Barrière de corail, en Australie, qu'on ne le pensait. C'est le constat de l'équipe de Terry Hughes, de l'université James Cook, à Townsville, en Australie. Les chercheurs ont réalisé un suivi aérien sur les 2300 kilomètres de la Barrière pendant le pic de chaleur, en mars-avril 2016. Et ils ont aussi effectué un suivi sous-marin sur cette période et huit mois plus tard.

Cette étude a permis notamment de clarifier et quantifier les liens entre une vague de chaleur, le blanchiment des coraux (dû à la perte de l'algue symbiotique qui apporte énergie et nutriments au corail) et la mortalité à court et plus long termes en fonction des différentes espèces. L'équipe a constaté que seuls 10% des coraux n'ont pas été affectés par le blanchiment. Au



Les récifs coralliens sont capables de récupérer après une vague de chaleur. Mais pas forcément si une telle perturbation devient fréquente...

total, près de 30% de la superficie occupée par les coraux a été perdue. Cela comprend à la fois les coraux qui sont morts du fait de la chaleur pendant le pic et ceux trop touchés pour récupérer une fonction symbiotique. La composition des récifs a aussi changé, les coraux les plus sensibles ayant disparu. ■

S. B.

T. P. Hughes et al., *Nature*, vol. 556, pp. 492-496, 2018

EN BREF

DES POULPES EN MILIEU EXTRÊME

Lors de l'expédition d'un véhicule submersible à 5 000 mètres de profondeur, à 200 kilomètres au large du Costa Rica, Anne Hartwell, de l'université Akron, aux États-Unis, et ses collègues ont eu la surprise de trouver près de sources thermales 102 poulpes du genre *Muusoctopus*, avec des œufs. Leur présence à cet endroit est paradoxale car les eaux (à 12,3 °C) sont trop chaudes pour le développement des embryons, et l'oxygène y est beaucoup trop rare. Les chercheurs supposent que ces poulpes se sont installés à cet endroit en raison d'une surpopulation dans une zone proche aux conditions plus propices.

COUCHE-TARD MORTS TÔT ?

Se coucher tard – une habitude souvent liée à un manque de sommeil –, est mauvais pour la santé, avec un risque accru de maladies cardiovasculaires, de diabète, etc. Kristen Knutson et Malcolm von Schantz, de l'université Northwestern, à Chicago, ont suivi plus de 400 000 personnes d'âges allant de 38 à 73 ans pendant en moyenne 6,5 ans. Ils ont montré que ceux « du soir » avaient aussi un risque de mortalité supérieur à ceux « du matin ».

IL Y A 700 000 ANS, DES HUMAINS AUX PHILIPPINES

La découverte aux Philippines d'un squelette de rhinocéros présentant des traces de découpe et en association avec des outils taillés sur enclume atteste de la présence d'humains bien plus tôt qu'on ne le pensait. Thomas Ingicco, du Muséum, à Paris, et ses collègues ont daté ces restes de 700 000 ans. Un homininé antérieur à *Homo sapiens* serait donc parvenu jusqu'aux Philippines, des îles déjà entourées de profonds bras de mer. Mais comment ?

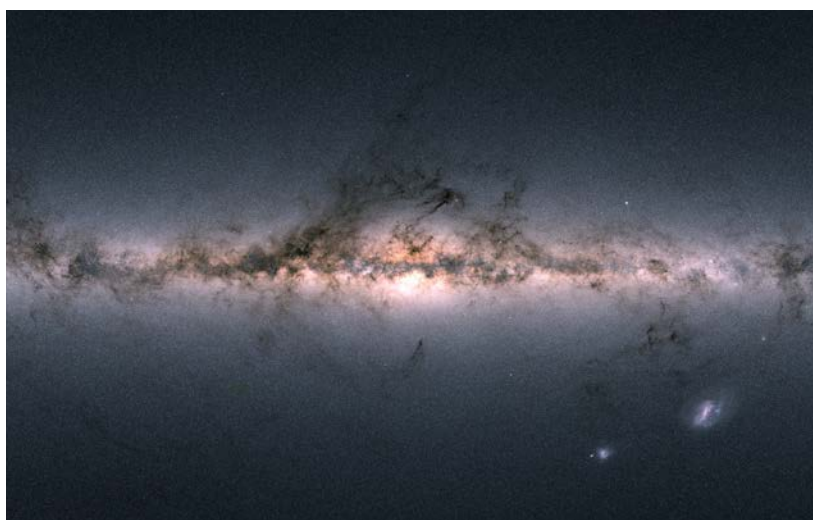
LA JOUISSANCE DES MOUCHES

Les drosophiles (mouches du vinaigre) mâles recherchent de toute évidence à s'accoupler avec des femelles, mais quelle est l'étape, de la cour jusqu'à la copulation, qui leur procure le plus de plaisir? Une équipe menée par Shir Zer-Krispil et Galit Shohat-Ophir, de l'université Bar-Ilan, en Israël, a montré qu'il s'agit probablement de l'éjaculation: en la provoquant artificiellement, ces chercheuses ont reproduit les divers symptômes physiologiques et comportementaux associés à un accouplement réussi. Pour ce faire, elles ont utilisé des mâles de drosophile génétiquement modifiés de façon que certains neurones, dits Crz, déclencheurs de l'éjaculation, puissent être activés par une lumière rouge. Et ont notamment constaté que ces mâles choisissent de se placer sous la lumière stimulatrice... ■

MAURICE MASHAAL

S. Zer-Krispil et al., *Current Biology*, vol. 28, pp. 1-8, 2018

1,7 MILLIARD D'ÉTOILES SOUS L'ŒIL DE GAIA



En plus des étoiles et de leurs caractéristiques, *Gaia* a aussi étudié la distribution de la poussière dans la Voie lactée, en analysant sa présence sur la ligne de visée de près de 88 millions d'étoiles.

L'ADAPTATION DES NAGEURS

En Asie du Sud-Est, les Bajaus, aussi nommés «nomades de la mer», vivent des ressources de l'océan. Ils plongent, par exemple, pour récolter des crustacés ou pêcher des poissons. Leurs performances sont spectaculaires: ils peuvent rester en apnée pendant près de cinq minutes et passer, au total, plusieurs heures par jour sous l'eau sans respirer. Ces capacités sont-elles le fruit d'un exercice quotidien ou sont-elles d'origine génétique? Pour le savoir, Melissa Ilardo, de l'université de Copenhague, et ses collègues ont séquencé le génome de 43 Bajaus et de 33 Saluans (un peuple fermier proche génétiquement). Ils ont trouvé 25 variants spécifiques aux Bajaus. L'un d'eux concerne le gène *PDE10A*, qui assure la production d'hormones thyroïdiennes impliquées dans le contrôle de la taille de la rate. Or cet organe, 50% plus grand chez les Bajaus, libère du sang oxygéné lorsque le corps est plongé dans l'eau. Autrement dit, il y a eu adaptation évolutive. ■

S. B.

M. A. Ilardo et al., *Cell*, vol. 173, pp. 569-580, 2018

Lancé en 2013, le satellite *Gaia* avait pour objectif d'observer plus d'un milliard d'étoiles dans la Voie lactée, de mesurer leurs positions, leurs distances, leurs mouvements et leurs propriétés physiques. Il succédait au satellite *Hipparcos*, mais en améliorant la précision d'un facteur 50. Un premier catalogue des données de *Gaia* avait été rendu public en 2016. Une seconde livraison (obtenue à partir de 22 mois de prise de données) vient de l'enrichir considérablement: 1,7 milliard de positions d'étoiles (ce qui représente environ 1% des astres de la Galaxie), 1,3 milliard de distances et mouvements propres, 7,2 millions de vitesses radiales, 500 000 courbes de lumière pour les étoiles variables, 160 millions de températures de surface et mesures de luminosité. Dans le Système solaire, pas moins de 14 000 astéroïdes ont été suivis avec une précision inégalée. Des objets extragalactiques sont aussi inclus, avec près de 500 000 quasars (des galaxies émettant un fort rayonnement électromagnétique).

L'exploitation des données a déjà commencé et plusieurs articles ont été publiés en même temps que le catalogue. Ainsi, les chercheurs ont construit une carte tridimensionnelle riche et précise de la Voie lactée. Par ailleurs, David Katz, de l'observatoire de Paris-Meudon, et ses collègues ont utilisé les vitesses radiales pour étudier en trois dimensions la dynamique des populations stellaires. Ces informations sont précieuses pour retracer l'histoire de la formation de la Voie lactée. Carine Babusiaux, de l'institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, et ses collègues ont construit un diagramme de Hertzsprung-Russell complet et détaillé à partir des données de température et de luminosité stellaire. Ce diagramme permet de classer les étoiles et indique à quel stade de leur vie elles se trouvent.

Initialement programmée pour une durée de cinq ans, la mission *Gaia* devrait être prolongée de deux ans, de quoi continuer à enrichir un catalogue devenu indispensable. Deux livraisons sont d'ailleurs prévues dans les années à venir. ■

S. B.

Collaboration *Gaia*, *Astronomy & Astrophysics*, en ligne, 25 avril 2018

MATHÉMATIQUES

LE NOMBRE CHROMATIQUE DU PLAN VAUT AU MOINS 5

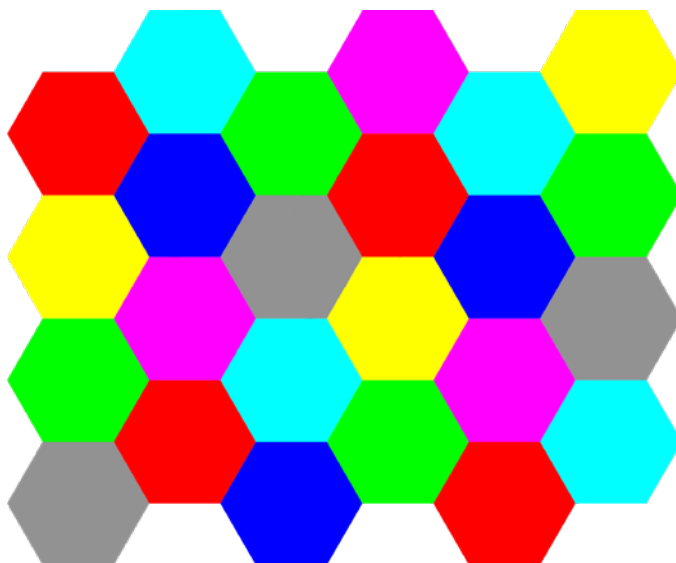
Un mathématicien amateur anglais vient de franchir une étape importante vers la résolution d'un vieux problème de la théorie des graphes.

Le plus célèbre résultat mathématique lié aux façons de colorier le plan est le théorème des quatre couleurs. Il prouve que 4 couleurs suffisent pour colorier n'importe quelle carte en s'assurant que deux régions limitrophes ne soient jamais de la même couleur. Le problème de Hadwiger-Nelson, vieux de presque 70 ans, se fixe une autre contrainte: quel est le nombre minimal de couleurs nécessaires pour colorier le plan de telle sorte que deux points quelconques distants d'une unité de longueur soient de couleurs différentes? L'Anglais Aubrey de Grey, biologiste spécialiste du vieillissement et mathématicien amateur, a franchi une étape importante vers la solution.

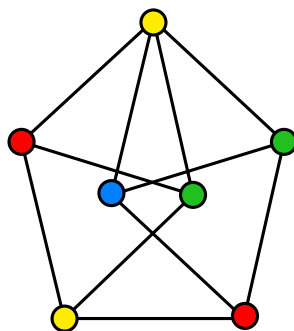
C'est en 1950 qu'Edward Nelson, alors étudiant à l'université de Chicago, a posé ce problème. Son nom est associé à celui du mathématicien suisse Hugo Hadwiger, qui s'est intéressé à des questions voisines dès 1945. La réponse, nommée nombre chromatique du plan, est nécessairement inférieure ou égale à 7. En effet, l'Américain John Isbell a remarqué dès 1950 qu'avec des hexagones de diamètre légèrement inférieur à 1, sept couleurs permettent de colorier le plan en respectant la contrainte d'Edward Nelson et de Hugo Hadwiger (voir la figure). Mais peut-on faire mieux?

Pour répondre de la façon la plus générale à la question, il faut reformuler le problème en termes de théorie des graphes. La même approche a été utilisée pour démontrer le théorème des quatre couleurs: les régions sont remplacées par des nœuds colorés reliés par des segments aux nœuds des régions voisines. Cette formulation plus simple du problème permet notamment un traitement informatique efficace.

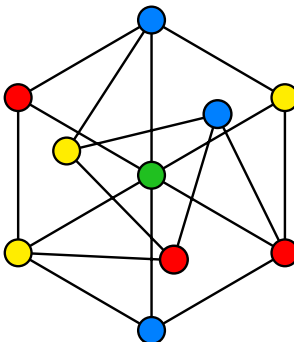
Dans le cas du problème de Hadwiger-Nelson, un nœud représente un point du plan; il est relié *a priori* à une infinité de points par des segments de longueur 1. Le graphe serait donc infini! Mais pour trouver une borne inférieure sur le nombre de couleurs nécessaires pour colorier le plan, un graphe fini suffit. Un graphe carré, par exemple, peut être colorié avec 2 couleurs. Mais 2 couleurs sont insuffisantes en toute généralité car le graphe de Moser (qui a 7 nœuds et 11 arêtes, *ci-contre*) ou celui de Solomon Golomb (qui comporte



Un pavage régulier par des hexagones de diamètre inférieur à 1 montre que 7 couleurs permettent de colorier le plan suivant la contrainte du problème de Hadwiger-Nelson.



Le graphe de Moser (*ci-dessus*), qui a 7 nœuds et 11 arêtes de longueur 1, et celui de Golomb (*ci-dessous*), qui compte 10 nœuds, ne peuvent être coloriés avec moins de 4 couleurs.



10 nœuds), par exemple, requièrent 4 couleurs. Ainsi, le nombre chromatique du plan devrait être compris entre 4 et 7.

Or Aubrey de Grey a construit des graphes composés de points du plan, dont un grand nombre de paires sont à distance 1, et qui nécessitent 5 couleurs. Pour les réaliser, il a fusionné des copies du graphe de Moser et des graphes hexagonaux. Son graphe initial comprenait 20 425 nœuds. Il l'a ensuite simplifié pour en obtenir un second, qui ne contient plus que 1 581 nœuds.

Le nombre chromatique du plan est donc compris entre 5 et 7. Maintenant, une autre énigme se pose: le graphe d'Aubrey de Grey est-il le plus petit possible nécessitant 5 couleurs? La communauté virtuelle de mathématiciens Polymath, sous l'impulsion d'Aubrey de Grey et Dustin Mixon, de l'université d'État de l'Ohio, s'est emparée de la question. Plusieurs personnes ont rapidement proposé des graphes simplifiés. Pour l'instant, le plus petit est celui de Marijn Heule, chercheur en informatique à l'université du Texas, à Austin: ce graphe n'a «que» 826 nœuds. ■

S. B.

A. de Grey, en ligne sur arXiv le 8 avril 2018, <https://arxiv.org/abs/1804.02385>

HYBRIDATION DES CIGALES PÉRIODIQUES

Les cigales vivent une grande partie de leur vie sous terre, à l'état de larve. Dans l'est américain, les différentes espèces de cigales « périodiques » présentent un cycle de vie de 13 ou 17 ans (deux nombres premiers qui font qu'elles ne se croisent que tous les 221 ans !). Ces cycles seraient apparus il y a 100 000 à 200 000 ans. Teiji Sota, de l'université de Kyoto, et ses collègues ont étudié le génome de ces cigales. Ils n'ont pas pu déterminer l'origine des cycles, mais ont montré que, malgré leurs rares rencontres, ces espèces se sont beaucoup hybridées.

LA TEMPÉRATURE DES ORGUES DE BASALTE

En se refroidissant, la lave basaltique forme parfois des ensembles de colonnes de section hexagonale, à l'image de la Chaussée des géants, en Irlande du Nord. Une question cruciale restait sans réponse : à quelle température le basalte se fend-il ainsi ? Anthony Lamur, de l'université de Liverpool, et ses collègues ont conçu un dispositif pour le déterminer sur des laves du volcan islandais Eyjafjallajökull. Résultat : le basalte cristallise à 980 °C et se fend en hexagones entre 890 °C et 840 °C.

DU PIN DANS LA GROTTÉ CHAUVET

Avec ses collègues, Isabelle Théry-Parisot, de l'université Nice-Sophia-Antipolis et du CNRS, a étudié 171 échantillons de charbon de bois laissés par les hommes qui occupaient la grotte Chauvet-Pont d'Arc, dans l'Ardèche, durant l'Aurignacien (de 37 000 à 33 500 ans avant notre ère) et au Gravettien (de 31 000 à 28 000 ans avant notre ère). À l'exception d'un échantillon, tous proviennent de bois de pin, qui produit de grandes flammes, de quoi éclairer la grotte. La présence de conifères signe un climat froid et sec.

SÉISMES EN PROFONDEUR

Les couches profondes de la croûte terrestre exercent une influence visible sur les couches superficielles, notamment pour ce qui est des processus de formation des montagnes, d'ouverture des rifts océaniques ou d'affaissement des bassins sédimentaires. Des études récentes suggèrent que la partie inférieure de la croûte terrestre subit des dommages provoqués par des séismes, mais cela semblait surprenant : la pression, à plus de 30 kilomètres de profondeur, est si élevée que les roches ne devraient pas y produire de séismes. François Renard, de l'Institut des sciences de la Terre, à Grenoble, et ses collègues viennent de proposer que ce sont des séismes de la partie supérieure de la croûte, et leurs répliques, qui se propagent jusque dans la croûte inférieure.

En profondeur, ces répliques fracturent les roches où de l'eau s'infiltre. Des réactions de métamorphisme transforment ces roches en d'autres, mécaniquement plus fragiles. Les chercheurs ont modélisé cet effet des séismes et estimé la proportion en volume de la croûte inférieure touchée par ces trains de répliques au cours du temps. Dans les zones à forte sismicité de surface, telles que les zones de subduction ou l'Himalaya, au minimum 1 % du volume de la couche profonde de la croûte



Des affleurements de croûte profonde en Norvège témoignent des effets de séismes de surface sur ces roches.

aurait été endommagé par des ruptures sismiques peu profondes.

Ces observations montrent pour la première fois que le modèle classique dit ascendant, où la croûte profonde influencerait presque à sens unique sur le comportement de la croûte superficielle, est insuffisant, et qu'il est nécessaire de considérer les interactions « descendantes » dans les modèles géodynamiques. La fragilisation de la croûte profonde par les séismes est ainsi à prendre en compte dans la dynamique des plaques tectoniques ou la formation et l'évolution des chaînes de montagnes. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

B. Jamveit et al.,
Nature, vol. 556, pp. 487-491, 2018

LE TRÉSOR DE HARALD

Dans le sol d'un tumulus arasé de l'île de Rügen, en Poméranie allemande, deux archéologues amateurs suspectaient la présence résiduelle de matériel archéologique. Comme ils avaient trouvé des indices convaincants, le Service pour la culture et le patrimoine du Land de Mecklembourg-Poméranie-Occidentale a envoyé une équipe qui a mis au jour un trésor viking d'argent comprenant 600 pièces de monnaies, notamment arabes, dont une centaine datent du règne de Harald I^{er} de Danemark (de 958 à 986). Les archéologues ont aussi trouvé des perles, un très rare bijou en forme de marteau de Thor, des broches et des torques brisés. La richesse et le niveau artistique du trésor suggèrent qu'il a pu appartenir à quelqu'un de l'entourage du roi, voire au roi ; on sait que ce dernier, blessé après une bataille



Certaines des pièces d'argent à l'effigie de Harald I^{er} de Danemark trouvées parmi les 600 monnaies du trésor.

contre le parti des Vikings restés païens et rassemblés autour de son fils Sven, est venu se réfugier, puis mourir en Poméranie slave. En Allemagne, l'idée qu'un roi semi-léendaire ait caché avant de mourir un trésor sur une île aujourd'hui allemande suscite de l'enthousiasme. Ce n'est pourtant qu'une possibilité... ■

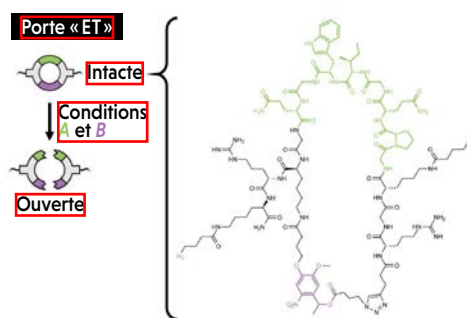
P. S.

BIOCHIMIE

BIOMATÉRIAU LOGIQUE

Améliorer les chimiothérapies passe par la mise au point de transporteurs qui délivrent des molécules bioactives directement au cœur des tissus malades. En évitant ainsi les tissus sains, le traitement peut être plus agressif sans pour autant causer d'effets secondaires. Le mécanisme de reconnaissance des zones malignes par ces transporteurs, qui doit provoquer la libération des anticancéreux, est ainsi critique: l'existence de traits communs entre les tissus sains et cancéreux rend très complexe sa conception. Aussi, renonçant à des systèmes trop simplistes, les chercheurs s'attellent à imaginer des transporteurs prenant en compte plusieurs paramètres à la fois.

Barry Badeau et ses collègues, de l'université de Washington, ont conçu un nouveau type de transporteur sous la forme d'un hydrogel biocompatible «programmable», qui emprisonne les substances à véhiculer et se dissout en réponse à des stimuli simultanés de son environnement, à la manière des portes logiques



Les «portes logiques» moléculaires provoquent une réaction en fonction de plusieurs conditions du milieu.

élémentaires «OUI», «ET» et «OU». Ce gel est constitué à 90% d'eau, retenue par un réseau polymérique dont chaque unité est constituée de trois segments, lesquels se brisent chacun en fonction d'une caractéristique spécifique du milieu. Les chercheurs ont entrepris des tests *in vitro* en utilisant un hydrogel piégeant de la doxorubicine, un anticancéreux. Ils ont constaté que seul le milieu qui avait les bonnes caractéristiques provoque la libération de la doxorubicine, qui détruit alors totalement les cellules cancéreuses. ■

MARTIN TIANO

B. A. Badeau et al., *Nature Chemistry*, vol. 10, pp. 251-258, 2018

EN BREF

MESURE PRÉCISE DE LA CONSTANTE DE STRUCTURE FINE

Cette grandeur, associée à la force

électromagnétique, vaut environ 1/137. Mais son calcul, par la théorie, est très sensible au modèle choisi pour décrire la physique des particules. En effet, les physiciens savent que le modèle standard n'est qu'une approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale. Pour sonder cette dernière, Richard Parker et ses collègues, de l'université de Californie, à Berkeley, ont mesuré la constante de structure fine à partir d'atomes de césium 133 avec une précision de l'ordre de 10^{-10} . Ils écartent ainsi certains scénarios au-delà du modèle standard, comme l'hypothèse de photons sombres, des particules en lien avec des modèles de matière noire.

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Partagez les savoirs

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

CONFÉRENCE / DÉBATS

AUTOUR DE L'EXPOSITION UN T.REX À PARIS

Lundi 4 juin – 18h : Comment les fossiles montrent l'évolution ?
 Animé par Guillaume Lecointre, zoologiste et systématicien, Muséum.
 Avec Alexandra Houssaye, paléohistologue, Muséum.
 Isabelle Rouget, spécialiste de l'évolution des céphalopodes, Muséum.
 Philippe Taquet, paléontologue, professeur émérite, Muséum

Lundi 11 juin – 18h : Un chercheur, un livre
 Une journée avec les dinosaures, C. Argot et L. Vivès.
 Ed. Flammarion – Muséum

Lundi 18 juin – 18h : Paléontologie, mythes et légendes
 Pascal Tassy, paléontologue, professeur émérite, Muséum

Lundi 25 juin – 18h : Biodiversité au cours des temps géologiques : acquis et idées reçues
 Patrick De Wever, géologue, professeur, Muséum

Lundi 2 juillet – 18h : Les Dinosaures du Vignoble
 Ronan Allain, maître de conférences, Centre de Recherche de Paléontologie de Paris (CR2P), Muséum

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

L'EAU, DÉJÀ SUR LA TERRE JEUNE

D'où vient l'eau terrestre? La planète s'est formée dans une région de l'espace *a priori* assez pauvre en eau. L'hypothèse est donc qu'un bombardement tardif de comètes et d'astéroïdes, après la formation de la Lune, aurait apporté cet élément. Mais, en 2015, l'équipe de Lydia Hallis, de l'université de Hawaï, a montré qu'une part de cette eau provient de matériaux qui ont formé la Terre, sans pouvoir préciser la fraction que cela représente.

Maintenant, Richard Greenwood, de l'Open University, au Royaume-Uni, et ses collègues estiment que seuls 5% à 30% de l'eau viendraient d'impacts tardifs. Les chercheurs ont analysé les isotopes de l'oxygène dans des échantillons de roches lunaires et terrestres. Les contraintes de leur modèle sur la formation de la Lune suggèrent que les bombardements tardifs ont eu une contribution mineure. ■

S. B.

R. C. Greenwood et al., *Science Advances*, vol. 4, eaao5928, 2018

BIOLOGIE ANIMALE

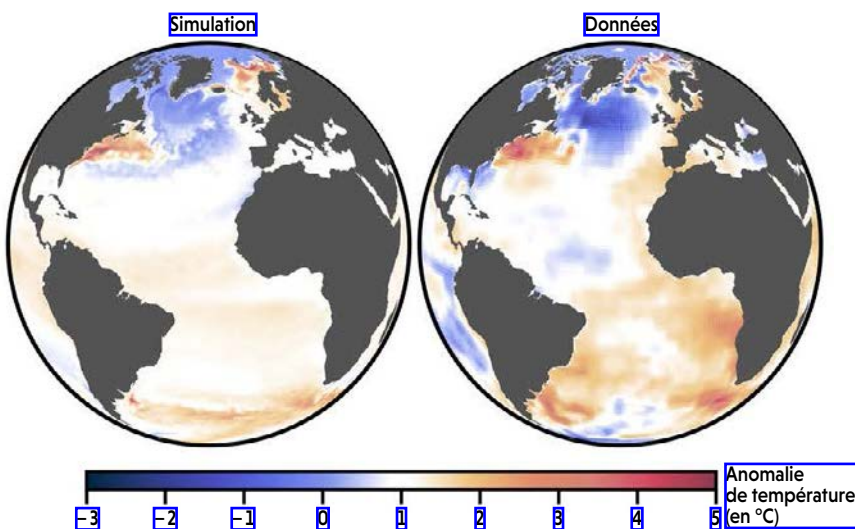
LE COLIBRI SIFFLE EN PIQUÉ

Pour séduire, certains animaux font la démonstration de leur célérité. Les colibris mâles volent en piqué droit sur les femelles et produisent un son aigu avec les plumes de leur queue. Plus le vol est rapide, plus les plumes vibrent et plus la fréquence du son est élevée. Malgré l'effet Doppler qui déforme le son perçu par la femelle, celle-ci estimerait la fréquence du son et, partant, la vitesse du mâle. Cela reste à prouver, mais les chercheurs supposent que les femelles ont une préférence pour les sons les plus aigus et donc les mâles les plus rapides. Dans ce contexte, Christopher Clark et Emily Mistick, de l'université de Californie, à Riverside, ont observé le comportement particulier du colibri de Costa (*Calypte costae*). Son vol en piqué vise à côté de la femelle. Il est par ailleurs capable de plier sa queue afin d'orienter le son directement sur la femelle. Ce faisant, il module la fréquence du son, mais amplifie aussi sa puissance de 11 décibels. Sa vitesse réelle est ainsi masquée. Un tricheur? ■

S. B.

C. J. Clark et E. A. Mistick, *Current Biology*, vol. 28, pp. 1257-1264, 2018

LE COURANT ATLANTIQUE NORD A FAIBLI DE 15%



L'équipe de Levke Caesar a étudié les anomalies de température liées aux courants marins dans l'océan au sud de l'Islande. Les simulations et les données sont en accord.

Un système complexe de courants parcourt l'océan Atlantique, dont la circulation méridienne de retournement atlantique (Amoc). Deux principaux courants la composent: un courant d'eau chaude de surface qui prend sa source dans le Gulf Stream et remonte vers le nord-est de l'océan Atlantique, et une circulation d'eau froide et salée en profondeur qui passe au large des côtes nord-américaines, des hautes latitudes vers le sud. Les importants échanges de chaleur entre l'océan Atlantique Nord et l'atmosphère suggèrent que des modifications de la dynamique du premier auraient un impact considérable sur le climat global. Pour mieux comprendre l'évolution à long terme de l'Amoc, deux équipes, menées par Levke Caesar, de l'université de Potsdam, en Allemagne, et par David Thornalley, de l'University College, à Londres, ont retracé l'intensité de son courant.

Levke Caesar et ses collègues ont étudié des anomalies de température à la surface de l'océan, signatures caractéristiques des modulations de l'Amoc, qu'ils ont ensuite reproduites *via* des simulations climatiques. Avec des données remontant jusqu'à la fin du XIX^e siècle, les chercheurs ont montré que l'Amoc avait perdu 15% de son intensité depuis environ 50 ans. Ils suggèrent que la fonte de la calotte groenlandaise, en apportant de l'eau douce, serait à l'origine de cette perturbation.

L'équipe de David Thornalley a étudié la taille des grains de terre retrouvés dans le limon au fond de l'océan Atlantique Nord subpolaire. La composition de ces sédiments est un indicateur de la force des courants. Les chercheurs ont ainsi montré que l'Amoc a été stable pendant près de 1500 ans, mais aurait commencé à faiblir il y a près de 150 ans, c'est-à-dire à la fin du petit âge glaciaire (vers 1850). Là aussi, la baisse est estimée à 15%, et la fonte des glaciers et de la glace de mer pourrait être à l'origine de cette tendance. Malgré la similarité du mécanisme suggéré, l'échelle de temps sur laquelle le phénomène est analysé diffère entre les deux articles. Il reste donc à déterminer s'il s'agit du même processus. ■

S. B.

L. Caesar et al., *Nature*, vol. 556, pp. 191-196, 2018 ;
D. J. R. Thornalley et al., *ibid.*, pp. 227-230

NEUROSCIENCES

COMMENT LE CERVEAU LIBÈRE DE L'ESPACE MÉMOIRE

Pour la première fois, lors d'un apprentissage chez les rats, des chercheurs ont visualisé l'apparition de nouvelles connexions neuronales et la disparition d'autres – pour faire de la place.

La plupart du temps, nous ne nous souvenons pas de tout ce que nous avons vu, entendu, vécu... C'est bien normal: la capacité de notre mémoire n'est pas infinie. Ce que nous retenons est en effet stocké dans le cerveau sous forme de nouvelles connexions entre neurones, c'est-à-dire de nouvelles synapses, ou par un renforcement de celles-ci. Et pour la première fois, Cailey Bromer, de l'institut Salk, en Californie, et ses collègues ont mis en évidence, chez les rats, un mécanisme cellulaire de compensation: quand de nouvelles synapses apparaissent, d'autres sont éliminées. Parce qu'il faut bien libérer de la place...

Toute nouvelle information ou tout nouvel apprentissage est d'abord stocké dans les hippocampes, des régions centrales du cerveau, plaques tournantes de la mémorisation, qui communiquent avec diverses zones du cortex où seront ensuite « envoyés » les souvenirs à très long terme. Les hippocampes sont une des rares aires cérébrales où des neurones et des synapses apparaissent encore à l'âge adulte. En outre, ils sont le siège d'une intense « plasticité »: des connexions se font jour, d'autres disparaissent, *via* deux mécanismes cellulaires, à savoir la potentialisation à long terme, ou LTP, qui renforce la synapse, et la dépression à long terme, ou LTD, qui l'affaiblit.

Pour comprendre le rôle de la synapse dans la mémorisation, il faut d'abord rappeler son fonctionnement. L'influx nerveux est apporté par l'axone d'un premier neurone jusqu'à un « bouton » présynaptique où des messagers chimiques, les neurotransmetteurs, sont libérés. Ces derniers sont alors captés par des récepteurs à la surface d'une dendrite, un prolongement d'un autre neurone, lequel transmettra l'influx nerveux. Un neurone présente un unique axone, mais plus ou moins de dendrites, parfois dotées d'épines dendritiques – comme dans les neurones de l'hippocampe –, au bout desquelles on trouve une synapse.

Les chercheurs ont étudié les capacités de stockage des neurones dans les hippocampes, notamment des cellules granulaires de la couche dite moléculaire, et les ont comparées à celles des cellules pyramidales de la couche dite CA1, également dans l'hippocampe.



Les neurones sont connectés les uns aux autres par des synapses. Lorsque nous mémorisons une information, de nouvelles synapses apparaissent, mais d'autres sont éliminées.

Pour ce faire, ils ont provoqué une LTP entre neurones dans l'hippocampe de rats éveillés, à l'aide d'électrodes de stimulation implantées chirurgicalement. Ils reproduisent ainsi les conditions d'un nouvel apprentissage. Puis ils ont visualisé par microscopie électronique en trois dimensions la taille et le nombre de synapses et des épines le long des dendrites.

Résultats: 30 minutes après la LTP, les synapses des épines dendritiques grossissent; leur bouton présynaptique augmente de volume et recèle davantage de vésicules de neurotransmetteurs, tandis que la densité des récepteurs postsynaptiques augmente. La capacité de stockage des cellules granulaires est donc meilleure, mais reste inférieure de l'ordre de 30% à celle constatée dans la région CA1.

Plus intéressant: par unité de longueur de dendrite, le nombre d'épines et l'aire totale des synapses restent constants après la LTP, ce qui suggère que certaines synapses diminuent de volume ou des épines disparaissent à d'autres endroits, probablement par un phénomène compensatoire de LTD, avec certainement une perte de données. De la place serait ainsi faite pour que de nouvelles informations soient accumulées, le volume total des couches des hippocampes ne pouvant pas augmenter à l'infini. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

C. Bromer *et al.*, PNAS, en ligne le 6 mars 2018

il s'en PASSÉ DES CHOSES SOUS NOS COUVERTURES

Déposez chez RELAY à partir du 14 sept,
les magazines les plus talentueux et les plus audacieux de l'année.

PREMIER RELAY DES MAGAZINES DE L'ANNÉE 2014



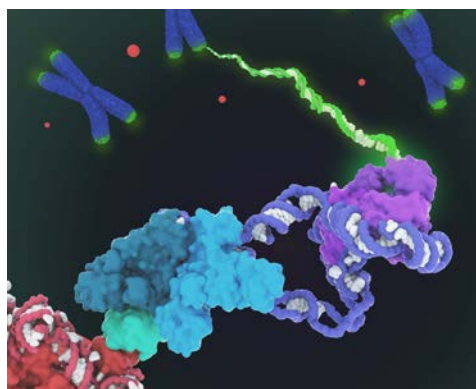
BIOLOGIE

LA TÉLOMÉRASE CARTOGRAPHIÉE

Chez les eucaryotes, les extrémités des chromosomes, nommées télomères, sont constituées de répétitions de séquences non codantes d'ADN (chez l'homme, la séquence TTAGGG est répétée sur environ 1000 paires de bases). La télomérase, une enzyme qui joue un rôle crucial dans le maintien des télomères, vient de voir sa structure décrite avec une précision inégalée.

À chaque division cellulaire, les télomères perdent un morceau de leur séquence et raccourcissent donc au cours du temps. Lorsqu'ils sont devenus trop courts, les cellules entrent dans un processus de sénescence répllicative et ne se divisent plus. Avec l'âge, elles s'accumulent dans les organes et sont une cause majeure du vieillissement des tissus. Or la télomérase limite le phénomène de sénescence. Il s'agit d'un grand complexe moléculaire, constitué d'une enzyme (la transcriptase inverse), d'un ARN et de protéines. La télomérase se fixe sur les télomères et, à partir de son ARN, synthétise de nouvelles séquences - TTAGGG chez l'homme.

L'équipe de Kathleen Collins, de l'université de Californie à Berkeley, a déterminé la structure de la télomérase humaine à une résolution subnanométrique. Elle a utilisé la



La télomérase, une enzyme liée à l'ADN, est constituée de deux lobes (violet et bleu-vert) dont les rôles viennent d'être précisés.

cryomicroscopie électronique, une technique qui consiste à congeler très vite des échantillons biologiques pour les observer dans leur état naturel. L'équipe a ainsi montré que le complexe est composé de deux lobes dans lesquels l'ARN fait office d'échafaudage pour différentes protéines. L'un des lobes contiendrait le noyau catalytique de l'enzyme ainsi que la séquence d'ARN servant de modèle pour les répétitions d'ADN. L'autre lobe contiendrait différentes protéines nécessaires entre autres à la maturation ou au transport de l'ARN. ■

A. G.

T. H. D. Nguyen et al., *Nature*, en ligne le 25 avril 2018

ASTROPHYSIQUE

IO BRILLE DE MILLE FEUX

De la même façon que la Terre, de nuit, scintille des lumières des villes, Io, la lune de Jupiter, brille grâce à ses volcans actifs. La sonde Juno, actuellement en orbite autour de Jupiter, l'a confirmé en l'observant en infrarouge. C'est lors du septième passage de la sonde sur une orbite très elliptique, en juillet 2017, que la caméra JIRAM (qui a par ailleurs réalisé d'exceptionnelles images de la planète géante gazeuse) a photographié Io.

À partir de ces données brutes et publiques, l'astronome amateur russe Roman Tkachenko a composé l'image de Io. On y voit ainsi une partie de la lune de nuit, où se distinguent de nombreux points lumineux: les volcans actifs de Io. On note qu'ils sont répartis sur toute la surface du corps et que le volcanisme y est



Les volcans de ce satellite de Jupiter brillent intensément dans l'infrarouge.

particulièrement intense. De fait, ce corps est le plus actif de tout le Système solaire: pas moins de 400 volcans y rejettent du soufre et du dioxyde de soufre, donnant à sa surface des teintes blanches, jaunes et vertes. ■

S. B.

https://www.nasa.gov/mission_pages/juno/

EN BREF

UNE NOUVELLE FOURMI EXPLOSIVE

Mentionnées pour la première fois en 1916, les fourmis explosives ont commencé à être vraiment étudiées en 2014. Alice Laciny, de l'université technique de Vienne, et ses collègues ont ainsi découvert une quinzaine de nouvelles espèces et en ont formellement décrit une, *Colobopsis explodens*. En cas de menace, les ouvrières de cette espèce se déchirent le corps, libérant un liquide collant et toxique qui tue l'assaillant ou ralentit sa progression.

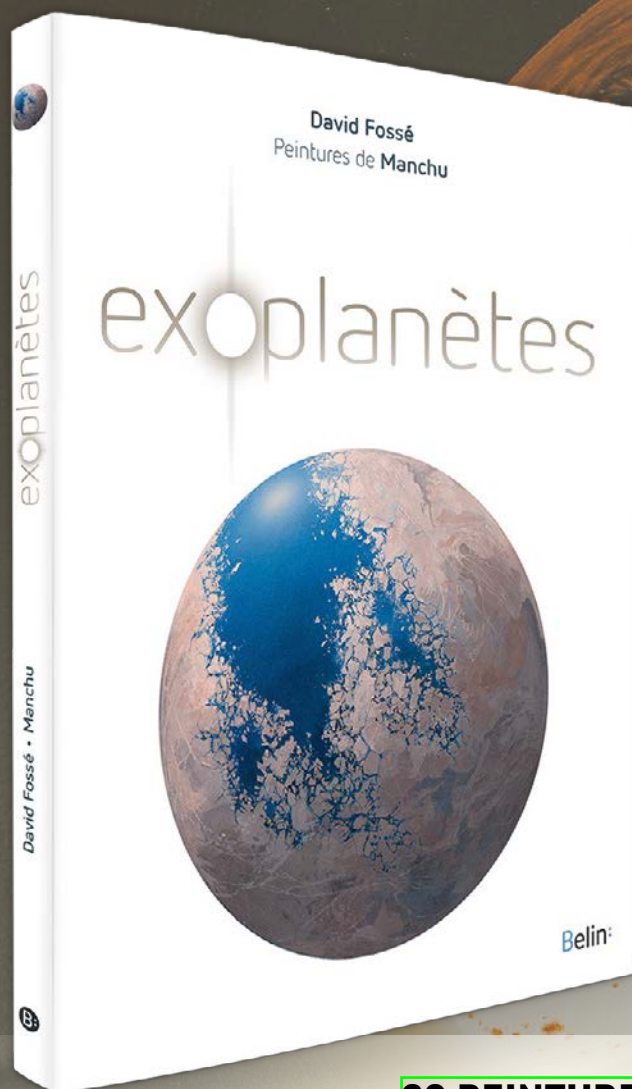
ÉTIRER LE GRAPHÈNE ET L'EMPLER

Récemment, des chercheurs ont montré qu'en empilant deux couches de graphène (un maillage régulier 2D d'atomes de carbone) avec un angle relatif de 1,1°, nommé angle magique, on obtient des propriétés électroniques intéressantes. Cette fois, Vincent Renard, de l'université Grenoble-Alpes, et ses collègues ont montré qu'il est aussi possible de moduler les propriétés électroniques de deux couches de graphène empilées en étirant l'une par rapport à l'autre.

AMPHIBIENS ET PERTURBATEURS

Depuis les années 1980, les populations d'amphibiens déclinent. Pourquoi ? Pour tester l'hypothèse des perturbateurs endocriniens, Stéphane Reynaud, de l'université Grenoble-Alpes, et ses collègues ont exposé des xénopes (*Xenopus tropicalis*) à des doses environnementales de deux perturbateurs endocriniens (l'antimicrobien triclosan et l'hydrocarbure polycyclique benzo[a]pyrène). Les animaux ont développé un syndrome métabolique proche du diabète de type 2. Cela s'est traduit par un développement limité et une baisse du succès reproducteur de la progéniture.

LE VOYAGE VERS D'AUTRES MONDES COMMENCE

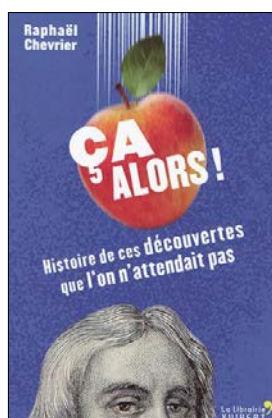
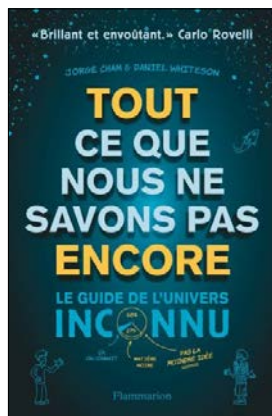


30 PEINTURES INÉDITES
du maître de l'illustration SF
MANCHU

Belin:

belin-editeur.com





PROSPECTIVE

TOUT CE QUE NOUS NE SAVONS PAS ENCORE

Jorge Cham et Daniel Whiteson

Flammarion, 2018
400 pages, 21,90 euros

«V

otre théorie est folle, mais pas assez pour être vraie», aurait affirmé le physicien danois Niels Bohr à l'un de ses collègues. On ne saurait faire ce reproche aux théories évoquées par les auteurs du livre, qui nous font entrevoir les réponses aux questions que nous aurions dû nous poser depuis longtemps. Ainsi, pour expliquer la valeur de la vitesse de la lumière, certains physiciens, kamikazes de leur discipline, s'interrogent sur la possibilité d'un univers sans causalité. Pour voyager vers d'autres galaxies, les auteurs invoquent une compression de l'espace-temps et pour rendre compte de la faible valeur de la force de gravitation, ils imaginent des dimensions nombreuses, mais millimétriques, où la gravitation pourrait «se dissoudre». Nous nous étions un peu habitués aux idées farfelues contraires à notre logique intuitive depuis que la mécanique quantique nous avait affirmé, et cela fut confirmé par l'expérience, qu'un électron peut être à deux endroits à la fois et que si nous vivions dans un univers à quatre dimensions, des choses apparaîtraient de manière incongrue pour disparaître ensuite sans raison apparente.

Une fois dans l'histoire, à la fin du XIX^e siècle, nous avons cru que nous avions tout découvert... sauf le rayonnement du corps noir, qui a engendré une révolution en physique: la mécanique quantique. Les temps ont bien changé: en ce début de XXI^e siècle, il apparaît que nous ne connaissons que 5% de la matière de l'Univers et que les lois qui gouvernent l'important reliquat de 95% sont absolument inconnues... Le livre est vivifiant d'intelligence et le ton est humoristique, avec des analogies savoureuses. Contrairement aux livres de physique, souvent rabat-joie car ils limitent nos possibilités d'action, cet ouvrage nous fait vivre dans un univers nouveau et rempli de pensées intrépides. Il est exaltant de comprendre ce que personne ne comprend.

PHILIPPE BOULANGER / ANCIEN DIRECTEUR DE POUR LA SCIENCE

PALÉONTOLOGIE HUMAINE

ORIGINES DE L'HOMME, ORIGINES D'UN HOMME

Yves Coppens

Odile Jacob, 2018
464 pages, 24,90 euros

Où l'on apprend que l'auteur, «père» de l'australopithèque Lucy, a fourbi ses premières armes sur les côtes bretonnes, remontant le temps des augets romains, servant à la récolte et au séchage du sel, aux mégalithes néolithiques. Il était alors enfant, atteint précocement par l'«archéologite» et l'«exotite» (l'attrait de l'ailleurs). Un peu plus tard, au Muséum, il devient spécialiste des mammouths, dont il remonte le squelette avec brio, confortant cet essai grâce à la dissection d'une éléphant – il suffit de la découper préalablement en six morceaux...

L'Afrique s'introduit modestement par le biais des dents de pachydermes fossiles. Aux années de mission au Tchad succède l'étude d'une tranche de sédiments particulièrement complète dans la vallée de l'Omo. Cette tranche-là de la carrière d'Yves Coppens est sans doute la mieux connue de tous. On en a ici une narration plus humaine, à travers les aléas de la mission et de la vie «ordinaire», si l'on peut dire!

Les missions dans d'autres terres lointaines et dans la cité, moins connues, montrent que la vie d'un chercheur ne se borne pas à une découverte, si importante et si médiatisée soit-elle. Qu'il faut savoir aller de l'avant, voire remettre en question les hypothèses d'un moment, que rien n'est jamais certitude, et que les autres ont aussi leur pierre à apporter à l'édifice. Un scientifique doit toujours être ouvert sur la vie et sur les autres et a le devoir de transmettre ses connaissances sans se laisser figer sur une image. Et c'est sans doute là l'apport essentiel de cet ouvrage, ouvert sur l'avenir.

NADINE GUILHOU / UNIVERSITÉ PAUL-VALÉRY, MONTPELLIER

IMPACTS

DES MÉTÉORES
AUX CRATÈRES

Sylvain Bouley (dir.)

Belin, 2017

192 pages, 23 euros

Les médias propagent régulièrement des informations plus ou moins alarmistes au sujet d'astéroïdes qui viendraient frôler notre planète et risqueraient d'entrer en collision avec elle. Et les données tant astronomiques que géologiques sont bien là pour le prouver: la Terre, comme les autres planètes du Système solaire, est soumise à un bombardement continu d'objets venus de l'espace. Ce livre a pour but d'informer le lecteur sur ces pierres tombées du ciel qui, lorsqu'elles atteignent des dimensions suffisantes, laissent à la surface du globe des cratères témoignant de leur impact. Rédigé par un groupe de spécialistes, il examine tous les aspects de la question, depuis l'origine des météorites et l'histoire de leur interprétation jusqu'aux effets de leurs collisions avec les planètes, dont la Terre (effets qui peuvent aller jusqu'à l'extinction en masse d'espèces vivantes, comme en témoignent les événements survenus à la limite entre le Crétacé et le Tertiaire, il y a 66 millions d'années). Les courts chapitres consacrés à des aspects très variés de l'étude des météorites et de leurs impacts sont superbement illustrés de photos et de diagrammes, et combinent clarté de l'exposé et précision scientifique. À noter, à la fin du livre, une série de fiches pratiques expliquant comment observer des chutes de météorites, les reconnaître lorsqu'on les retrouve au sol, et interpréter les cratères qu'elles peuvent laisser – en participant par exemple au programme de sciences participatives Vigie-Ciel.

Alors qu'elle se développait de façon considérable dans de nombreux pays durant les dernières décennies, l'étude des météorites, et surtout celle de leurs impacts, a pu sembler un peu délaissée en France, où certains géologues ont paru douter de l'importance de ces phénomènes dans l'histoire de notre planète et de ses habitants. Ce livre très documenté et attrayant montre à l'évidence que, fort heureusement, ce n'est plus le cas aujourd'hui.

ERIC BUFFETAUT / CNRS, ENS

ÇA ALORS !

HISTOIRE DE CES
DÉCOUVERTES QUE L'ON
N'ATTENDAIT PAS

Raphaël Chevrier

Vuibert, 2018

224 pages, 15,90 euros

Le titre de ce livre s'accorde avec son ton décontracté, adapté à un public jeune, curieux de sciences mais pas averti des coups de théâtre fameux qui jalonnent leur histoire. Le livre expose quatorze pour illustrer la sérendipité, définie par une jolie formule: savoir enlever ses œillères. L'auteur regrette que les chercheurs actuels travaillent selon un programme, sacrifiant ainsi la disponibilité intellectuelle essentielle à leur activité.

Sans omettre les explications scientifiques (l'auteur est physicien), le livre s'attache aux personnalités. Ténacité, audace et aptitude à saisir la chance les caractérisent. Le médecin Jenner écoute les histoires racontées par les paysans et cela lui donne l'idée de la vaccination. La nitroglycérine renversée par mégarde tombe sur un sable de composition très particulière et n'explose pas, ce qui permet à Nobel de fabriquer la dynamite. Le ciel couvert aide Becquerel à mettre en évidence la radioactivité. Penzias et Wilson chassent les pigeons qui pourraient avoir faussé les mesures obtenues par leur antenne radio, puis se rendent compte qu'elles détectent en fait le rayonnement fossile. Jocelyn Bell repère des anomalies dans des signaux issus du cosmos, découvre les pulsars... et, étant femme et jeune, voit le prix Nobel aller à son directeur de thèse. Finissons sur une curiosité. Röntgen, mis sur la piste des rayons X par son exceptionnelle acuité visuelle, est, pages 93-94, un jeune ambitieux, atypique, intransigeant, opportuniste et, page 103, un homme discret, modeste, courtois, empathique, désintéressé. Un principe de superposition quantique doit-il lui être appliqué?

DIDIER NORDON / ESSAYISTE

CE QUE LES OISEAUX DISENT
DES HOMMES

Noah Strycker

Arthaud, 2018

292 pages, 21 euros

Un ornithologue réputé avoir vu en une année 6 042 des 10 400 espèces d'oiseaux connus cherche à sensibiliser aux oiseaux. Son discours éclectique est divisé en trois parties, dans lesquelles il passe en revue mille facettes biologiques, comportementales ou cognitives des oiseaux. Saviez-vous par exemple que, introduits en Amérique à la fin du XIX^e siècle, les étourneaux y sont devenus nombreux et détestés ? Que les mâles des oiseaux jardiniers se construisent des garçonnières, ou encore qu'un cacatoès blanc nommé Snowball est devenu célèbre au États-Unis parce qu'il danse comme Michael Jackson sur sa musique ?

LES MATHÉMATIQUES ET LE RÉEL
Éveline Barbin, Dominique Bénard
et Guillaume Moussard (dir.)

Presses universitaires de Rennes, 2018

248 pages, 20 euros

Oui, les mathématiques ont un rapport avec le réel, avec l'expérience ! Afin d'aider les enseignants, les directeurs de cet ouvrage ont rassemblé une quinzaine d'articles à sujets historiques et pratiques rédigés par différentes équipes de chercheurs. Tous invitent à réaliser par des expériences un type de phénomène mathématique. Les éléments d'histoire des mathématiques qui accompagnent ce matériel rendent l'ouvrage encore plus intéressant.

ADN
Adam Rutherford

Larousse, 2018

400 pages, 20,95 euros

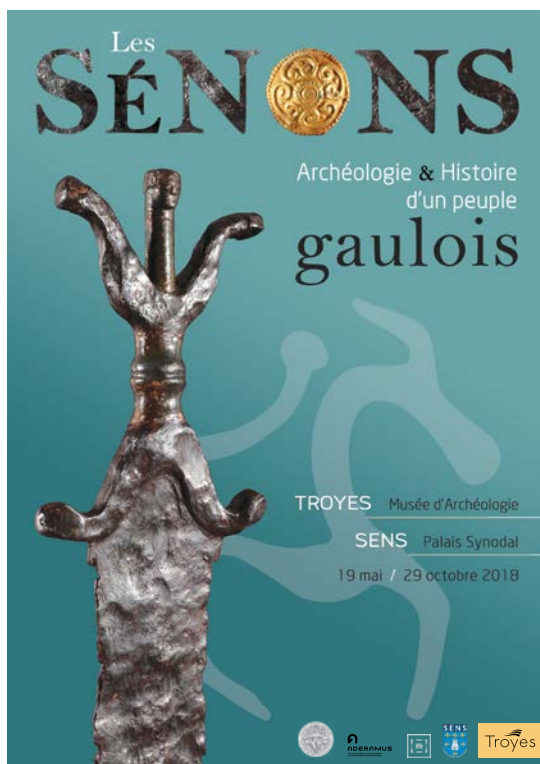
Relatant une foule de recherches paléogénétiques, l'auteur montre de quelle manière la génomique raconte l'histoire de l'humanité. Sa narration passionnée, car elle répond à des questions que nous nous sommes déjà posées sur les premiers Européens, sur nos origines, sur les blonds, sur les roux... Très facile d'accès, son livre suscite le plaisir de la curiosité satisfaite et nous aide à prendre conscience que, si nous sommes les produits d'une loterie aveugle – la loterie génétique –, elle nous a tous faits uniques.

TROYES - SENS

JUSQU'AU 29 OCTOBRE 2018

Musée des Beaux-Arts et d'Archéologie (Troyes), Palais synodal (Sens)
Tél. 03 25 42 20 09 (Troyes), Tél. 03 86 83 88 90 (Sens)

Les Sénons : archéologie et histoire d'un peuple gaulois



Peuple celte originaire du centre-est de la Gaule, les Sénons se sont fait connaître en participant à la prise et au pillage de Rome en 390 avant notre ère. L'exposition qui se tient simultanément à Troyes et à Sens vise à familiariser un large public avec ce peuple et son histoire, du début du IV^e siècle jusqu'à la fin du I^{er} siècle avant notre ère, lorsque la Gaule a perdu son indépendance.

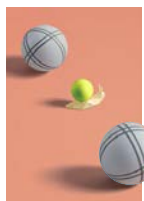
La priorité a été de donner une image scientifiquement cohérente des Sénons, sur la base des découvertes archéologiques – lesquelles se sont multipliées ces dernières décennies, en particulier avec le développement de l'archéologie de sauvetage. L'histoire des Sénons est abordée dans les deux sites d'exposition, mais ceux-ci se complètent sur certaines thématiques: le musée de Sens présente ainsi l'univers religieux et les pratiques funéraires, tandis que le musée de Troyes expose l'organisation du territoire et l'habitat, l'agriculture, l'artisanat, la monnaie, la langue et son écriture... ■

VILLENEUVE-D'ASCQ

JUSQU'AU 2 SEPTEMBRE 2018

Forum départemental des sciences
forumdepartementaldessciences.fr

Risque, osez l'expo!



Qu'est donc le risque? Pourquoi l'individu doit-il faire preuve de courage et d'audace? Comment la société essaie-t-elle de prévenir les risques ou les réduire? Telles sont les questions qu'aborde cette exposition au design coloré, et qui propose 25 manipulations interactives, par exemple avec des lunettes pour voir comme un ivrogne... ■

POITIERS

JUSQU'AU 3 MARS 2019

Espace Mendès-France
emf.fr

Tous humains



Atravers des panneaux explicatifs, des objets, des photos, des manipulations, etc., cette exposition retrace l'histoire d'*Homo sapiens* et fait comprendre que, malgré la grande diversité apparente des individus et des cultures, nous formons une espèce unique et génétiquement si homogène que la notion de races humaines est inepte. ■

ET AUSSI

Du 6 juin au 2 septembre
Muséum national d'histoire naturelle - Paris
mnhn.fr

UN T. REX À PARIS

Pour la première fois en France, un vrai squelette de *Tyrannosaurus rex*, impressionnant monstre de la fin du Crétacé, est exposé (voir l'entretien avec Ronan Allain, le commissaire scientifique de l'exposition, pages 52 à 57).

Jeudi 7 juin, 18 h
Campus Joseph-Aiguier
Marseille
provence-corse.cnrs.fr

L'INTELLIGENCE SOCIALE DU CHIEN

Florence Gaunet, chercheuse au Laboratoire de psychologie cognitive, à Marseille, explique pourquoi le chien est « le meilleur ami de l'homme ».

Jeudi 7 juin, 18 h 30
LNE - Paris 15^e
lne.fr

LA CANDELA

Les unités utilisées pour mesurer la lumière sont méconnues du grand public. Cette conférence est l'occasion de se familiariser avec. Elle fait partie d'une série sur les unités du Système international (qui sera redéfini cette année), organisée par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). Le 28 juin, c'est la mole dont on parlera.

Samedi 9 juin, 20 h 50
Sur la chaîne Arte
arte.tv

700 REQUINS DANS LA NUIT

Un documentaire-enquête sur le plus grand regroupement de requins gris connu à ce jour, dans la passe de l'atoll Fakarava, en Polynésie.

Le 30 juin et le 1^{er} juillet, de 10 h à 18 h
Quai des Savoirs - Toulouse
quaidessavoirs.fr

CHIMIE ET VIVANT

Qu'est-ce que la chimie du vivant et à quoi ça sert? Autour de ce thème, des manipulations et divers ateliers animés par des scientifiques, des vidéos réalisées par des écoliers, des cafés-débats...

LE HAVRE

JUSQU'AU 10 MARS 2019
Muséum d'histoire naturelle
museum-lehavre.fr

Le génie de la nature



Il s'agit ici plus exactement du génie animal, illustré notamment par près de 60 photographies de grand format ainsi que plus de 50 animaux naturalisés issus des collections du muséum du Havre. Divers thèmes sont déclinés, par exemple le biomimétisme, les interactions entre espèces et au sein d'une même espèce, les diverses formes d'intelligence qu'on rencontre dans le règne animal, les formes de communication, les adaptations... Il y a largement de quoi être surpris ou émerveillé, ou les deux. Avec les yeux, mais aussi avec les oreilles: l'univers sonore est élaboré, et comprend notamment une demi-heure de «voyage». ■

BRUXELLES

DU 26 MAI AU 2 DÉCEMBRE 2018
Musée royal de Mariemont
musee-mariemont.be

Au temps de Galien

Si Hippocrate est souvent considéré comme le «père de la médecine», Galien en est le «prince». Né en 129 à Pergame, en Asie mineure, ce médecin grec s'est occupé des gladiateurs de sa ville natale et a exercé à Rome où il a soigné des empereurs. Par son œuvre et ses écrits prolifiques (on en connaît quelque 20 000 pages), il a eu une grande influence sur la médecine jusqu'au XVII^e siècle.

La vie de ce personnage est le fil conducteur de l'exposition, qui brosse un tableau des pratiques médicales, pharmacologiques et sanitaires de l'Empire romain au début de notre



ère, et à travers lesquelles transparaît la société romaine de l'époque. La postérité de Galien, c'est-à-dire le galénisme, est également évoquée. De nombreuses pièces, prêtées par plus de vingt-cinq musées et institutions en Europe, sont exposées: des manuscrits rares, des instruments médicaux variés, des plantes et produits exotiques, des statuettes, des ex-voto... ■

ÎLE TATIHOU (MANCHE)

JUSQU'AU 4 NOVEMBRE 2018
Musée de Tatihou
tatihou.manche.fr



Tromelin, l'île des esclaves oubliés

En 1761, le navire *L'Utile* s'échoue sur un îlot désert au large de Madagascar et y laisse quatre-vingts esclaves malgaches en promettant qu'on viendra les rechercher. Ce n'est que quinze ans plus tard qu'un bateau viendra sauver les survivants: sept femmes et un enfant de huit mois... L'exposition raconte l'histoire de cette tragédie et la survie des esclaves abandonnés sur l'île à la lumière des fouilles archéologiques sous-marines et terrestres menées entre 2006 et 2013. ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 9 juin
Auvers-Saint-Georges (91)
Tél. 01 60 91 97 34

FOSSILES TAMISÉS

L'Essonne était jadis submergée. Son sous-sol recèle donc des fossiles d'organismes marins. Une session de tamisage vous est proposée pour en découvrir.

Dimanche 24 juin, 6 h 30
Rosnay (Indre)
Tél. 02 54 28 12 13

L'AUBE EN BRENNÉ

Le monde, en particulier celui des oiseaux, appartient à ceux qui se lèvent tôt. Cette sortie matinale, qui s'achève par un petit-déjeuner campagnard, vise à le prouver !

Lundi 11 juin, 20 h 30
Saint-Michel-en-Brenne (36)
Tél. 02 54 28 12 13

VOIR ET ENTENDRE L'ENGOULEMENT

Une excursion vespérale à la découverte d'un curieux oiseau qui claque des ailes et chante comme un vélomoteur, dans un paysage de landes.

Mercredi 20 juin, 16 h - 22 h
Vif (Isère)
Tél. 04 76 42 98 13

LE PETIT PEUPLE DES ISLES

Une escapade dans la réserve naturelle des Isles du Drac où, en cette saison, les fleurs méditerranéennes et les libellules abondent. Et, au crépuscule, une possible entrevue avec des castors.

Dimanche 3 juin, 9 h
Grasse (Alpes-Maritimes)
Tél. 04 42 20 03 83

LE COL DU CLAPIER

Promenade naturaliste et géologique sur les crêtes de Caussols avec vue sur les Préalpes et le littoral.

Mercredi 6 juin, 14 h
Bruxerolles (Vienne)
Tél. 05 49 50 42 59

LA VALLÉE DES BUIS

Une balade dans un site réputé pour ses pelouses sèches, où orchidées, insectes, oiseaux, etc. sont particulièrement abondants et variés.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

CASSER UN ROBOT SERA-T-IL UN CRIME?

Pourquoi tuer un être humain est-il plus grave que casser une machine ou un robot ? Avec les progrès de la robotique et de la biologie, la réponse devient difficile.



Avec les avancées de la science et des techniques, la différence entre les humains et les machines se réduit. À l'exemple de ce robot, nommé Sophia, qui a reçu la nationalité saoudienne en 2017.

Nous nous accordons heureusement tous, à de très rares exceptions près, sur l'idée que la vie humaine est « sacrée ». Cela se traduit par exemple par le fait qu'il est plus grave sur le plan éthique de tuer un être humain que de casser une machine. Mais les raisons pour lesquelles nous le pensons ne sont pas si simples à déterminer.

Une raison parfois invoquée est que nous sommes « meilleurs » que les machines : nous savons nous exprimer dans une langue, transmettre une culture, nous reconnaître dans un miroir, peindre des fresques sur les parois des grottes de Lascaux, etc. Mais cet argument tourne court : les machines sont « meilleures » que nous pour jouer aux échecs, faire des multiplications, usiner des pièces ou lever des charges lourdes, sans que nous considérions pour autant comme un crime le fait de casser un ordinateur, une calculatrice, une machine-outil ou une grue.

Une autre raison est que ces machines sont facilement reproduites à l'identique.

Le caractère sacré de la vie humaine, comme celle d'une œuvre d'art, proviendrait alors de sa non-duplicabilité : la mort d'un être humain est une perte irréparable. C'est sans doute en partie de là que proviennent nos réticences éthiques à cloner des humains. Si nous nous rapprochions de la possibilité de dupliquer

Si notre corps cesse d'être un mystère insondable, la vie humaine perdra-t-elle son caractère sacré ?

les humains à l'identique, le meurtre risquerait de devenir un acte presque sans conséquence, puisqu'il suffirait alors, pour le réparer, de fabriquer une personne identique – ou, plutôt, de refabriquer la même personne.

Cette possibilité de reproduire les machines à l'identique est une conséquence

du fait que nous savons comment elles fonctionnent, alors que les êtres humains demeurent des mystères insondables. Ce qui nous mène à une troisième raison : la vie humaine est sacrée parce que les humains sont insondables. Les ordinateurs nous battent certes aux échecs, mais nous savons comment ils font pour nous battre : ils ne font que « bêtement » explorer, mémoriser, analyser, etc. un grand nombre de configurations.

Cette sacralisation du mystère explique pourquoi nous valorisons souvent davantage l'oracle du prophète que le théorème du mathématicien : le prophète ne dit pas pourquoi ce qu'il affirme est vrai et maintient donc un halo de mystère autour de son oracle, quand le mathématicien désenchanté son théorème en le démontrant, c'est-à-dire en expliquant pourquoi il est vrai.

Pourtant, ce postulat éthique : « Ce qui est insondable est sacré » est de moins en moins efficace, car nous savons de mieux en mieux comment fonctionnent notre corps, notre cerveau et notre psychisme. Un jour peut-être, la manière dont Bizet a composé *Carmen* ou la raison pour laquelle Carmen désire Don José nous sembleront aussi limpides que la façon dont un ordinateur nous bat aux échecs. Dans ce cas, la différence entre les humains et les machines risque de nous apparaître plus ténue.

L'éthique voit ainsi s'ouvrir devant elle un chantier immense : comment justifierions-nous le caractère sacré de la vie humaine si notre corps, notre cerveau et notre psychisme cessaient de nous apparaître comme des mystères insondables ?

Peut-être devrions-nous alors remplacer ce raisonnement selon lequel la vie humaine est sacrée parce que les êtres humains sont insondables, par un autre, selon lequel la vie humaine est sacrée parce que nous avons décidé qu'elle l'était – ou peut-être, plus simplement, parce qu'elle est l'une des formes de la vie. ■

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

les conférences

mai
— juin 2018

accès gratuit

cité

sciences
et industrie

Palais

DÉCOUVERTE

Conférence proposée par l'Académie
de l'air et de l'espace

Les lanceurs réutilisables, quel avenir ?

Jusque tout récemment, les lanceurs spatiaux ne servaient qu'une seule fois. Dès leur mission achevée, ils retombaient sur Terre sans que l'on puisse les réutiliser. Aujourd'hui, il devient possible de récupérer certains de leurs constituants, voire de les recycler. Pourquoi cette soudaine évolution ?

EN PARTENARIAT AVEC



l'air et l'espace

conférences

jeudi 31 mai
14h

Palais

DÉCOUVERTE

habiter l'espace

ciné-débat

mardi 12 juin
19h

cité

sciences
et industrie

L'humanité est-elle prête à habiter l'espace ?

Table ronde avec Ugo Bellagamba, Ségolène Guinard et Roland Lehoucq, illustrée d'exemples empruntés à la science-fiction et suivie de la projection du film *Silent running* - réal. D. Trumbull, USA, 1972, 90 min, vostf.

by Flor Fabre & Visione

AVEC LE SOUTIEN DE

SCIENCE

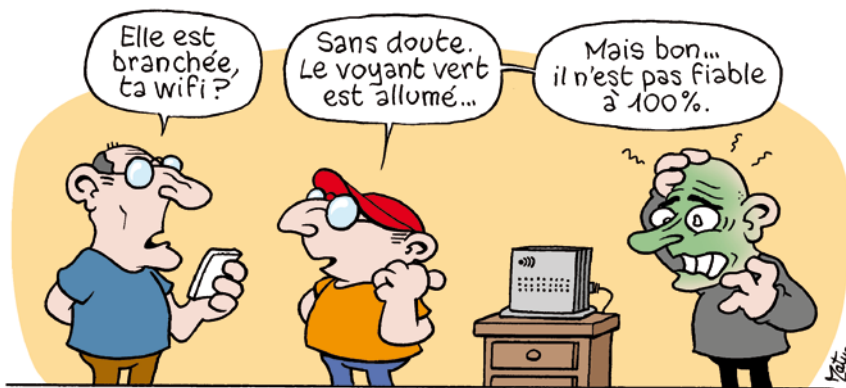
Informations sur cite-sciences.fr et palais-decouverte.fr



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

DES ALERTES EMPOISONNÉES

Les alarmes sur des sujets de santé publique ont parfois un effet nocebo, comme l'illustre notamment l'affaire de l'exposition aux ondes électromagnétiques.



En 2009, certains habitants de la ville de Saint-Cloud, dans la région parisienne, ont commencé à ressentir de curieux symptômes : maux de tête, saignements de nez, sensations étranges comme celle d'avoir un goût métallique dans la bouche... Pour ces riverains, la cause était entendue, il s'agissait de l'effet nocif de l'installation récente de trois antennes-relais.

L'affaire leur paraissait d'autant plus grave que ces antennes avaient été implantées non loin d'une maison de retraite et d'une  cole maternelle. Le collectif qui alerta toute la ville envisagea de déposer une plainte et, bientôt, les médias s'en mêlèrent pour dénoncer un scandale sanitaire et le calvaire de ces riverains tentant sans succès d'utiliser des filtres de protection contre les ondes.

Le problème est que, après le grand bruit suscité par cette affaire, on s'est rendu compte que les baies électroniques du traitement du signal n'étaient pas encore installées et que le raccordement au réseau électrique n'avait pas encore eu

lieu. Bref, ces antennes étaient inactives et n'émettaient aucune onde ! Ce qui s'était produit à Saint-Cloud, c'était une épidémie de symptômes ressentis. Cela ne signifie pas que les individus ne souffraient pas réellement, mais ils souffraient d'avoir endossé des récits alarmistes et non de l'effet des ondes.

Pour psychosomatique qu'elle soit, cette souffrance est bien réelle, comme l'a

Les individus souffraient d'avoir endossé des récits alarmistes et non de l'effet des ondes

montré une étude par IRM fonctionnelle réalisée par des neuroscientifiques allemands (M. Landgrebe *et al.*, *Neuroimage*, vol. 41(4), pp. 1336-1344, 2008) : les personnes se déclarant sensibles aux ondes réagissent notablement plus que les autres à une exposition fictive, par une

modification spécifique de l'activité du cortex cingulaire antérieur et du cortex insulaire. En d'autres termes, le fait d'avoir endossé le récit d'une hypersensibilité à la présence d'ondes stimule ce que les spécialistes nomment une « neuromatrice de la douleur ».

De la même façon, des psychologues de l'université de Mayence et de celle de Louvain ont montré tout récemment que le fait d'être exposé à un reportage télévisé sur les « effets néfastes » des champs électromagnétiques sur la santé provoquait non seulement un sentiment d'anxiété, mais aussi une augmentation de la perception déclarée d'une stimulation wifi fictive (A.-K. Br scher *et al.*, *Environmental Research*, vol. 156, pp. 265-271, 2017) !

Autrement dit, les récits anxiogènes qui se diffusent ne sont pas toujours sans effet et, dans ce domaine, l'expression « mieux vaut prévenir que guérir » n'est pas aussi sage qu'il pourrait y paraître. En effet, prévenir peut parfois rendre malade ou plutôt donner le sentiment de l'être. Les alarmes sur des sujets de santé publique sont parfois utiles, mais il arrive aussi qu'elles contribuent incons quemment à l'épidémie de symptômes ressentis à tort.

C'est ce que montrent d'une autre façon des chercheurs des universités de Sydney et de Wollongong dans une étude publiée en 2013 (S. Chapman *et al.*, *PLoS One*, vol. 8, e76584) et qui met en évidence un lien entre la répartition spatiotemporelle des plaintes de santé et l'activité de groupes d'opposition à des champs d'éoliennes. Ces groupes contribuent à la diffusion de propositions narratives favorisant les effets nocebo (l'équivalent négatif du célèbre effet placebo).

Certaines alertes peuvent donc être en quelque sorte empoisonnées : elles ne sont pas sans conséquence, du moins au regard du critère de bien-être que l'OMS intègre désormais dans sa définition même de l'état de santé. Certains individus souffrent bien, mais peut-être pas en raison de la cause qu'ils imaginent : on peut être malade de croyances. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

Les SCIENCES dans la CITÉ

Yves Gingras

**SOCIOLOGIE
DES SCIENCES**

*Que
sais-je?*



Suivez-nous
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com

L'ESSENTIEL

> Un bref et étrange signal radio a été détecté en 2007 dans les données de l'observatoire Parkes, en Australie.

> Pendant quelques années, les astronomes ont douté de la provenance cosmique de ce signal avant d'en observer d'autres du même type.

> Certains de ces « sursauts radio rapides » sont répétitifs et proviennent donc d'une même source. Les autres semblent être des événements uniques.

> L'origine des sursauts reste à élucider. Diverses hypothèses ont été émises : étoiles compactes, supernovæ, cordes cosmiques...

LES AUTEURS



DUNCAN LORIMER
professeur de physique
et d'astronomie au Centre
des ondes gravitationnelles
et de cosmologie de l'université
de Virginie-Occidentale



MAURA McLAUGHLIN
astronome à l'université
de Virginie-Occidentale,
aux États-Unis

D'où viennent les sursauts radio rapides?

Découverts il y a tout juste dix ans, les sursauts radio rapides sont émis par des phénomènes cosmiques très puissants et lointains. Quelle est leur origine? On l'ignore encore, mais des observations récentes nous informent sur l'environnement où ils se sont produits.

Début 2007, David Narkevic, un de nos étudiants à l'université de Virginie-Occidentale, est venu nous voir pour parler de la tâche que nous lui avions confiée. Il devait analyser des données d'archives issues d'observations des nuages de Magellan, de petites galaxies satellites de la Voie lactée situées à quelque 200 000 années-lumière de la Terre. Avec nonchalance, il nous a simplement dit: «J'ai trouvé quelque chose qui a l'air assez intéressant.» Il s'agissait d'une courbe montrant un signal 100 fois plus fort que le bruit de fond produit par l'électronique du télescope. À première vue, il semblait que David avait identifié juste ce que nous espérions qu'il trouve: un pulsar, un genre de petite étoile très brillante.

Ces astres très denses et au champ magnétique intense émettent un rayonnement sous la forme de faisceaux qui, parce que ces étoiles tournent sur elles-mêmes, balaient l'espace à la manière d'un phare. Cette émission nous

parvient donc sous la forme d'impulsions. Les astronomes connaissaient à l'époque près de 2000 pulsars, et nous participions à un projet monté pour en découvrir d'autres particulièrement lointains et brillants. Pour cette recherche, nous utilisions un programme, développé par l'une de nous (Maura McLaughlin) et son directeur de thèse, qui traquait des impulsions isolées dans les données des radiotélescopes.

Dans le traitement des données, le programme prenait en compte l'effet dit de dispersion interstellaire, lié à la propagation des ondes radio dans l'espace: quand ces ondes rencontrent des électrons libres dans le milieu interstellaire, elles s'étalent en fonction des fréquences qui les composent. Les électrons libres agissent comme un plasma au travers duquel les ondes radio se propagent d'autant plus vite (et atteignent d'autant plus tôt le télescope) que leur fréquence est élevée. Plus une source est lointaine, plus ses ondes radio rencontrent d'électrons au cours de leur traversée du cosmos, et donc plus grand sera le



C'est dans les données de l'observatoire de Parkes, un radiotélescope situé en Australie, qu'on a découvert le premier sursaut radio rapide, une bouffée très brève d'ondes radio provenant de l'Univers lointain.

▢ décalage entre les temps d'arrivée, sur Terre, des ondes des fréquences hautes et basses.

Comme nous ignorions à quelle distance les pulsars que nous cherchions pouvaient se trouver, le programme scrutait les données à la recherche de signaux ayant divers degrés de dispersion (on parle de mesure de dispersion), afin d'être sûrs de détecter des pulsars sur tout un éventail de distances possibles.

Au moment de sa découverte, David Narkevic analysait des observations effectuées cinq ans auparavant au radiotélescope de Parkes, en Australie. Cet instrument est capable de réaliser des relevés rapides de vastes régions en observant simultanément 13 zones du ciel, appelées lobes. Notre étudiant inspectait visuellement les signaux que le programme isolait afin d'éliminer 99%, ou plus, d'entre eux qui étaient du bruit ou des artefacts.

UN MESSAGE VENANT DE LOIN

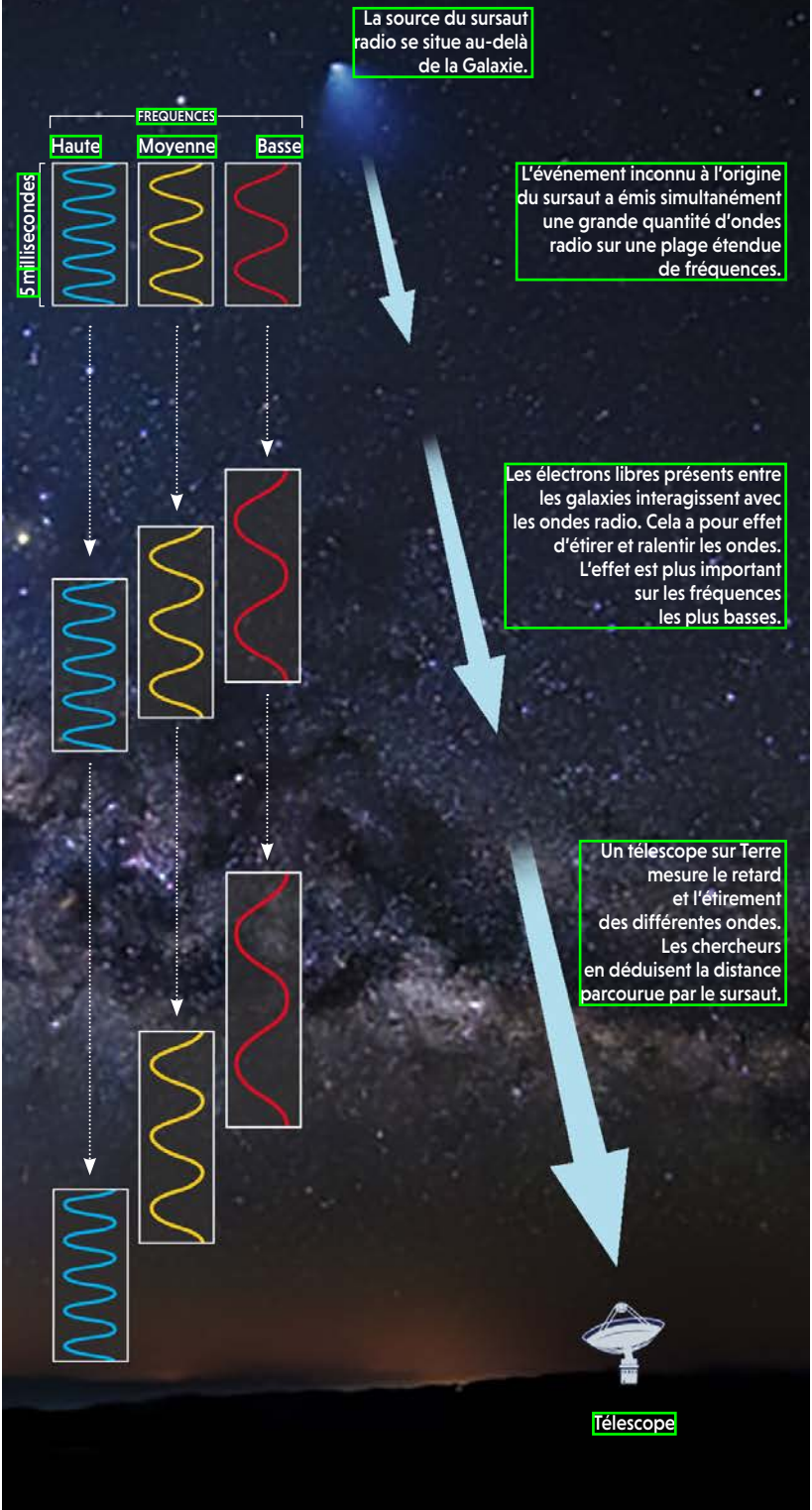
Le signal que David Narkevic avait trouvé était très curieux non seulement du fait de son intensité, mais aussi du fait qu'il provenait d'une région du ciel quelques degrés au sud du Petit nuage de Magellan, où nous ne nous attendions pas à observer de pulsars associés à cette galaxie naine. Plus étonnant, le signal présentait une mesure de dispersion très élevée, plusieurs fois supérieure à celle attendue pour un objet de la Voie lactée, et encore 50% supérieure à la valeur attendue pour un objet appartenant au Petit nuage de Magellan. Cela suggérait que la source était distante d'environ 3 milliards d'années-lumière, bien au-delà des frontières du Groupe local, l'amas de galaxies dont fait partie la Voie lactée.

En plus de venir de très loin, le signal était de courte durée, ce qui indiquait (la vitesse de la lumière étant finie) qu'il provenait d'une source dont le diamètre ne mesurait pas plus de 10 millisecondes-lumière, soit environ 3000 kilomètres, ce qui est beaucoup plus petit que le diamètre du Soleil (1,4 million de kilomètres). Cette contrainte sur la taille ne suffisait pas à éliminer l'hypothèse d'un pulsar, mais la quantité d'énergie émise par cette source devait être colossale: supérieure à celle que le Soleil émet en un mois et plus de 1 milliard de fois supérieure au plus brillant des pulsars.

Quel type d'objet pouvait bien produire un tel signal? Notre priorité a été de déterminer si ce pic d'émission était dû à des activités humaines. Contrairement aux faisceaux des pulsars, ce signal ne semblait pas se répéter; nous n'avions dans les données, qui correspondaient à deux heures d'observation, qu'une seule impulsion. L'hypothèse d'un pulsar semblait à écarter. Un examen plus poussé du signal a montré que les différents temps d'arrivée de ses composantes fréquentielles suivaient le motif attendu dans le cas d'une

QUAND L'ÉMISSION RADIO SE DISPERSER

Les astrophysiciens ignorent à quels phénomènes les sursauts radio rapides sont dus. Cependant, ils ont estimé leur distance à partir de l'effet de dispersion des ondes électromagnétiques, qui provoque un retard à l'arrivée sur Terre des ondes de basse fréquence, comparé aux ondes de haute fréquence. La mesure de dispersion dans le cas des sursauts radio rapides suggère que ces signaux proviennent de très loin et qu'ils ont parcouru des distances qui se comptent en milliards d'années-lumière.



dispersion interstellaire; si la source était terrestre, ce serait une coïncidence très improbable. Une preuve supplémentaire que ce sursaut radio était d'origine astronomique et non liée aux activités humaines est qu'il semblait n'émaner que d'un point du ciel. Il est particulièrement brillant sur l'un des lobes récepteurs de l'observatoire de Parkes, et seuls trois autres le détectent faiblement: exactement la marque d'un signal céleste. Un signal d'origine terrestre serait, typiquement, apparu sur les 13 lobes.

Il semblait donc que David Narkevic avait trouvé par hasard un phénomène nouveau. Cette découverte a mobilisé une part croissante de nos activités de recherche et a intrigué toute la communauté des astrophysiciens. Nous pensions que ce signal d'origine inconnue ne pouvait pas être le seul de son genre. Compte tenu de la durée de l'observation de Parkes et du champ qu'elle couvrait, nous avons estimé qu'il pourrait y avoir, à notre insu, plusieurs centaines de ces sursauts chaque jour sur l'ensemble du ciel.

Plus tard en 2007, nous avons publié un article avançant que cet événement était le prototype d'une nouvelle population de sources radio d'origine inconnue. Si nous arrivions à les identifier, nous aurions non seulement découvert un nouveau type d'événement cosmique, mais nous serions capables d'estimer leur distance grâce aux mesures de dispersion. Avec de telles données, il serait possible de cartographier la structure de l'Univers à grande échelle. Mais avant d'en arriver là, il fallait prouver que le sursaut était réel. Cette quête allait connaître maints revirements et a bien failli se conclure par un abandon.

RÉALITÉ OU FICTION ?

Au début, les chercheurs ont été intrigués par notre découverte, vite surnommée le «sursaut Lorimer», et ont commencé à proposer des hypothèses pour expliquer son origine et à rechercher d'autres événements du même genre. Matthew Bailes, de l'université Swinburne de technologie, à Melbourne, et coauteur de notre article rapportant la découverte, a scruté pendant 90 heures, avec le télescope de Parkes, la région du ciel d'où provenait le sursaut Lorimer; il n'y a pas trouvé la moindre trace d'autres bouffées radio. Mais ce travail complémentaire venait 6 ans après l'observation initiale retrouvée dans les archives, et il n'était ainsi pas exclu que des sursauts multiples se soient déroulés dans les heures ou même les années précédant ou suivant l'observation du sursaut Lorimer.

C'est pourquoi Matthew Bailes et Sarah Burke-Spolaor ont analysé davantage de données d'archives de Parkes, mais relatives à une autre région du ciel. Dans un article publié en 2010, ils ont rapporté la découverte de

16 événements qui partageaient de nombreuses caractéristiques avec le sursaut Lorimer. Certains présentaient des mesures de dispersion quasiment identiques, avec des durées et des formes d'impulsion similaires. Mais il y avait une différence saisissante: chacun de ces nouveaux signaux apparaissait dans les 13 lobes du récepteur de Parkes, suggérant fortement qu'ils ne pouvaient pas être associés à une source spatiale.

Leur origine devait se situer plutôt soit au sol, soit dans l'atmosphère: par exemple, un impact de foudre. Eu égard à la nature trompeuse de ces sources, Sarah Burke-Spolaor et Matthew Bailes les ont surnommées *péritios*, du nom du cerf ailé mythique (évoqué par l'écrivain argentin Jorge Luis Borges dans *Le Livre des êtres imaginaires*), qui projette une ombre humaine.

La découverte des *péritios* a conduit de nombreux chercheurs à douter du sursaut Lorimer. Puisque les nouvelles études radio ne révélaient aucun sursaut, la plupart des astronomes ont commencé à croire que le sursaut Lorimer était lui aussi un *péritio*. Le nombre d'articles qui spéculaient sur la nature du signal s'est mis à diminuer. Lors d'une conférence en 2011, il y a même eu un vote à main levée pour voir quelle fraction de l'audience croyait encore à la réalité du sursaut Lorimer. L'un de nous (Duncan Lorimer), assis au premier rang, n'a pas osé se tourner vers le reste de l'auditoire pour voir le résultat du sondage!

Quatre ans après la détection initiale, Maura McLaughlin et deux collègues ont fouillé un important relevé radio de pulsars à la recherche d'autres sursauts. Sans succès. Maura McLaughlin elle-même en est venue à douter du sursaut Lorimer. À tel point qu'elle et ses collègues ont rédigé un article affirmant qu'il était tout compte fait improbable qu'il s'agisse d'un événement astrophysique – rétrospectivement, une conclusion assez embarrassante.

Mais c'est à peu près à ce moment qu'un rebondissement spectaculaire s'est produit. Le premier événement prometteur est survenu en 2012: Evan Keane, qui est aujourd'hui à Manchester, en Angleterre, au siège du projet SKA (*Square Kilometer Array*, un vaste réseau de radiotélescopes en cours d'installation en Australie et en Afrique du Sud), a repéré un autre sursaut fortement dispersé dans les données archivées de Parkes.

Matthew Bailes avait par ailleurs dirigé le projet visant à équiper le radiotélescope de Parkes avec des instruments numériques de pointe, ce qui lui conférait une sensibilité sans précédent pour détecter les sursauts à forte dispersion. La persévérance de Matthew Bailes s'est révélée payante: en 2013, dans un nouveau relevé réalisé à Parkes, des chercheurs ont

➤ trouvé 4 nouveaux sursauts associés à des mesures de dispersion très variées. Dans l'article qui présentait les premiers résultats de ce relevé, dirigé par Dan Thornton, alors à l'université de Manchester, les scientifiques ont nommé sursauts radio rapides (FRB, pour *fast radio bursts*) ces événements brefs. Un point essentiel est que, contrairement aux péritios, ces 4 sursauts ont été détectés dans un seul lobe, ce qui leur confère une origine cosmique plutôt qu'humaine.

Très vite, de plus en plus de chercheurs se sont lancés dans des recherches dédiées au moyen de différents radiotélescopes. Et d'avantage de sursauts radio rapides ont été détectés. Le télescope de Green Bank, en Virginie-Occidentale, aux États-Unis, en a enregistré un dans une partie du spectre radio différente de celle du sursaut Lorimer; il apportait ainsi une preuve supplémentaire que le sursaut est une réalité et non le produit d'une particularité des récepteurs de l'observatoire de Parkes.

DES SURSAUTS QUI SE RÉPÈTENT

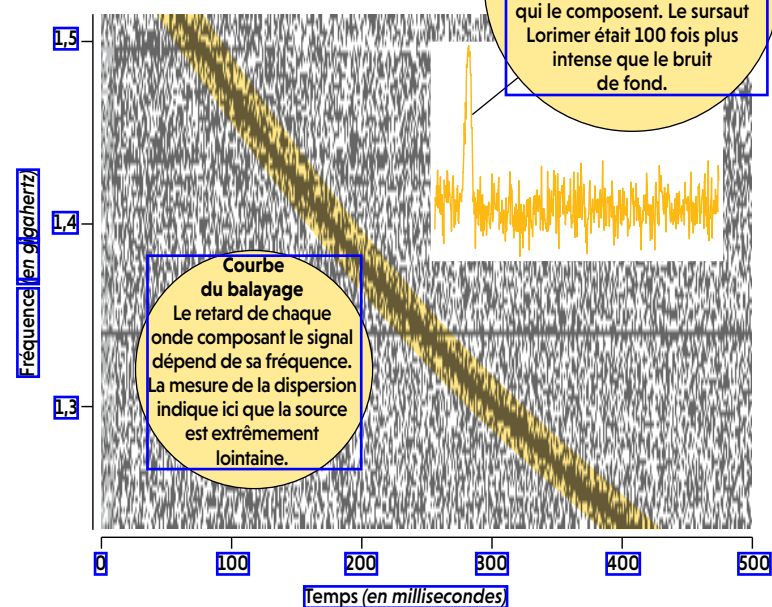
Cependant, en 2016, la quête des sursauts radio rapides s'est corsée. L'équipe de Laura Spitler, de l'institut Max-Planck de radioastronomie à Bonn, en Allemagne, a rapporté l'existence d'une source ayant émis plusieurs sursauts. Jusqu'alors, les astronomes avaient généralement conclu que les sursauts étaient des événements uniques. Mais Laura Spitler et ses collègues ont trouvé un signal répété. Le premier, noté FRB 121102, a été repéré dans les données de 2012 de l'observatoire d'Arecibo, à Porto Rico. Mais dans les 3 années suivantes, les astrophysiciens ont observé 10 sursauts de plus. Ces sursauts ne semblaient pas émis de façon périodique et la durée précise des impulsions radio variait, de même que d'autres caractéristiques.

Motivées par cette découverte, plusieurs équipes de chercheurs ont programmé des campagnes d'observation sur les radiotélescopes du monde entier. L'une d'elles a utilisé le VLA (*Very Large Array*), un réseau de 27 antennes radio, au Nouveau-Mexique, pour rechercher des événements brefs, à l'échelle de la milliseconde, dans la région du ciel où a été vu FRB 121102. Ce relevé a la capacité unique de repérer des sursauts radio sur la voûte céleste avec une précision de plusieurs ordres de grandeur meilleure que celle d'une parabole radio unique. Après environ 6 mois d'observation, l'équipe, dirigée par Shami Chatterjee, de l'université Cornell, a découvert et localisé un nouveau sursaut.

Peu après, l'estimation de la position dans le ciel a encore été améliorée grâce à la technique d'interférométrie à très longue base. Cette approche consiste à combiner les signaux de multiples télescopes du monde entier pour simuler un télescope virtuel beaucoup plus

LE PREMIER SURSAUT RADIO RAPIDE

Ce signal étonnant, le « sursaut Lorimer », a été découvert dans les données d'archives du radiotélescope de Parkes, en Australie. Les astronomes cherchaient initialement des pulsars lointains dont le signal a subi un effet de dispersion : au cours de leur propagation, les ondes électromagnétiques sont ralenties par les interactions avec les électrons libres présents dans l'espace. Cet effet est plus fort pour des ondes de basse fréquence que des ondes de haute fréquence. Les différentes composantes du signal initial nous parviennent donc décalées. Pour mettre en évidence cet effet, les chercheurs tracent l'instant d'arrivée des ondes en fonction de la fréquence ; la courbe régulière surlignée (en jaune) correspond à la décomposition fréquentielle du signal.



grand et doté d'une excellente résolution. Ainsi, Benito Marcote, de l'institut Jive, près de Groningue, aux Pays-Bas, et ses collègues ont localisé les sursauts répétés de FRB 121102 avec une incertitude inférieure à une seconde d'angle ($1/3600$ degré).

Ce résultat, unique par sa précision, a permis aux astronomes d'identifier la galaxie où les sursauts se sont produits. L'équipe de Shriharsh Tendulkar, de l'université McGill, à Montréal, a ainsi relié FRB 121102 à une galaxie naine environ 20000 fois moins massive que la Voie lactée et se trouvant environ 20000 fois plus loin que le plus distant des pulsars connus. Ces découvertes ont fermement établi que les sursauts radio rapides sont des phénomènes extrêmement lointains, et donc très puissants (sinon, nous ne les détecterions pas).

À ce stade, nous avons établi que les sursauts radio rapides sont des événements cosmiques bien réels, mais il restait beaucoup de chemin à faire pour comprendre leur nature. L'une des questions majeures était de savoir si ces sursauts ont leur origine dans des phénomènes éphémères (comme les supernovæ) ou

s'ils proviennent d'objets à longue durée de vie, comme les pulsars qui émettent périodiquement de puissants signaux. Le cas du sursaut radio répétitif, FRB 121102, penche en faveur de la seconde possibilité, même s'il est unique en son genre. Il est possible que tous les sursauts radio rapides se répètent et que chaque sursaut unique détecté corresponde au plus puissant d'une séquence de sursauts émis par une source. Dans ce cas, il nous faudrait chercher une explication du côté de sources cosmiques durables.

Dans cette catégorie, de nombreux astrophysiciens privilégient des explications impliquant des étoiles compactes telles que des pulsars. Ces objets se forment lors d'une supernova dite à effondrement de cœur. Lorsqu'une étoile très massive meurt, l'essentiel de sa structure s'effondre sur elle-même tandis que ses couches externes sont soufflées vers l'extérieur en une explosion très énergétique. La densité de l'objet résultant est si élevée que les atomes se transforment : leurs protons et leurs électrons s'unissent pour former des neutrons. Le produit final est une «étoile à neutrons», pas plus grosse que le quartier new-yorkais de Manhattan et constituée presque exclusivement de neutrons.

Ces astres tournent sur eux-mêmes extrêmement vite et émettent un rayonnement électromagnétique au niveau de leurs deux pôles magnétiques. Les pulsars correspondent à de

champ magnétique intense, en rotation lente, et dont les émissions résultent de leur énergie magnétique plutôt que de leur rotation. L'un des aspects intéressants et curieux des observations de FRB 121102 par le réseau VLA est la présence d'une forte émission radio persistante, distincte des sursauts radio rapides, dans la galaxie hôte. Les astronomes ont suggéré que cette émission radio est due à un noyau actif de galaxie (un trou noir supermassif au centre d'une galaxie en train d'avaler de grandes quantités de gaz et d'étoiles) et que le sursaut radio rapide est produit par l'interaction du magnétar avec le noyau actif.

UN ENVIRONNEMENT TRÈS MAGNÉTISÉ

Une variante de cette idée est que les sursauts répétitifs proviendraient d'un magnétar enfoui dans le vestige dense d'une hypernova, une supernova particulièrement lumineuse (10, voire 100 fois plus énergétique qu'une supernova ordinaire), qui se serait produite il y a quelques décennies. Une équipe de chercheurs a noté que la galaxie hôte de FRB 121102 est semblable à celles qui sont le théâtre d'un autre phénomène très énergétique, les sursauts gamma, dont on pense qu'ils sont liés à de très jeunes magnétars formés par des hypernovæ.

Très récemment, cette même équipe, menée par Daniele Michilli, de l'université d'Amsterdam, a mesuré le champ magnétique le long de la ligne de visée de FRB 121102. Ils ont étudié la polarisation du rayonnement de 16 sursauts provenant de cette source. Lorsqu'elles traversent un milieu où règne un fort champ magnétique, les ondes électromagnétiques deviennent partiellement polarisées (en l'occurrence, elles acquièrent une polarisation linéaire, c'est-à-dire que le champ électrique de ces ondes oscille dans une direction fixe). Or les ondes radio de FRB 121102 sont polarisées à 100%! Cela indique que la source de FRB 121102 doit se trouver dans une région où le champ magnétique est intense, comme c'est le cas dans un vestige de supernova dense ou autour d'un trou noir supermassif situé au centre d'une galaxie. Mais d'autres scénarios sont également possibles.

Par ailleurs, on ne peut pas encore exclure la possibilité d'événements vraiment uniques. Peut-être certains sursauts se répètent-ils et d'autres pas : il y aurait dans ce cas différents types de sursauts radio rapides, associés à des sources différentes. Et de fait, Divya Palaniswamy, à l'université du Nevada à Las Vegas, et ses collègues ont récemment montré que si tous les sursauts radio rapides se répètent au rythme observé pour FRB 121102, alors nous aurions dû voir d'autres événements multiples. Il est donc raisonnable de supposer que certains sursauts radio rapides ont leur origine dans des événements cataclysmiques uniques. Un

L'énergie rayonnée lors du sursaut Lorimer était supérieure à celle que le Soleil émet en un mois

tels astres dont les faisceaux pointent vers la Terre périodiquement, en raison de leur rotation. Comme les sursauts répétés de FRB 121102 ont des propriétés compatibles avec celles des impulsions extrêmement énergétiques émises par une jeune étoile à neutrons, les sursauts radio rapides pourraient en définitive n'être que des pulsars – mais des pulsars d'un type rare et particulièrement puissant.

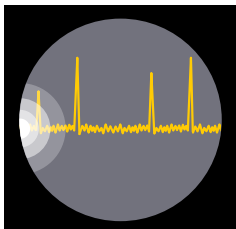
Selon une idée voisine, les sursauts radio rapides proviendraient de ce qu'on appelle des magnétars : des étoiles à neutrons ayant un

LES SOURCES POSSIBLES DES SURSAUTS RADIO RAPIDES



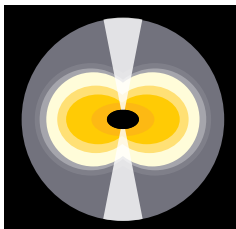
Pulsation d'une étoile à neutrons très massive

Les étoiles à neutrons, vestiges denses d'étoiles mortes, émettent un rayonnement sous forme de faisceaux qui balaient l'espace : elles donnent l'impression de pulser en tournant à la manière d'un phare. Une étoile à neutrons particulièrement puissante pourrait être à l'origine d'un sursaut radio rapide.



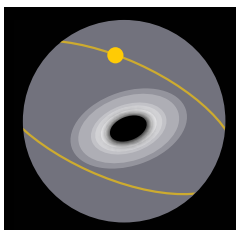
Collision d'étoiles à neutrons

Si deux étoiles à neutrons entrent en collision, l'impact produit un trou noir (ou une étoile à neutrons particulièrement massive) et libère de grandes quantités d'ondes électromagnétiques.



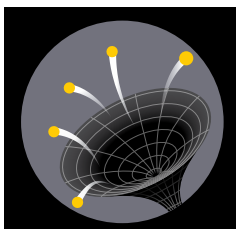
Supernova énergétique

Quand une étoile massive est en fin de vie, elle s'effondre, ce qui conduit à une explosion appelée supernova. Les sursauts radio rapides pourraient correspondre à des supernovae particulièrement énergétiques.



Interaction avec un magnétar

Des étoiles à neutrons fortement magnétisées, appelées magnétars, émettent un rayonnement engendré par leur énergie magnétique plutôt que par leur rotation. Si l'un de ces astres se trouvait en rotation autour d'un trou noir qui avale de la matière (comme dans un noyau actif de galaxie), l'interaction des deux corps se traduit peut-être par un sursaut radio rapide.



Évaporation d'un trou noir primordial

Certains théoriciens spéculent que le Big Bang aurait créé des trous noirs primordiaux éparpillés dans l'espace. Si l'un de ces trous noirs s'évaporerait spontanément, un éclair radio pourrait s'ensuivre.



Cordes cosmiques

Ces défauts de l'espace-temps sont un autre résultat exotique possible du Big Bang. À supposer qu'ils existent, ils ont pu faire jaillir des éclairs en interagissant avec le plasma qui emplissait l'Univers primordial.

certain nombre de sources potentielles sont alors à envisager.

Tout en haut de la liste figure la collision de deux étoiles à neutrons. Un tel fracas libérerait probablement un puissant souffle pendant que les deux astres compacts fusionnent en formant un unique trou noir. Une deuxième possibilité pour un événement unique serait l'explosion d'une supernova particulièrement énergétique.

Les théoriciens ont aussi imaginé des scénarios plus exotiques. L'un d'entre eux est l'hypothèse des cordes cosmiques. De tels objets auraient pu se former dans l'Univers primordial lorsque ce dernier a subi des transitions de phase – des changements d'état. Il aurait résulté de ces transitions des défauts, dits topologiques, de l'espace et du temps : les cordes cosmiques. Ces dernières se seraient propagées à la vitesse de la lumière dans le cosmos qui était alors rempli de plasma brûlant, et auraient produit des bouffées de rayonnement en interagissant avec le plasma. Les observations dont nous disposons ne permettent pas d'exclure que les sursauts radio rapides correspondent à ce scénario, qui est cependant hautement spéculatif.

Les scientifiques ont aussi proposé comme source de sursauts radio les trous noirs primordiaux, de petits trous noirs qui se seraient formés à la naissance de l'Univers et qui n'ont pour l'instant pas été détectés. Si l'un de ces trous noirs primordiaux s'évaporerait spontanément, il émettrait un rayonnement qui pourrait correspondre à un signal de sursaut radio rapide.

Si l'une ou l'autre de ces idées devait trouver confirmation, le sursaut Lorimer serait la première preuve observationnelle de ces phénomènes exotiques.

CARTOGRAPHIER LE CIEL

Dix ans après la découverte du sursaut Lorimer, la quête de ces signaux est en passe d'entrer dans une phase inédite grâce à des télescopes de nouvelle génération.

En 2012, le réseau Askap (*Australian square kilometer array pathfinder*) à grand champ de vue est entré en service et a très vite permis de détecter des sursauts radio rapides. Au moment où nous écrivons cet article, on connaît près d'une trentaine de ces sursauts. Certaines installations existantes telles que le VLA et le radiotélescope de Molonglo, près de Canberra, en Australie, ont subi des travaux de rénovation qui ont permis d'améliorer leur sensibilité et leur couverture du ciel. Ces radiotélescopes modernisés sont maintenant opérationnels, rejoints par d'autres entièrement nouveaux comme Chime (Expérience canadienne de cartographie de l'intensité de l'hydrogène) et Fast (un radiotélescope sphérique de 500 mètres d'ouverture, en Chine).

Cela devrait notablement augmenter notre échantillon de sursauts radio rapides et nous apporter une bien meilleure compréhension de leur origine.

Certains des nouveaux télescopes peuvent localiser les sursauts radio rapides avec une précision d'une seconde d'angle en temps réel. Avec une telle réactivité, nous espérons réaliser des observations complémentaires dans d'autres longueurs d'onde, pour, notamment, mieux identifier la galaxie hôte de ces sursauts.

Par ailleurs, certains modèles expliquant les sursauts radio rapides, comme celui des fusions d'étoiles à neutrons, prédisent qu'ils s'accompagnent d'une production d'ondes gravitationnelles. Or en 2015, les physiciens ont réussi l'exploit de détecter ces ondulations de l'espace-temps, grâce aux expériences *Ligo* et *Virgo*. Il existe donc aujourd'hui une possibilité réelle de détecter conjointement les émissions électromagnétiques et les émissions d'ondes gravitationnelles de ces sources. Grâce à une telle détection, les chercheurs auront accès à certaines propriétés de la source d'un sursaut radio rapide, telle que sa masse, information impossible à obtenir par d'autres moyens. On peut donc espérer des progrès majeurs et prochains dans la compréhension de ces messagers cosmiques.

Au-delà de percer l'identité et l'origine des sursauts radio rapides, l'étude de ces signaux sera aussi utile pour un projet ambitieux: la cartographie de l'Univers. Les astronomes en sont encore aux premières étapes de leur entreprise visant à déterminer la répartition de la matière dans l'espace et à visualiser les structures qu'elle forme à grande échelle. Or les sursauts radio rapides apportent une information précieuse dans ces efforts de cartographie. Ce sont en effet les seuls signaux extragalactiques à notre disposition qui soient assez courts pour qu'on puisse en mesurer la dispersion intergalactique et en déduire la densité de la matière le long de la ligne de visée. La densité du milieu intergalactique est une prédiction critique de divers modèles de la structure de l'Univers à grande échelle, et l'information fournie par les sursauts radio rapides devrait donc permettre de faire le tri entre ces modèles.

L'histoire des sursauts radio rapides n'en est qu'à ses débuts. Si nous sommes maintenant convaincus qu'ils existent, nous esquissons à peine leur origine. Mais les choses s'accroissent. En mars 2018, pas moins de trois sursauts ont été détectés par l'observatoire de Parkes, dont le plus lumineux jamais capté, ce qui nous promet encore des découvertes passionnantes. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Chatterjee et al., **A direct localization of a fast radio burst and its host**, *Nature*, vol. 541, pp. 58-61, 2017.

D. Kasen, **Des kilonovæ aux ultranovæ**, *Pour la Science*, n° 474, avril 2017.

D. R. Lorimer et al., **A bright millisecond radio burst of extragalactic origin**, *Science*, vol. 318, pp. 777-780, 2007.

Direction de l'innovation et des relations avec les entreprises

cnrs

formation entreprises

Organisme de formation continue

→ 230 formations technologiques courtes proposées par le CNRS dans ses laboratoires de recherche pour les chercheurs, ingénieurs et techniciens

→ Domaines de formation
Big data, sciences de l'ingénieur, matériaux, biologie, microscopie, spectrométrie, urbanisme... et plus encore

+ de 1300 stagiaires formés chaque année



Découvrez nos stages sur **cnrsformation.cnrs.fr**



contact : cfe.contact@cnrs.fr ou +33 (0)1 69 82 44 55

[@CNRS_CFE](https://twitter.com/CNRS_CFE)



Ces deux mérinos d'Islande illustrent pourquoi cette race de mouton est la plus productive en laine de toutes.

L'ESSENTIEL

> Les mouflons, c'est-à-dire les moutons sauvages, au pelage rêche, ont été domestiqués au Néolithique pour leur viande et leur lait.

> Les plus anciennes mentions de moutons à laine sont mésopotamiennes et datent de la fin du IV^e millénaire.

> Toutefois, les fusaioles et fuseaux à filer la laine qui parsèment les habitats néolithiques prouvent que des moutons laineux étaient élevés en Asie occidentale dès le V^e millénaire, voire avant.

> En Europe, cela n'est venu qu'un millénaire plus tard.

L'AUTEUR



WOLFRAM SCHIER
professeur d'archéologie
néolithique à l'université libre
de Berlin, en Allemagne

Du mouton à poils au mouton à laine

Quand et où les populations humaines ont-elles commencé à élever des moutons pour leur laine ? Les archéologues ont recueilli de nombreux indices montrant que la sélection et la domestication de moutons laineux ont débuté au V^e millénaire, voire avant, dans les villages néolithiques d'Asie occidentale.

Autrefois, en Colchide, un royaume bordant l'est de la mer Noire, une toison dorée de bélier décorait le bois sacré d'Arès (Mars). Un dragon insomniaque gardait jour et nuit ce trésor fabuleux : la Toison d'or. Jason et ses Argonautes réussirent tout de même à le voler, nous raconte Homère. Bien d'autres fragments de mythes – le « loup en peau de mouton » des évangiles de Mathieu par exemple – attestent de la présence très précoce du mouton dans la culture.

Ces microtémoignages ne remontent cependant pas à la domestication du mouflon, c'est-à-dire du mouton sauvage, puisque la toison de cet animal aux cornes impressionnantes n'avait rien de laineux. Le pelage des mouflons

est en effet rêche comme celui d'une chèvre. La laine est donc l'un des sous-produits de la domestication du mouflon, dont on ignore quand exactement elle s'est déroulée. Dommage, car, en concurrençant les fibres végétales utilisées auparavant – celles du lin, du raphia (un genre de palmier), voire des orties –, les fines fibres qui composent la laine ont sans doute joué un grand rôle social.

Comme nous le verrons, la détermination directe de la date d'apparition et de l'origine géographique de la laine est exclue. C'est pourquoi l'équipe Révolution textile que je dirige à l'université libre de Berlin s'est concentrée sur tous les indices indirects pouvant être rassemblés afin de constituer un tableau cohérent des premières manifestations de la laine.

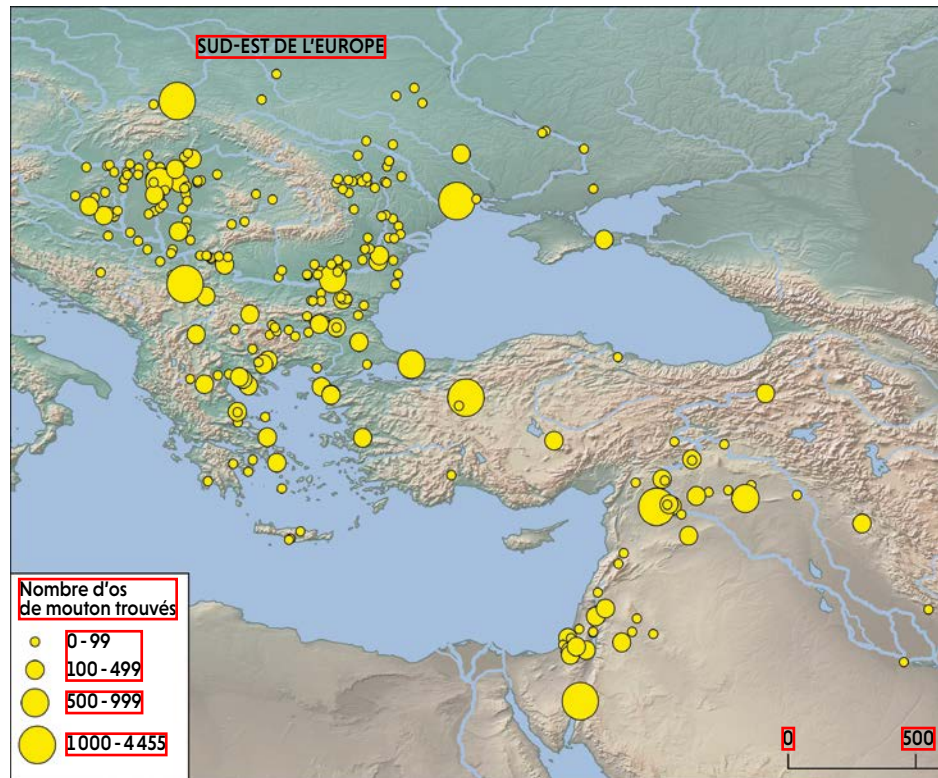
Fondamentalement, la laine est du duvet, c'est-à-dire une accumulation de ces poils fins, dont le rôle est d'isoler le corps pendant la saison froide. Tous les mammifères en sont munis, et, normalement, il tombe partiellement pendant la saison chaude. Chez les moutons à laine, en revanche, il domine le pelage et subsiste en grande partie tout au long de l'année.

Selon de nombreux chercheurs, l'exploitation de la laine a déclenché une « révolution textile ». En effet, la laine isole bien mieux du froid que le lin ; sa teneur en matières grasses la rend hydrophobe ; sa production nécessite moins d'étapes, et des étapes plus simples, que celle du lin. Et on peut la teindre plus facilement et plus intensément que le lin textile, ce qui a eu d'importantes conséquences sociales : grâce à la diversité des couleurs vives qu'on peut lui donner, les groupes sociaux ont pu commencer à se distinguer les uns des autres par des vêtements très différents. La laine aurait donc favorisé l'émergence des hiérarchies et des différences sociales.

On dispose de textes cunéiformes datant de la fin du IV^e millénaire avant notre ère qui traitent d'élevage et de production de laine. C'est pourquoi les moutons à laine passaient jusqu'à présent pour une innovation mésopotamienne. Dans les cités-États du début du III^e millénaire avant notre ère, l'élevage de moutons et la production de laine jouaient manifestement un grand rôle économique. Dans des sources plus anciennes, on note des distinctions entre diverses races de moutons et qualités de laine, ce qui suggère que le travail de la laine était déjà développé dans cette région bien avant. Certains idéogrammes de l'écriture proto cunéiforme datant des derniers siècles du IV^e millénaire avant notre ère nous confortent dans l'idée que les débuts de la laine sont bien plus anciens, car ils servaient à évoquer des tissus de laine ainsi que des moutons d'âges et de sexes différents.

S'agissant du Néolithique d'Europe centrale ou du Sud-Est, nous ne disposons bien sûr d'aucune source écrite datant de la même époque. Les quelques figurines qui nous sont parvenues ne prouvent en rien que l'animal représenté était couvert de laine plutôt que de poils. Il est cependant probable que les premiers moutons à laine aient foulé le sud-est de l'Europe plus tôt, c'est-à-dire dès le IV^e millénaire avant notre ère. Découvrir où et quand exactement est cependant difficile, car, comme toute substance kératineuse, la laine se décompose très vite.

La laine et les poils de mouton sauvage ne diffèrent pas dans leur structure intime, les paléogénéticiens ne peuvent pas non plus nous éclairer. En comparant les ADN, ils ont cependant pu montrer que tous les moutons



Les occupations humaines de 7000 à 1500 avant notre ère ont livré des myriades d'os de moutons. Ci-dessus, le report sur une carte des nombres d'os découverts retrace la naissance de la production de laine au Proche-Orient, puis l'importance prise par cette nouvelle industrie pendant le Néolithique en Europe du Sud-Est.

à laine descendent d'*Ovis orientalis*, la sous-espèce iranienne du mouflon sauvage d'Asie. Pour autant, ils ne sont pas en mesure d'identifier quelles différences génétiques séparent les races à poils des races à laine.

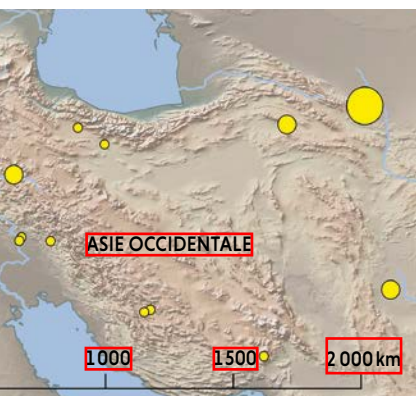
DES ÉLEVAGES DE MOUTONS DÈS LE IX^e MILLÉNAIRE

Il reste alors à se rabattre sur les indices indirects de l'exploitation de la laine. Ceux-ci sont abondants : les nombreux ossements parsemant les habitats néolithiques (voir la carte ci-dessus) nous montrent que dans le Croissant fertile (la zone bioclimatique du Proche-Orient où est née l'agriculture), on a élevé des moutons dès le IX^e millénaire. Les ancêtres de ces premiers moutons domestiqués vivaient dans les montagnes du Caucase, de l'Afghanistan, de l'Anatolie du Nord ou encore de l'Iraq et de l'Iran. Au lieu de les tuer tous, les peuplades néolithiques en gardaient probablement certains vivants afin de se constituer une réserve de viande. Elles se seront mises ensuite à les nourrir, de sorte que ces ovins se sont multipliés et ont contribué à la survie des communautés humaines sédentaires.

Des résidus retrouvés dans certaines céramiques révèlent que l'on a exploité le lait de

Sites comportant plus de 1 000 os de mouton

Lieux de découverte	Os de mouton
Demircihüyük	4 455
Usatovo	2 424
Endrőd-oregszőlők 119	2 332
Ilipinar	1 560
Tall Hujayrat al-Ghuzlan	1 335
Blagotin	1 048



brebis dès le Néolithique ancien. Mais l'ADN contenu dans des squelettes de cette époque nous montre aussi que le gène codant la lactase – l'enzyme qui décompose le principal sucre du lait, le lactose – n'a intégré notre patrimoine génétique que bien plus tard. Le lait était probablement consommé sous une forme pauvre en lactose, c'est-à-dire sous la forme de lait fermenté et de fromage. Le grand avantage de l'élevage laitier, qu'il s'agisse de moutons ou de bovins, est bien qu'il n'est pas besoin de tuer les animaux pour en tirer de la nourriture.

L'apparition de toisons laineuses sur les moutons a constitué un bénéfice secondaire tardif de la domestication. Nous supposons que les évolutions génétiques nécessaires se sont produites par hasard. Les éleveurs ont remarqué l'utilité de certains pelages apparus et se sont mis à sélectionner les animaux en fonction de leur toison. Peu à peu, le duvet s'est alors densifié et allongé, tandis que les animaux cessaient de le perdre pendant les mois chauds.

L'arrivée dans cette phase de la domestication se traduit, dans le registre archéologique, par l'apparition de fusaïoles. C'est ainsi que l'on nomme les volants d'inertie (de petits disques percés) qui équipent les fuseaux des fileuses. On s'en sert encore de nos jours dans de nombreux pays pour produire du fil de la façon suivante : tiré d'une

matériau filé. Les fuseaux lourds servent en effet à filer les plus grosses fibres, comme celles du lin ou d'autres végétaux ; les fuseaux légers conviennent, eux, au filage des fibres les plus fines, comme celles de la laine.

Il existe des fibres végétales fines, mais elles ont la caractéristique d'être longues. Sur ce point, la forme des fusaïoles nous fournit un deuxième indice : les fibres de laine requièrent un fuseau à rotation rapide. Cela implique des fusaïoles allongées de petit diamètre, puisqu'à masse égale, un disque est plus difficile à faire tourner qu'un cylindre dont la masse est ramassée sur l'axe.

Ana Grabundžija et Chiara Schoch, de l'université libre de Berlin, ont étudié environ 1 500 fusaïoles en céramique mises au jour dans des sites turcs, syriens, irakiens et iraniens, et 900 autres provenant de Hongrie, de Slovaquie, de Croatie et de Serbie. Cet échantillon représente un total de 46 sites archéologiques d'époques allant du VI^e au III^e millénaire. Cette étude comparative des fusaïoles néolithiques est ainsi la plus complète réalisée à ce jour.

FUSAÏOLES D'ASIE OCCIDENTALE ET FUSAÏOLES D'EUROPE

C'est en particulier la répartition statistique des poids, diamètres et hauteurs des fusaïoles qui est instructive. On constate non seulement que les fusaïoles d'Asie occidentale, entre le V^e et le IV^e millénaires, sont avant tout adaptées au traitement des fils fins, mais aussi qu'elles se trouvent toutes à l'intérieur d'une gamme de poids resserrée. Cela confirme l'idée qu'en Asie occidentale, la filature – en particulier celle des fibres animales – s'est développée très tôt.

Dans le sud-est de l'Europe, la situation est très différente. Les statistiques relatives au V^e millénaire révèlent une variation des poids, diamètres et hauteurs des fusaïoles, qui s'amplifie clairement au cours du IV^e millénaire (voir les graphiques page 43). En plus des petites fusaïoles légères et de hauteurs différentes adaptées à la laine ou aux fibres végétales fines, on utilisait désormais aussi des fusaïoles pesant 50 à 200 grammes, inconnues en Asie occidentale. Leur fonction n'est pas claire : il est possible que les fils produits aient été ensuite torsadés en fils plus épais, voire en cordons (torons) ou cordes.

Ces innovations n'ont pu provenir d'Asie occidentale, où aucun modèle antérieur de fusaïole lourde n'a été retrouvé. Elles ont été précédées par d'autres innovations dans la transformation et dans la production de tissus et de vêtements. Les couches archéologiques du V^e millénaire – donc du Néolithique tardif et du début de l'âge du Cuivre – ont livré en

Les fusaïoles utilisées en Asie occidentale étaient adaptées au traitement de fils fins

quenouille, c'est-à-dire d'une pelote de fibres, un faisceau de fibres est formé à la main en un fil attaché au bas du fuseau ; pendu au bout du fil, ce dernier est ensuite mis en rotation afin de torsader les fibres ; le fil formé est enroulé autour du fuseau, puis la fileuse recommence... (voir la photo page 45 et, par exemple, la vidéo www.youtube.com/watch?v=GF6CsoLVEoA pour une explication claire du filage au fuseau).

Or les fouilles de sites de nombreuses cultures et époques ont livré des fusaïoles, dont le poids est un premier indice quant au

➤ série des artefacts d'argile, qui les révèlent. Il s'agit notamment des pesons qui servaient à tendre les fils de chaîne sur des métiers à tisser verticaux. La même technique ne semble guère avoir été utilisée en Asie occidentale, sauf en Anatolie. Au cours du IV^e millénaire, ces pesons ont disparu. Il semble que de nouveaux métiers à tisser s'étaient imposés: on enroulait les fils de chaîne sur un cylindre (le régulateur) afin de les tendre à l'intérieur d'un cadre horizontal. Certaines tisserandes attachaient l'extrémité de ce genre de métier à un poteau ou à un arbre; d'autres les enveloppaient autour de leurs hanches et tendaient les fils avec leur corps. Nous ne pouvons que spéculer sur les raisons de l'adoption de cette nouvelle façon de tisser. Peut-être était-elle plus compatible avec un mode de vie plus mobile qu'auparavant?

L'impression d'ensemble qui se dégage de tout cela est que la production textile s'est alors intensifiée en Europe. Un phénomène que l'archéobotaniste Sabine Karg, de l'Institut d'archéologie préhistorique de l'université libre de Berlin, cherche à expliquer. Selon elle, on aurait réussi à l'époque à sélectionner les deux types de lin que nous employons toujours: l'un, le lin oléagineux, a de grosses graines qui donnent davantage d'huile; l'autre, le lin textile, a des tiges longues, donc des fibres plus longues. Ces deux variétés se sont alors répandues dans toute l'Europe centrale. Toutefois, le lin textile a besoin de sols fertiles, de sorte qu'il entrerait en concurrence avec d'autres cultures. Il faut en outre beaucoup d'eau pour en tirer des fibres. Cette réalité explique sans doute qu'au IV^e millénaire, des villages se sont créés dans les zones humides entourant le lac Feder, dans le Bade-Wurtemberg: ces villages se seraient spécialisés dans la culture du lin textile.

Les moutons, eux, ont l'avantage de pouvoir se nourrir dans les paysages arides ou humides peu adaptés à l'agriculture. Les races actuelles sont d'ailleurs restées très peu exigeantes en termes de nourriture: il leur suffit d'avoir de l'herbe en été, du foin et quelques herbes en hiver, et, pour les minéraux, une pierre à lécher. Leurs ancêtres sauvages pouvaient même digérer des brindilles et de l'écorce.

Ces avantages ne profitaient guère à ceux qui élevaient des moutons pour leur viande et leur lait. Faire pâturer les bêtes sur des terrains peu propices à l'agriculture n'était en effet guère intéressant, car le fromage et le lait fermenté se gâtent vite: le bétail laitier paissait probablement près des lieux habités.

Aussi l'arrivée du mouton lainier a-t-elle agrandi le territoire exploitable. Pour cette raison, il est vraisemblable que la transhumance se soit développée au IV^e millénaire, puisque, à certaines saisons, on avait intérêt

à mener les troupeaux sur des pâturages éloignés. Les bergers qui les guidaient étaient sans doute de jeunes hommes, comme c'est toujours le cas aujourd'hui, notamment s'agissant des troupeaux transhumant vers les Alpes. Cette façon de gérer les troupeaux libérerait ainsi les propriétaires de cheptels pour d'autres activités.

Ces considérations ont orienté notre équipe vers la recherche d'indices de la modification des espaces naturels par le pâturage. Étant donné que les sols foulés par de nombreux animaux, qu'il s'agisse d'ovins ou de bovins, sont davantage érodés, de telles évolutions se traduisent dans les zones montagneuses par une quantité accrue de sédiments emportés par les eaux de ruissellement. Le passage d'un paysage forestier à un paysage ouvert, caractérisé par la présence de buissons et d'arbres isolés, constitue l'un des indices les plus clairs de l'arrivée de troupeaux d'herbivores. La lande de Lüneburg ou le nord-ouest du Jutland illustrent une telle mutation paysagère: comme les moutons y mangent les pousses d'arbres, la forêt ne peut se régénérer.

La façon dont la végétation a évolué au cours des derniers millénaires peut être restituée à partir de carottes de forage extraites dans les lacs. En effet, les enveloppes des grains de pollen apportés par le vent dans un

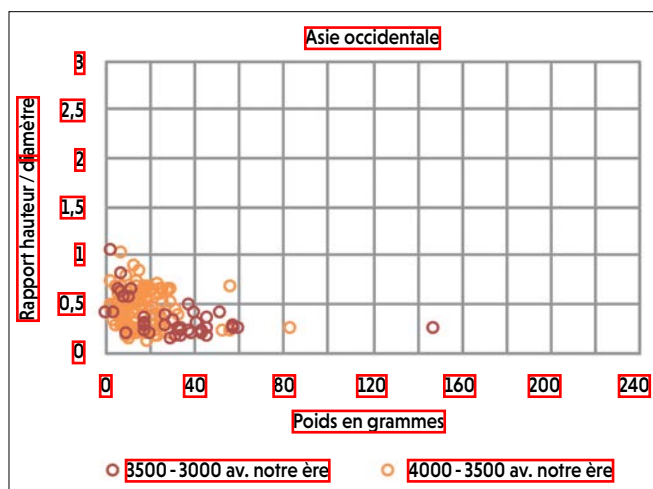
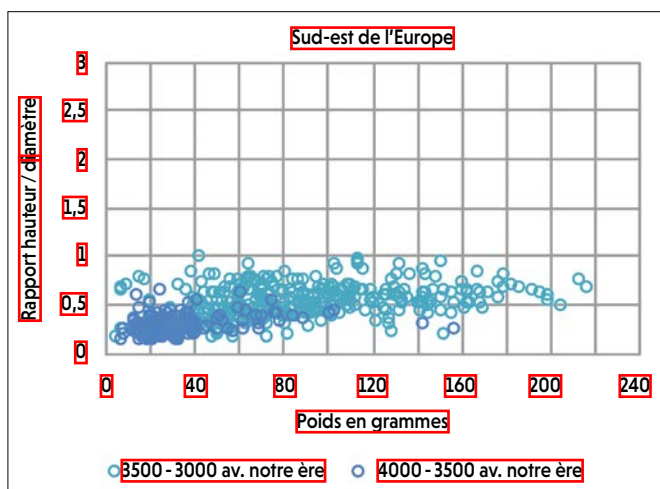
LE MOUTON, ESPÈCE ABERRANTE ?

Les moutons, s'ils étaient libres, pourraient-ils vivre dans la nature ?

Rien n'est moins sûr, tant il est désavantageux pour un mammifère de ne pouvoir faire évoluer son pelage en fonction de la saison. Pour le mouton domestiqué, la tonte pratiquée par les humains une à deux fois par an est vitale, comme l'illustre le cas de Chris, un mouton australien qui, volontairement ou pas, a vécu seul dans la nature pendant cinq ans. Lorsqu'un tondeur professionnel plein de compassion put enfin déshabiller Chris, que la croissance de sa laine avait rendu quasiment aveugle, l'animal portait un pull-over de quelque 40,5 kilogrammes...

Que se passerait-il si une population de moutons retournait à la nature ? Une sélection négative en éliminerait des lignées jusqu'à ce que leur pelage redevienne supportable en été. C'est peut-être ce qui est arrivé aux moutons perdus à l'origine des magnifiques mouflons de Corse. On ignore cependant si leurs ancêtres, des moutons introduits par les premiers paysans sur l'île au IV^e millénaire, étaient lainiers ou à poil ras !





lac sont si stables chimiquement qu'elles se conservent très longtemps dans les sédiments humides. Or leurs formes révèlent les espèces végétales dont le pollen est issu. Les carottes forées dans les lacs révèlent ainsi, centimètre après centimètre, quelle végétation entourait le plan d'eau à telle ou telle époque.

Martin Schumacher, de l'université libre de Berlin, a rassemblé les études paléopalinologiques effectuées sur près de 20 sites roumains et hongrois. La proportion de pollens non arboricoles joue un rôle important dans notre problématique, car elle fournit des informations sur l'ouverture du paysage. Les inclusions de charbon de bois dans les sédiments prouvent par ailleurs l'utilisation du feu.

Martin Schumacher a aussi déterminé les teneurs en carbone organique ou en aluminium dans les sédiments, leur augmentation signifiant un apport accru de sédiments, ce qui traduit l'érosion des alentours du plan d'eau considéré. Si les causes naturelles possibles de ces phénomènes peuvent être exclues, alors seule l'activité humaine en est la cause. Martin Schumacher a évalué les zones qu'il a étudiées par période de 500 ans sur une échelle à 4 gradations allant de 0 (absence d'influence humaine détectable sur le paysage) à 3 (influence intense du pâturage).

L'ÉTUDE DES POLLENS RESTITUE LES PAYSAGES DISPARUS

Dans les Carpates méridionales et dans les monts Apuseni, deux chaînes de montagnes roumaines, la présence modérée voire forte du pacage est déjà perceptible au début de l'âge du Cuivre (4500-4000 avant notre ère). Les ossements retrouvés suggèrent cependant davantage la présence de vaches que celle de moutons. Plus au nord-ouest, dans le bassin des Carpates, aucun signe de transhumance n'est perceptible. Nous supposons donc que l'utilisation plus intense des régions de montagne par les bergers est venue dans le contexte de l'exploitation du minerai de cuivre.

Au cours de la première moitié du IV^e millénaire, les diamètres et les poids des fusaiols néolithiques ont peu varié au Proche-Orient, alors qu'ils sont beaucoup plus dispersés dans le sud-est de l'Europe. Cette tendance, qui se confirme jusqu'à la fin du millénaire, traduit une évolution des pratiques de filage.

Dans les deux millénaires qui suivent, l'activité humaine n'a modifié les paysages de montagne que légèrement, ce qui pourrait indiquer un recul de l'extraction du minerai de cuivre, mais aussi de la population présente en montagne. Ce n'est qu'à l'âge du Bronze moyen et tardif, c'est-à-dire entre 1500 et 1000 avant notre ère, que les bergers et leurs troupeaux hantent de nouveau les hauts pâturages.

Dans le nord de la Hongrie, les basses plaines du bassin des Carpates sont bordées par des chaînes de montagnes basses. L'élevage ne semble avoir commencé à en modifier le paysage qu'autour de 3500 avant notre ère. Contrairement à ce qui est le cas dans les Carpates du Sud, le phénomène aurait notablement augmenté entre 3000 et 2500 avant notre ère. D'après les résultats des analyses géochimiques effectuées sur deux sites, une augmentation de l'érosion des sols est même probable. Les os d'animaux montrent que la proportion d'ovins et de caprins pourrait représenter jusqu'à 60%, proportion qui correspond bien à une exploitation textile. Il se pourrait que cette dernière ait connu un nouvel essor. Malheureusement, on ne peut mener de recherches comparables au Proche-Orient, où il n'existe ni marais ni zones que nous pourrions carotter, en raison de la sécheresse.

Finalement, ne nous satisfaisant pas du fait que rien ne distingue les os des moutons lainiers de ceux de leurs congénères non lainiers, nous avons, une fois de plus, recherché des indices indirects de leur présence.

S'il n'est pas possible de connaître le type de toison d'un individu, on peut souvent déterminer son âge, son sexe et sa taille. Les mâles châtrés peuvent par ailleurs être distingués des béliers, car la castration entraîne une augmentation de la taille et des changements de certaines caractéristiques osseuses.

Or lorsque la fouille d'un habitat préhistorique produit des milliers d'os de moutons, les répartitions statistiques de leurs âges, >



Ces fusaïoles proviennent de villages néolithiques fouillés en Grèce et datent des VI^e et V^e millénaires.

sexes et tailles reflètent les priorités de l'élevage. Un éleveur de bétail axé sur la viande abat surtout des moutons adultes et jeunes, quel que soit leur sexe. Dès lors, les individus âgés ne seront pas représentés dans le lot d'ossements issus de cet élevage, tandis que mâles et femelles seront à peu près à parité.

Quand, en revanche, les statistiques montrent que les femelles et les animaux plus âgés sont préférés, et que peu d'agneaux devant être nourris par leurs mères sont présents, alors l'accent est apparemment mis sur la production de lait.

Suivant la même logique, les caractéristiques d'un troupeau lainier sont aussi évidentes: cette fois, il s'agit de favoriser les moutons donnant de la laine pendant de nombreuses années. À cet égard, le sexe de l'animal ne joue aucun rôle. En revanche, la taille intervient, puisque les moutons plus grands portent davantage de poils, ce qui est par exemple le cas des béliers. Christian Küchelmann, aujourd'hui à l'université de Groningue, aux Pays-Bas, a rassemblé dans une base de données archéozoologiques les informations de plus de 2,1 millions d'os de mammifères provenant de plus de 400 sites. Cette base de données couvre une vaste région allant de l'Iran à la Hongrie, sur une période s'étendant de 7000 à 1500 avant notre ère. Environ 67 000 moutons y sont documentés, par au moins un os.

Nous avons tiré de cette base de données la répartition par âge des troupeaux de 27 sites d'Asie occidentale datant de 6000 à 2000 avant notre ère. De façon surprenante, nous n'avons pas constaté de baisse du nombre d'agneaux, à laquelle on s'attendrait en cas d'exploitation accrue du lait et de la laine. Chose remarquable, même sur des sites contemporains et voisins, on abattait les moutons à des âges différents.

BIBLIOGRAPHIE

C. Becker et al., **The Textile Revolution. Research into the Origin and Spread of Wool Production between the Near East and Central Europe**, *eTopoi, Journal for Ancient Studies*, vol. 6, pp. 102–151, 2016.

E. Barber, **Women's Work: The First 20,000 Years. Women, Cloth and Society in Early Times**, Norton, 1994.

Le cas de Habuba Kabira et Djebel Aruda, deux villes syriennes de la fin du IV^e millénaire situées de part et d'autre de l'Euphrate, à seulement huit kilomètres de distance, l'illustre. À Habuba Kabira, 90% des moutons étaient abattus à un âge supérieur à 1,5 an; à Djebel Aruda, seulement la moitié l'étaient après cet âge. Sans doute produisait-on plutôt de la laine à Habuba Kabira et plutôt de la viande et du lait à Djebel Aruda.

Dans ce genre d'étude, le sexe des animaux ne peut malheureusement qu'être rarement déterminé. Le site de Fikirtepe, dans la région d'Istanbul, constitue cependant une exception. Au VI^e millénaire, les moutons, souvent des brebis et seulement rarement des béliers castrés, y vieillissaient, ce qui indique une exploitation laitière. Au millénaire suivant, les mâles adultes prédominaient, ce qui montre un accent mis sur la production de laine.

LA DOMESTICATION DES MOUTONS À LAINE S'EST ACHEVÉE AU IV^e MILLÉNAIRE

Dans le sud-est de l'Europe, 35 sites ont livré des données assez riches pour que l'on puisse déterminer la répartition des âges, dont 10 où nous avons pu aussi savoir celle des sexes. Au début de la période, les mêmes tendances que celles observées en Asie occidentale sont manifestes: les proportions de moutons jeunes et adultes varient beaucoup, sans qu'une tendance claire ne soit perceptible, et la proportion de mâles adultes restant généralement bien inférieure au tiers jusqu'à la fin du V^e millénaire. Ce n'est qu'à l'âge du Bronze précoce dans le Kanlıgeçit, en Turquie, et à l'âge du Bronze moyen à Agios Mamas, en Grèce, qu'environ la moitié des moutons adultes deviennent des béliers castrés, ce qui signale une production de laine.

Enfin, à partir des 3400 os de moutons provenant des sites d'Asie occidentale, nous avons calculé un indice caractérisant la taille des animaux. Il s'avère que les moutons sont restés relativement petits jusqu'à 4500 avant notre ère à peu près, puis que leurs tailles ont augmenté jusqu'à 4000 environ. Même si cette observation n'est fondée que sur quelques individus, une certaine dispersion des valeurs est perceptible dans le millénaire qui suit, ce qui suggère une stabilisation de la taille. Au vu de toutes les autres informations disponibles, l'explication la plus plausible de cette stabilisation de la taille est que, au début du V^e millénaire, les éleveurs d'Asie occidentale s'étaient orientés vers un type de mouton optimal pour la production de laine, et que de plus en plus d'éleveurs l'ont ensuite adopté vers la fin de ce millénaire.

Une évolution similaire est perceptible dans le sud-est de l'Europe, mais seulement après le milieu du IV^e millénaire. Bien que l'indice de taille augmente plus modérément, le très grand échantillon étudié, constitué de plus de 6300 os, le rend statistiquement significatif et suggère qu'une nouvelle race de mouton a été introduite dans cette région à partir de 3500 avant notre ère. S'agit-il des moutons sélectionnés en Asie occidentale? Nous ne sommes pas en mesure de le dire, mais une sélection locale semble peu probable.

L'exploitation de la laine pour produire des tissus, des tresses et du feutre est sans aucun doute l'une des innovations techniques les plus importantes de la Préhistoire. Pour la première fois, on disposait de tissus fins et colorés pouvant être traités de différentes manières. Ce que nous avons mis en évidence

ne suffit cependant pas pour parler de révolution textile: il est manifeste qu'un processus lent et graduel a préparé l'avènement de la laine par étapes.

Tout a commencé à la faveur de mutations aléatoires de gènes de moutons en un ou plusieurs endroits, dont les effets ont été remar-



L'exploitation de la laine est l'une des plus grandes innovations de la Préhistoire



Un fuseau, c'est-à-dire un petit axe en bois à l'inertie renforcée par un petit volant d'argile, suffit pour filer de la laine ou des fibres végétales. Au Néolithique, on utilisait beaucoup les fuseaux pour produire du fil, puis du tissu.

qués et sélectionnés par les éleveurs. Cela s'est produit bien plus tôt qu'on ne le pensait: dès le V^e millénaire en Asie occidentale et à partir du milieu du IV^e millénaire en Europe. Au cours du millénaire suivant, les fibres animales ont prédominé dans la production textile.

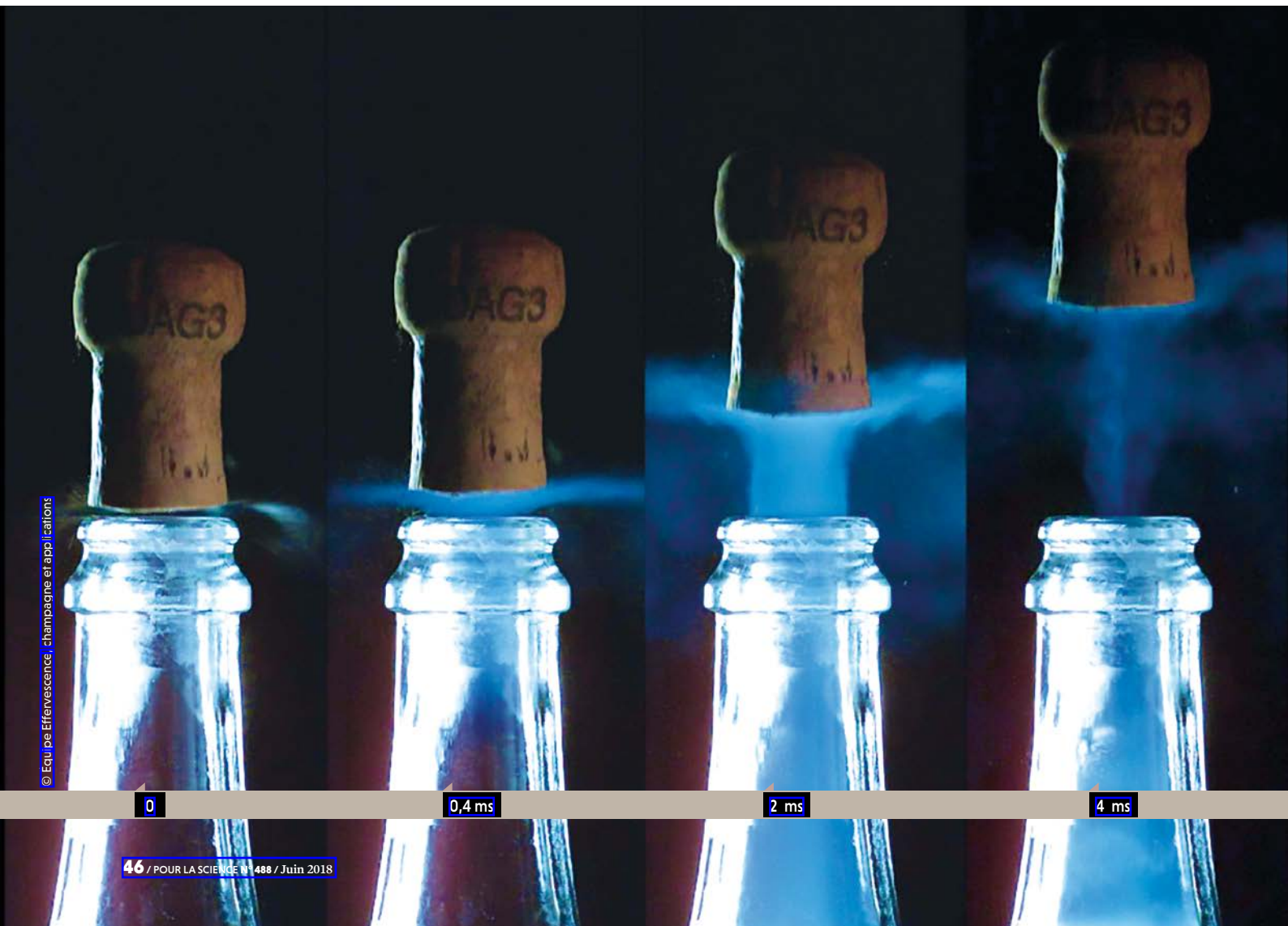
Nos données indiquent en outre que les éleveurs préhistoriques poursuivaient des objectifs variés: production de viande, de lait ou de laine. Parfois, même des groupes voisins se livraient à des activités différentes. Nous ne pouvons que spéculer sur les raisons. Les connaissances détenues dans certains villages étaient-elles plus grandes que dans d'autres? Y avait-il chez certains groupes une forte inféodation aux traditions ancestrales qui les aurait amenés à rejeter les innovations que d'autres adoptaient?

Évaluer l'importance relative de l'élevage par rapport à l'agriculture est en outre difficile. Bien que des restes de plantes carbonisées aient été préservés dans la plupart des habitats, les sélections subies par les espèces végétales sont très différentes de celles qu'ont connues les animaux. On peut donc comprendre l'importance relative des différentes espèces animales, mais pas celle de l'élevage dans son ensemble par rapport à l'agriculture.

Seuls les écrits et les bas-reliefs des cités mésopotamiennes, puis des civilisations ultérieures, nous prouvent complètement l'existence d'une industrie de la laine. Quant à la légende de la Toison d'or, elle a probablement une signification historique, puisqu'en Colchide, on extrayait de l'or des rivières à l'aide de peaux de mouton... ■



Le fugace nuage bleu du champagne



L'ESSENTIEL

> Quand on débouche une bouteille de champagne stockée à 20 °C, on observe un nuage bleuté dans le col de la bouteille et dans le sillage du bouchon.

> Ce phénomène, qui ne se produit pas avec une bouteille froide, ne dure que quelques millisecondes : après, le nuage de condensation blanchit.

> Les auteurs ont proposé un modèle théorique qui explique l'apparition du panache bleuté et sa disparition.

> L'aspect bleuté résulte de la diffusion de la lumière ambiante par de minuscules cristaux de dioxyde de carbone, bien plus petits que les longueurs d'onde de la lumière visible.

LES AUTEURS



GERARD LIGER-BELAIR
professeur de physique à l'université de Reims, fondateur de l'équipe Effervescence au laboratoire GSMA (UMR CNRS 7331)



DANIEL CORDIER
astrophysicien, chargé de recherche du CNRS au sein du GSMA (Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique)



JACQUES HONVAULT
ingénieur des Arts et Métiers, photographe et spécialiste de l'imagerie numérique à haute vitesse

Débouchez une bouteille de champagne stockée à 20 °C et filmez la scène au ralenti : vous pourrez constater l'apparition, pendant quelques millisecondes, d'un panache bleuté dans le sillage du bouchon. Ce phénomène, remarqué il y a quelques années, a désormais son explication. La voici.

Cette séquence de clichés montre la première seconde du débouchage d'une bouteille de champagne gerbeuse, à 20 °C.



0,1 s

0,2 s

0,5 s

1 s

En moyenne, ce sont près de dix bouchons de champagne qui sautent chaque seconde dans le monde. Et ce chiffre explose bien entendu aux moments festifs de l'année.

Les tout premiers millièmes de seconde qui suivent le débouchage retiennent aujourd'hui toute notre attention : c'est l'instant précis où l'énergie enfermée dans la bouteille se libère, en permettant au gaz carbonique dissous dans le liquide de s'échapper sous forme de bulles.

Il y a quelques années, en filmant le débouchage d'un lot de bouteilles de champagne stockées à température ambiante, nous avons constaté un phénomène aussi curieux qu'inattendu : dans le sillage du bouchon qui saute, apparaît un nuage bleu azur. À l'époque, nous n'avions pas pu expliquer de façon satisfaisante son origine. Ce n'est que récemment que nous avons proposé et publié, après examen par des pairs, un modèle théorique du phénomène, et c'est cette explication que nous présentons ici.

LE DÉBOUCHAGE DU CHAMPAGNE AU RALENTI

L'étude des quelques millièmes de seconde qui suivent le débouchage d'une bouteille de champagne s'inscrit dans un programme de recherche ambitieux dont l'objectif est de mieux comprendre un phénomène redouté des élaborateurs de vins effervescents : le gerbage, terme qui désigne la production excessive de bulles et de mousse à l'ouverture de la bouteille.

Quand on débouche une telle bouteille, on observe qu'elle gerbe moins de une demi-seconde après son débouchage (*voir la séquence de photographies pages précédentes*). Mais remontons le temps et observons ce qui se passe en amont de cet instant. Environ 0,4 milliseconde après le débouchage, on voit apparaître un nuage de condensation bleuté dans le col de la bouteille et dans le sillage du bouchon qui saute. Quelques millisecondes plus tard, ce nuage bleuté disparaît du sillage du bouchon, mais demeure encore très persistant dans le goulot de la bouteille, où sa couleur vire progressivement au blanc-gris.

Afin de comprendre l'origine du nuage bleu, nous avons examiné les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de bouteilles stockées à différentes températures (*voir les photographies page suivante*). Pour ce faire, nous disposons de 30 bouteilles de champagne rosé, que nous avons réparties en trois lots de 10 bouteilles. Quarante-huit heures avant de réaliser nos observations, les trois lots ont été stockés à des températures respectives de 6, 12 et 20°C.

Les phénomènes de condensation survenant lors du débouchage d'une bouteille de champagne (ou de toute autre boisson gazeuse)

froide ont été décrits et compris par les scientifiques il y a déjà longtemps. L'explication couramment proposée est la suivante.

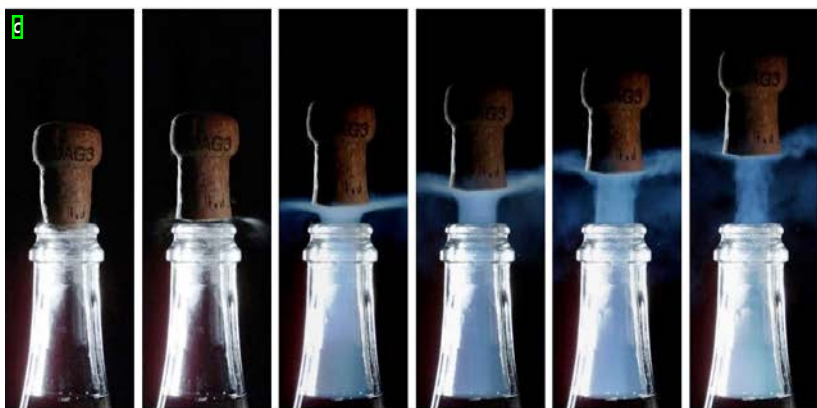
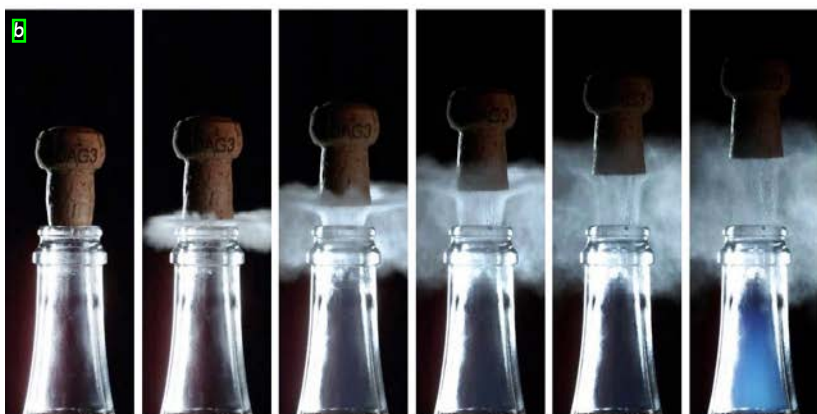
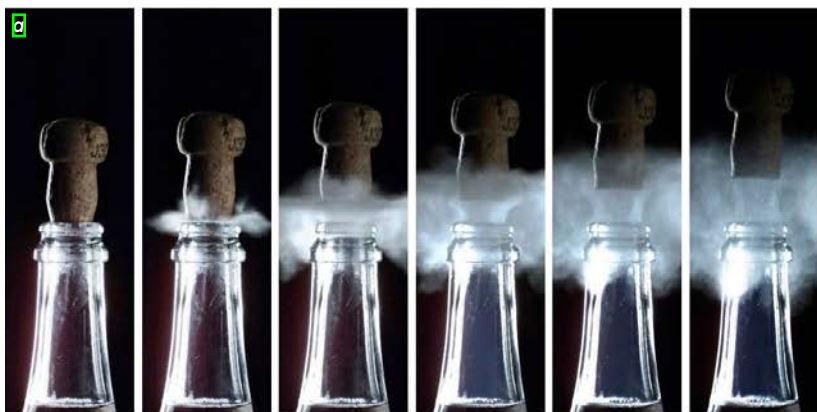
Au moment du débouchage, la décompression brutale du gaz sous pression présent dans le col de la bouteille s'accompagne d'une chute de sa température (les physiciens parlent d'une détente adiabatique). Ce nuage de gaz froid refroidit l'air ambiant. Or ce dernier contient de la vapeur d'eau. En se refroidissant, la vapeur d'eau se condense sous la forme d'un brouillard de minuscules gouttelettes dont la taille varie de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. La diffusion de la lumière ambiante par ces gouttelettes se fait de façon quasi isotrope dans l'espace et pour toutes les longueurs d'onde du spectre visible. Cela confère au panache de condensation une teinte blanchâtre.

Ce mode de diffusion de la lumière, où la taille des objets qui diffusent le rayonnement est comparable ou supérieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante (de 0,4 micromètre pour le bleu à 0,8 micromètre pour le rouge), est connu sous le nom de diffusion de Mie, du nom du physicien allemand Gustav Mie, mort en 1957.

Dans le goulot de la bouteille, le nuage bleu persiste mais devient blanc-gris

La description que nous venons de donner est bien conforme à ce que l'on observe quand on débouche des bouteilles stockées à 6°C ou à 12°C. D'ailleurs, à une tout autre échelle, celle de l'atmosphère, les nuages voient le jour selon le même principe : des masses d'air chargées de vapeur d'eau montent en altitude et se refroidissent progressivement, ce qui entraîne la condensation de leur eau en masses nuageuses – lesquelles sont visibles grâce à la diffusion de la lumière solaire par leurs gouttelettes d'eau, diffusion qui fait apparaître blancs ou gris les nuages.

Cependant, dans le cas d'une bouteille de champagne stockée à la température ambiante



de 20°C, pourquoi le nuage de condensation apparaît-il directement dans le goulot de la bouteille et pourquoi est-il bleu azur et non pas blanc? La clé de l'énigme se trouve dans la relation qui existe entre la température des gaz qui s'échappent du col de la bouteille et la température initiale de celle-ci.

LA PRESSION DANS UNE BOUTEILLE DÉPEND DE SA TEMPÉRATURE

À la suite d'une seconde fermentation alcoolique en bouteille close (la «prise de mousse»), les vins de Champagne et les vins effervescents élaborés selon la méthode traditionnelle se chargent en gaz carbonique

Ces clichés permettent de comparer les phénomènes de condensation qui accompagnent le débouchage de trois bouteilles stockées respectivement à 6°C (a), 12°C (b) et 20°C (c). L'intervalle de temps entre deux images successives est de 0,4 milliseconde. On constate que le nuage bleu n'apparaît que pour une température initiale assez élevée: sinon, le refroidissement dû à la détente du gaz n'est pas suffisant pour que se forment les minuscules cristaux de dioxyde de carbone qui diffusent le bleu plus efficacement que les autres longueurs d'onde de la lumière.

dissous. Or la solubilité du dioxyde de carbone (CO_2) est très sensible à la température: plus le vin est froid, plus le gaz carbonique y est soluble. Cela implique que, pour une quantité fixe de CO_2 dans une bouteille close, la pression due au CO_2 (sa «pression partielle») régnant dans le col de la bouteille sera d'autant plus faible que la température est basse, puisque la quantité de CO_2 dissous dans le liquide sera plus grande.

On peut calculer avec une grande précision la pression de gaz carbonique qui règne dans une bouteille en fonction de sa température. Pour ce faire, on fait appel à la loi des gaz parfaits, à celle de la conservation de la matière et à la loi de Henry, énoncée en 1803 et selon laquelle la concentration en gaz dissous est proportionnelle à la pression partielle de ce gaz dans le col de la bouteille, le facteur de proportionnalité étant la solubilité. On trouve ainsi que dans une bouteille de 75 centilitres, la pression de gaz carbonique est de 4,5 bars à la température de 6°C, et qu'elle passe à 7,5 bars pour une bouteille à 20°C.

La température initiale d'une bouteille de champagne doit donc de toute évidence jouer un rôle sur les phénomènes de condensation qui accompagnent son débouchage.

GROS PLAN SUR LA DÉTENTE ADIABATIQUE

De fait, la chute de la température des gaz s'échappant du col dépend directement de la chute de pression qu'ils subissent lorsque le bouchon saute.

En effet, lorsque le bouchon saute, le volume de gaz présent sous pression dans le col de la bouteille se détend brutalement. Il s'agit d'une détente adiabatique, ce qui signifie que le processus se déroule sans échange de chaleur avec l'extérieur. La température du gaz chute alors de façon concomitante pour atteindre une nouvelle température T' donnée par une relation bien connue et qui s'écrit:

$$T'/T = (P_0/P_B)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

Dans cette formule, T est la température initiale régnant dans la bouteille encore bouchée, P_0 est la pression ambiante (de l'ordre de 10^5 pascals, soit 1 bar), P_B est la pression du gaz régnant dans la bouteille bouchée (et qui dépend beaucoup de la température initiale T de la bouteille), et γ (gamma) désigne l'indice adiabatique du gaz, défini comme le rapport de ses capacités calorifiques à pression et à volume constants, et qui est égal à environ 1,3 pour le CO_2 .

On peut tracer la température T' atteinte par le gaz en fonction de la température initiale T de la bouteille (voir le graphique page 51). On voit que, de façon assez contre-intuitive, cette température du gaz détendu est d'autant plus basse que la température

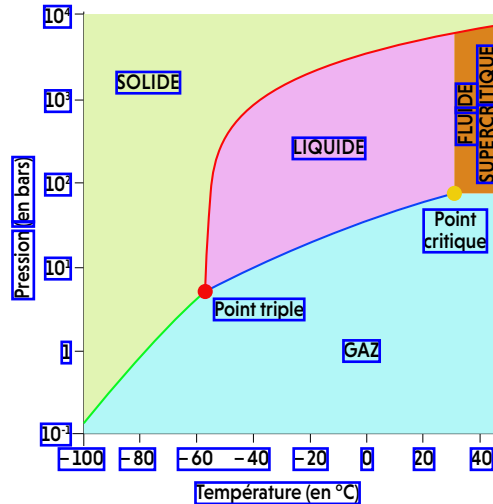
> initiale de la bouteille est élevée. En théorie, la température du gaz qui se détend hors d'une bouteille stockée à 20 °C chute à presque -90 °C ! Dans un environnement aussi glacial, que deviennent les différentes espèces gazeuses présentes ?

DES CRISTAUX DE NEIGE CARBONIQUE

En fonction de sa température et de sa pression, un corps pur est susceptible d'exister sous trois phases – gazeuse, liquide ou solide. Prenons par exemple le cas familier de l'eau. Sous une pression de 1 bar et à 20 °C, l'eau est liquide. Elle peut se transformer en glace au-dessous de 0 °C et, à 100 °C, elle commence à bouillir pour se transformer intégralement en vapeur.

Qu'en est-il du CO₂ ? Le diagramme de phase de ce corps pur montre qu'aux températures et aux pressions de quelques bars régnant dans une bouteille bouchée, le CO₂ est un gaz (voir le diagramme ci-dessus). Lorsque le bouchon saute, il se détend brutalement et sa pression rejoint celle de l'atmosphère extérieure, c'est-à-dire 1 bar. Et dans ce processus adiabatique, sa température chute de plusieurs dizaines de degrés (voir le graphique page suivante). Or le diagramme de phase montre qu'à une pression de 1 bar, le CO₂ est gazeux au-dessus de -78,5 °C, mais qu'au-dessous de cette température, il est sous sa forme solide (la glace carbonique).

Si l'on se réfère au graphique montrant la température atteinte après le débouchage en fonction de la température initiale de la bouteille, on remarque qu'une bouteille initialement à 6 °C voit la température des gaz qui s'en échappent chuter à près de -77 °C. Autrement dit, il ne fait pas encore assez froid pour que les vapeurs de CO₂ se condensent en glace carbonique.



Le diagramme de phase pression-température du dioxyde de carbone. On voit en particulier qu'à la pression atmosphérique (soit 1 bar), des cristaux de CO₂ ne peuvent apparaître que si la température est inférieure à environ -80 °C.

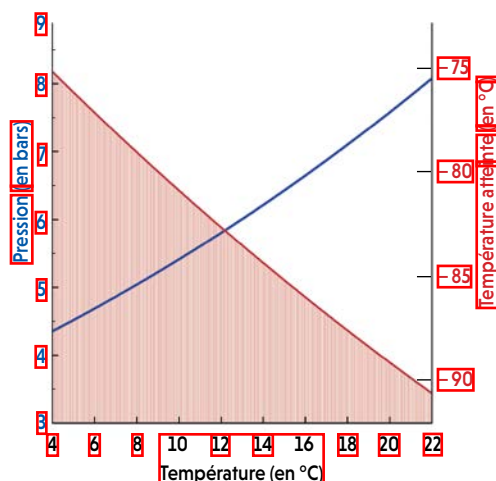
Pour les bouteilles stockées à 12 et à 20 °C, la température des gaz qui se détendent chute respectivement à -83 °C et -89 °C. Ces valeurs sont inférieures au seuil de -78,5 °C. En théorie, les vapeurs de CO₂ qui jaillissent hors du col de la bouteille sont donc susceptibles de se transformer en glace carbonique.

Cependant, même si la température du gaz carbonique chute sous le seuil de condensation, le changement de phase ne s'effectue pas aussi aisément. Les vapeurs de CO₂ ne peuvent pas se transformer en cristaux de neige carbonique *ex nihilo* : il ne fait pas encore assez froid pour cela. Pour se transformer en cristaux, le gaz carbonique a besoin de noyaux de condensation qui serviront de catalyseurs pour déclencher le processus. Et c'est à cette étape qu'un autre acteur du système entre en jeu : la vapeur d'eau – pas celle contenue dans l'air ambiant, mais celle présente dans le col de la bouteille.

En effet, le gaz présent dans le col de la bouteille encore bouchée contient de la vapeur d'eau en équilibre avec le champagne qui,

Les phénomènes de condensation à l'œuvre dans le nuage bleu du champagne sont similaires à ceux que présentent les gaz s'échappant des tuyères d'un réacteur de fusée. Les particules diffusantes y sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière visible, d'où une diffusion dite de Rayleigh de la lumière ambiante, qui fait apparaître du bleu (davantage diffusé que les autres longueurs d'onde). C'est ce même régime de diffusion qui fait apparaître bleu le ciel.





Ces deux graphiques montrent, en fonction de la température de la bouteille bouchée, la pression partielle de CO_2 régnant dans le col de la bouteille (en bleu) et la température atteinte par le nuage de gaz carbonique après que le bouchon a sauté (en rouge).

rappelons-le, est formé d'environ 85 % d'eau en volume. La teneur en vapeur d'eau dans le col d'une bouteille augmente avec sa température, selon une loi connue (la loi de Clausius-Clapeyron). Elle passe de 0,9 % dans le col d'une bouteille à 6 °C, à environ 2,3 % pour une bouteille à 20 °C.

Comme on l'a vu, lorsque le bouchon saute, les gaz initialement sous pression dans le col d'une bouteille se détendent et leur température chute à plusieurs dizaines de degrés sous la température de congélation de l'eau. Il fait alors si froid que la vapeur d'eau se transforme instantanément en cristaux de glace d'eau *ex nihilo* (c'est-à-dire sans que la présence de noyaux de condensation soit nécessaire), à la différence du gaz carbonique. Ce sont donc les cristaux de glace d'eau nés dans le col de la bouteille qui servent de noyaux solides pour la condensation du gaz carbonique en neige carbonique.

Des phénomènes similaires ont été mis en évidence dans le mélange gazeux qui se détend dans les tuyères des moteurs de fusées (voir la photographie page précédente). Là aussi, les gaz les plus facilement condensables (en général l'eau et le CO_2) servent de noyaux solides qui rendent possible la condensation des espèces présentant des températures de condensation bien plus basses (tels que le dioxygène et le diazote).

Le panache bleu azur qui apparaît dans le sillage du bouchon qui saute et dans le col de la bouteille serait donc la signature de la transformation des vapeurs de CO_2 en cristaux de neige carbonique. Mais pourquoi ce panache est-il bleu, alors que le nuage de condensation de la vapeur d'eau ambiante qui caractérise le débouchage des bouteilles plus froides apparaît plutôt blanc ?

Cette couleur bleue a certainement pour origine la très petite taille des cristaux de neige carbonique qui diffusent la lumière ambiante. En effet, lorsque les cristaux qui diffusent la lumière sont de taille très inférieure aux

longueurs d'onde du spectre de la lumière ambiante (centrée autour de 0,6 micromètre environ), ils diffusent bien plus efficacement les petites longueurs d'onde du spectre, et donc la lumière bleue. Le nuage de condensation apparaît alors bleuté et non pas blanc comme dans le cas de la diffusion de Mie, où la taille des objets qui diffusent la lumière est comparable à celle de la longueur d'onde incidente.

COMME LE BLEU DU CIEL

Ce mode de diffusion de la lumière par des particules plus petites que les longueurs d'onde incidentes est connu sous le nom de diffusion de Rayleigh (d'après le physicien anglais John Rayleigh, ou Lord Rayleigh, 1842-1919). C'est d'ailleurs le même phénomène qui explique pourquoi le ciel nous apparaît bleu. Les molécules qui composent l'atmosphère de notre planète sont bien plus petites que les longueurs d'onde de la lumière solaire. Le bleu est donc bien plus efficacement diffusé que les autres couleurs du spectre, et c'est pourquoi l'atmosphère terrestre nous apparaît de cette couleur (voir la photographie page précédente).

Et si le nuage de condensation du gaz carbonique ne blanchit pas hors du goulot de la bouteille, c'est parce que les cristaux de neige carbonique dont il est constitué ne peuvent pas croître suffisamment pour atteindre des tailles micrométriques, qui le feraient paraître blanc par diffusion de la lumière ambiante. En effet, l'air ambiant, à une vingtaine de degrés Celsius, agit comme un immense réservoir thermique. Très vite, la température du nuage de condensation remonte alors au-dessus des -78,5 °C fatidiques, et les cristaux de neige carbonique se subliment pour se transformer en gaz carbonique. Ainsi, au bout de quelques millisecondes, le nuage bleu s'évanouit au-dessus du goulot.

Cependant, confiné dans le goulot de la bouteille, le nuage de condensation est protégé du réservoir thermique un peu plus longtemps. Les cristaux de neige carbonique sont donc susceptibles de croître autour de leur cœur de glace d'eau. Ils atteignent alors des tailles micrométriques et le nuage de condensation présent dans le goulot change progressivement de couleur. Il vire du bleu profond au blanc-gris, comme on peut clairement le constater sur les photographies reproduites.

En d'autres termes, pour ce qui est de la diffusion de la lumière ambiante, on passe progressivement d'un régime de Rayleigh, dû à des cristaux de taille très inférieure aux longueurs d'onde de la lumière ambiante, à un régime de Mie lorsque la taille des cristaux de neige carbonique devient comparable ou supérieure à ces longueurs d'onde. Le nuage bleu visible lors du débouchage d'une bouteille de champagne à température ambiante et son changement de couleur n'ont ainsi plus de mystères... ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Liger-Belair et al., **Unveiling CO_2 heterogeneous freezing plumes during champagne cork popping**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 10938, 2017.

G. Liger-Belair et al., **Un océan dans une flûte de champagne**, *Pour la Science*, n° 459, pp. 36-41, janvier 2016.

M. Vollmer et K.-P. Möllmann, **Vapour pressure and adiabatic cooling from champagne : Slow-motion visualization of gas thermodynamics**, *Physics Education*, vol. 45, pp. 608-615, 2012.

B. E. Wyslouzil et al., **Binary condensation in a supersonic nozzle**, *Journal of Chemical Physics*, vol. 113, pp. 7317-7329, 2000.

R. Batt, **Pop ! Goes the champagne bottle cork**, *Journal of Chemical Education*, vol. 48, p. 75, 1971.

RONAN ALLAIN

est le paléontologue chargé de la conservation des collections de reptiles et d'oiseaux fossiles au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Spécialiste des dinosaures, il participe aux fouilles du site d'Angeac-Charente, qui a livré de nombreux squelettes de dinosaures, notamment un fémur de sauropode de 2,3 mètres de long.



Trix, le premier T. rex jamais exposé en France



Pendant tout l'été, le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, présente Trix, une femelle tyrannosaure découverte dans le Montana. Ronan Allain, commissaire scientifique de l'exposition, nous raconte la vie de cet hypercarnassier du Crétacé.



L'exposition « Un T. rex à Paris » se tiendra au Jardin des plantes du 6 juin au 2 septembre 2018. Pourquoi le Muséum national d'histoire naturelle consacre-t-il cette exposition de paléontologie à une unique espèce de dinosaure ?

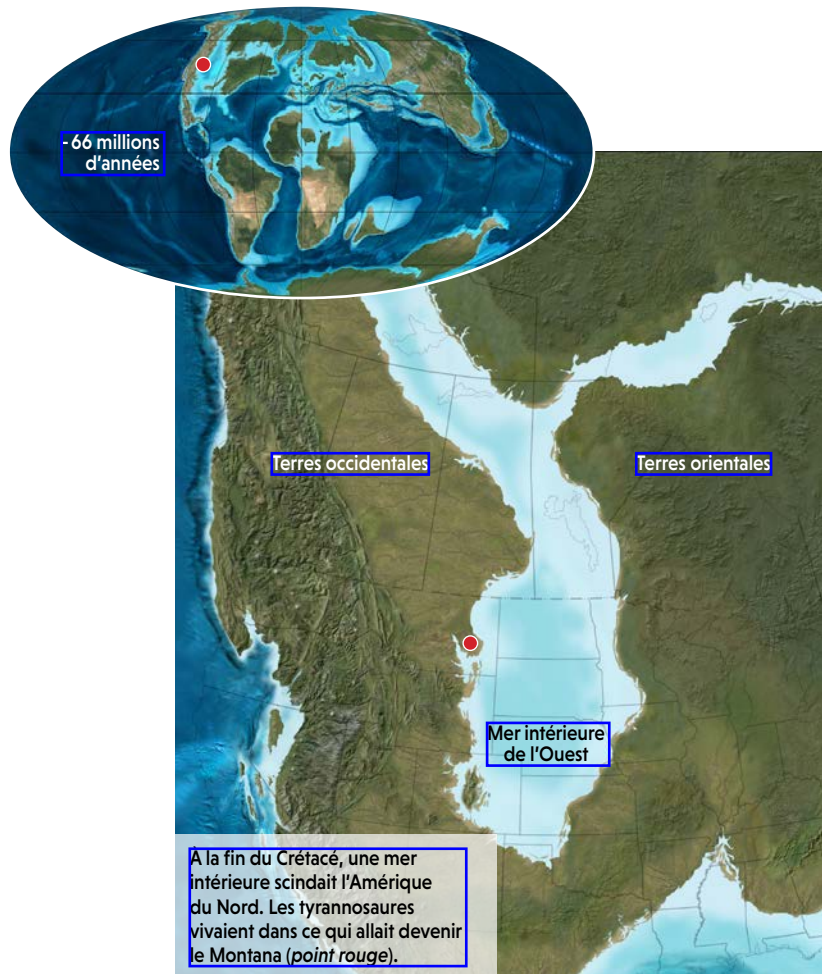
Parce que *Tyrannosaurus rex* est une espèce spectaculaire ! Or les études des dernières années nous la font connaître de mieux en mieux. Nous avons donc voulu consacrer une exposition à cette espèce emblématique. Pour cela, nous faisons venir à Paris le squelette de tyrannosaure que nos collègues du centre de biodiversité Naturalis de Leyde, aux Pays-Bas, ont mis au jour. Après une partie qui contextualise le tyrannosaure dans le temps et l'espace et qui aborde l'histoire de ses découvertes, nous y présenterons l'animal en pied dans la position qu'il devait adopter lorsqu'il était en chasse.

Le nom de l'exposition « Un T. rex à Paris » est une allusion à la célèbre comédie musicale ?

À l'origine, j'avais même proposé « Une Américaine à Paris », car c'est vraiment une vieille dame américaine qui nous rend visite.

Car ce squelette vient d'Amérique...

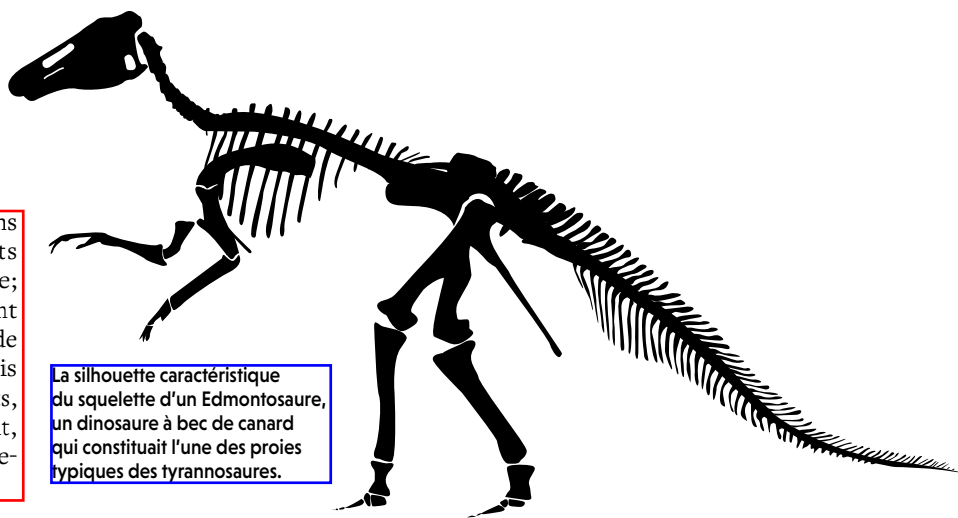
Oui, de la formation géologique de Hell Creek. Cette formation que ses fossiles ont rendue célèbre se trouve quelque 50 kilomètres au sud de la ville de Jordan dans le Montana.



Qu'est-ce qui fait de *T. rex* une espèce si emblématique: ses grandes dents?

Certes! Mais surtout le fait qu'elle soit dans la culture de tout un chacun. Nos enfants jouent avec des répliques de *T. rex* en plastique; nous avons tous vu et aimé *Jurassic Park*, dont un énième avatar va sortir en juin, le jour de l'ouverture de l'exposition justement; depuis ce film, le *T. rex* est partout, sur les T-shirts, dans les bandes dessinées, etc. Pour autant, cette espèce et surtout son histoire sont largement méconnues en Europe...

La silhouette caractéristique du squelette d'un Edmontosaure, un dinosaure à bec de canard qui constituait l'une des proies typiques des tyrannosaures.



Comment cela?

Peu de gens sur notre continent ont repéré qu'il n'y a eu de *T. rex* qu'en Amérique; et seulement pendant les deux derniers millions d'années précédant la chute de la météorite qui a mis fin à la domination des dinosaures dans tous les écosystèmes terrestres, il y a 66 millions d'années...

Cela signifie-t-il que les tyrannosaures ont évolué sur le continent américain?

Non, pas vraiment, car il faut distinguer l'histoire évolutive de *Tyrannosaurus rex*, espèce exclusivement américaine de genre *Tyrannosaurus*, de celle, beaucoup plus complexe de la superfamille des tyrannosauroïdes. La persistance jusqu'au tyrannosauridés, c'est-à-dire jusqu'au genre *Tyrannosaurus*, de certains traits anatomiques au sein de cette superfamille nous a permis d'identifier des tyrannosauroïdes en Europe et en Asie dès le Jurassique moyen, il y a 165 millions d'années. Cela suggère qu'au Jurassique, des tyrannosauroïdes ont vécu sur tous les continents. Ces animaux, qui mesuraient moins de quatre mètres, étaient bien plus modestes que leurs descendants tyrannosauridés...

Ensuite, à partir du début du Crétacé supérieur, il y a quelque 100 millions d'années, on ne trouve des membres de ce genre qu'en Asie et en Amérique du Nord. Finalement, au Maastrichtien, la dernière période du Crétacé

(qui dura environ six millions d'années), les tyrannosaures de Mongolie comme le *Tarbosaurus* étaient très proches de ceux de l'ouest de l'Amérique du Nord. En effet, comme nous l'expliquons dans la première partie de l'exposition, pendant le Crétacé, ce qui allait devenir le continent nord américain actuel était alors scindé par une mer, la mer intérieure de l'Ouest, et l'on n'a jamais découvert de tyrannosaures dans l'est de l'Amérique du Nord.

Les tyrannosaures vivaient donc sur les terres occidentales. Le fait que l'on ait retrouvé des fossiles de tyrannosauroïdes en Alaska suggère par ailleurs une circulation des tyrannosauridés entre l'Asie et les terres occidentales de l'Amérique du Nord. Faut-il voir là l'origine de la proximité entre les tyrannosauridés maastrichtiens asiatiques et *Tyrannosaurus*?

Et dans quel genre d'environnement vivaient ces animaux?

La formation de Hell Creek est composée en grande partie de grès et de mudstones – une fine roche sédimentaire faite de boue consolidée – attribués à de basses plaines côtières marécageuses, à des estuaires et à d'autres environnements fluviaux ou lacustres, mais en tout cas à des zones humides sous climat chaud. La température moyenne terrestre était alors proche de 20 °C. Depuis le début du Crétacé, les angiospermes, en d'autres termes les plantes à fleurs, avaient envahi la nature auparavant occupée seulement par les gymnospermes, c'est-à-dire par les conifères. Les paysages ressemblaient donc à ceux que nous connaissons aujourd'hui dans certaines régions tropicales comme la Floride. La végétation était assez dense, pour que les superprédateurs que sont les tyrannosaures puissent se dissimuler et prendre leurs proies par surprise...

Parmi eux, Trix, le spécimen bientôt exposé à Paris. Qu'a-t-il de si remarquable?

Tout d'abord, il est exceptionnellement bien conservé. Après les quelques spécimens de tyrannosaures exhumés dans les années 1900, plus aucune découverte notable n'a eu lieu jusque dans les années 1990. Depuis, les

À part eux-mêmes, aucun animal n'attaquait les *T. rex*!

➤ chercheurs privés du Wyoming et du Montana ont produit plusieurs beaux squelettes, notamment Sue, complète à 85%, Scotty, complet à 70% et Stan, complet à 65%. Dans l'étude des tyrannosaures, la découverte de Trix n'a donc rien d'anodin: même si seulement la moitié de ses os ont été découverts, ils représentent de 75 à 80% du volume osseux, ce qui fait de Trix l'un des tyrannosaures les mieux conservés. Par ailleurs, l'animal est imposant: vivant, il a dû peser 5 tonnes et mesurer de 4 à 5 mètres de haut pour une longueur de 12 mètres... Finalement, on s'est aperçu que cette robuste femelle a probablement atteint une trentaine d'années – la durée de vie maximale des tyrannosaures, sans doute...

Comment sait-on que Trix est une femelle ?

Cette attribution découle de l'interprétation que font nombre de paléontologues – notamment ceux de l'institut de recherche géologique des Black Hills, qui a aidé le centre Naturalis à découvrir Trix – de l'existence de deux types de squelettes de tyrannosaures. Le premier, très robuste, serait celui des femelles et le second, nettement plus gracile, celui des mâles. Pour ces paléontologues, cette interprétation est corroborée par la présence, dans les parties internes de certains os des spécimens robustes, de tissus enrichis en calcium, qui auraient facilité la production d'œufs. Trix, notamment de par les proportions de ses pattes, est clairement du type robuste. Nos collègues hollandais veulent mener de plus amples explorations à la recherche de réserves de calcium, mais ils estiment à ce stade que Trix est «très probablement» une femelle. Quoi qu'il en soit, ils ont nommé leur spécimen Trix en hommage à la reine Béatrix. Cela fait donc de leur *T. rex* une sorte de «reine des tyrannosaures»...

Comment décririez-vous Trix ou un tyrannosaure en quelques mots ?

Les tyrannosaures sont les plus gros prédateurs que la Terre ait jamais portés. Le corps de ces hypercarnivores bipèdes dénués de plumes était organisé afin de porter une énorme tête – celle de Trix mesure 1,5 mètre de long. Leur gueule était pleine de longs crocs similaires les uns aux autres qu'ils enfonçaient profondément dans la chair de leurs proies afin de les maintenir. Terminées par seulement deux doigts, leurs pattes antérieures avaient régressé en taille, ce qui déséquilibrait moins un animal qui compensait le poids de sa tête par sa queue. Leurs yeux étaient orientés vers l'avant de la face, ce qui leur permettait une vision stéréoscopique (en 3D) comparable à la nôtre. Très puissantes, les pattes postérieures étaient adaptées à une bipédie permanente et à une course qui ne devait pas être très rapide – avec des pointes à 20 kilomètres par heure,



peut-être – suffisantes pour rattraper les lourds dinosaures herbivores qu'ils chassaient...

Justement, quelles étaient leurs proies ?

Il pouvait s'agir de tricératops, d'ankylosaures, de dinosaures à bec de canard... Nous présentons un membre de cette dernière famille dans l'exposition: un *Edmontosaurus*, un dinosaure à bec de canard qui, d'après ce que l'on a compris, aimait vivre dans les plaines côtières; il pouvait peser jusqu'à 4 tonnes et mesurer jusqu'à 13 mètres de long. Le squelette de celui que le Muséum national d'histoire naturelle possède depuis un siècle mesure 8 mètres de long. Grande première: Trix nous donne l'occasion de le sortir des réserves pour l'exposer, ce que nous ferons en le présentant en position couchée.

Les tyrannosaures avaient-ils des prédateurs ?

À part eux-mêmes, ce qui est envisagé, aucun animal n'attaquait les *T. rex*!

Pourtant, Trix a eu une vie mouvementée ?

En effet ! Pendant les fouilles, nos collègues hollandais ont découvert les traces de blessures et de maladies sur certains os. Cela suggère que la vieille dame Trix en a vu au cours de sa vie: un os de sa jambe droite et une de ses côtes présentent des excroissances, signes possibles de fractures ou d'infection; ses mâchoires ont subi des dommages considérables: une infection du maxillaire droit et une morsure d'un autre tyrannosaure sur la mâchoire inférieure

Pour survivre, un tyrannosaure devait absolument éviter de se faire briser la patte par les puissants dinosaures herbivores qu'il chassait. Dans cette restitution, l'un d'eux, un ankylosaure, se défend à l'aide de sa queue en forme de masse d'arme.

UN T. REX À PARIS

Au Jardin des plantes, du 6 juin au 2 septembre 2018.





gauche. On peut imaginer des interactions rudes avec un mâle *T. rex* pendant l'accouplement, ou un combat autour d'une proie... Le sacrum et la première vertèbre caudale montrent un développement inégal qui pourrait suggérer une malformation congénitale ou une blessure subie pendant la jeunesse...

Si le *T. rex* n'avait aucun prédateur à part lui-même, un coup de corne de tricératops pouvait être létal. Les tricératops étaient en effet de véritables chars d'assaut, cuirassés et massifs, qui de plus vivaient en troupes, ce qui ne devait pas les rendre faciles à terrasser. Un autre dinosaure herbivore à armure, l'ankylosaure, était pour sa part muni d'une queue en forme de masse d'arme. Un coup de queue d'ankylosaure aurait pu briser la jambe d'un tyrannosaure, qui, dès lors, n'aurait plus pu se nourrir. Pour avoir survécu aussi longtemps, Trix, comme tous les grands prédateurs, a dû être d'une très grande prudence. S'il y a beaucoup de traces de blessures sur son squelette, la plupart sont cicatrisées et ne semblent pas être à l'origine de sa mort. Trix est morte tranquillement, après s'être couchée dans son coin...

Comment a-t-on déterminé son âge ?

Pour survivre, les jeunes tyrannosaures devaient grandir très vite, mais leur croissance marquait un arrêt chaque année pendant l'hiver. Si l'on admet qu'une ligne d'arrêt de croissance représente un an, alors il suffit de compter ces lignes pour trouver l'âge d'un dinosaure juvénile. Toutefois, les reptiles sont différents de nous qui arrêtons de grandir : leur croissance est continue, de sorte que pour continuer à croître, ils en viennent à dissoudre l'intérieur de leur os pour le réutiliser à l'extérieur de celui-ci. Les petites baies de dissolution correspondantes se voient très bien sur une lame mince. Chez Trix, cette dissolution est si avancée que l'on ne voit pratiquement plus les lignes d'arrêt de croissance. C'est ainsi que la comparaison avec d'autres individus nous a montré qu'elle est plus vieille, en fait la plus vieille de tous les tyrannosaures que l'on a trouvés : on estime qu'elle a vécu plus de 27 ans, voire 30 ans.

Quelles sont les autres recherches menées sur le squelette de Trix ?

Ces recherches n'ont pas encore été publiées, mais elles incluent sa datation – entre 67 et 66 millions d'années – par des méthodes géologiques et paléomagnétiques, ainsi que des études histologiques et une tomographie du crâne de Trix.

Que confirme par exemple l'étude du crâne ?

Que *Tyrannosaurus* avait un coefficient d'encéphalisation – un paramètre qui, au sein d'une lignée, caractérise le rapport entre la

masse du cerveau et celle du corps – intermédiaire entre celui des premiers dinosaures et celui des dinosaures actuels, c'est-à-dire des oiseaux. C'est logique : ne volant pas, il n'avait pas développé les volumineux circuits cérébraux du vol. Le scan nous a confirmé par ailleurs l'importance des lobes olfactifs, ce qui confirme une fois de plus que les tyrannosaures se servaient beaucoup de l'odorat pour déterminer la présence de proies et sans doute celle de dangereux concurrents à éviter...

Cela a-t-il un rapport avec la position dans laquelle le dinosaure sera présenté ?

Tout à fait : après avoir complété son squelette à partir de celui de Sue qui est de corpulence comparable, Trix a été montée dans une position dynamique, en train de marcher le museau très bas et la queue relevée pour équilibrer le poids de la tête. Nous la montrons non pas comme le gros animal pataud et quasi debout que l'on représentait au ^{xx}e siècle, mais telle que cette prédatrice se tenait probablement alors qu'elle progressait en surveillant et en reniflant toutes les odeurs émanant du sol ou apportées par le vent.

Quelles questions les paléontologues se posent-ils encore sur *T. rex* ?

Nous n'avons pas d'œufs de tyrannosaures. Si nous en avions, nous pourrions progresser quant à la croissance de ces animaux, mais aussi sur leur comportement social. Comment se passait l'élevage des petits ? Se rassemblaient-ils pour se protéger mutuellement ? Les tyrannosaures s'associaient-ils aussi pour chasser ?

Outre ses magnifiques fossiles et leur contexte scientifique, que contient cette exposition ?

Nous l'avons conçue pour le grand public, de sorte que nous lui avons adjoint une troisième partie ludique, plus particulièrement destinée aux enfants : ils pourront se comparer à un tyrannosaure juvénile sous la forme d'un hologramme ou encore tenter d'échapper à vélo à un tyrannosaure, etc.

Bref, l'exposition qu'il faut avoir vue pour connaître la science des tyrannosaures avant de visionner un énième *Jurassic World*...

En effet, puisque dans le film qui va sortir, les tyrannosaures et les autres dinosaures sont supposés clonés et modifiés génétiquement ! Vous conviendrez que pareil parti pris n'a plus grand-chose à voir avec ce que la paléontologie peut dire sur ces animaux qui vivaient non pas au Jurassique, mais à la toute fin du Crétacé... ■

PROPOS RECUEILLIS
PAR FRANÇOIS SAVATIER

BIBLIOGRAPHIE

S. Brusatte, *L'ascension des tyrannosaures*, Pour la Science, n° 456, 2015.

A. R. Fiorillo et R. S. Tykoski, *A diminutive new Tyrannosaur from the top of the world*, Plos One, vol. 9(3), article e91287, 2014.

M. Schweitzer, *Dinosaures : on a retrouvé leur sang*, Pour la Science n° 402, 2011.

S. Brusatte et al., *New research on ancient exemplar organisms*, Science, vol. 329, pp. 1481-1485, 2010.

G. M. Erickson, *La vie de Tyrannosaurus rex*, Dossier Pour la Science, n° 48, 2005.

L'ESSENTIEL

> Rougeur, gonflement, chaleur et douleur sont connus depuis longtemps comme des signes d'inflammation, qu'elle soit due à une infection ou à une lésion.

> Des scientifiques ont montré que des cellules lancent ce processus en assemblant des complexes moléculaires nommés inflammasomes.

> Les mêmes inflammasomes interviennent dans de nombreuses pathologies chroniques apparemment sans lien comme la maladie d'Alzheimer, la goutte et des maladies cardiaques.

> On espère ainsi concevoir de nouveaux médicaments visant une grande variété de maladies.

L'AUTEUR



WAJAHAT Z. MEHAL
professeur de médecine spécialisé dans les maladies digestives et l'inflammation à l'université Yale, aux États-Unis

Comment les cellules s'enflamment

Quel est le point commun entre la goutte, la maladie d'Alzheimer et la stéatose hépatique ? Il n'y en a pas, aurait-on répondu il y a quinze ans. Mais depuis, on a découvert que, dans toutes ces maladies, une même structure moléculaire entretient une inflammation chronique.

Si vous avez déjà eu un bouton, vous connaissez les signes typiques d'une infection: rougeur, gonflement, chaleur et douleur. Cette réaction de l'organisme, nommée inflammation, est identifiée depuis longtemps. Cependant, elle ne se déclenche pas seulement lors d'une infection. Elle se produit aussi quand un tissu est endommagé, même en l'absence d'agent pathogène – par exemple lorsque vous vous cognez un orteil ou, plus gravement, lors d'une crise cardiaque. Et quand elle tourne mal, cette inflammation dite stérile contribue à toute une série de maladies apparemment sans lien, allant de la maladie d'Alzheimer au diabète et à diverses affections hépatiques.

L'inflammation prolongée et son rôle dans la maladie sont connus depuis des décennies. Néanmoins, les recherches menées ces dernières années ont révélé d'étonnantes informations

sur ses origines, dont l'une des plus fascinantes est que l'inflammation n'est pas une réaction automatique: elle ne se lance qu'après un assemblage actif de structures moléculaires. Les cellules qui interviennent dans l'inflammation construisent rapidement ces structures, nommées inflammasomes, puis les démantèlent très vite, en général dans les vingt-quatre heures qui suivent une blessure. Imaginez la construction d'une usine d'assemblage en quelques minutes lorsqu'un produit devient nécessaire, puis sa démolition dès que le besoin a disparu et vous aurez une idée de la scène. Le désassemblage rapide aide probablement l'organisme à éviter des lésions excessives. Une certaine dose d'inflammation est utile, car elle détruit les agents pathogènes et bloque leur propagation dans l'organisme. Mais une inflammation trop forte est susceptible d'altérer les tissus sains environnants et d'étendre ainsi la lésion initiale.



Mis en évidence en 2002 par Jurg Tschopp et ses collègues à l'université de Lausanne, les inflammasomes constituent une découverte clé en biologie fondamentale, mais ils ont également de profondes implications en médecine. On s'est en effet aperçu que des perturbations du cycle d'assemblage et de désassemblage des inflammasomes alimentent des inflammations délétères en cours. Actuellement, nombre de médicaments antalgiques et anti-inflammatoires bloquent l'activité de certaines protéines qui attisent le feu de l'inflammation. Mais ces nouveaux travaux suggèrent que des médicaments capables de bloquer l'assemblage de l'inflammasome ou d'induire sa dispersion entraveraient la production même de ces protéines problématiques et réduiraient ainsi les lésions tissulaires d'une façon totalement nouvelle. De tels médicaments, seuls ou en combinaison avec ceux existants, aideraient à combattre l'inflammation, qui résiste encore souvent aux traitements actuels.

De fait, de récentes découvertes sur les inflammasomes et la façon dont ils deviennent parfois hyperactifs nous conduisent, divers chercheurs en médecine et moi-même, à changer radicalement notre façon de concevoir la maladie humaine. Au lieu de classer les maladies en fonction des organes spécifiques concernés (cœur, foie, etc.), nous pensons plutôt en termes de machinerie cellulaire susceptible d'être impliquée: jusqu'ici, les scientifiques ont caractérisé sept types d'inflammasomes, et d'autres encore devraient suivre. L'un des avantages de cette approche est que les chercheurs commencent à tester si les médicaments efficaces, par exemple, pour soigner la goutte – une maladie où un inflammasome particulier est activé – seraient aussi bénéfiques pour des patients souffrant d'une maladie cardiaque déclenchée par le même inflammasome.

L'ALERTE DU COUP DE MARTEAU

La réaction inflammatoire est l'un des mécanismes de la branche dite innée du système immunitaire, la première ligne de défense contre les microbes qui envahissent l'organisme. Des cellules de la famille des globules blancs, des macrophages, ou des cellules apparentées migrent vers le site d'invasion, où elles sécrètent des protéines déclenchant le gonflement des tissus et une production de chaleur qui immobilisent et affaiblissent les microbes; ces sécrétions recrutent aussi davantage de cellules immunitaires dans la zone touchée. Le pus qui suinte des plaies infectées est composé de tels globules blancs.

Pendant des années, les chercheurs ont cru que le système inné déclenchait cette cascade uniquement en distinguant le «soi» du «non soi». Les macrophages reconnaissent en effet des motifs moléculaires particuliers, communs

à de nombreux agents pathogènes et absents des humains et autres vertébrés. Après être entrés en contact avec ces signaux moléculaires étrangers, ils libèrent des protéines qui déclenchent le reste de la réaction inflammatoire. Charles Janeway Jr. et Ruslan Medzhitov, tous deux chercheurs à l'université Yale, aux États-Unis, ont mené les travaux préparatoires de ces recherches à la fin des années 1980 et au milieu des années 1990.

Toutefois, les macrophages se sont aussi révélés extrêmement réactifs à certaines molécules produites par l'organisme, telles l'ATP – une sorte de batterie chimique rechargeable pour les cellules – et les substances héréditaires que sont l'ADN et l'ARN. Ces molécules sont habituellement nichées en lieu sûr dans des compartiments de la cellule, bien à l'écart des protubérances tentaculaires des macrophages. Cependant, il arrive qu'elles se déversent dans l'espace entre les cellules, par exemple lorsque vous frappez accidentellement votre pouce d'un coup de marteau. Elles deviennent alors détectables par des protéines connues sous le nom de récepteurs de type Toll ou TLR (*Toll-like receptors*) et d'autres molécules présentes sur les cellules immunitaires. L'organisme ne prend pas de risque: il répond à ces signaux de danger comme si des agents étrangers (pathogènes) étaient aussi dans les parages et déclenche la même réaction inflammatoire.

UNE CENTRALE INFLAMMATOIRE DANS LES MACROPHAGES

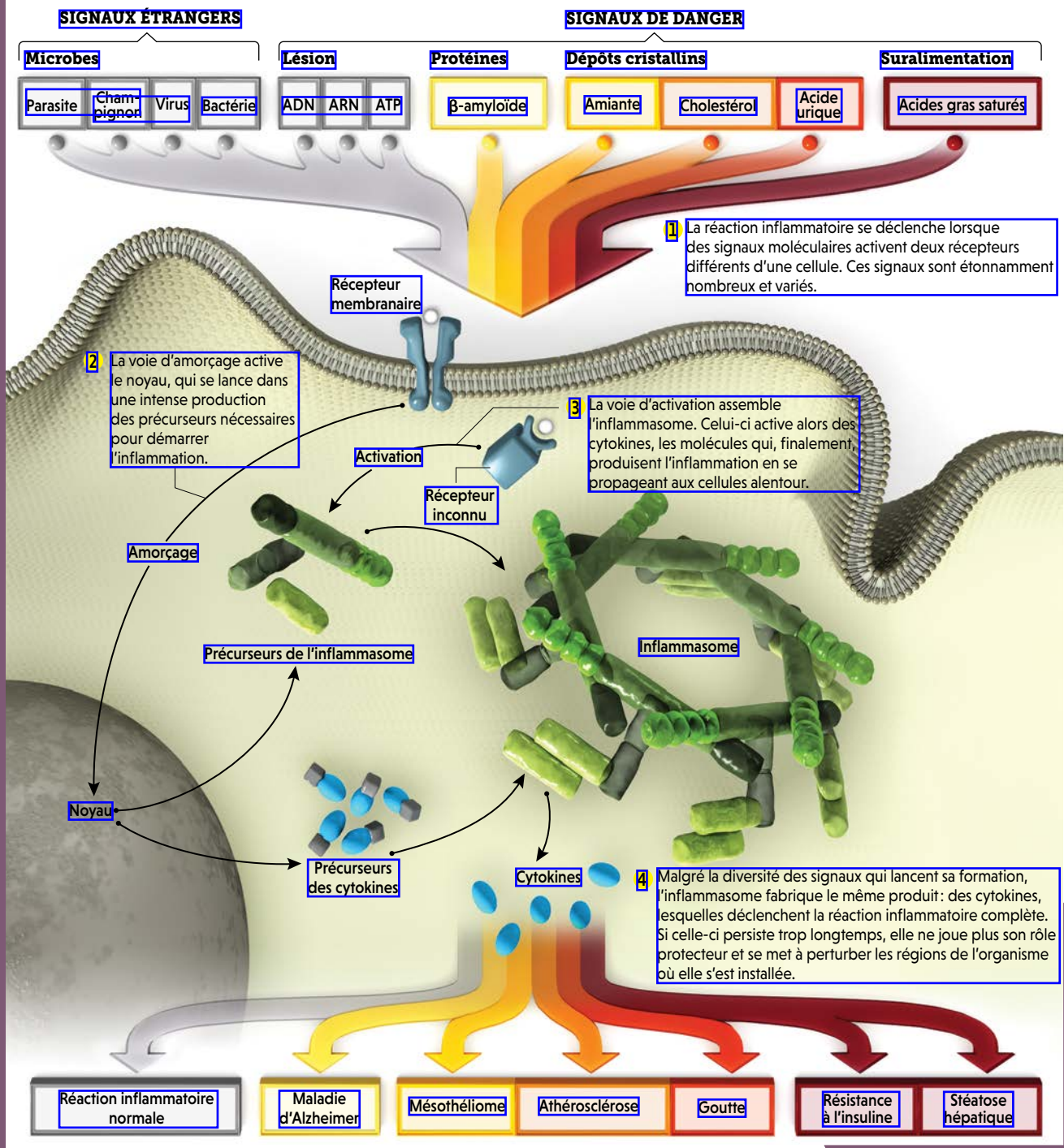
On connaissait les grandes lignes de la réaction inflammatoire depuis plus de quinze ans, mais la découverte de l'inflammasome et les recherches qui ont suivi ont relancé l'intérêt pour ce processus: ces douze dernières années, des biologistes ont révélé plus en détail ce qui se produit exactement au sein d'un macrophage avant qu'il ne déclenche une réaction défensive d'une telle puissance. Auparavant, les chercheurs pensaient que pour comprendre en profondeur comment l'inflammation se développe, il leur faudrait traquer des centaines de signaux moléculaires agissant sur des dizaines de types cellulaires différents (dont les macrophages). Mais en se concentrant sur les macrophages, ils se sont aperçus qu'il suffit de quelques cascades d'interactions moléculaires pour sonner l'alarme. Qui plus est, d'autres cellules utilisent ces mêmes voies. Puisque ces voies à explorer sont peu nombreuses, les chercheurs espèrent développer une poignée de médicaments qui soit bloqueront complètement la production d'inflammasomes, soit favoriseront leur désassemblage, et ce dans une grande variété de maladies.

Alors, que se passe-t-il à l'intérieur des macrophages? D'abord, tous ceux à proximité des cellules endommagées baignent dans des

AU CŒUR DE L'USINE À INFLAMMATION

A la grande surprise des chercheurs, toutes les cellules de l'organisme sont capables de déclencher une inflammation, et elles le font plus ou moins de la même façon : en construisant une structure moléculaire – un inflammasome – qui libère des molécules nommées cytokines. En général, ces cytokines provoquent une réponse inflammatoire normale de courte durée, caractérisée par une rougeur, un gonflement, de la douleur et de la chaleur. Cependant, lorsqu'un inflammasome reste trop longtemps actif, l'inflammation se prolonge et, en fonction

de divers facteurs tels que la quantité de cytokines produites ou la réaction des tissus à ces molécules, elle contribue à l'installation de diverses pathologies comme la maladie d'Alzheimer et la goutte. Parmi les substances responsables de l'activation de l'inflammasome figurent des signaux dits étrangers (produits par des microbes) et des signaux de danger (produits lorsque l'organisme lui-même est endommagé). Chacun est susceptible d'activer l'une des deux voies qui déclenchent la construction de l'inflammasome, l'amorçage et l'activation.



RYTHME CIRCADIEN ET INFLAMMASOME

Depuis plusieurs décennies, on sait que le système immunitaire ne réagit pas de la même façon contre des infections selon le moment de la journée. Dans les années 1960 et 1970, des études pionnières ont notamment montré que des souris contaminées avec des doses létales de produits bactériens étaient plus susceptibles de développer une septicémie – une réaction inflammatoire généralisée – lorsque la contamination avait eu lieu à la fin de leur période de repos.

Mais il y a quelques années, diverses équipes ont commencé à révéler que de multiples aspects de la fonction immunitaire sont rythmés par notre horloge biologique : interaction hôte-pathogène, circulation et abondance des globules blancs, recrutement de ces cellules immunitaires dans les tissus lésés, activation de systèmes immunitaires innés et adaptatifs... Les réactions immunitaires nécessitent une grosse dépense énergétique, et il est apparu que le contrôle circadien participe à l'optimisation de cette dépense au cours de la journée. Toutefois, les mécanismes en jeu restaient inconnus.

Avec la découverte et l'exploration des inflammasomes, les choses se sont encore précisées. Notamment, plusieurs études ont récemment suggéré que des agents de l'horloge biologique modulent l'activation de l'inflammasome NLRP3.

La mélatonine est l'un de ces agents. Surnommée l'hormone du sommeil, elle est connue depuis plusieurs années comme un anti-inflammatoire à large spectre, modulant l'action de diverses cytokines – les messagers de l'inflammation – ou aidant, par son fort pouvoir antioxydant, à éliminer les radicaux libres, des molécules instables que produisent les cellules, notamment en vieillissant, et qui déclenchent des réactions inflammatoires. En 2015, Yong Zhang, de l'université

d'agriculture de Chine, à Beijing, et ses collègues ont montré chez des souris que la mélatonine atténue l'inflammation des poumons observée dans le syndrome de détresse respiratoire aiguë en inhibant l'assemblage de l'inflammasome NLRP3. La molécule agirait non seulement en réduisant les signaux de danger qui déclenchent cette inflammation, mais aussi en bloquant l'activation de l'inflammasome par les signaux restants.

Une autre étude, publiée en 2017 et menée à Xianyang, en Chine, sur des souris soumises à un régime riche en graisse, suggère quant à elle que la mélatonine pourrait aider à réduire l'inflammation chronique du tissu adipeux liée à l'obésité et qu'elle agirait en inhibant l'expression de gènes impliqués dans la formation de l'inflammasome NLRP3.

Diverses études chez des modèles animaux, enfin, ont montré ces dernières

Des agents de l'horloge biologique moduleraient l'activation de l'inflammasome NLRP3

années que la mélatonine réduit l'activation de l'inflammasome NLRP3 lors d'une septicémie, la transformant en un état inflammatoire modéré. Un essai clinique testant une nouvelle forme injectable de mélatonine sur des patients atteints de septicémie est en cours en Espagne et a fourni de premiers résultats encourageants.

Un autre acteur de l'horloge biologique, la protéine Rev-erba, a aussi récemment été impliqué dans la modulation de l'activation de l'inflammasome NLRP3. Cette protéine

joue un rôle majeur dans le développement du tissu adipeux, des cellules du foie, des muscles squelettiques et du cerveau, et la régulation de leur rythme circadien. Hélène Duez, de l'institut Pasteur de Lille, et ses collègues ont montré que dans des macrophages prélevés sur des souris ou des humains, l'activation de l'inflammasome varie selon le moment de la journée et que la protéine Rev-erba contrôle cette variation.

Toutes ces études sont encore préliminaires et nécessitent d'être consolidées, mais elles convergent vers une idée cruciale : elles suggèrent un lien entre les troubles du rythme veille-sommeil et le maintien d'une inflammation. Des mécanismes complémentaires sont encore à découvrir pour témoigner du rôle de « grand nettoyeur » qu'a le sommeil.

Des travaux récents ont montré que dans le cerveau, le volume du milieu intercellulaire augmente de plus de 60 % pendant le sommeil, permettant au liquide céphalo-rachidien de drainer des produits de dégradation cellulaires. C'est le cas en particulier de la substance β -amyloïde, dont le défaut de drainage maintiendrait une inflammation *in situ*, en particulier via l'inflammasome. Il est à parier que de nouvelles études établiront d'autres ponts entre les mécanismes de l'inflammation et le sur-risque que, selon plusieurs études cliniques, l'inversion du rythme veille-sommeil entraîne vis-à-vis de nombreuses maladies comme les maladies cardiovasculaires, neurodégénératives ou le cancer.

THOMAS GIRARD

Unité Guy Moquet, Hôtel-Dieu, Assistance publique des hôpitaux de Paris

B. Pourcet et al., *Gastroenterology*, vol. 154, pp. 1449-1464, 2018.

G. Favero et al., *Int. J. Endocrinol.*, vol. 2017, article 1835195, 2017.

L. Xie et al., *Science*, vol. 342, pp. 373-377, 2013.



❧ débris d'ADN, d'ARN et d'autres signaux de danger. Certains de ces motifs moléculaires se lient à une protéine particulière sur la surface externe du macrophage, d'autres se fixent sur une autre substance, dont l'identité et la localisation restent encore à préciser. Ces liaisons déclenchent l'un ou l'autre de deux processus cellulaires : le premier, nommé amorçage, consiste à intensifier la production de certaines molécules nécessaires pour déclencher l'inflammation, et le second, l'activation, assemble un inflammasome. Celui-ci modifie alors les molécules inflammatoires nouvellement produites d'une façon qui les active ; il active aussi une protéine, la gastermine D, qui forme des trous dans la membrane du macrophage, par où s'échappent les molécules inflammatoires.

Étonnamment, un inflammasome libère peu de molécules différentes, quels que soient les signaux qui ont déclenché sa formation. Chacune des structures inflammatoires décrites jusqu'ici produit et libère principalement deux substances : l'interleukine 1 bêta (IL-1 β) et l'interleukine 18 (IL-18). Ces molécules de signalisation de la famille des cytokines étaient connues pour agir sur l'inflammation, mais, avant la découverte des inflammasomes, personne ne savait comment elles étaient produites. Une fois libérées, ces interleukines se répandent dans le tissu et déclenchent la production d'une quantité encore plus importante de cytokines, lesquelles intensifient localement le flux sanguin, recrutent d'autres cellules immunitaires et induisent tout un ensemble de modifications qui constituent la réaction inflammatoire.

ALZHEIMER, ATHÉROSCLÉROSE, GOUTTE, MÊME COMBAT

D'autres surprises étaient encore à venir. Peu à peu, des études ont commencé à montrer que les inflammasomes sont au cœur d'une grande variété de maladies et de troubles dans lesquels l'inflammation était supposée jouer, au mieux, un rôle secondaire. En effet, on s'est aperçu que toutes sortes de cellules construisent des inflammasomes, et pas uniquement les macrophages et autres cellules immunitaires. Par exemple, en réponse à des signaux de danger ou étrangers, certaines cellules de l'intestin produisent des inflammasomes qui libèrent des cytokines, lesquelles déclenchent la production de mucus.

Par ailleurs, on a observé que dans des maladies variées touchant diverses parties de l'organisme, des particules microscopiques se formaient et causaient localement une inflammation. Or un inflammasome particulier détecté dans de nombreuses cellules différentes, nommé NLRP3, serait responsable de la plupart des inflammations dues à ces dépôts, qu'il s'agisse d'amiante dans les poumons (mésothéliome), de cristaux d'acide urique dans les articulations (goutte), et même de

cholestérol (athérosclérose) et des agrégats de la protéine β -amyloïde dans la maladie d'Alzheimer.

En effet, des recherches suggèrent que les cristaux de cholestérol qui s'accumulent sur les parois des vaisseaux sanguins lors de l'athérosclérose activent l'inflammasome NLRP3, lequel, en retour, favorise la rupture de ces plaques athérosclérotiques, c'est-à-dire leur détachement de la paroi. Libérées dans les



Toutes sortes de cellules construisent des inflammasomes, pas juste les macrophages



artères, elles sont alors susceptibles de les boucher et d'entraîner de graves complications telle qu'une crise cardiaque ou un accident vasculaire cérébral. De même, dans la maladie d'Alzheimer, l'accumulation d'agrégats de la protéine β -amyloïde entre les neurones active l'inflammasome NLRP3 dans les cellules de la microglie, les équivalents cérébraux des macrophages, ce qui entraîne la mort de neurones. Ainsi, même si l'acide urique, le cholestérol, la protéine β -amyloïde, l'amiante et d'autres substances encore sont impliqués dans tout un éventail de maladies touchant divers organes, leurs modes d'action dépendent tous de la machinerie de production des inflammasomes.

LA SURALIMENTATION AUSSI

Cependant, la véritable surprise fut, à mon sens, la découverte que l'absorption d'aliments peut déclencher une réaction inflammatoire. Plus précisément, une prise excessive de nourriture en un seul repas entraîne un épisode inflammatoire aigu qui finit par se résorber tout seul ; et la consommation régulière de quantités telles de calories que l'organisme doit les stocker sous forme de graisse provoque quant à elle une inflammation chronique.

Les biologistes n'avaient pas de raison particulière de soupçonner une telle relation. Après tout, les nutriments ne sont pas des molécules ou particules spécifiques d'agents pathogènes et ne sont pas non plus séquestrés dans des cellules (ce qui en aurait fait des

>

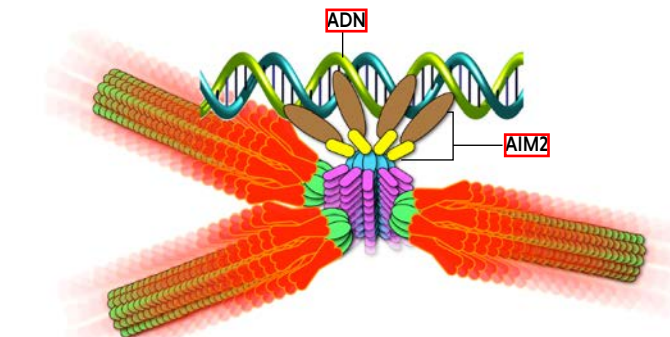
> signaux de danger évidents). Pourtant, plusieurs études menées au cours des dernières années chez des animaux ont montré que certains nutriments tels que les acides gras saturés (présents dans la viande et le fromage, et également produits dans l'organisme) agissent, quand ils abondent, comme des signaux de danger et activent directement l'inflammasome NLRP3 dans des macrophages et d'autres cellules. Cette découverte a ouvert tout un nouveau champ de recherche où l'on explore les effets de métabolites (produits de la digestion) spécifiques sur l'activité des inflammasomes. Par exemple, diverses équipes ont montré qu'une consommation excessive de glucides ou d'autres nutriments active indirectement l'inflammation: l'organisme convertit l'excès de ces substances en acides gras, lesquels déclenchent l'inflammation.

Si l'inflammation due à la suralimentation touche nombre d'organes, c'est dans le foie que l'on a observé la réaction la plus forte, probablement en partie parce que cet organe stocke une grande quantité d'acides gras. De plus, un foie sain contient de nombreuses cellules immunitaires prêtes à agir et capables de provoquer des lésions hépatiques même à la suite d'une faible stimulation. Ensemble, ces processus entraînent parfois un gonflement et une inflammation du foie qui aboutit à une maladie, la stéatose hépatique (une accumulation de graisse dans les cellules du foie). Cette affection est réversible, mais il est souvent impossible de la distinguer des lésions du foie observées chez les personnes qui consomment beaucoup d'alcool. (Pour des raisons qui ne sont pas entièrement élucidées, la stéatose hépatique évolue parfois en cirrhose, une maladie potentiellement fatale.)

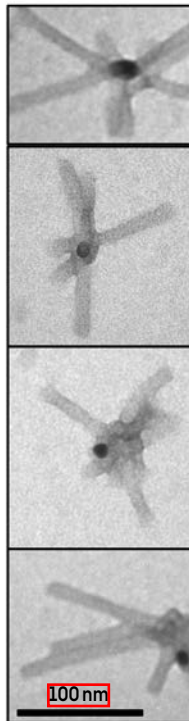
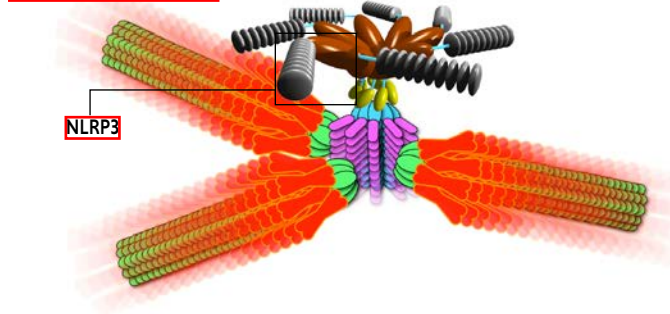
A cette découverte déjà assez préoccupante s'ajoute un constat inquiétant: un tiers des enfants obèses ont une stéatose hépatique, ce qui suggère qu'au moins certains d'entre eux développeront une cirrhose au début de l'âge adulte. Un peu comme si de nombreux préadolescents souffraient de stéatose hépatique alcoolique, sauf que le facteur en cause est un excès de calories et non l'alcool. Si, comme le suggèrent des études menées chez l'animal, l'inflammasome NLRP3 est impliqué dans l'inflammation liée à l'alimentation, alors il est probable qu'un traitement prévenant sa construction limiterait l'inflammation et les lésions du foie chez les personnes en surpoids ou obèses. À l'appui de cette idée, des chercheurs ont montré que des souris obèses déficientes en composants de l'inflammasome étaient certes sujettes aux infections, mais avaient un foie en meilleure santé.

Puisque la suralimentation entraîne parfois une inflammation, mes collègues de l'université Yale et moi-même avons décidé

INFLAMMASOME AIM2



INFLAMMASOME NLRP3



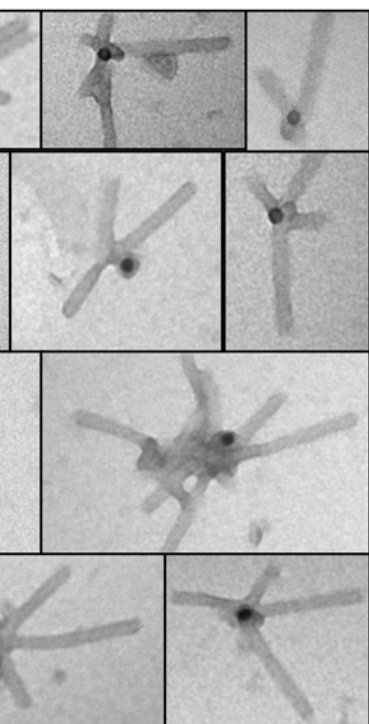
d'approfondir la question inverse: la sous-nutrition conduit-elle à la production de métabolites capables de réduire l'activation des inflammasomes? Les effets anti-inflammatoires du jeûne et de l'exercice physique sont bien connus; nous avons donc examiné deux molécules dont les concentrations augmentent dans l'organisme durant ces pratiques: le β -hydroxybutyrate et l'acide lactique. Nous avons observé que ces molécules interagissent avec des récepteurs particuliers, distincts, présents sur les macrophages; ensemble, ces interactions amorcent une série de réactions biochimiques dans les cellules, laquelle désactive des gènes impliqués dans le déclenchement de la production des inflammasomes. Divers inhibiteurs des inflammasomes sont actuellement testés pour réduire les lésions des tissus causées par un infarctus du myocarde ou une inflammation du foie.

UN SYSTÈME DE SÉCURITÉ BRIDE L'INFLAMMATION

La première étape pour comprendre comment désarmer l'inflammasome est de déterminer comment l'organisme s'y prend naturellement – un processus qui se déclenche normalement 18 à 24 heures après son assemblage. Parallèlement, les chercheurs espèrent déchiffrer les voies moléculaires qui, dans diverses maladies, autorisent les inflammasomes à fonctionner plus longtemps qu'ils ne le devraient. Toutes ces connaissances

LA STRUCTURE DE L'INFLAMMASOME

Observés en microscopie électronique à transmission (à droite, des inflammasomes AIM2, un type sensible à l'ADN), les inflammasomes ressemblent à des nœuds à partir desquels croissent plusieurs filaments. En 2014, l'équipe de Hao Wu, de la Harvard Medical School, à Boston, a montré que les inflammasomes s'assemblent en deux étapes (à gauche en rose et rouge): lorsqu'une protéine sensible aux signaux de danger (ici AIM2 ou NLRP3) est activée, elle se lie avec ses consœurs et forme une plateforme (en marron) qui induit la polymérisation d'un premier filament (en rose). À partir de ce dernier s'assemblent à leur tour d'autres filaments contenant l'enzyme qui active les cytokines (en rouge).



révéleront peut-être des moyens de neutraliser les inflammasomes persistants.

Par exemple, des études indiquent que tous les signaux de danger connus, qu'ils déclenchent la voie d'amorçage ou celle d'activation de l'inflammasome, produisent une réaction inflammatoire limitée même s'ils persistent dans le milieu intercellulaire. Après un certain temps, les cellules immunitaires s'arrêtent tout simplement de réagir à la présence des signaux qui activent la voie d'amorçage (celle qui intensifie la production de précurseurs de l'inflammation), selon un processus nommé tolérance. Quant aux signaux qui déclenchent la voie d'activation de l'inflammasome (celle qui assemble ce dernier), ils provoquent la mort des cellules immunitaires s'ils persistent trop longtemps. Dans les deux cas, le résultat est l'arrêt du processus inflammatoire.

Des signaux supplémentaires sont donc clairement nécessaires pour maintenir un inflammasome activé pendant une durée prolongée, comme c'est le cas dans le diabète et la stéatose hépatique. Mon équipe, en collaboration avec d'autres, a ainsi déterminé que l'adénosine, une substance que l'organisme produit chaque fois qu'il libère de l'énergie en cassant des molécules d'ATP, semble retarder le démantèlement de l'inflammasome NLRP3. Ironie du sort, l'adénosine a longtemps été considérée comme une molécule anti-inflammatoire parce qu'elle contrebalance des produits apparaissant ultérieurement lors du processus inflammatoire.

De telles thérapies visent le blocage de l'inflammasome à différentes étapes de sa construction, notamment celle de la liaison de signaux de danger à leurs récepteurs. Plusieurs entreprises pharmaceutiques ont déjà commencé à mener des expériences avec différents composés qui agissent directement sur l'inflammasome. Il faudra cependant très probablement une bonne décennie pour démontrer que ces candidats sont sûrs et efficaces.

En attendant, de nombreux chercheurs ont commencé à tester sur des patients souffrant de différentes infections liées à un même inflammasome des traitements déjà efficaces contre une maladie (et approuvés par l'administration américaine de sécurité des aliments et des médicaments). Par exemple, l'anakinra, un médicament utilisé depuis longtemps dans le traitement de la polyarthrite rhumatoïde (notamment en France), bloque le récepteur sur lequel se fixe l'interleukine IL-1 β , une des cytokines que libère l'inflammasome NLRP3. Ce médicament a donc été testé dans diverses maladies liées à cet inflammasome. Il a ainsi produit des effets bénéfiques dans un large éventail de maladies inflammatoires, notamment un syndrome inflammatoire pédiatrique rare et invalidant.

LA PISTE DE LA DIGOXINE

Par ailleurs, mon équipe étudie si la digoxine, un médicament couramment utilisé pour traiter certains troubles du rythme cardiaque, atténuerait l'inflammation dans diverses maladies inflammatoires, notamment des inflammations chroniques du foie et des pathologies neurologiques. D'autres chercheurs ont en effet montré il y a quelques années que la digoxine inhibe une molécule nommée HIF-1 α . Mon équipe a ensuite déterminé que cette molécule est nécessaire pour que l'activation de l'inflammasome NLRP3 persiste. Un excès de digoxine s'est révélé produire divers effets indésirables, mais nous avons montré qu'à faible dose, la digoxine réduit l'inflammation et les lésions associées dans différents modèles de maladie du foie. Nous préparons à présent des essais cliniques sur cette molécule.

Ces dernières années, les recherches sur la biologie fondamentale de l'inflammasome ont explosé et l'effervescence se poursuit. S'il est encore difficile de prédire quand ces travaux conduiront à de nouvelles thérapies, l'organisation riche et complexe de cette étonnante usine cellulaire indique toutefois clairement qu'attaquer l'inflammation à sa source est une carte indispensable à jouer si l'on veut un jour parvenir à soulager beaucoup plus de personnes qu'aujourd'hui des souffrances et invalidités quotidiennes que l'inflammation chronique leur inflige. ■

A L'ASSAUT DE L'INFLAMMASOME PERSISTANT

Les découvertes brièvement décrites ici ont profondément changé notre conception de l'inflammation. Non seulement les chercheurs comprennent mieux ses étapes, mais désormais, ils admettent en général que de nombreux stimuli différents – des signaux étrangers, des signaux de danger et même nombre de produits de la digestion des aliments – convergent vers une seule usine inflammatoire, l'inflammasome, qui fabrique relativement peu de produits. Les différences entre les maladies sont dues au type de signal initial, à l'endroit où les inflammasomes sont activés et à la durée de leur activation. Par exemple, des cristaux d'acide urique dans les articulations déclenchent des épisodes inflammatoires aigus (la goutte) qui se résorbent malgré la persistance des cristaux (du moins jusqu'à la prochaine crise), mais des cristaux de silice dans le poumon provoquent une inflammation chronique et l'apparition de lésions.

Ces nouvelles informations fournissent des cibles moléculaires potentielles contre lesquelles développer de nouveaux médicaments.

BIBLIOGRAPHIE

M. Gros Lambert et B. F. Py, **NLRP3, un inflammasome sous contrôle**, *Médecine Sciences*, vol. 34(1), pp. 47-53, 2018.

H. Guo et al., **Inflammasomes : Mechanism of action, role in disease, and therapeutics**, *Nature Medicine*, vol. 21(7), pp. 677-687, 2015.

X. Ouyang et al., **Inflammasome biology in fibrogenesis**, *BBA Molecular Basis of Disease*, vol. 1832(7), pp. 979-988, 2013.

T. Strowig et al., **Inflammasomes in health and disease**, *Nature*, vol. 481, pp. 278-286, 2012.

K. Schroder et J. Tschoop, **The inflammasomes**, *Cell*, vol. 140(6), pp. 821-832, 2010.

L'ESSENTIEL

> Le climat de l'Arctique change rapidement. La température, l'humidité de l'air et d'autres variables y ont battu plus d'une dizaine de records ces trois dernières années.

> La banquise disparaît, les températures de l'air augmentent, le sol dégèle et les glaciers fondent.

> Parce qu'il modifie le courant-jet et le vortex polaires, ce réchauffement rapide allonge les périodes de canicule, de sécheresse, de froid intense et de fortes pluies.

L'AUTEURE



JENNIFER A. FRANCIS
directrice de recherche
au Département de science
marine et côtière
de l'université Rutgers,
aux États-Unis

La grande débâcle de l'Arctique

La banquise de l'océan Arctique fond à des vitesses record, et elle pourrait disparaître en été dès 2040. Or les glaces boréales contribuent à la stabilité du climat de tout l'hémisphère Nord. Sans elles, les épisodes climatiques extrêmes qui frappent l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie risquent donc de s'intensifier.



Au Groenland, des icebergs flottent au large de la ville d'Ilulissat sous le soleil de minuit. Ils se sont détachés du Jakobshavn, l'un des glaciers du pays qui se déplacent le plus vite.

© Getty Images

Un choc, une révélation. En 2003, j'avais été invitée par la National Science Foundation (NSF, l'agence américaine de la science) à un séjour scientifique à Big Sky, dans le Montana. Une vingtaine d'autres climatologues y participaient. Chacun avait son propre domaine de compétence et, spécialisation de la science moderne oblige, avait une vision limitée du travail de ses confrères. Mais quand nous avons échangé sur nos sujets de recherche respectifs, nous avons fait un constat effarant. Les changements que chacun de nous avait observés se révélaient liés et allaient tous dans le même sens: le système arctique dans son ensemble se transformait et évoluait vers un état précaire. Et l'espoir d'enrayer le processus semblait mince.

À l'issue du congrès, nous avons publié un article pour alerter la communauté scientifique: si l'évolution de l'Arctique se poursuivait au même rythme, il était vraisemblable que dans moins d'un siècle, cet océan soit dépourvu de glace en été – une situation inédite depuis des millénaires. Hélas, à la lumière des recherches récentes, je dois admettre que nous nous étions trompés: les glaces estivales de l'Arctique pourraient bien disparaître dès 2040, c'est-à-dire soixante ans plus tôt que nous l'avions prédit!

En fait, l'Arctique change exactement comme les scientifiques l'avaient anticipé, mais encore plus rapidement que l'indiquaient les prédictions passées les plus alarmistes. Le continent blanc semble s'être transformé en glaçon posé sur une gazinière. En seulement trois ans, plus d'une dizaine de records climatiques vieux de plusieurs décennies ont été battus. C'est le cas pour la réduction de la superficie des banquises estivale et hivernale, mais aussi pour d'autres paramètres tels que le réchauffement de l'air ou le dégel du sol.

La fin annoncée de l'Arctique pourrait n'être qu'un problème écologique parmi tant d'autres, loin de nos préoccupations quotidiennes. Mais sa régression annonce probablement des difficultés pour les habitants du monde entier. La dernière fois que l'Arctique a été légèrement plus chaud qu'aujourd'hui, il y a environ 125 000 ans, le niveau des océans était 4 à 6 mètres plus haut. Si cette situation se reproduit, adieu Miami, La Nouvelle-Orléans, la majeure partie de New York et de la Silicon Valley, mais aussi Venise, Londres et Shanghai.

Ce n'est pas tout. De nouvelles recherches suggèrent que le réchauffement rapide de l'Arctique perturbe le trajet du courant-jet (ou *jet-stream*) polaire – un courant d'air froid de haute altitude qui influe sur le temps qu'il fait en Europe et aux latitudes équivalentes – de telle façon que les épisodes climatiques extrêmes



Les eaux de fonte au sommet d'une calotte glaciaire qui se désintègre au Svalbard, en Norvège, se déversent dans la mer.

(canicules, sécheresses et tempêtes) pourraient sévir plus longtemps sur l'Amérique du Nord, l'Europe centrale et l'Asie.

Par ailleurs, les scientifiques observent depuis peu une prolifération du plancton dans le sud de l'océan Arctique. Ces efflorescences risquent de perturber les chaînes alimentaires sur lesquelles repose la pêche commerciale. Enfin, si la fonte massive des glaciers se poursuit, l'apport d'énormes quantités d'eau froide au sud du Groenland pourrait ralentir le Gulf Stream, avec comme conséquence possible un bouleversement des régimes climatiques sur les terres situées de part et d'autre de l'océan Atlantique.

FONTE DES GLACES « ÉTERNELLES »

Le dégel accéléré de la région n'a pas attendu les prévisions alarmistes récentes. En seulement quarante ans, l'étendue de la glace estivale dans l'océan Arctique a diminué de moitié. Oui, de moitié. Le volume de la banquise, sur l'année, s'est également beaucoup réduit: il ne reste qu'un quart du volume présent au début des années 1980. Jusqu'à récemment, les chercheurs pensaient qu'il faudrait



attendre le milieu du xxi^e siècle pour atteindre de tels extrêmes.

Pourquoi le continent Arctique court-il si vite à sa perte? Parce que la région est particulièrement sensible au changement climatique. À tel point qu'on pourrait la décrire comme un «canari dans la mine de charbon» à l'échelle de l'ensemble du système climatique terrestre, pour utiliser une métaphore. Cette grande sensibilité provient de «boucles de rétroactions» présentes dans le système climatique, des cercles vicieux qui amplifient les petits changements. Par exemple, quand un petit supplément de chaleur fait fondre de la glace bien blanche de la banquise, le trou formé expose une surface (sombre) de l'océan au rayonnement solaire, lequel est alors moins réfléchi vers l'espace. L'apport calorique associé se retrouve ensuite dans l'air et accélère le réchauffement en faisant fondre encore davantage de glace.

L'hiver, quand le soleil brille moins, il existe d'autres boucles de rétroactions qui mènent elles aussi à un emballement du système. L'une d'entre elles met en jeu le rôle d'isolant joué par la banquise, dont l'épaisseur empêche la chaleur et l'humidité piégées en dessous de s'échapper dans l'atmosphère. Si ce bouclier de glace disparaît en partie, davantage de chaleur et d'humidité seront relâchées et l'air se réchauffera, ce qui amplifiera le processus. Pour l'instant, les simulations numériques qui cherchent à prévoir le changement climatique global de la planète ne prennent pas en compte l'accélération de la disparition de la banquise et, de ce fait, sous-estiment à mon avis le réchauffement de

La disparition de la banquise n'est pas la seule transformation du cercle polaire qui perturbe le sommeil des chercheurs comme moi. Les deux autres types de sols gelés présents en Arctique sont eux aussi en déclin rapide.

Il y a bien sûr le pergélisol, ou permafrost (c'est-à-dire le sol qui reste gelé toute l'année), qui se trouvait auparavant dans un état si immuable que l'on pouvait y exhumer des cadavres de mammoth parfaitement conservés. Aujourd'hui, en raison de la fonte de la glace qui est mêlée à la terre, les bâtiments construits sur le pergélisol s'effondrent, les arbres tombent, et les routes se déforment.

DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DUES AU DÉGEL

En plus de perturber la vie quotidienne des gens, les sols qui se dégèlent dégagent de grandes quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Car quand de la matière organique piégée dans le pergélisol depuis des millénaires dégèle, des bactéries la réduisent en dioxyde de carbone (si de l'oxygène est présent) ou en méthane (s'il n'y en a pas). Le pergélisol arctique renferme environ deux fois plus de carbone que l'atmosphère n'en contient aujourd'hui, si bien qu'un dégel généralisé pourrait fortement exacerber le réchauffement global, ce qui entraînerait un dégel encore plus rapide. Les modèles peinent à prendre en compte l'impact du dégel du permafrost, mais on peut parier là encore qu'il faudra, lorsque ces mécanismes seront mieux connus, revoir à la hausse le réchauffement global.

Le troisième type de glace arctique que l'on considérait comme permanente est celle des glaciers et de l'énorme inlandsis du Groenland, qui fait plus de deux kilomètres d'épaisseur en moyenne. La fonte de cette glace a d'importantes conséquences au niveau mondial parce que, contrairement à la fonte de la banquise, l'eau qui s'écoule dans l'océan élève directement le niveau de la mer.

Au cours de l'été 2016, la masse totale de la calotte glaciaire du Groenland (estimée de l'espace à travers son effet sur la gravité terrestre) a atteint sa plus petite valeur depuis les premières observations par satellite, qui datent de 2002 (en moyenne, elle perd environ 280 milliards de tonnes chaque année, d'après les données des satellites *Grace*). Les niveaux sont aussi sans précédents lorsque l'on consulte les archives qui remontent jusqu'à la fin des années 1950, quand on estimait la masse par d'autres moyens. Une analyse récente, conduite par Bert Wouters, aujourd'hui à l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, suggère que l'accélération de la fonte des glaces à la surface du Groenland est précipitée par des effets de réchauffement liés au rétrécissement de la banquise.

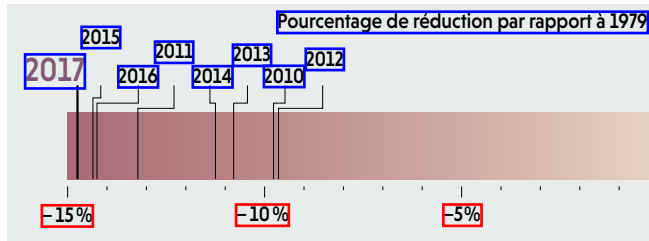
L'Arctique constitue, à l'échelle de l'ensemble du système climatique, un «canari dans la mine de charbon»

L'Arctique. Pour cette raison, aussi noires soient-elles, les projections des changements à venir à l'échelle planétaire sont peut-être encore beaucoup trop optimistes. À cause de la banquise, le réchauffement planétaire sera probablement supérieur à celui prévu actuellement.

RECORDS BATTUS EN ARCTIQUE

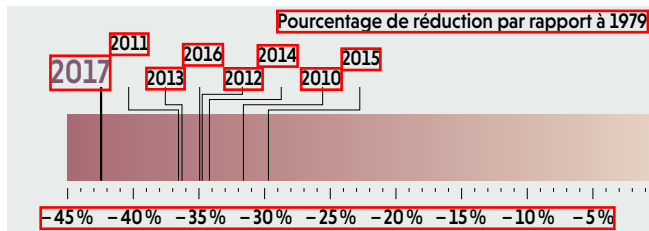
La région arctique change de façon spectaculaire et rapide. Au cours des trois dernières années, de nombreux records climatiques ont été battus dans le Grand Nord, parfois largement. Six exemples sont présentés ici. Les années marquées en rouge dans les frises ci-dessous indiquent des records absolus. Pour chacun des six facteurs climatiques, les valeurs des années récentes montrent une tendance générale vers ces valeurs hors normes. Considérés individuellement, ces changements modifient l'environnement et la vie quotidienne des habitants de toute la région. Pris ensemble, ils refaçonnent la météorologie de tout l'hémisphère Nord, ce que montre bien l'amplification arctique (dernier graphique), paramètre qui mesure les risques de rencontrer des conditions extrêmes à tout moment de l'année.

Valeur en	(1979)
100	100
80	100
60	100
40	100
20	100
0	100



ÉTENDUE HIVERNALE DE LA BANQUISE

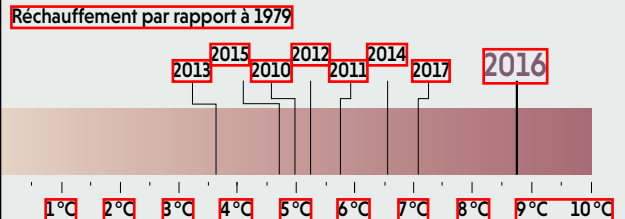
Quand le continent s'enfonce dans l'hiver, la glace s'étend au-dessus de l'océan Arctique. Mais année après année, la superficie maximale recouverte décroît, en particulier sur les mers de Barents et de Béring. Débarrassées de leur gangue de glace, les zones océaniques mises à nu émettent de la chaleur et de l'humidité dans l'air et contribuent à dérégler le climat arctique.

**VOLUME HIVERNAL DE LA BANQUISE**

En 2017, la quantité de glace hivernale flottant sur l'océan Arctique avait diminué de 42,5 % depuis 1979. Comme les vents poussent plus facilement la glace quand elle est mince, la mer se retrouve parsemée de gros glaçons qui entravent la navigation et l'accès aux agglomérations côtières. Par ailleurs, une glace mince fond également plus vite pendant les mois chauds : le volume de la glace estivale a diminué de 80 % au cours de cette même période.

TEMPÉRATURE DE L'AIR HIVERNAL

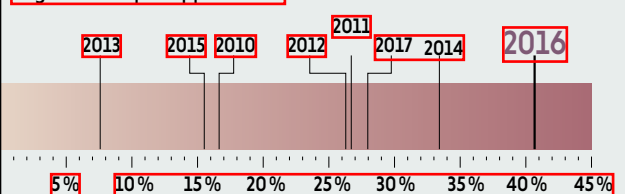
Les températures arctiques peuvent grimper certains jours jusqu'à 20 degrés au-dessus des normales saisonnières. Elles dépassent celles-ci maintenant pendant tout l'hiver. En 2016, la température hivernale moyenne était près de 9 degrés plus élevée qu'en 1979. Cette tendance peut affaiblir le courant-jet et apporter des vagues de froid et de neige intenses sur les États-Unis, l'Europe et l'Asie.



HUMIDITÉ HIVERNALE

Avec une couverture glaciaire réduite, la fraction exposée de l'océan est plus étendue et envoie davantage de vapeur d'eau dans l'air. Même petite, une augmentation de l'humidité a des conséquences importantes, car la vapeur d'eau est un puissant gaz à effet de serre. Par ailleurs, lorsqu'elle se condense en nuages, elle libère de la chaleur qui contribue au réchauffement. Enfin, les nuages peuvent eux aussi accroître l'élévation de température.

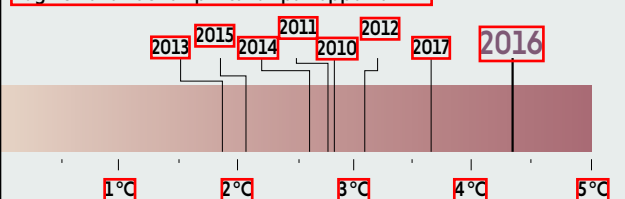
Augmentation par rapport à 1979



AMPLIFICATION ARCTIQUE

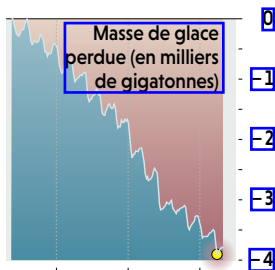
L'Arctique se réchauffe plus vite que le reste du monde. Cette « amplification » signifie que la température moyenne dans l'Arctique se rapproche de la température moyenne aux latitudes moyennes. L'uniformisation des températures ralentit le courant-jet tout au long de l'année, ce qui augmente les risques que l'hémisphère Nord subisse des calamités météorologiques de plus en plus longues et intenses, telles que canicules, inondations, vagues de froid et peut-être même ouragans.

Augmentation de l'amplification par rapport à 1979

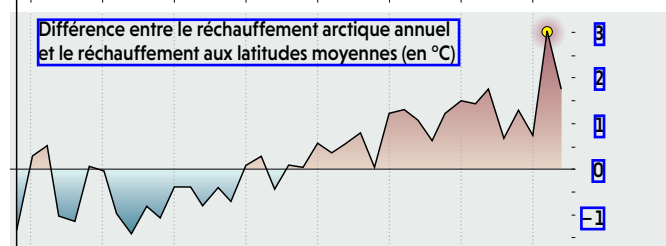
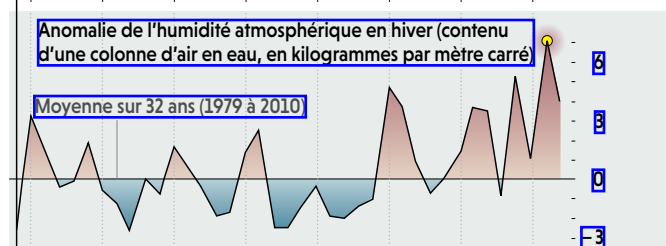
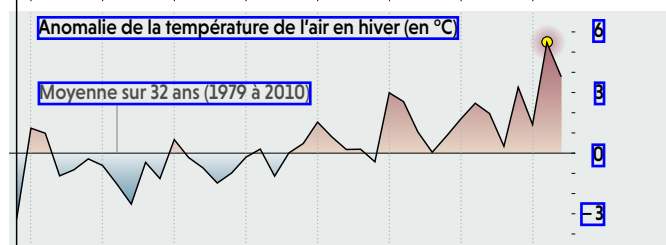
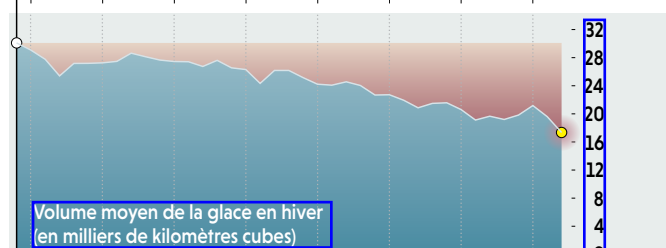
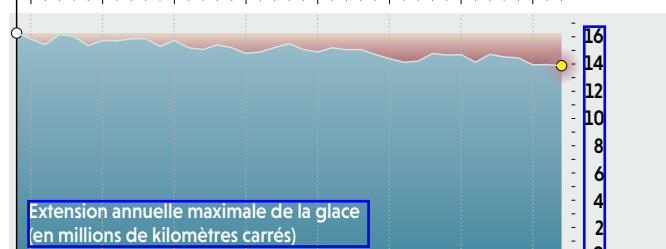


LES PERTES DE GLACE AU GROENLAND

La masse de l'inlandsis du Groenland s'est effondrée depuis 2002 (date à laquelle ont débuté les mesures par satellite de ses effets sur le champ gravitationnel de la Terre). Il s'ensuit que la contribution des eaux de fonte à l'élévation du niveau de la mer augmente plus vite que celle des autres facteurs.



1979 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2017



La réduction de la banquise et le réchauffement rapide de l'Arctique ont d'autres effets d'une portée considérable. La combinaison de ces deux facteurs peut modifier les vents d'altitude de telle façon qu'ils transportent davantage de chaleur et d'humidité des basses latitudes vers le pôle Nord.

UN AIR PLUS CHAUD ET PLUS HUMIDE

En 2012, le record de fonte (battu depuis) de surface au Groenland résultait de la présence dans la région d'une zone de haute pression inhabituellement forte et persistante, ce qu'on appelle un anticyclone de blocage (« blocage », car le système de pression verrouille alors les conditions météorologiques pour plusieurs semaines, voire davantage). Comme cette anomalie s'accompagnait de remontées d'air des latitudes inférieures, elle a apporté non seulement de la chaleur et de l'humidité du sud, mais également de la suie des feux de forêt de l'hémisphère Nord. Cette suie a assombri la glace et les surfaces enneigées, qui ont vu leur albédo (leur pouvoir réfléchissant vis-à-vis de la lumière solaire) baisser et se sont donc mises à absorber davantage d'énergie solaire, ce qui a accéléré la fonte – un autre cercle vicieux.

Les situations de blocage (qui se matérialisent sur les cartes de vent par des sinuosités dans la trajectoire du courant-jet polaire) près du Groenland semblent se produire plus souvent ces dernières décennies, surtout les mois d'été, ce qui explique sans doute au moins en partie la tendance à l'augmentation de la fonte. La perte de masse de glace à l'été 2016 a été la troisième plus importante jamais enregistrée, juste derrière celles de 2010 et 2012. Des travaux réalisés par mes collègues et moi laissent penser que le nombre accru de situations de blocage est vraisemblablement lié au réchauffement global. Mais comme les simulations par ordinateur ont du mal à représenter de façon réaliste la naissance et la disparition des blocages météorologiques, il est difficile de dire comment ces régimes de pression agiront à l'avenir.

L'Arctique est le siège d'autres phénomènes atypiques ces derniers temps. Ces deux derniers hivers, des vagues de chaleur de plus en plus chaudes n'ont cessé de déferler près du pôle Nord. La régression et l'amincissement de la banquise en sont responsables en partie, puisque cela permet à davantage de chaleur de l'océan de pénétrer dans l'air. Les importantes oscillations nord-sud du courant-jet polaire ont également amené des bouffées record d'humidité et d'air chaud jusqu'aux hautes latitudes. Les scientifiques et les populations vivant à l'intérieur du cercle polaire n'imaginent souvent pas les effets drastiques d'un supplément

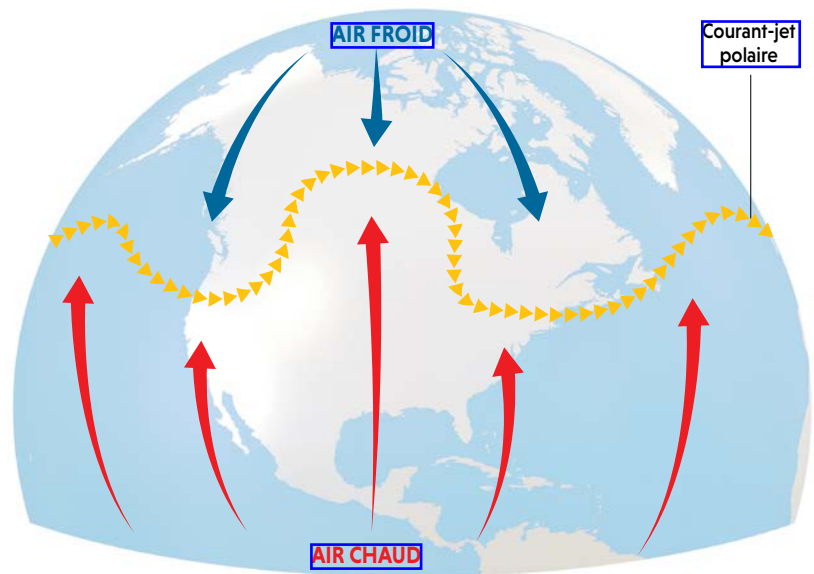
☒ d'humidité sur la température de l'air. La vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, tout excès d'humidité dans l'atmosphère sèche de l'hiver arctique empêche une partie de la chaleur de s'échapper dans l'espace sous forme de rayonnement. En outre, quand cette humidité se condense en nuages, elle libère de la chaleur latente qui réchauffe un peu plus encore l'air. Enfin, parce qu'elle fait office de bouclier thermique, ce surplus de couverture nuageuse contribue au réchauffement et donc aussi à la fonte de l'Arctique.

MÉTÉO EXTRÊME, LA NOUVELLE NORME ?

Bien que nous ayons encore beaucoup de choses à apprendre, il est désormais clair qu'une transformation rapide de l'Arctique est en cours, la plus spectaculaire dans l'histoire de l'humanité. Compte tenu de cette sombre réalité, les spécialistes de l'atmosphère s'efforcent de déterminer les effets que les changements de l'Arctique auront sur les populations humaines et les écosystèmes du monde entier, afin que nos sociétés puissent déterminer comment réagir et s'y préparer.

Un exemple évident des effets à l'échelle de la planète est celui des inondations côtières. Selon un nouveau rapport de l'UCS (Union of Concerned Scientists, un groupe de réflexion américain composé en partie de chercheurs préoccupés par les questions d'environnement), environ 170 agglomérations côtières des États-Unis connaîtront des inondations chroniques d'ici vingt ans. À la fin de ce siècle, si les émissions mondiales de dioxyde de carbone se poursuivent au même rythme, la plupart des grandes villes en bord de mer seront concernées par le problème. De façon presque prémonitoire, ce rapport a été publié quelques semaines avant que les ouragans Harvey, Irma et Maria ne fassent de 2017 la saison des ouragans la plus destructrice et la plus coûteuse de toute l'histoire des États-Unis.

Mais les déluges ne sont pas les seuls périls qu'entraînerait la disparition de la banquise. Notamment grâce à des travaux effectués avec mon collègue Stephen Vavrus, qui travaille au Centre de recherche sur le climat à l'université de Wisconsin-Madison, des indices en nombre croissant suggèrent que de forts réchauffements de la basse atmosphère de l'Arctique peuvent affecter les vents du courant-jet et même plus haut dans la stratosphère, où réside le vortex polaire, une configuration de vents circulaires soufflant au-dessus de l'Arctique. Le courant-jet suivrait alors plus souvent une courbe tortueuse serpentant au-dessus de l'Amérique et du nord de l'Europe. Or les sinuosités du courant-jet (qui entourent les centres de haute et basse pression marqués par un H et un L sur



Le courant-jet polaire a une influence sur la météorologie de l'hémisphère Nord. En temps normal, lorsque l'air polaire reste très froid, ce courant est vigoureux et souffle d'ouest en est selon une trajectoire à peu près rectiligne. Il empêche alors les intrusions d'air froid aux moyennes latitudes. En revanche, lorsqu'il faiblit (en réaction à des températures élevées en Arctique), il se met à onduler. Des masses d'air glacial descendent vers le sud et, ailleurs, de l'air chaud monte vers le nord. Par ce mécanisme, des épisodes neigeux ou de canicule peuvent s'installer durablement aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord.

les cartes météorologiques anglophones, ou A et D sur les francophones) contrôlent la météorologie dans l'hémisphère Nord.

Si des déformations de très grande amplitude se produisent plus fréquemment, il faut s'attendre à voir s'intensifier les épisodes climatiques extrêmes là où vivent des milliards de personnes. Pourquoi? Parce que les oscillations importantes du courant-jet tendent à ralentir sa progression d'ouest en est, ce qui crée des situations de blocage. En clair, en cas de déformation prononcée du courant-jet, les régimes météorologiques consécutifs s'attarderont davantage au-dessus des terres. Le phénomène allongera les épisodes de canicule, entraînera des pluies diluviennes et formera des tempêtes tropicales persistantes. L'ouragan Harvey qui a déversé ses pluies sur Houston en août 2017 et les incendies destructeurs qui ont sévi en Californie l'année dernière illustrent ces changements possibles à venir.

La perturbation du courant-jet aura peut-être d'autres conséquences. De grandes ondulations du courant, associées à un fort réchauffement de l'Arctique, peuvent perturber le vortex polaire. Nous assisterons alors à des vagues de froid sévères et durables, accompagnées de tempêtes de neige, à l'image du long épisode de froid intense qui a frappé le nord des États-Unis au début de janvier 2018. Comme un retour à l'envoyeur, un effondrement du vortex polaire provoquera alors des

oscillations très amples du courant-jet, qui remonteront d'importantes quantités d'air chaud des basses latitudes vers l'Alaska et le Grand Nord. Nous verrons alors s'installer une nouvelle boucle de rétroaction qui accélérera le réchauffement arctique.

Avec quelle certitude devons-nous redouter que le courant-jet polaire produise de tels effets? Certaines études, comme celle menée par Johanna Beckmann, de l'université de Potsdam, en Allemagne, suggèrent que le réchauffement de l'Arctique est déjà étroitement lié à de semblables ondulations; pour d'autres scientifiques, les preuves sont trop ténues pour établir le lien entre les deux phénomènes. De nombreuses recherches sont menées sur ce sujet et devraient livrer rapidement des réponses.

La multiplication de calamités climatiques n'est pas l'unique répercussion à attendre d'un Arctique qui transpire. Selon toute vraisemblance, un Arctique se réchauffant rapidement modifiera les habitats continentaux et marins de manière significative.

Des efflorescences de plancton ont déjà fait leur apparition dans de nouvelles régions et à de nouvelles saisons. Cet apport nutritif attire vers les eaux arctiques des poissons de latitudes plus basses, au détriment des poissons natifs de l'Arctique qui disparaissent.

DES PERTURBATIONS SUR LES TERRES

La perturbation des écosystèmes se fait aussi sentir sur les terres: une fonte des neiges plus précoce au printemps dans les hautes latitudes a conduit à un verdissement plus précoce de la toundra et à une éclosion plus précoce des insectes; si le phénomène se poursuit, les oiseaux migrateurs, qui fondent leur calendrier sur la longueur du jour, risqueront d'arriver à leurs quartiers d'été trop tard pour se nourrir.

Les habitants de l'Arctique subissent eux aussi les impacts du réchauffement dans leur vie quotidienne. La glace qui fond les empêche d'accéder à leurs zones de chasse traditionnelles, et les oblige même à déplacer leurs villes menacées par l'érosion du littoral. À mesure qu'elle disparaît, la banquise littorale n'offre plus de protection naturelle contre les tempêtes violentes.

Un autre point de crispation pour les populations est économique. La fonte des glaces polaires ouvre de nouveaux accès au sous-sol et on assiste actuellement à une ruée des grands pays et des grandes entreprises pour rechercher dans ces terres inconnues des ressources naturelles. Les tensions montent au sein des populations des territoires nordiques pour déterminer quelle partie des vastes et riches fonds marins doit leur revenir.

Le moment de révélation que mes collègues et moi-même avons vécu lors du séjour à

Big Sky se rejoue dans ma tête chaque fois que j'entends que l'Arctique a battu à nouveau l'un de ses records de température ou de surface minimale de banquise. Une chose me rassure toutefois et ne me laisse pas complètement abattue: j'ai l'impression que le cri d'alarme lancé par les scientifiques a été entendu par l'opinion publique. Selon des sondages, la plupart des Américains savent aujourd'hui que la

L'Arctique est devenu imprévisible, et ses changements sont peut-être irréversibles

perte de la glace arctique et le courant-jet (*jet-stream* est devenu rapidement un terme familier) se conjuguent pour créer des conditions météorologiques instables. L'Arctique d'antan était certes impitoyable, mais il était constant dans sa rudesse. Aujourd'hui, il est devenu imprévisible et ces changements, peut-être irréversibles, risquent d'avoir des répercussions sur l'ensemble des organismes vivants de la planète.

Ces impacts sont-ils encore évitables? Oui et non. La machine thermique que constitue la Terre réagit à l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre avec un certain retard, en partie à cause des océans qui stockent une partie de ces gaz et mettent du temps à les relâcher. Cette inertie, ajoutée à la très longue durée de vie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, fait que les changements futurs sont déjà ancrés dans le système climatique sans être pour autant visibles. Toutefois, l'ampleur et le rythme de ces changements pourront être réduits si les gouvernements prennent des mesures rapides pour ralentir les émissions, et si par ailleurs on parvient à développer des méthodes pour extraire le carbone de l'atmosphère en grande quantité (pour l'enfouir en profondeur dans des sites de stockage, par exemple). Les progrès sur ces deux fronts sont rapides, mais sans doute trop maigres et trop tardifs pour préserver la Terre et l'Arctique tels que nous les avons connus. Préparons-nous à l'inattendu. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. A. Francis et al., **Amplified arctic warming and mid-latitude weather: New perspectives on emerging connections**, *WIREs Climate Change*, vol. 8(5), article e474, 2017.

J. Masters, **Le jet-stream polaire se dérègle-t-il?**, *Pour la Science*, n° 449, pp. 56-63, février 2015.

National Research Council, **Arctic Matters: The Global Connection to Changes in the Arctic**, National Academies Press, 2015.

Invitée au musée d'ethnographie du Trocadéro en juin 1933 par Georges Henri Rivière (à gauche), Joséphine Baker visite en grande pompe ses nouvelles salles.



L'ESSENTIEL

> Il y a 80 ans, l'ethnologue Paul Rivet inaugurerait le musée de l'Homme dans le tout nouveau palais de Chaillot, à Paris.

> Bâti sur les décombres du musée d'ethnographie du Trocadéro, le musée de l'Homme cristallisait dix années d'une profonde modernisation.

> Paul Rivet et son adjoint Georges Henri Rivière avaient en effet l'ambition d'ouvrir le public, éduqué dans le culte de l'empire colonial, aux autres cultures en s'appuyant sur le rayonnement de la toute jeune ethnologie dans les cercles culturels parisiens.

L'AUTEURE



CHRISTINE LAURIÈRE
chargée de recherche au CNRS
à l'Institut interdisciplinaire
d'anthropologie du
contemporain, à Paris

Les années folles du musée de l'Homme

Le musée de l'Homme fête ses 80 ans. Né des cendres du musée d'ethnographie du Trocadéro, à Paris, il a mis, à une époque empreinte de colonialisme, les cultures du monde au cœur de la culture occidentale.

Le 20 juin 1938, à Paris, est inauguré avec faste le musée de l'Homme. Cette inauguration est un événement pour le petit monde de l'ethnologie française, alors en pleine reconstruction et professionnalisation, mais aussi sur la scène culturelle parisienne. De nombreux artistes d'avant-garde, des intellectuels, des écrivains, se pressent à cette soirée. Donnée grâce au mécénat de la vicomtesse Marie-Laure de Noailles, une cantate composée pour l'occasion par Darius Milhaud égrène ses notes sur un texte de Robert Desnos. Ami du fondateur et directeur du musée, Paul Rivet, Paul Valéry est l'auteur des stances gravées en lettres d'or au fronton du palais de Chaillot où est logé le musée de l'Homme:

*Choses rares ou choses belles
Ici savamment assemblées
Instruisent l'œil à regarder
Comme jamais vues*

Toutes choses qui sont au monde.

Cette association avec le monde des arts évoque davantage l'inauguration d'un musée

d'art moderne occidental que celle d'un musée d'ethnographie « exotique ». Elle illustre les relations étroites nouées depuis 1928 entre les avant-gardes artistiques et le musée. Le génie du nom même du musée de l'Homme s'évertue, lui aussi, à brouiller les frontières: « Rien de ce qui est humain ne m'est étranger », semble-t-il affirmer à la façon du poète antique Térence. C'est de fait une alliance osée et presque provocatrice qu'affirment Paul Rivet et son adjoint, Georges Henri Rivière, avec l'ouverture de ce nouveau musée: une alliance entre la science et la culture moderne occidentale, avec la volonté, par cette alliance, de défendre et promouvoir l'étude non plus de « peuples archaïques », mais la découverte d'autres cultures, à une époque où la société française est encore éduquée dans le culte de la colonisation et des missions civilisatrices associées.

UN MUSÉE MILITANT

Paul Rivet présente le musée de l'Homme comme le musée le plus moderne du monde. Il est en tout cas l'un des très rares musées anthropologiques à être construits et créés

▢ dans les années 1930. Plus qu'un musée avec ses traditionnelles galeries d'exposition, plus qu'un musée-laboratoire qui concentre en un seul lieu objets, documentation, enseignement, publications et recherche, il s'agit aussi d'une cité scientifique et culturelle, avec son cycle de conférences, son programme de cinéma permanent, ses galas de musique et de danse «exotiques», son audition de disques commentée, son bar, sa librairie, sa bibliothèque ouverte au grand public – un modèle qui sera d'ailleurs largement repris en 2006 par le musée du quai Branly.

Abritant des collections d'ethnographie, préhistoire, paléontologie et anthropologie physique, c'est un musée de l'homme biologique et culturel. Le musée de l'Homme collecte, préserve et présente les archives de l'humanité sous toutes leurs facettes: préhistorique, physique et biologique, culturelle, technologique. Il explique au visiteur les origines de l'homme, il restitue le parcours des grandes migrations humaines pour peupler la planète, il en montre la diversité physique dans l'unité de l'espèce humaine, la variété culturelle et linguistique.

En 1938, le discours à destination du public, dans une époque très troublée, est clairement engagé et militant, ce qui n'empêche pas que l'on y décèle des ambiguïtés *a posteriori*. Le musée affiche son antiracisme – surtout en ce qui concerne la réfutation de l'antisémitisme et de la supériorité de la «race aryenne» au sein des populations européennes –, mais il reste raciste en ce qu'il distingue des «races» humaines selon les croyances scientifiques de l'époque. Il est à la fois humaniste (il souhaite éduquer les visiteurs à la différence et à la diversité culturelle) et colonialiste en ce qu'il fait connaître les nombreuses sociétés de l'empire colonial français et les met en valeur. Il est culturaliste en ce qu'il insiste sur la richesse des cultures humaines, mais aussi plutôt «traditionaliste» et essentialiste en ce qu'il fige les sociétés dans une pureté culturelle illusoire qui serait celle qu'elles auraient connue avant leurs contacts avec la civilisation occidentale, la colonisation et la modernisation.

La fonction et la définition mêmes du musée sont tout à fait en phase avec les idées politiques de Paul Rivet. Depuis mars 1934, ce dernier préside le Comité de vigilance des intellectuels antifascistes. Surtout, en mai 1935, grâce au rassemblement des forces de gauche sur son nom, il a été élu conseiller municipal du quartier Saint-Victor, à Paris, préfigurant par son élection la possibilité même d'un Front populaire uni. L'idéal politique de vulgarisation du savoir pour les masses laborieuses correspond parfaitement aux aspirations idéologiques de Paul Rivet, qui nourrit une conception militante de l'ethnologie comme discipline de



LE PALAIS DU TROCADÉRO

Construit pour l'exposition universelle de 1878, le palais du Trocadéro (ici sur une gravure extraite de *L'Exposition de Paris*, d'Adolphe Bitard, 1878) hébergea le musée d'ethnographie du Trocadéro jusqu'en 1937.

vigilance, «école d'optimisme», outil au service de l'éducation du peuple à la diversité et à l'altérité, afin de combattre les stéréotypes sur des populations qu'on qualifiait alors encore volontiers de primitives ou d'arriérées.

UNE ETHNOLOGIE FRANÇAISE RAYONNANTE

Construit à l'occasion de l'Exposition internationale de 1937, le bâtiment du musée de l'Homme fut édifié sur les décombres du musée d'ethnographie du Trocadéro, lui-même inauguré à l'occasion de l'Exposition universelle de 1878. Déjà dirigé, depuis 1928, par Paul Rivet et son bouillant sous-directeur, Georges Henri Rivière, le vieux musée avait fait l'objet d'une réorganisation radicale et connu une petite dizaine d'années fastes avant sa destruction pour céder la place au musée de l'Homme. Ces années 1928-1937 furent déterminantes pour la construction du projet scientifique du musée de l'Homme, mais aussi pour l'essor d'une science qui venait tout juste d'entrer à l'université, l'ethnologie.

Cette jeune science tout à la fois sociale, humaine et morale exerce un fort pouvoir

MUSÉE DE L'HOMME

GAL



INAUGURATION PAR MONSIEUR LE PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE
20 JUIN 1938

LE MUSÉE DE L'HOMME

En 1937, le palais du Trocadéro fut démoli pour céder la place au nouveau palais de Chaillot et sa cité de musées dont le musée de l'Homme, abrité dans l'aile Passy du monument et vu ici sur l'invitation à son inauguration, le 20 juin 1938.

d'attraction sur la génération née au tournant du ^{xx}e siècle. Elle constitue un nouvel humanisme riche de promesses existentielles dans une époque marquée par le machinisme industriel, l'urbanisation, la montée des totalitarismes, du racisme, le triomphe de l'impérialisme européen. L'ethnologie est alors une discipline à la marge du monde académique parce qu'elle se consacre à l'étude des marges de l'humanité – ou, plus justement, considérées comme telles par l'Occident (voir l'encadré page 78). La culture matérielle de ces sociétés,

leurs créations rituelles et usuelles ont commencé à devenir un peu plus familières aux amateurs de formes d'art autres, subversives, « primitives », interrogeant les canons de la beauté. Pour sa part, l'ethnologie interroge les canons de la socialité. Elle documente des mondes qui obéissent à d'autres prescriptions et modèles, et n'ont pas sombré dans le grand chaos destructeur et sauvage d'une guerre apocalyptique (la Première Guerre mondiale) qui a dévoilé des pulsions meurtrières très éloignées des idéaux portés au pinacle du progrès, de la raison, de la science et du beau – autant de notions que les avant-gardes culturelles occidentales remettent en doute et que l'ethnologie relativise.

Grâce au musée d'ethnographie du Trocadéro, l'ethnologie s'impose avec force sur la scène intellectuelle et culturelle. Le musée fait rayonner cette discipline hors de son pré carré de spécialistes, de coloniaux, d'étudiants. Sous l'impulsion de son exceptionnelle direction à deux têtes, il scelle une alliance inédite et explosive entre la science et la culture. Alliance entre une science encore indisciplinée, en voie de professionnalisation et d'institutionnalisation, qui a besoin de monter en puissance, en légitimité et en notoriété, et la culture – toutes les formes de culture moderne occidentale: celles des avant-gardes, lettrées, aristocratiques, élitistes, populaires, savantes, matérielles...

PROFITER DE LA VOGUE DE « L'ART NÈGRE »... ET S'EN DÉTACHER

C'est le début des années folles de l'ethnographie, révélatrices de l'engouement pour une discipline, l'ethnologie, qui se pare habilement des attraits de la nouveauté – sans qu'il soit d'ailleurs bien certain que tous aient la même définition, la même conception de ce qu'elle est ou de ses ambitions scientifiques. Des ambiguïtés et des malentendus féconds ont d'ailleurs ainsi profité au musée d'ethnographie du Trocadéro, comme la vogue de « l'art nègre ».

Depuis le début du siècle, l'art nègre est furieusement à la mode parmi les artistes et les intellectuels. Rien qu'à Paris, il y aurait près de 150 collectionneurs d'« art primitif » et, au milieu des années 1920, les revues nègres de Joséphine Baker au théâtre des Champs-Élysées ou des Blackbirds au Moulin Rouge chavirent le public et les artistes. Mais paradoxalement, en même temps que cette mode concourt indéniablement au regain d'intérêt entourant le musée et à la faveur retrouvée de l'ethnologie, Rivet et Rivière veulent l'arracher au champ artistique et faire entendre un autre discours, plus ambitieux et attentif au contexte d'expression sociale et symbolique de ces objets: un discours qui entreprend de réhabiliter les sociétés traditionnelles et leur



L'ethnologie exerce un fort pouvoir attractif sur la jeune génération



➤ culture matérielle, un discours plus riche, sensible aux dimensions rituelle et culturelle, qui dépasse la simple séduction esthétique.

Le musée voit aussi converger vers lui des réseaux dont la coexistence pourrait sembler insolite si on oubliait que ses directeurs font preuve d'un grand pragmatisme pour consolider leur entreprise de modernisation et de popularisation du Trocadéro : des scouts, des missionnaires religieux, des explorateurs et voyageurs, des fonctionnaires coloniaux, des journalistes, des artistes et écrivains, des banquiers et financiers, des galeristes et collectionneurs, des nobles, des étudiants et des savants...

ATTIRER DADAS, SURREALISTES ET AUTRES ARTISTES D'AVANT-GARDE

De fait, les directeurs du musée d'ethnographie font flèche de tout bois pour mettre en valeur leur ambitieuse entreprise de rénovation du lieu, tribune et vitrine de cette science sur la scène parisienne : brouillant les frontières, ils profitent tout à la fois du goût du grand public pour l'aventure et l'exotisme, abondamment relayé dans la presse à gros tirage et les récits de voyage pittoresques, mais aussi de la ferveur des élites mondaines pour les arts dits primitifs, notamment des cercles artistiques d'avant-garde, en particulier les dissidents surréalistes et les artistes dadas. C'est toute la gageure de l'idéologie défendue par Rivet et Rivière telle qu'elle se manifeste dans le discours, la muséographie et l'animation éducative, scientifique et culturelle du musée : ils veulent en faire un lieu à la fois populaire, c'est-à-dire un instrument d'éducation et de propagande tourné vers le peuple, et à l'avant-garde de la culture. Pour eux, l'ethnologie, en tant que nouvelle science qui bouscule les hiérarchies épistémologiques, culturelles et raciales établies, doit être associée de plein droit à la culture.

À partir de 1932, ils parviennent ainsi à jouer sur les deux registres : celui du musée scientifique en mode majeur et celui du musée des beaux-arts en mode mineur. Pour lutter contre les préjugés raciaux et culturels, ils montrent au public tout ce qu'il peut avoir en commun avec cette humanité exotique : le geste et la parole, la technique et l'art. Conservatoire de la civilisation matérielle qui ouvre elle-même sur l'univers mental propre à chaque société, le musée d'ethnographie du Trocadéro veut faire la preuve par l'objet de l'indéfectible solidarité unissant tous les hommes, et montrer leurs communes aptitudes techniques qui sont autant de marches franchies dans l'ascension vers le progrès.

La mise en œuvre de cette volonté passe par un investissement tous azimuts dans les places fortes de la culture en pleine expansion,

LA CROISADE DES PREMIERS ETHNOLOGUES FRANÇAIS

En France, l'ethnologie entre officiellement à l'université en 1925, avec la fondation de l'Institut d'ethnologie, en 1925, sous l'égide du ministère des Colonies. On doit sa création au philosophe Lucien Lévy-Bruhl, au sociologue Marcel Mauss et à l'ethnologue Paul Rivet qui le dirige. L'Institut d'ethnologie forme la première génération d'ethnologues, hommes et femmes qui ont décidé de faire de leur vocation un métier. Dans la professionnalisation de ce métier, le terrain ethnographique devient « le rite d'initiation pratique », « l'épreuve du feu » (selon les mots de Rivet) qui permet d'observer par soi-même des cultures différentes, d'en comprendre les logiques sociales et rituelles, les valeurs.

Plus de cent missions ethnographiques sont organisées entre 1925 et 1940, preuve de la vitalité de l'ethnologie. Elles obéissent à deux impératifs : la collecte d'objets de la culture matérielle afin de

constituer les archives des sociétés traditionnelles ; l'ethnographie de sauvetage qui se hâte de documenter des modes de vie qui seraient menacés de disparition à cause de la colonisation et de la modernisation occidentales. Les possessions coloniales en Afrique et en Asie sont des terres de mission privilégiées, car faciles d'accès pour les ethnographes. Paul Rivet prône une alliance étroite entre le terrain ethnographique, la collecte d'objets, la recherche ethnologique et le musée d'ethnographie du Trocadéro qu'il dirige depuis 1928, véritable musée-laboratoire.

L'ambition est de quadriller la planète d'ethnographes et de collecteurs travaillant en coordination avec le musée. Si les terrains sous domination coloniale sont plus nombreux, ils sont loin d'être exclusifs. Jacques et Georgette Soustelle partent deux ans au Mexique et étudient les Otomis et les Lacandons ; Claude et Dina Lévi-Strauss mènent plusieurs enquêtes au Brésil, en particulier sur les Bororos et les Nambikwaras ; Alfred Métraux réalise des missions en Argentine, en Bolivie, à l'île de Pâques. André Leroi-Gourhan séjourne deux ans au Japon, Germaine Tillion et Thérèse Rivière s'installent dans l'Aurès algérien ; la grande mission Dakar-Djibouti, dirigée par Marcel Griaule, traverse l'Afrique entre 1931 et 1933, et popularise la culture dogon ; Paul-Émile Victor effectue plusieurs hivernages avec les Inuits de la côte orientale du Groenland ; Denise Paulme et Deborah Lifchitz mènent une enquête intensive à Sanga, au Mali ; Georges Devereux séjourne chez les Sedangs d'Indochine ; etc. Les ambitions sont multiples : faire connaître les sociétés lointaines de manière scientifique et didactique, témoigner de leur richesse culturelle, matérielle et artistique, restituer la diversité de façons d'être au monde, loin des épithètes péjoratives et dépréciatives. C. L.



PAUL RIVET (1876-1958)

Ici photographié à Teotihuacán, au Mexique, en août 1929, Paul Rivet s'intéressa à l'ethnologie en accompagnant une mission géodésique en Amérique au début du xx^e siècle. Il en devint un pionnier.



Photo Hendeg
A Ceremonial Mask-French West Africa.

When in **PARIS**
See the **WORLD !**

Pay a visit to the
MUSEUM OF MAN
(Musée de l'Homme)
in the new
PALAIS DE CHAILLOT.

The early Ages of Mankind.
The Human Races.
The Crafts and daily Life of the native Tribes.
The Arts of Ancient America (Peru, Mexico), Africa and Oceania.

More than 15.000 specimens, 5.000
photographs, maps, etc..., exhibited
in the most modern and fascinating
Museum.



A Fertility-Goddess of ancient Mexico

**IN TWO HOURS
SEE THE WORLD**
in the
MUSEUM OF MAN.

For information, apply to : MUSÉE DE L'HOMME. PALAIS DE CHAILLOT
Paris-16° — Telephone : Passy 74-46. Library. Tea-room.

Dans la continuité des réformes du musée d'ethnographie du Trocadéro, le musée de l'Homme multiplia les événements et déploya de vastes campagnes de communication.

Rivet et Rivière montent des opérations de prestige qui n'excluent pas des événements grand public, populaires comme un gala de matchs de boxe au Cirque d'Hiver en avril 1931 ou la venue de Joséphine Baker au musée en juin 1933. Rivière, qui connaît déjà l'artiste américaine, l'a invitée pour une visite des nouvelles salles présentant les collections recueillies par la mission Dakar-Djibouti, qui traversa l'Afrique d'ouest en est entre 1931 et 1933. Il a imaginé une séance de prises de vue particulière en sa compagnie à l'occasion de l'ouverture prochaine de l'exposition consacrée à cette mission.

LES GRANDS BALS ETHNIQUES DU MUSÉE DU TROCADÉRO

Les inaugurations d'expositions et de salles rénovées (une bonne cinquantaine en cinq ans) suivent un rythme trépidant et sont inmanquablement l'occasion d'événements festifs et médiatiques. De grands bals sont ainsi donnés par le musée, comme celui organisé à l'occasion de l'exposition coloniale de 1931 sur le thème des danses et chants africains, ou celui organisé à l'hôtel George V en mars 1934. Ce bal aux couleurs du Hoggar, une chaîne de montagnes du sud de l'Algérie, exploite habilement l'imaginaire orientaliste pour susciter la curiosité en attendant l'inauguration de la grande exposition sur le Sahara, qui rencontrera un énorme succès avec plus de 70 000 entrées.

Les initiatives de Rivet et Rivière ont ainsi propulsé le musée d'ethnographie du Trocadéro hors de son orbite scientifique naturelle et l'ont ouvert à une diversité de publics rarement atteinte depuis. Jamais le champ d'attraction de l'ethnologie ne fut plus vaste. Aujourd'hui, le musée du quai Branly et le musée de l'Homme s'inscrivent tous deux dans ce même esprit. Héritier des riches collections d'ethnographie de l'ancien musée de l'Homme, le musée du quai Branly, inauguré en juin 2006, continue à porter la volonté de mise en valeur de la diversité culturelle et artistique. Quant au nouveau musée de l'Homme inauguré en octobre 2015, il restitue non seulement l'histoire naturelle de l'humanité depuis la Préhistoire jusqu'à aujourd'hui dans toute la diversité physique de l'espèce humaine, mais aussi l'histoire culturelle de ses relations à son environnement, de son adaptation et de son utilisation de la nature. Plus que jamais, l'anthropologie est au cœur de la culture. ■

quelle qu'elle soit, et dans les médias de masse comme la radio, la presse écrite et la photographie. Des causeries ethnologiques sont ainsi diffusées chaque semaine sur les ondes de Radio-P.T.T., et dans les magazines et les quotidiens, on lit régulièrement des récits des ethnographes sur leur terrain. Rivet et Rivière n'hésitent pas à s'affranchir de la retenue et de la modération attendue des savants pour communiquer haut et fort sur les missions de leur musée en recourant parfois à des moyens inédits pour faire leur publicité.

Le musée se départit de son image d'austérité savante et se montre davantage accueillant et pédagogue vis-à-vis du public, des publics. Grâce à Rivière, issu du monde des arts, il est l'un des tout premiers musées à entrer dans l'ère de la communication, de la publicité, de l'événementiel, avec l'organisation de coups médiatiques, de fêtes, de bals, d'inaugurations d'expositions très régulières qui en font l'un des endroits les plus courus de Paris. Pour les journaux, le Trocadéro devient un lieu à la mode où il se passe toujours quelque chose, où règne un esprit moderne, chic, cultivé, jeune, joyeux, aventureux, savant sans être ennuyeux.

BIBLIOGRAPHIE

A. Delpuech, C. Laurière et C. Peltier-Caroff, **Les Années folles de l'ethnographie. Trocadéro 28-37**, MNHN, 2017.

C. Laurière, **Paul Rivet, le savant et le politique**, MNHN, 2008.

A. Conklin, **Exposer l'humanité. Race, ethnologie et empire en France (1850-1950)**, MNHN, 2015.

C. Blanckaert (dir.), **Le Musée de l'Homme. Histoire d'un musée-laboratoire**, MNHN/Artlys, 2015.

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

INTELLIGENCES ARTIFICIELLES : UN APPRENTISSAGE PAS SI PROFOND !

Les systèmes de reconnaissance automatique ont d'étonnantes faiblesses. Exploiter ces failles permet de s'amuser, mais aussi d'améliorer les procédures d'apprentissage... ou de concevoir de nouvelles attaques malveillantes.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au Centre
de recherche en
informatique, signal
et automatique de Lille
(Cristal)

L'apprentissage automatique à l'aide de réseaux neuronaux «profonds» est à la mode. Comme souvent quand il s'agit d'intelligence artificielle, il y a ceux qui perçoivent raisonnablement les capacités des nouvelles idées et il y a ceux qui imaginent bien plus. Cet enthousiasme excessif s'est produit avec les premiers succès des méthodes d'apprentissage automatique dans la décennie 1950; cela a recommencé avec les systèmes experts dans les années 1980; puis quelque temps après avec les réseaux de neurones; et maintenant, c'est une forme de ces réseaux qui fait croire que nous sommes sur le point de mettre dans nos ordinateurs une intelligence générale susceptible de nous surpasser.

Le présent article n'a pas pour objectif de dénigrer une remarquable technique qui a récemment triomphé au jeu de go, qui aide à concevoir des véhicules autonomes, qui améliore la traduction automatique et qu'on maîtrise de mieux en mieux; les livres d'Aurélien Géron (*voir la bibliographie*) vous initieront à cette science nouvelle. Nous cherchons ici à remettre les pieds sur terre à ceux qui l'imaginent comme une panacée informatique.

formels de la couche d'entrée du réseau reçoivent des informations, par exemple sous la forme d'images décomposées en pixels: chaque pixel est une entrée. En fonction de leurs paramètres internes, les neurones de cette première couche envoient des signaux aux neurones de la seconde couche, qui eux-mêmes, en fonction de leurs paramètres internes, envoient des signaux à la troisième couche, etc.

Les influx de sortie, c'est-à-dire de la dernière couche, désignent les réponses possibles. Ce sont par exemple des lettres A, B, C ...: si les images données en entrée sont des lettres manuscrites et imprécises, le but recherché est que le réseau, une fois instruit, sache correctement reconnaître les lettres qui lui sont proposées. La phase d'apprentissage consiste à ajuster les paramètres internes de chaque neurone pour que le réseau réponde correctement. Souvent, plusieurs milliers de paramètres sont à calculer. Tout l'art de la programmation des réseaux de neurones consiste, à l'aide d'un grand nombre d'images avec leurs classifications (par exemple des formes manuscrites dont on indique au réseau à quelles lettres elles correspondent), à faire converger les jeux de paramètres des neurones vers un état à peu près stabilisé et qui sera tel que lorsqu'on proposera des images, par exemple d'autres lettres manuscrites non utilisées, elles soient correctement identifiées.

On parle d'apprentissage supervisé: lors d'une phase initiale, on indique au réseau les réponses voulues; il apprend et, si tout s'est bien passé, il devient alors capable de trouver, seul, les bonnes réponses à des entrées



Jean-Paul Delahaye a récemment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

RÉSEAUX NEUROMIMÉTIQUES

Les neurones formels proposés en 1959 sont des modèles informatiques et simplifiés des neurones de notre cerveau. On conçoit des programmes qui en simulent un grand nombre en les regroupant en couches successives, comme les neurones du cerveau humain. Les neurones

PERFORMANCES : L'EXEMPLE DU SYSTÈME CAPTIONBOT

1

L'identification automatique d'objets sur une photo a fait récemment de grands progrès et les systèmes d'aujourd'hui sont capables, avec un certain succès, de reconnaître le contenu d'images délicates. Vous vous en rendez compte vous-même en testant le système en ligne CaptionBot conçu par Microsoft (<https://www.captionbot.ai>).

Le système combine deux réseaux neuronaux. Le premier s'occupe de reconnaissance d'images,

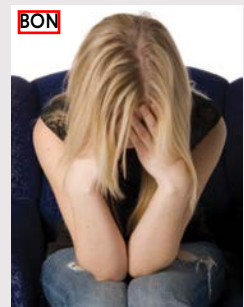
le second du traitement du langage naturel pour composer les réponses. En prenant en compte un grand nombre d'images accompagnées de leur description, le logiciel apprend à associer les caractéristiques de l'image à des descriptions écrites de ce qu'elles montrent. Il tente alors de faire de même avec de nouvelles images. Le système continue de progresser. En février 2018, on obtenait par exemple les résultats ci-dessous (les réponses ont été traduites).



BON
Je pense que c'est un arbre avec en fond un coucher de soleil.



BON
Je pense que c'est une personne tenant une guitare.



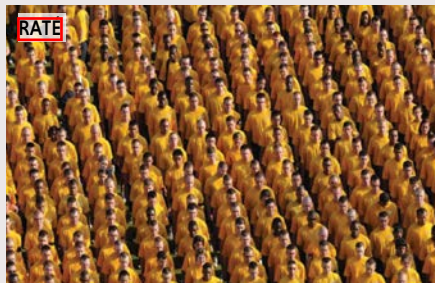
BON
Je pense que c'est une femme assise sur un canapé.



PAS SI MAL
Je pense que c'est un homme sur une plage.



PAS SI MAL
Je n'en suis pas très sûr, mais je pense que c'est un ours brun assis sur une table.



RATE
Je pense que c'est un grand étalage de maïs.



RATE
Je pense que c'est une paire de chaussures bleues.



RATE
Je n'en suis pas très sûr, mais je pense que c'est un avion dans le ciel.

nouvelles. Un autre type de méthodes pour instruire un réseau de neurones formels se fonde sur l'idée de le récompenser quand il propose une bonne réponse et de le pénaliser sinon; ce sont les méthodes d'«apprentissage par renforcement».

La puissance de calcul disponible aujourd'hui, les bases de données volumineuses collectées pour les exemples utilisés en phase d'apprentissage, ainsi que la multiplication des couches internes d'un réseau (on en utilise parfois plusieurs dizaines) ont conduit récemment à de spectaculaires réussites, comme la victoire des machines sur les humains au jeu de go.

Les chercheurs du domaine étaient persuadés qu'un réseau ayant bien appris était nécessairement robuste et doté d'une propriété de continuité: des traits dessinant de manière vague et approchée une lettre seront reconnus correctement, et une image proche d'une image reconnue sera elle aussi reconnue.

Or ce n'est pas le cas: les chercheurs ont mis au point des images pièges, conçues pour qu'un réseau ayant appris à reconnaître une certaine catégorie d'images propose une réponse incongrue et fautive quand on lui soumet une image proche, qu'un humain classe aisément.

Insistons sur la prudence nécessaire. Yann LeCun, pionnier de l'« apprentissage profond » ayant dirigé la recherche en intelligence artificielle chez Facebook, est clair: « C'est un abus de langage que de parler de neurones! De la même façon qu'on parle d'aile pour un avion, mais aussi pour un oiseau, le neurone artificiel est un modèle extrêmement simplifié de la réalité biologique. » Il ajoute: « Les intelligences artificielles les plus abouties ont aujourd'hui moins de sens commun qu'un rat! »

Nous disposons de méthodes qui surpassent les humains pour certains types de problèmes et c'est un remarquable succès. Cependant, dans de nombreux domaines, l'informatique a depuis longtemps créé des systèmes qui dépassent les humains. Pouvez-vous mémoriser 300 numéros de téléphone? Savez-vous calculer 3^{10} en une seconde? Non. Votre téléphone portable, lui, fait cela facilement. Les réussites des réseaux de neurones, des méthodes d'apprentissage automatique et des méthodes de fouille de données massives (les *big data*) sont de nouveaux exploits des machines, mais ces succès ne signifient pas que les machines sont devenues véritablement intelligentes.

L'ÉTRANGE EXPÉRIENCE DE 2014

Revenons à nos exemples pièges. Une équipe de sept chercheurs affiliés aux universités de New York et Montréal, à Google et à Facebook, réunie autour de Christian Szegedy, a publié en 2014 une méthode permettant de tromper les systèmes de reconnaissance visuelle.

Les chercheurs en réseaux neuronaux affirment volontiers que les réseaux « généralisent ». Si un réseau apprend à reconnaître un cheval à partir d'un ensemble de photos de chevaux, il aura la capacité de reconnaître un cheval sur des photos qu'il n'a jamais vues. Il semblait alors aller de soi qu'un réseau qui classe correctement une photo de cheval donnée classera correctement la même photo où quelques pixels seulement ont été modifiés.

Ce n'est pas le cas: le réseau indiquera parfois qu'il voit une vache à la place du cheval, que tous les humains identifient pourtant. Si l'hypothèse de continuité « Ce qui est proche d'une image correctement traitée l'est aussi » jusque-là admise était correcte, alors aucune méthode piège de ce type ne pourrait fonctionner. Il est troublant que la technique du groupe de Christian Szegedy fonctionne presque toujours et puisse fabriquer des exemples trompeurs pour une vaste catégorie de réseaux de neurones et de données d'apprentissage. Ces chercheurs écrivent: « Pour tous les réseaux que nous avons étudiés et pour toutes les bases d'images utilisées pour l'apprentissage, nous réussissons à engendrer des exemples très proches, visuellement indiscernables d'images correctement reconnues, qui sont mal classées par le réseau. »

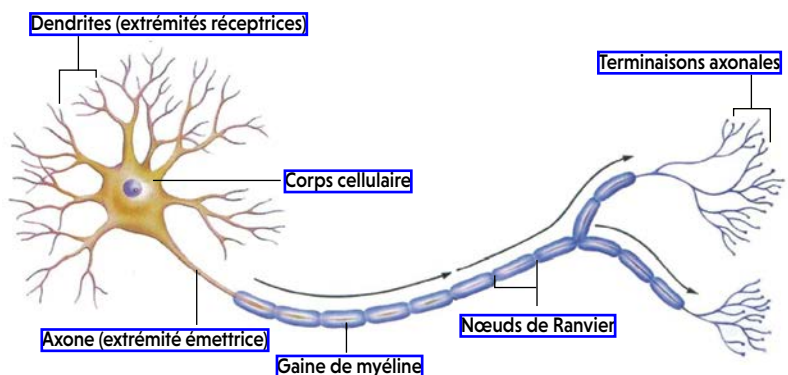
Pour construire les images pièges, on utilise une fonction qui estime le risque d'erreur pour chaque image possible, puis on utilise un algorithme d'optimisation qui, de petites modifications en petites modifications, déforme l'image

2

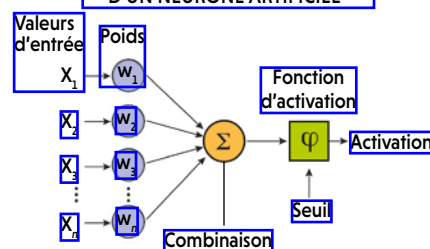
NEURONES ET RÉSEAUX PROFONDS

Les neurones artificiels sont des versions simplifiées (matérielles ou logicielles) des neurones biologiques. Le plus souvent, on les conçoit de façon que les signaux d'entrée (des influx plus ou moins forts) sont mélangés : on calcule par exemple une combinaison linéaire de ses influx d'entrée en utilisant des paramètres $w_1, w_2, \dots, w_n$ propres au neurone. Si cette valeur calculée dépasse un certain seuil (encore un paramètre du neurone), alors un influx de sortie est émis. Un réseau dit profond comporte de nombreuses couches de neurones formels qui interagissent ainsi (schéma du bas, à droite). En réponse aux signaux donnés en entrée (par exemple les pixels d'une image), le réseau produit des signaux en sortie (qui codent par exemple l'objet reconnu dans l'image).

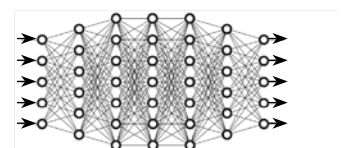
NEURONE BIOLOGIQUE



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN NEURONE ARTIFICIEL



RÉSEAU PROFOND



3

DES IMAGES PIÈGES

Un procédé de modification d'images permet de piéger les algorithmes neuronaux de reconnaissance d'images et les conduit à produire des réponses absurdes.

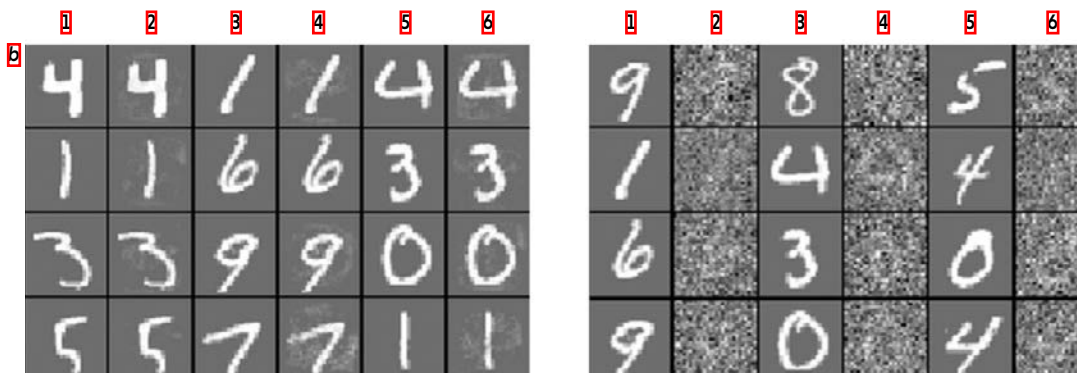
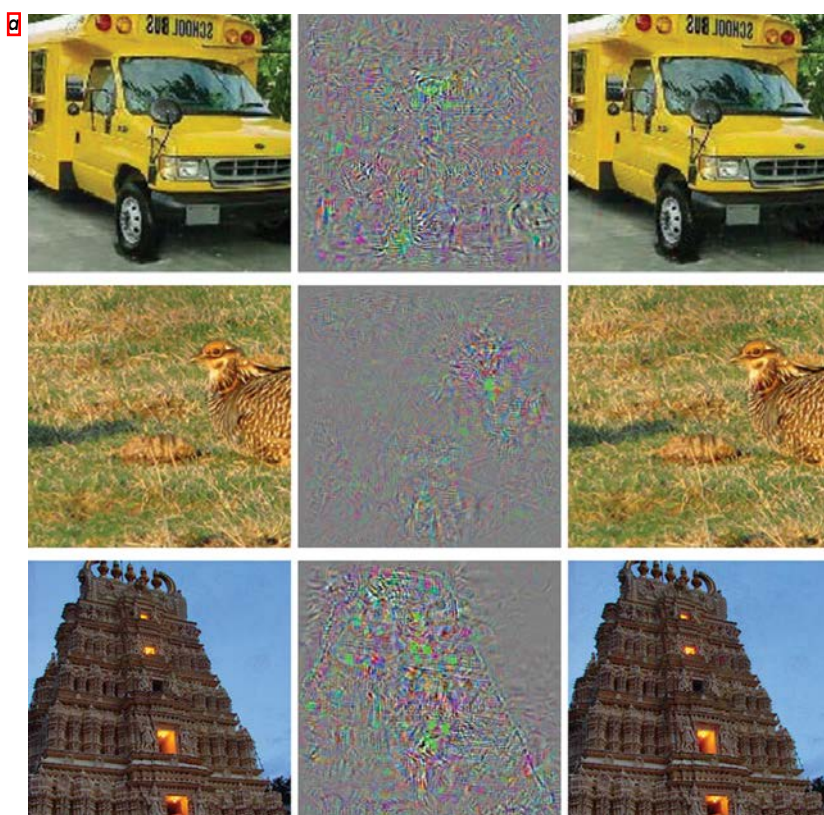
Les images proposées dans la colonne de gauche de la figure a, après la phase d'apprentissage du réseau de neurones, sont toutes correctement reconnues. Christian Szegedy et son équipe calculent alors des perturbations (colonne centrale) qui, appliquées aux images de la colonne de gauche, donnent les images de la colonne de droite. Ces dernières sont alors, dans chaque cas, reconnues par le système comme figurant des autruches !

Dans le premier tableau de la figure b, les chiffres manuscrits des colonnes 1, 3, et 5 sont identifiés correctement par le réseau de neurones

(après apprentissage). En revanche, le réseau identifie mal les mêmes images qui ont subi de légères modifications (colonnes 2, 4 et 6), alors que l'œil humain les identifie aussi bien et ne voit presque pas de différences avec les premières images.

Dans le second tableau de la figure b, on a placé en colonnes 2, 4 et 6 les images des colonnes 1, 3 et 5 soumises à un assez fort bruit aléatoire. Le réseau continue pourtant de fournir les bonnes identifications dans plus de la moitié des cas, alors que les humains en sont incapables.

Ces deux tableaux montrent donc que ce qu'un réseau de neurones apprend dans sa phase d'apprentissage est d'une nature assez différente de ce que nous-mêmes apprenons.



© Images extraites de C. Szegedy et al., Intriguing properties of neural networks, International Conference on Learning Representations, 2014, prépublication arXiv:1312.6199, 2014.

En augmentant le plus possible ce risque d'erreur, tout en changeant le moins possible l'image manipulée. De proche en proche, sans que l'œil humain ne perçoive de changements notables, l'algorithme construit une image qui fera trébucher le réseau.

UN NOUVEAU DOMAINE DE RECHERCHE

Comme souvent en recherche, quand une bonne idée est découverte, une multitude de travaux la précisent et la prolongent. Depuis l'article de 2014, des dizaines d'équipes ont trouvé et perfectionné toutes sortes d'astuces produisant des images pièges, et cela quelle que soit la méthode d'apprentissage mise en œuvre pour instruire le réseau. Dans certains cas, un seul pixel modifié induit en erreur le réseau (voir l'encadré 4). Assez souvent, une image qui piège un réseau trompera aussi d'autres réseaux ayant appris selon une méthode différente. Christian Szegedy explique :

« Nos exemples pièges sont relativement robustes, et trompent aussi des réseaux de neurones ayant un nombre différent de couches que celui qui les a engendrés ou provenant de phases d'apprentissage n'utilisant que des sous-ensembles des données. »

En apprentissage automatique, l'erreur que commettent les systèmes est parfois due à ce qu'on nomme le surajustement (*overfitting*). La méthode apprend au système à réagir sur un nombre limité d'exemples, mais dès qu'on en sort, le système se trompe, un peu comme une courbe que l'on force à passer par tous les points de mesure disponibles et qui est incapable de prédire correctement une nouvelle valeur.

Cependant, on a du mal à y voir la bonne explication des exemples pièges, puisque la classification automatique par le réseau

fonctionne en général. Ce qui se produit est plus subtil qu'un surajustement : le réseau a généralisé les exemples utilisés dans la phase d'instruction, mais cette généralisation a laissé des failles que détectent les méthodes d'optimisation employées pour le piéger, en faisant apparaître des cas d'erreur inattendus.

De surcroît, on a su fabriquer des objets 3D qui, quand on les photographie, produisent des images pièges : ce n'est pas une image très spécifique qui trompe le réseau, mais toutes celles qu'engendre un objet réel. C'est inquiétant : on pourrait par exemple fabriquer un faux panneau « Stop » qu'un véhicule autonome interpréterait comme un panneau lui donnant la priorité ! Ces images pièges rendent possibles de nouveaux types d'attaques contre des systèmes informatiques intégrant des réseaux de neurones. Parmi les travaux menés, mentionnons ceux ayant établi qu'on peut piéger plusieurs images à la fois : on cherche à optimiser le pixel qui augmente le plus la mesure du risque d'erreur non pas sur une seule image, mais sur un ensemble d'images. On construit ainsi de proche en proche une perturbation unique, une matrice de valeurs, qui, appliquée à chaque image d'un vaste ensemble d'images, produira une image piège.

Ce que l'on a réussi à faire pour les images a été adapté aux sons. Les méthodes décrites par Moustafa Alzantot, de l'université de Californie à Los Angeles, et ses collègues permettent de modifier insensiblement le son d'une voix qui prononce « yes » de façon que le système neuronal l'interprétera comme « no » (https://nesl.github.io/adversarial_audio/). On imagine les graves conséquences qu'auraient de telles méthodes si on les utilisait à des fins malveillantes...

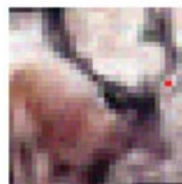
Pour évaluer l'effet du bruit ajouté aux sons initiaux pour fabriquer les exemples

TROMPER AVEC UN SEUL PIXEL

Les images comportant un petit nombre de pixels sont plus délicates à déchiffrer.

Pourtant, nous savons le faire assez bien, comme l'illustrent ces six images en basse résolution, assez facilement identifiables.

Dans l'article « One pixel attack for fooling deep neural networks » (prépublication arXiv:1710.08864, 2017), les chercheurs Jiawei Su, Danilo Vasconcellos Vargas et Sakurai Kouichi expliquent comment, après une phase d'apprentissage conduisant à de bonnes identifications (respectivement un cerf, un oiseau, un chien, un cheval, un bateau, un chat), ils ont réussi, en ne modifiant qu'un seul pixel de chaque image (qu'on voit assez nettement), à berner le réseau qui a alors reconnu autre chose, respectivement un avion, une grenouille, un chat, un chien, un avion, un chien.



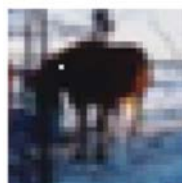
Cerf
Avion (49,8 %)



Oiseau
Grenouille (88,8 %)



Chien
Chat (75,5 %)



Cheval
Chien (88 %)



Bateau
Avion (62,7 %)



Chat
Chien (78,2 %)

pièges, les chercheurs ont mené une comparaison avec des sujets humains. Chacune des personnes d'un groupe de 23 participants a écouté 1500 séquences sonores pièges sans être informée de ce qu'il fallait trouver. Dans 89% des cas, la reconnaissance par les sujets humains n'a pas été affectée, alors que la machine s'est trompée dans 100% des cas.

CORRIGER LES MÉTHODES

Ce qu'on a découvert donne des pistes pour créer de nouvelles méthodes d'apprentissage plus résistantes. L'idée la plus simple consiste, après la première période d'apprentissage, à construire de nombreuses images pièges et à les faire apprendre en complément au réseau en lui indiquant les bonnes réponses, tout comme un professeur de langue indique les faux amis à l'étudiant qui, averti, ne commettra pas l'erreur associée à ces expressions trompeuses.

Une autre idée simple fournit facilement une première protection : la compression de données. Gintare Dziugaite, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont noté dès 2016 l'intérêt et les effets des méthodes de compression informatique pour se protéger des images pièges. Avant de faire apprendre une image au réseau, on lui appliquera un algorithme de compression d'images d'usage courant. Cela modifie un peu certains pixels, mais la compression, en simplifiant l'image, la débarrasse des caractéristiques inutiles que le réseau pourrait prendre en compte alors qu'elles ne sont qu'accidentelles. Ce lissage ramène à ce qui est essentiel dans l'image.

On se retrouve une fois encore dans une situation où le perfectionnement des armes conduit aux perfectionnements des protections. Quelle sera l'issue finale de cette coévolution du glaive et du bouclier? Nul ne le sait, mais cela fera globalement progresser la science de l'apprentissage automatique.

LE POSSIBLE ET L'IMPOSSIBLE

Les réseaux de neurones artificiels sont formidables pour une catégorie de tâches particulières que Andrew Ng, chercheur principal chez Baidu, entreprise chinoise, décrit comme suit: «Si un individu moyen est capable de réaliser une certaine tâche en moins de une seconde, alors il est probable que vous pourrez l'automatiser.» En revanche, leur mode de fonctionnement et leur programmation par apprentissage à base d'exemples entraînent des caractéristiques dont plusieurs sont des limitations.

Gary Marcus, professeur de psychologie à l'université de New York, énumère dans une prépublication (arXiv:1801.00631, 2018) dix problèmes liés aux réseaux de neurones profonds qui nous aident à percevoir ce qu'il faudrait faire pour aller au-delà.

1. L'apprentissage profond exige énormément de données: lors de la phase d'apprentissage, il faut donner au système plus d'exemples que n'en aurait besoin un humain.

2. L'apprentissage à l'aide de réseaux de neurones profonds est en réalité superficiel; l'utilisation de l'adjectif *profond* concerne la structure des réseaux utilisés, mais pas la nature de ce qui est appris et maîtrisé.

3. L'apprentissage profond ne sait pas, jusqu'à présent, traiter de manière directe les structures hiérarchiques ou impliquant une combinatoire complexe entre éléments (par exemple le fonctionnement d'un moteur de voiture).

4. L'apprentissage profond est inefficace pour mener des raisonnements logiques enchaînés, comme déduire de «Lucie est la mère de Jacques et la fille de Jean» que «Jacques est le petit-fils de Jean». On sait construire des méthodes symboliques (non neuronales) qui réussissent ces tâches de raisonnement qu'il faudra probablement associer aux méthodes neuromimétiques.

5. L'apprentissage profond est opaque. Lorsque le réseau a appris à mener une certaine tâche, des milliers de paramètres ont été fixés et, sauf dans les cas les plus simples, il est impossible de les interpréter et de comprendre pourquoi ils ont les valeurs retenues: ils vous donnent une réponse, contentez-vous en!

6. L'apprentissage profond ne permet pas, jusqu'à présent, d'intégrer des connaissances *a priori* ou formulées abstraitement, par exemple du type: «Si sur le dos de l'animal il y a une selle, il est assez probable que c'est un cheval.» Les humains ne comprennent pas tout à l'aide d'exemples, ils intègrent aussi des connaissances élaborées par d'autres auxquels ils font confiance, leurs enseignants par exemple.

7. L'apprentissage profond ne distingue pas une corrélation d'une cause. Il repère des liens, mais n'est pas en mesure de les analyser.

8. L'apprentissage profond suppose un monde stable, ce qui est ennuyeux dans un univers en mouvement ou en évolution rapide.

9. L'apprentissage profond ne garantit pas les résultats. La découverte de méthodes insoupçonnées qui engendrent des exemples pièges en a été une preuve spectaculaire.

10. L'apprentissage profond n'est pas facile à mettre en œuvre, car on ne sait pas à l'avance ce qui marchera, et à chaque nouvelle application, il faut ajuster les paramètres généraux (profondeur du réseau, nombre de neurones, technique d'apprentissage, etc.) sans savoir *a priori* ce qui fonctionnera le mieux.

Vive l'intelligence artificielle, et bravo pour ses succès récents grâce à l'apprentissage profond... Mais restons lucides sur ce qui est fait et reste à faire avant de parler de machines en tout point meilleures que les humains. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Akhtar et A. Mian, **Threat of adversarial attacks on deep learning in computer vision : A survey**, prépublication arXiv:1801.00553, 2018.

M. Alzantot et al., **Did you hear that ? Adversarial examples against automatic speech recognition**, prépublication arXiv:1801.00554, 2018.

Y. Bengio, **La révolution de l'apprentissage profond**, Pour la Science Hors-Série n° 98, pp. 43-48, février-mars 2018.

A. Géron, **Machine Learning avec Scikit-Learn et Deep learning avec TensorFlow**, Dunod, 2017.

G. K. Dziugaite et al., **A study of the effect of jpg compression on adversarial images**, prépublication arXiv:1608.00853, 2016.

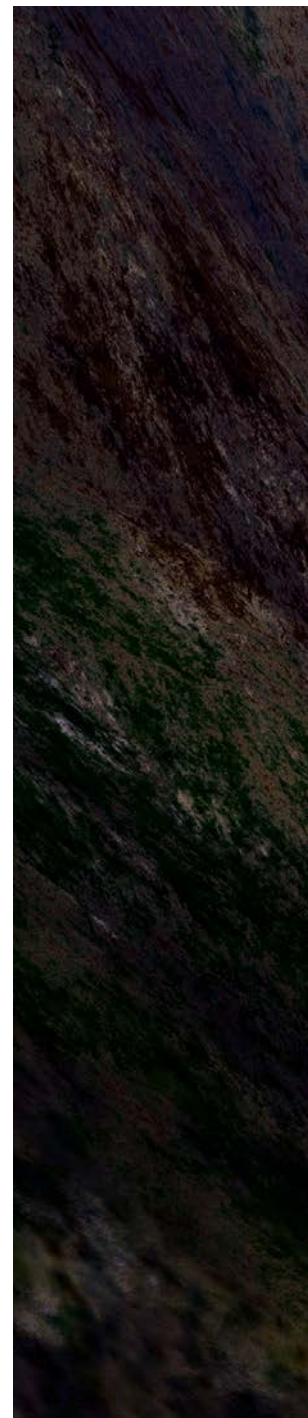
A. Ng, **What artificial intelligence can and can't do right now**, Harvard Business Review, vol. 9, 2016.

C. Szegedy et al., **Intriguing properties of neural networks**, International Conference on Learning Representations, 2014, prépublication arXiv:1312.6199, 2014.

L'AUTEUR

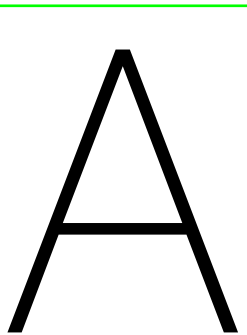


LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*



UN PAYSAGE PLUS VRAI QUE NATURE

Un artiste espagnol détourne un logiciel de création de paysages tridimensionnels pour composer des mondes virtuels réalistes à partir de toiles de peintres classiques. Invitation au voyage dans l'irréel.



André Derain, pionnier du fauvisme au début du xx^e siècle avec Henri Matisse, Maurice de Vlaminck, Georges Braque... est une figure incontournable de l'art moderne. *Bosquet*, l'une de ses toiles, peinte en 1912 et conservée au musée de l'Ermitage, à Saint-Petersbourg, en Russie, est visible au Grand Palais, à Paris, jusqu'à cet été (voir page ci-contre). Pas convaincu par ce que vous voyez? Rien d'étonnant: l'œuvre (voir ci-dessus) est passée entre les mains de l'artiste espagnol Joan Fontcuberta. Plus déconcertant

encore, elle est présentée dans le cadre d'une exposition intitulée *Artistes & Robots!* Le mystère s'éclaircira.

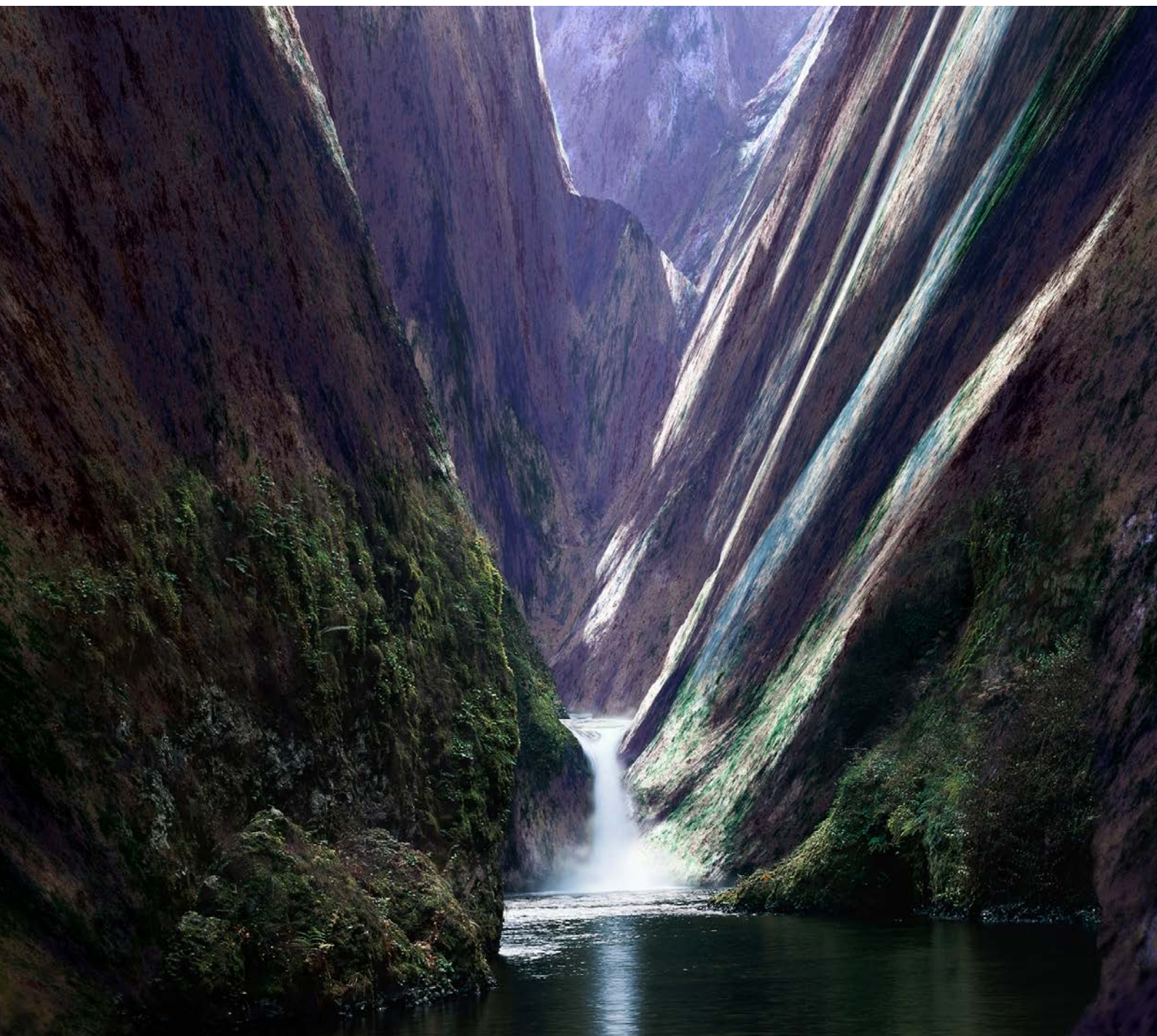
La manifestation propose une quarantaine d'œuvres pour lesquelles les artistes se sont adjoint l'aide de machines, de robots, de programmes informatiques, d'intelligence artificielle. Des machines à peindre bricolées par le Suisse Jean Tinguely dans les années 1960 jusqu'aux œuvres les plus récentes conçues grâce à l'«apprentissage profond», l'autonomie du créateur humain s'estompe à mesure que l'on progresse dans l'exposition, laissant une place toujours plus grande à la technologie. De même, l'interactivité avec le public va croissant. L'œuvre s'échappe et vit sa propre vie.

Chemin faisant, les questions surgissent, nombreuses. Une intelligence artificielle peut-elle avoir de l'imagination? Que peut faire un robot qui soit inaccessible à un humain? Une œuvre

Le *Bosquet* d'André Derain interprété en un paysage 3D par un logiciel informatique.

d'art est-elle nécessairement d'origine humaine? Jusqu'où une machine peut-elle revendiquer le statut d'artiste? Et bien d'autres encore.

Et l'on découvre le travail de Joan Fontcuberta. Dans son projet *Orogenesis* (qui concerne la naissance des montagnes), il utilise des logiciels, notamment Terragen, qui traduisent des informations bidimensionnelles en paysages tridimensionnels virtuels et réalistes. Ces programmes ont d'abord été mis au point pour des applications



militaires et scientifiques, par exemple pour reconstruire des reliefs à partir de données satellitaires ou cartographiques. Mais l'artiste les détourne.

Il leur soumet des toiles de Paul Cézanne, William Turner, John Constable, Caspar David Friedrich... et donc d'André Derain, et contraint les logiciels à les interpréter afin qu'ils créent des mondes parallèles. Les contours et les tons des peintures deviennent des montagnes, des rivières, des vallées, des cascades, des nuages. Les paysages qui en résultent,

splendides, extrêmement réalistes et plausibles, mais de pure fiction, sont ensuite photographiés, et ce sont ces clichés qui sont à voir au Grand Palais.

Selon Joan Fontcuberta, il s'agit d'«hallucinations contemporaines définies par la technologie». Les machines acquerraient ainsi une capacité d'imagination, et de fait, l'artiste n'est ici que l'instigateur, le travail de production étant délégué à l'ordinateur.

Le choix du médium n'est pas anodin. En effet, la photographie a longtemps été

considérée comme le reflet de la réalité, un témoin digne de foi. Or là, Joan Fontcuberta brouille les frontières entre réel et imaginaire, entre vérité et mensonge. Il le revendique: il souhaite semer le doute, détruire les certitudes, annihiler les convictions... ■

«Artistes & Robots»,
au Grand Palais, à Paris, jusqu'au 9 juillet 2018.



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



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

LE NEC PLUS ULTRA DE LA CHUTE LIBRE

La situation où un objet tombe sous la seule influence de la gravitation, sans perturbations externes, est impossible à réaliser, même en orbite autour de la Terre. Mais la mission spatiale *Microscope* s'en approche en compensant les forces résiduelles.

Le 2 avril 2018, la station spatiale chinoise *Tiangong-1* se désintégraît dans l'atmosphère après une interminable chute. Depuis mi-2016 et la coupure des communications avec les opérateurs au sol, il n'était plus possible de maintenir son altitude en actionnant à distance ses moteurs. Moralité: même à 400 kilomètres d'altitude, la station n'était pas en parfaite chute libre le long de son orbite, mais subissait, outre la gravité, des forces résiduelles qui la freinaient et qui l'ont finalement fait tomber vers le sol.

Cet événement illustre une question qui se pose aussi dans d'autres contextes: comment s'approcher au mieux d'une chute libre, c'est-à-dire d'un mouvement dû uniquement à la gravitation? Y répondre est crucial par exemple pour vérifier avec précision un principe fondamental de la physique, le «principe

d'équivalence», qui implique que tous les corps chutent de la même façon.

Depuis Galilée, en effet, les physiciens cherchent à tester avec la meilleure précision possible si des corps de compositions différentes tombent de la même façon dans le vide. Comme Newton l'a ensuite compris, cela revient à vérifier l'égalité entre la «masse pesante», qui caractérise la manière dont un corps est attiré gravitationnellement par d'autres corps, et la «masse inerte», qui caractérise la difficulté qu'il y a à modifier sa vitesse en lui appliquant une force.

COMPARER LA CHUTE D'UNE PLUME ET CELLE D'UNE BILLE

A l'air libre, une telle expérience est vouée à l'échec: à cause du frottement de l'air, une plume tombe bien plus lentement qu'une bille de plomb. Ainsi, avec une feuille de papier de format A4 faisant 80 grammes par mètre carré qui tombe à

Dans l'air, deux objets différents chutent rarement de la même façon: la traînée aérodynamique a une grande influence.



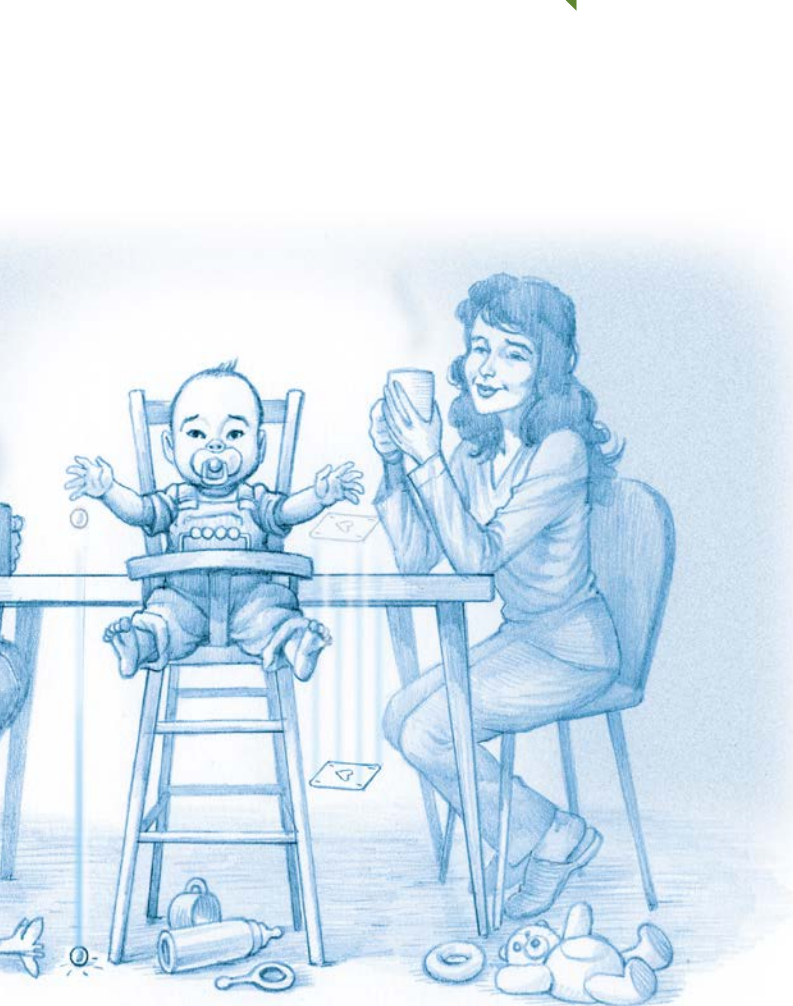
plat, la traînée aérodynamique compense le poids pour une vitesse de chute de l'ordre de 1 mètre par seconde, une valeur atteinte et dépassée en un dixième de seconde par des objets plus compacts.

La force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse de l'objet par rapport à l'air, à la masse volumique de l'air et à la surface que présente l'objet dans la direction du mouvement. Comment la diminuer?

Une solution est de réduire la masse volumique de l'air, autrement dit de faire le vide. Le gain est alors considérable: sans atteindre les valeurs de l'ultravide (10^{-7} pascal) réservées généralement à des cavités

L'EXPÉRIENCE CLASSIQUE

Une expérience simple, pratiquée depuis plus de trois siècles, illustre le fait que tous les corps chutent de la même façon si l'on s'affranchit des forces non gravitationnelles. On fait le vide dans un tube de verre vertical contenant une plume et une bille de plomb (ou tout autre objet compact, une pièce de monnaie par exemple). On retourne rapidement le tube, de façon que ces deux objets se retrouvent en haut du tube, et l'on constate qu'ils chutent de façon identique : ils arrivent en bas du tube en même temps. Mais une telle expérience ne permet pas de faire des tests précis de l'universalité de la chute libre.



de petite taille, les pompes et les étanchéités actuelles permettent de mettre sous basse pression des volumes importants.

Il y a quelques années, le physicien et vulgarisateur britannique Brian Cox a ainsi réalisé une version spectaculaire d'expérience de chute libre dans une chambre à vide de la Nasa haute de plus d'une trentaine de mètres et où l'on peut réduire la pression jusqu'à $1/10\,000$ pascal, soit 1 milliardième d'atmosphère : lâchées en même temps d'environ 10 mètres de haut, une plume de paon et une boule de bowling ont bien atteint le sol simultanément.

Pour des expériences plus précises, les physiciens disposent de la tour de

chute libre à Brême, en Allemagne, haute de 146 mètres. Dans un cylindre faisant 110 mètres de hauteur, on abaisse la pression à moins de 10 pascals. La masse volumique de l'air atteint alors 0,12 gramme par mètre cube ! Dans ces conditions, la capsule d'expérience (plus de 300 kilogrammes, 80 centimètres de diamètre) chute en 4,74 secondes, et sa décélération due à la traînée fait moins de $10^{-5}g$ (g étant l'accélération de la pesanteur).

Malgré cette performance et la longue durée de la chute, commode pour réaliser des expériences, ce n'est pas satisfaisant pour les scientifiques qui testent la chute libre.

Pour faire mieux, il faut aller dans l'espace. Sur la Lune par exemple. En juillet 1971, l'astronaute David Scott y fit une petite démonstration de chute libre en lâchant un marteau et une plume de faucon, arrivés au sol plus lentement que sur Terre, mais en même temps. Cependant, la Lune manque encore d'infrastructures !

Près de la Terre, alors ? A une altitude de 250 kilomètres, la masse volumique de l'atmosphère tombe à 7×10^{-8} gramme par mètre cube ; et à 820 kilomètres d'altitude, elle est de 3×10^{-11} gramme par mètre cube – des valeurs difficilement atteignables sur Terre. Mieux encore : en

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



En choisissant convenablement la vitesse d'un satellite, on peut lui conférer une orbite quasi circulaire où il est en perpétuelle chute quasi libre, ce qui permet d'allonger considérablement la durée des expériences.

UN ESPACE PAS SI VIDE

Ce tableau idyllique doit cependant être nuancé. D'abord, d'autres forces entrent en jeu, notamment la pression de radiation qu'exerce la lumière du Soleil sur la structure du satellite et qui peut varier le long de l'orbite selon son orientation et son ensoleillement.

On peut aussi penser aux impacts de micrométéorites. Ensuite, la force de traînée n'est pas si faible, car la vitesse d'un satellite en orbite basse est très élevée (de l'ordre de 7,5 kilomètres par seconde).

Dans le cas du satellite *Spot-4*, qui pesait 2,76 tonnes et qui était en orbite à 822 kilomètres d'altitude, la décélération due à la traînée était ainsi égale à $1,3 \times 10^{-8}$ mètre par seconde carrée. Cela ne faisait perdre que 2,5 mètres d'altitude par jour au satellite. En revanche, si le même satellite avait été placé à 250 kilomètres d'altitude, il aurait perdu 5 kilomètres par jour à cause de la prodigieuse augmentation de la masse volumique de l'air (même si elle reste très faible) ! Sa durée de vie se serait alors comptée en semaines.

On comprend mieux pourquoi tous les satellites doivent être munis de propulseurs d'appoint : ces derniers sont nécessaires pour corriger leurs trajectoires et leurs positions avec précision.

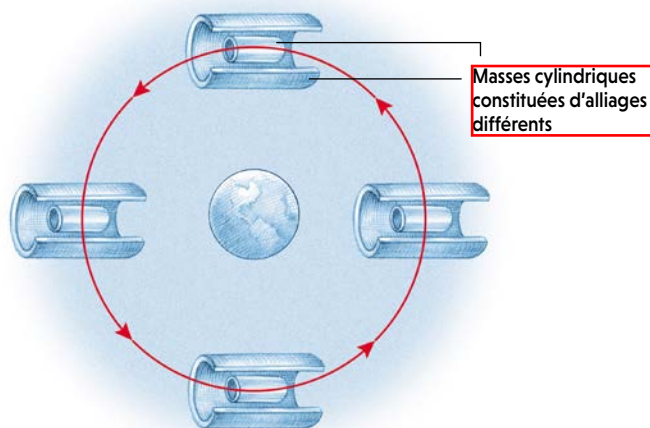
Alors, que faire pour s'approcher encore mieux de la chute libre ? Utiliser des moteurs pour compenser les forces perturbatrices agissant sur le satellite – et cela en continu et non pas en remontant périodiquement le satellite sur son orbite nominale, comme cela se fait habituellement. C'est le principe de la traînée compensée, mis en œuvre avec le satellite *Microscope*.

Lancé le 25 avril 2016, ce satellite en cours d'exploitation a déjà permis de vérifier avec une précision record le principe d'équivalence, c'est-à-dire l'égalité de la masse pesante et de la masse inerte. L'expérience consiste à mesurer l'éventuelle différence d'accélération entre deux cylindres creux concentriques de compositions différentes (platine et rhodium pour l'un ; titane, aluminium et vanadium pour l'autre) en chute libre autour de la Terre (voir l'encadré ci-dessus).

Ce système de deux masses emboîtées est suspendu à l'intérieur du satellite

CHUTE LIBRE AU SEIN D'UN SATELLITE

Le satellite *Microscope* (acronyme de *Microsatellite à traînée compensée* pour l'observation du principe d'équivalence), lancé en 2016, contient un système de deux masses cylindriques concentriques constituées d'alliages différents. Le système est suspendu sans contact avec le reste du satellite, dont les moteurs assurent qu'il reste immobile par rapport au système des deux masses. Le mouvement du système des deux masses le long de son orbite s'effectue alors avec des forces aérodynamiques totalement négligeables, l'air résiduel à l'intérieur du satellite étant immobile par rapport au système en question. Il s'agit donc d'une véritable chute libre sous l'effet exclusif de la gravitation de la Terre. L'expérience consiste à vérifier qu'il n'y a pas de mouvement d'une masse par rapport à l'autre. Sinon, le principe d'équivalence serait violé : la chute libre différencierait selon la nature du corps.



sans qu'il y ait contact avec la structure de celui-ci, grâce à des forces électrostatiques bien contrôlées. Ainsi, contrairement au satellite, le dispositif n'est pas soumis aux perturbations de l'atmosphère résiduelle extérieure ni à la pression de radiation solaire.

TRAÎNÉE COMPENSÉE

Par ailleurs, l'accélération moyenne du dispositif est mesurée et sert à piloter les moteurs du satellite de façon que celui-ci reste immobile par rapport au système expérimental. Tout se passe alors comme si le satellite était en chute libre, la traînée atmosphérique étant compensée par la poussée des moteurs. En outre, les masses d'épreuve restent immobiles par rapport à l'air résiduel présent à l'intérieur du satellite, ce qui garantit que les forces aérodynamiques agissant sur ces masses sont totalement négligeables.

Ainsi, avec cette traînée compensée, le satellite suit une trajectoire de chute libre. Sur sa durée de vie, l'expérience pourra alors cumuler de longues périodes de chute parfaitement libre, l'objectif étant d'améliorer d'un facteur 100 la précision du test du principe d'équivalence. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Touboul et al., **MICROSCOPE mission : First results of a space test of the equivalence principle**, *Physical Review Letters*, vol. 119, article 231101, 2017.

E. M. Gaposchkin et A. J. Coster, **Analysis of satellite drag**, *The Lincoln Laboratory Journal*, vol. 1, pp. 203-224, 1988.

J. P. Marec et al., **Contrôle d'orbite d'un satellite de navigation à traînée compensée**, *Acta Astronautica*, vol. 4, pp. 947-984, 1977.

Le principe d'équivalence, Wikipédia ([fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d'équivalence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Principe_d%27%C3%A9quivalence)).



Chers lecteurs, votre avis nous intéresse !

Répondez
en quelques
minutes à notre
enquête sur Internet :

rebrand.ly/enquete-pls

DE NOMBREUX LOTS
À GAGNER

L'AUTEUR



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

Escherichia coli L'ÉVOLUTION EN MARCHÉ

En trois jours, une bactérie *Escherichia coli* produit 200 générations de descendantes. Combien de mutations accumule sa lignée ? Où ? À quelle fréquence ? Et avec quelles conséquences ? Des biologistes viennent d'apporter les réponses.

Suivre en direct, cellule par cellule, les mutations chez la bactérie *Escherichia coli*: ce rêve de Salvador Luria et Max Delbrück, pionniers de la biologie moléculaire et tous deux lauréats en 1969 du prix Nobel de physiologie et médecine, vient de se réaliser soixante-quinze ans après leurs premières expériences. Luria et Delbrück n'avaient pu traquer que des mutations sélectionnées. Mais en mars dernier, Marina Elez et Lydia Robert, du laboratoire Jean-Perrin de Sorbonne Université, à Paris, et leurs collègues ont réussi à suivre les mutations d'une bactérie et de ses descendantes sur plusieurs centaines de générations. Ils ont ainsi montré que, dans leur très grande majorité, ces mutations sont neutres.

En 1936, l'Allemand Max Delbrück, physicien théoricien converti à la biologie par Niels Bohr, fuit le nazisme et, grâce à la

fondation Rockefeller, rejoint le California Institute of Technology où il découvre l'intérêt des bactériophages, les virus de bactéries, pour comprendre les bases de la génétique. En 1940, l'Italien Salvatore Luria, médecin radiologue d'une grande famille intellectuelle juive, en stage à l'institut Pasteur, à Paris, rejoint Marseille à bicyclette lors de l'invasion allemande et s'embarque pour les États-Unis, où le physicien italien Enrico Fermi, récemment lauréat du prix Nobel, lui obtient une bourse de la fondation Rockefeller.

Dès leur rencontre, Luria l'expérimentateur et Delbrück le théoricien fondent, avec Alfred Hershey (aussi lauréat du prix Nobel de 1969), le Groupe du phage, qui révolutionnera la biologie évolutive. Leur première publication commune, exceptionnelle, en 1943, vise à répondre à une question majeure posée dès 1932 par le généticien de la drosophile Thomas Morgan: quelle est la nature de la



Les bactéries *E. coli* constituent 80 % de la flore intestinale aérobie humaine ; elles peuvent néanmoins donner des lignées pathogènes, décrites à la fin du XIX^e siècle par le pédiatre Theodor Escherich, par acquisition de gènes de virulence.

Elle est capable de vivre avec ou sans oxygène.

EN CHIFFRES

20

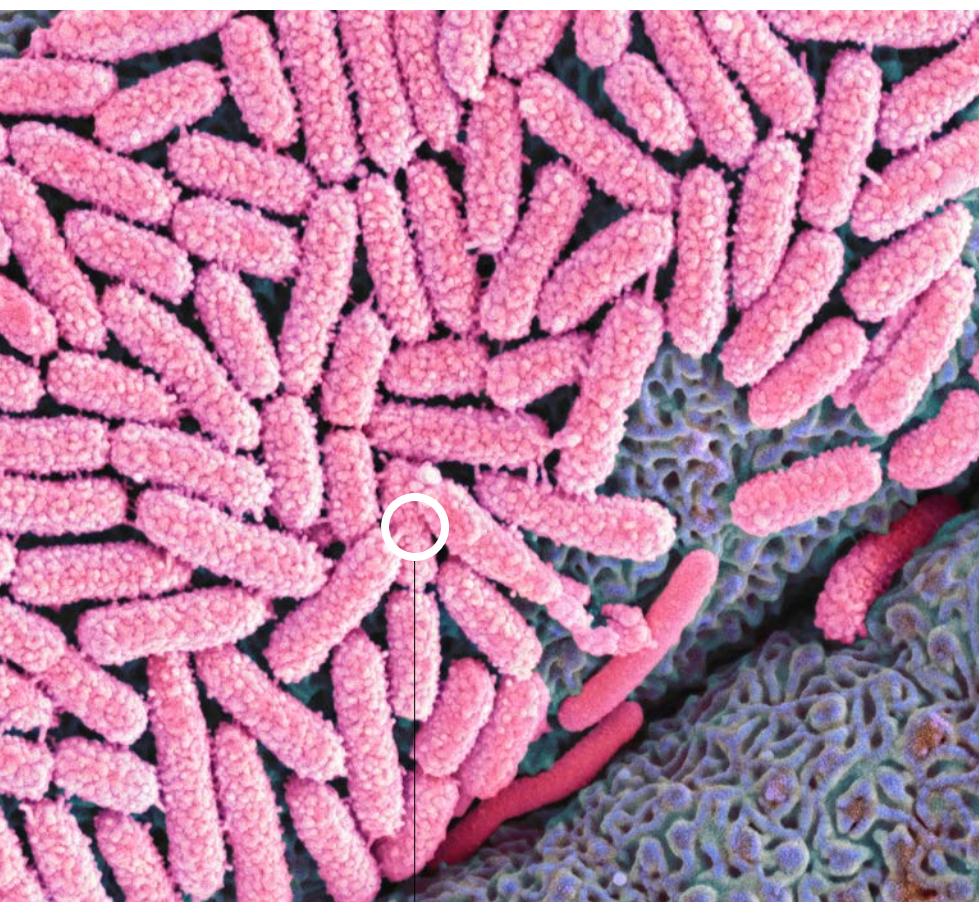
Une bactérie *Escherichia coli* se divise toutes les 20 minutes à 37 °C dans un milieu riche en nutriments.

4,6 millions

Le génome d'une bactérie *E. coli* mesure quelques millimètres et compte environ 4,6 millions de paires de bases – les constituants de l'ADN –, contre 2 mètres et 3,2 milliards de paires de bases chez les humains. *E. coli* comporte environ 4 200 gènes, un humain environ 23 000.

8 espèces

On connaît 8 espèces du genre *Escherichia*, dont la plus récente, *E. marmotae*, a été décrite en 2015. La plupart de leurs souches sont commensales : elles vivent associées à des animaux à sang chaud, dans leur tube digestif.



Elle se propulse à l'aide de plusieurs flagelles qui hérissent sa surface.



Escherichia coli
Taille : environ 2 µm

mutation? À l'époque, on ignorait que l'ADN était le support du matériel héréditaire, mais on savait que les gènes étaient localisés sur les chromosomes. On ne détectait la mutation d'un gène (un changement brusque d'un caractère héréditaire) que par son effet sur l'organisme.

Luria et Delbrück mettent au point une méthode leur permettant d'observer, chez *E. coli*, l'apparition des mutations qui confèrent une résistance au bactériophage α . Dans des tubes de culture, Luria inocule un petit nombre de bactéries sensibles au virus. Après leur multiplication, il les étale dans des boîtes de Petri sur un gel

nutritif contenant des bactériophages en excès qui devraient tuer toutes les bactéries. Mais si une bactérie est devenue résistante, elle se multiplie et donne une colonie circulaire sur le gel. Or très peu de bactéries survivent, et compter les colonies revient à compter les occurrences de telles résistances.

DES MUTATIONS ALÉATOIRES?

Pour expliquer l'apparition de mutations qui confèrent ces résistances, Luria et Delbrück veulent tester deux hypothèses. Selon la première, chaque bactérie a une faible probabilité, indépendante de la présence du virus, de muter et de devenir résistante; chaque descendant du mutant sera résistant – sauf mutation inverse. Selon la seconde, chaque bactérie a une faible probabilité d'acquérir une immunité en présence du virus et de survivre à son attaque, immunité elle aussi conférée à sa descendance.

En substance, dans le premier cas, on s'attend que, dans une culture en croissance, la proportion des colonies résistantes augmente avec le temps puisque de nouveaux mutants apparaissent constamment. Dans le second cas, au contraire, on obtiendrait une proportion constante de colonies résistantes puisque cette résistance apparaît au contact du virus. Il suffit donc de déterminer la proportion de bactéries résistantes dans la culture et ses sous-cultures. Mais si la première hypothèse est la bonne, les résultats ne seront pas reproductibles d'un jour à l'autre. C'est pourquoi Delbrück quantifie et interprète

Ces fluctuations à l'aide d'un outil statistique performant issu de la mécanique quantique. Le test, dit de fluctuation, fournit un résultat en faveur de la première hypothèse: les mutations surviennent de manière aléatoire, indépendamment de la présence du virus.

Dans leur expérience, Luria et Delbrück étudient la mutation, certes, mais de façon très indirecte. Ils n'ont pas accès à la cellule qui a muté, mais à la colonie qui en résulte des générations plus tard. Ils ne suivent pas non plus la mutation elle-même, mais déduisent son occurrence de la résistance qu'elle confère. Enfin, la mutation recherchée est sous forte sélection, puisque la survie de la bactérie en dépend. C'est donc une prouesse qu'ont réalisée Marina Elez, Lydia Robert et leurs collègues.

DES ERREURS LUMINEUSES

Le système expérimental permet de suivre en temps réel, sur cellules isolées d'*E. coli*, la dynamique des mutations et leurs effets sur le succès reproducteur des bactéries, caractérisé ici par leur vitesse de division. Il a nécessité la mise au point d'une structure microfluidique élaborée où il est possible de suivre les générations bactériennes pendant plusieurs jours (voir l'encadré ci-contre). On y visualise par ailleurs les mutations à l'aide d'une technique biologique inventive.

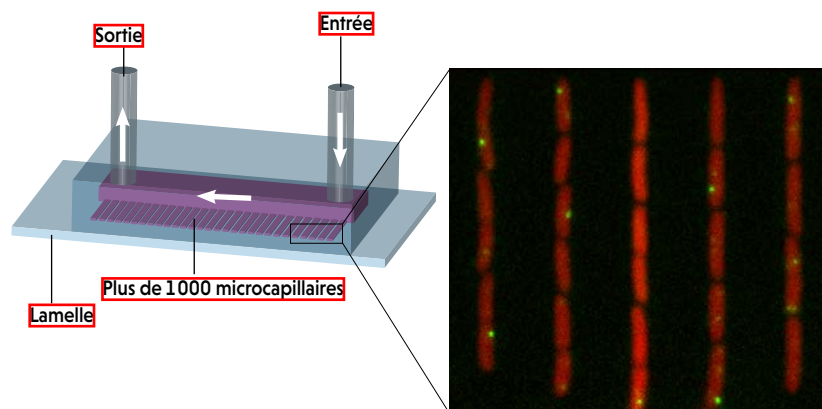
La majorité des mutations sont dues à des erreurs de lecture lors de la réplication – la duplication du chromosome bactérien. Or un système moléculaire reconnaît ces erreurs et les répare. Il est constitué de plusieurs protéines qui agissent séquentiellement. La protéine MutS reconnaît une erreur sur un brin d'ADN, ce qui recrute la protéine MutL, laquelle confirme l'erreur. Puis l'enzyme MutH interagit avec MutL et coupe le brin, qui est ensuite réparé.

Toutefois, si on inactive le gène *mutH*, la réparation n'a pas lieu, bien que tout le jeu des protéines en amont se déroule normalement. La protéine MutL s'accumule alors transitoirement à l'endroit de l'erreur, le temps de la synthèse locale de l'ADN qui, comme la réparation n'a pu se produire, présentera une mutation ponctuelle. Les biologistes ont utilisé cette accumulation pour visualiser les mutations à venir en fusionnant le gène *mutL* avec celui d'une protéine fluorescente, visible quand on l'éclaire à une certaine longueur d'onde.

En suivant des bactéries ainsi modifiées sur 200 générations (trois jours), ils ont détecté 3000 points fluorescents, survenant à une vitesse de 0,32 mutation par

UNE POUPONNIÈRE DE BACTÉRIES

Pour suivre pendant plusieurs jours l'évolution de bactéries isolées, les chercheurs ont cultivé ces cellules dans plus d'un millier de microcapillaires si étroits que les cellules en division y restent alignées. Une cellule mère a été placée au fond de chaque capillaire. À chaque fois qu'elle se divise, elle donne une nouvelle génération : deux cellules filles dont une reste au fond. Ce sont ces cellules « du fond » qui sont observées toutes les 4 minutes pendant 3 jours, ce qui correspond à 200 générations. Les mutations apparaissent sous la forme de points fluorescents.



heure. En revanche, la bactérie non modifiée, capable de réparer son ADN, ne subit que 0,0022 mutation par heure (le spot lumineux y dure plus longtemps quand l'ADN n'est pas réparé, ce qui distingue les erreurs conduisant à des mutations). Ainsi, en 60 heures, une lignée issue d'une cellule mère unique incapable de réparer ses mutations en a accumulé 20, tandis qu'une lignée issue d'une cellule normale n'en a acquis que 0,1 – ce qui montre la performance du système de réparation.

Mais comment vivent des cellules qui ont accumulé 20 mutations en 60 heures? En analysant la vitesse de croissance de chaque lignée, les chercheurs ont estimé leur succès reproducteur. Résultat : 1% seulement des mutations étaient létales. Les mutations non létales, quant à elles, ne modifiaient la vitesse de croissance des lignées que de 0,32%, ce qui est insignifiant. Ainsi, les mutations, dans leur grande majorité, sont neutres ou quasi neutres, c'est-à-dire qu'étant ni favorables ni défavorables à la bactérie, elles ne portent pas à sélection.

Il y a un demi-siècle, le généticien japonais Motoo Kimura proposait sa théorie neutraliste de l'évolution, alors controversée. Si celle-ci est aujourd'hui communément admise, Marina Elez, Lydia Robert et leurs collègues en ont désormais apporté une preuve expérimentale éclatante. On attend avec impatience le suivi des mutations dans un environnement changeant, plus drastique... ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Robert et al., **Mutation dynamics and fitness effects followed in single cells**, *Science*, vol. 359, pp. 1283-1286, 2018.

M. Elez et al., **Seeing mutations in living cells**, *Curr. Biol.*, vol. 20, pp. 1432-1437, 2010.

S. Luria et M. Delbrück, **Mutations of bacteria from virus sensitivity to virus resistance**, *Genetics*, vol. 28, pp. 491-511, 1943.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT!**



N° 487 (mai 18)
réf. PL487



N° 486 (avril 18)
réf. PL486



N° 485 (mars 18)
réf. PL485



N° 484 (févr. 18)
réf. PL484



N° 483 (janv. 18)
réf. PL483



N° 482 (déc. 17)
réf. PL482



N° 481 (nov. 17)
réf. PL481



N° 480 (oct. 17)
réf. PL480



N° 479 (sept. 17)
réf. PL479



N° 478 (août 17)
réf. PL478



N° 477 (juil. 17)
réf. PL477



N° 476 (juin 17)
réf. PL476



À retourner accompagné 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, au tarif unitaire de 9,50 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ x 9,50 € = _____ €

2^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

3^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

4^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

5^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

6^e réf. _____ x 9,50 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2018 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science et de ses partenaires

☐ OUI ☐ NON
☐ 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**

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

GELS HOMOGÈNES... EN APPARENCE !

En ajustant les indices optiques de réfraction, on peut réaliser une préparation constituée de gels différents et qui présente néanmoins une transparence uniforme.

La transparence séduit l'humanité au moins depuis que nos lointains ancêtres ont découvert des perles vitrifiées dans les foyers où ils cuisaient leurs aliments : nos bijoux, nos vitres, nos immenses immeubles ou pyramides de verre sont fils de la cuisine. Mais pourquoi cette fascination ? Était-ce la stupeur de retrouver là, sous la forme solidifiée, les propriétés de l'eau ? Nul ne le sait. Toujours est-il que cet engouement a aussi touché les pionniers de la cuisine note à note, qui ont voulu produire des mets transparents.

Dans la cuisine note à note, les ingrédients ne sont plus les viandes, légumes, fruits, poissons, œufs..., mais des composés purs que l'on assemble pour synthétiser forme, consistance, couleur, odeur, saveur, goût en un mot. Alors que le broyage d'un légume fait une purée opaque, on peut par exemple mélanger un peu de composé odorant à de l'eau et de l'agar-agar, chauffer et couler la solution au fond d'une assiette pour obtenir un voile de gel transparent. Bien sûr, ce n'est pas nouveau : on avait déjà les aspics ou les confitures. Mais que de complications pour les obtenir, alors qu'il suffit de dissoudre quelques gouttes d'un composé odorant concentré (une société nouvelle en vend) dans un liquide que l'on fait gélifier pour obtenir un gel au goût sur mesure et transparent.

On peut produire ainsi des gelées goûteuses sous forme non seulement de blocs, mais aussi de feuilles si l'on coule les gels dans des récipients plats, ou de « spaghettis » si l'on découpe les feuilles ainsi réalisées, une fois que le gel a pris. Et l'on peut ajuster les consistances en jouant sur les agents gélifiants : la gélatine fait des gels tendres, qui fondent dans la bouche, alors que l'agar-agar donne des gels plus

Un assemblage de gels de goûts et consistances différents peut donner une gelée d'aspect homogène si les indices de réfraction de ces composants sont les mêmes.

cassants ; et l'on dispose de toute la gamme des autres agents gélifiants, qui conduisent à des consistances variées.

Reste que nous devons créer du contraste afin de créer des mets qui ont du goût. Ce contraste est essentiel, sans quoi notre appareil sensoriel s'émousse : pensons à l'odeur de tabac que nous sentons dans une pièce où nous entrons, et que nous ne sentons plus après quelques instants.

Empiler des gels (feuilles, spaghettis, cubes...) différents dans un récipient permet de créer des contrastes de goût. Cependant, la transparence est alors perdue, en raison des réflexions de la lumière sur les interfaces de milieux d'indices de réfraction différents. Ces interfaces sont en réalité responsables du blanc des blancs d'œufs en neige, de la couleur crème des... crèmes variées, de la couleur des purées...

Comment éviter les réflexions aux interfaces air-gel ? Par exemple en remplaçant l'air par un liquide dont l'indice de réfraction est le même que celui du gel. Dans un bol (transparent !) où l'on a empilé des éléments de gels tous de même consistance mais de goûts différents, l'ajout d'un tel liquide fera une masse d'apparence homogène, pour peu que l'indice soit bien ajusté.

Ce n'est pas difficile : coulons, sur cet ensemble d'éléments de gel, de l'eau où nous aurons dissous des composés



donnant du goût. En raison de la différence de composition du gel et de l'eau, on peut penser que nous verrons encore les hétérogénéités ; mais si, progressivement, nous dissolvons dans l'eau un composé qui augmente l'indice de réfraction (par exemple du sucre), alors nous obtiendrons deux milieux différents de même indice : nous aurons ainsi rendu la préparation transparente. De sorte que le système sera hétérogène sur les plans du goût et de la consistance, mais homogène – et transparent ! – du point de vue visuel. ■



LA RECETTE

- 1 Dans de l'eau, dissoudre 1 % en masse d'agar-agar, faire bouillir, puis saler un peu, sucrer et dissoudre quelques gouttes de benzaldéhyde ou d'« arôme d'amande amère ». Couler ensuite le liquide dans un grand plat.
- 2 Faire un second gel en procédant comme ci-dessus, en dissolvant quelques gouttes de solutions de linalol, de limonène et de terpinéol, ou d'eau de fleur d'oranger.
- 3 Quand les gels sont pris, utiliser une règle et un couteau pour découper des spaghettis transparents et parfumés.
- 4 Dans des bols transparents ou dans des verres, déposer des spaghettis des deux sortes, puis ajouter de l'eau.
- 5 Ajouter peu à peu du sucre à l'eau jusqu'à « transparisation » des spaghettis.

CE MAGAZINE VOUS PLAÎT ?

OFFRE
1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le Hors-Série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité www.pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du Hors-Série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	59 € Au lieu de 82,80 €	79 € Au lieu de 114,40 €	99 € Au lieu de 174,40 €
VOTRE RÉDUCTION*	- 29 %	- 31 %	- 43 %

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à
POUR LA
SCIENCE**

1 / JE CHOISIS MA FORMULE (merci de cocher)

- ☐ **FORMULE INTÉGRALE** **99 €**
Au lieu de 174,40 €
12 n° du magazine papier
4 Hors-Séries papier
Accès illimité aux contenus en ligne
- ☐ **FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE** **79 €**
Au lieu de 114,40 €
12 n° du magazine papier
4 Hors-Séries papier
- ☐ **FORMULE PAPIER** **59 €**
Au lieu de 82,80 €
12 n° du magazine papier

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/12/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr. Conformément à la loi « Informatique et libertés » du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Photos non contractuelles.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

PAG18STD

☐ M. ☐ Mme
Nom : Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville :
Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)@.....
J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

Signature obligatoire :

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 – APE 5814 Z



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.52

TRIX

Le squelette de ce *Tyrannosaurus rex* femelle est le premier jamais exposé en France. L'équipe néerlandaise qui l'a découvert aux États-Unis lui a donné ce nom en hommage à la reine Beatrix.

P.88

SPOT-4

Le satellite *Spot-4* (1998-2013) a été mis en orbite à 822 kilomètres d'altitude. Du fait des frottements de l'air, il perdait 2,5 mètres par jour. Placé à 250 kilomètres, il aurait perdu 5 kilomètres d'altitude par jour. Sa durée de vie n'aurait alors été que de quelques semaines.

P.7

« 60% des personnes interrogées pensent que la girafe n'est pas menacée, alors que celle de Nubie a perdu 97% de sa population en 35 ans »

FRANCK COURCHAMP
écologue au CNRS

P.93

200

La bactérie *Escherichia coli* représente 80% du microbiote intestinal aérobie humain. Elle produit une génération de descendantes toutes les 20 minutes, soit près de 200 en trois jours.

P.38

40,5 KILOGRAMMES

C'est la masse de laine retrouvée sur le mouton Chris, en Australie, qui a vécu seul dans la nature pendant cinq ans. Il arrivait à peine à voir et se déplaçait avec difficulté. Pour les moutons domestiqués, la tonte pratiquée par l'homme est vitale.

P.80

UN SEUL PIXEL

Pour tromper un réseau neuronal « profond » ayant appris à reconnaître des images, il suffit parfois de changer un seul pixel. Et le système prend alors des oiseaux pour des grenouilles et des bateaux pour des avions...

P.66

2040

Avec des vitesses de fonte accélérées, les glaces estivales de l'Arctique pourraient bien disparaître d'ici à 2040, c'est-à-dire soixante ans plus tôt que ne le prévoient les climatologues!

L'Observatoire de Paris propose deux Diplômes d'Université:

LUMIÈRES SUR L'UNIVERS

Formation en ligne en astrophysique - Niveau (L1-M1) - Diplômante

- Cours et nombreux exercices interactifs - **Tutorat personnel individualisé** assuré par des **astrophysiciens professionnels**.
- Ouvert à tous (niveau bac minimum) : passionnés, animateurs, étudiants...
- Validation possible sous forme d'un Diplôme d'Université ou de Crédits de Licence ou de Master (ECTS)

Des parcours spécialisés adaptés à tous

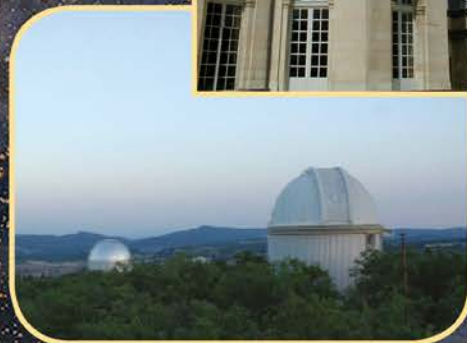
Des étoiles aux planètes : niveau L1-L2
Cosmologie et Astrophysique extragalactique : niveau L2
Mécanique Céleste : niveau L3
Fondamentaux pour l'astronomie et l'astrophysique : niveau L3
Sciences Planétaires : niveau L3
Fenêtres Sur l'Univers : niveau M1
Instrumentation, chaîne de mesure et projets : niveau M1

Inscriptions 2018 - 2019 ouvertes jusqu'au 3 Septembre 2018 :

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Contenus visibles ici : <https://media4.obspm.fr/dulu>

contact.dulu@obspm.fr



EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS

Formation en présentiel ou à distance en vidéo, Niveau L1, Diplômante

Objectifs

Acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Un stage d'observation de 4 nuits est proposé à l'Observatoire de Haute Provence en été (en option et sous conditions ; nombre de places limitées).

Contenu

Cours le mardi soir de 17h à 20h à Paris : Mécanique Céleste, Ondes et instruments, Histoire, Soleil, Planétologie comparée, Traitement de données, Étoiles et milieu interstellaire, Galaxies, Cosmologie, Epistémologie.

Ces cours peuvent être suivis en présentiel ou à distance en vidéo (en direct ou en différé).

Publics concernés

Cette formation s'adresse à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 3 septembre sur le site d'inscription en ligne :

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Un stage de travaux pratiques est proposé en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limitées).

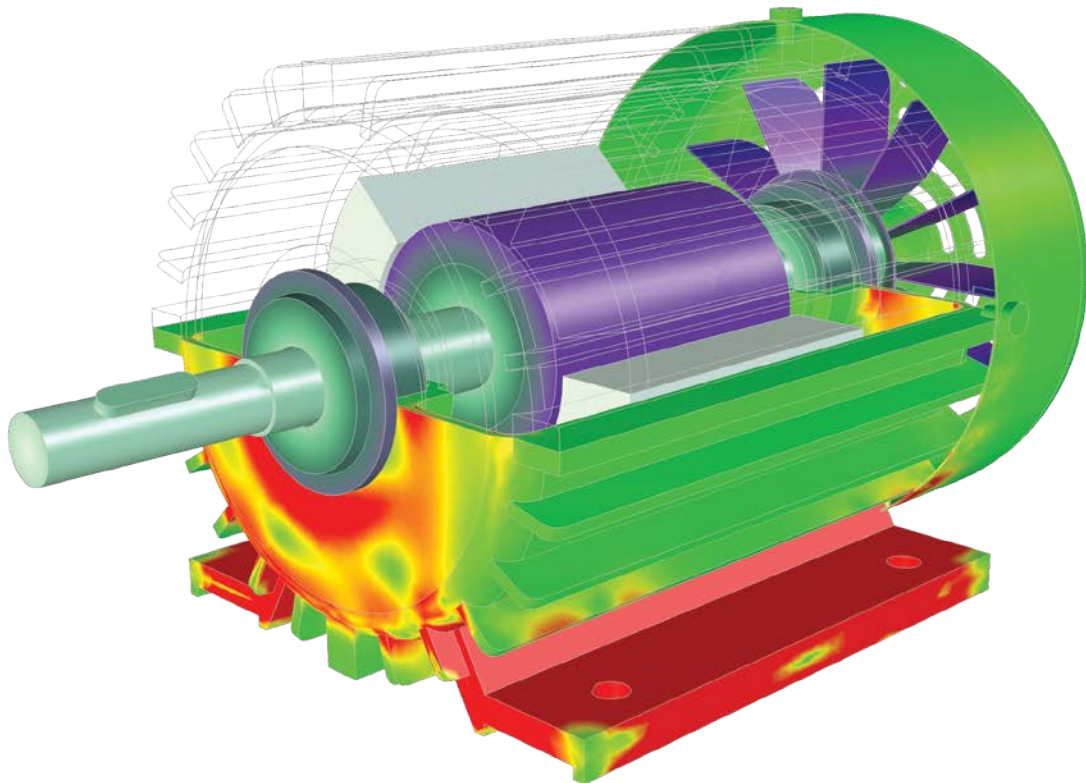
Renseignements

<http://ufe.obspm.fr/Diplomes-d-Universite/DU-en-presentiel>

contact.duecu@obspm.fr

Téléphone : 01.45.07.78.87

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 arrivé, 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