



SCIENCE



AOÛT 2018
N° 490

ARCHÉOLOGIE
**L'ÉNIGME
DES VIKINGS
DU GROENLAND**

PHYSIQUE
**MATIÈRE NOIRE :
SUR LA PISTE
DES AXIONS**

GÉOLOGIE
**FAUT-IL EXPLOITER
LES GRANDS
FONDS MARINS ?**

La biologie du nombre d'or

QUAND LES PLANTES FONT DES MATHS

BEL: 7,6 € - CAN: 11,6 € CAD - DOMUS: 7,7 € - Réunion/A: 9,9 € - ESP: 7,6 € - GR: 7,6 € - ITA: 7,6 € - LUX: 7,6 € - MAR: 6,4 € MAD - TOM: 1,00 € XPF - PORT: COINT: 7,6 € - CH: 12,7 € CHF - TUN: 5,91 TND

SANTÉ PUBLIQUE

LES NOUVELLES ARMES
POUR SE DÉBARRASSER
DES MOUSTIQUES



L'actualité de la recherche à l'IRSN



Abonnez-vous à la lettre numérique

AKTIS

Toutes les infos sur irsn.fr/aktis

irsn.fr/aktis-EN

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

Stagiaires: Claire Heitz et Coraline Madec

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

Révisseuse: 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:

Daniel Beysens, Anthony Boccaletti, Maud Bruguière, Nicolas Combe, Aline Desesquelles, Jean-Philippe Duvel, Andrea Fantuzzi, Hélène Gélot, Bleuenn Guéguenn, Mathieu Guigüe, Jean-Louis Hartenberger, Mathilde Jauzac, François Lé, Eric Marois, Xavier Müller, Christophe Pichon, William Rutherford, Frédéric Simard

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 » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris. © Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

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

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

LES BONNES DISPOSITIONS DES PLANTES

Dans l'univers des nombres, les inégalités sont aussi criantes que dans le nôtre. Certains nombres, comme π et e (la base des logarithmes népériens), ont acquis une célébrité largement méritée. La plupart des autres, comme 182 ou 5,47, croupissent dans un anonymat presque complet. D'autres encore, comme 1, 2 ou 3, sont si omniprésents et indispensables qu'on finit par ne plus les voir. Et il existe aussi des nombres de statut intermédiaire et ayant une réputation parfois douteuse. Tel est le cas du nombre d'or.

Ce nombre, égal à environ 1,618 (son expression exacte est $(1+\sqrt{5})/2$), a été qualifié de divine proportion à la Renaissance. Il a été considéré comme un canon de l'esthétique et de l'architecture, et un parfum d'ésotérisme règne autour de lui. Mais l'intérêt qu'on lui porte a aussi quelques bonnes raisons. Le nombre d'or intervient en effet dans divers contextes des mathématiques et de la physique, et il se manifeste dans certaines structures remarquables que construit la nature. Il en est ainsi, chez les végétaux, de la disposition des feuilles autour des tiges - ce qu'on appelle, en termes plus savants, la phyllotaxie.

Cette présence du nombre d'or dans les structures botaniques est connue depuis longtemps, mais elle est restée mystérieuse jusqu'au début des années 1990, quand des physiciens français ont réalisé une expérience et conçu un modèle produisant des motifs semblables à ceux des plantes. Depuis, la balle est passée dans le camp des biologistes, et parmi eux les auteurs de l'article que nous consacrons aux découvertes récentes sur le sujet (voir pages 26 à 35). Ces chercheurs élucident les mécanismes intimes, à l'échelle cellulaire et moléculaire, par lesquels les plantes construisent des structures aussi ordonnées. Aujourd'hui, on ne sait pas encore tout sur la façon dont les plantes font, à l'image de Monsieur Jourdain et sa prose, des mathématiques sans le savoir. Mais on en sait assez pour que la question ait perdu son ésotérisme. ■

S OMMAIRE

N° 490 /
Août 2018

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Du nouveau sur la piste des contrôleurs du VIH
- La fonte de l'Antarctique s'accélère
- Les premiers tétrapodes, sortis d'eaux saumâtres?
- Une photosynthèse efficace sous infrarouge
- Alzheimer: l'effet des bêta-amyloïdes
- Récupérer l'eau de l'atmosphère en plein désert
- Des virus géants fabricants de gènes
- La matière baryonique de l'Univers enfin retrouvée
- Ce que révèlent les outils d'Ötzi

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Le double héritage de Bletchley Park

Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

La tangente au présent et l'ordinateur quantique

Gérald Bronner



En couverture:
© Shutterstock.com/ Paggi Eleanor

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



P. 36

ARCHÉOLOGIE

L'ÉNIGME DES VIKINGS DU GROENLAND

Zach Zorich

Après avoir mené une vie prospère au Groenland pendant cinq siècles, les Vikings ont subitement quitté l'île au xv^e siècle. De nouvelles découvertes archéologiques expliquent leur mystérieuse disparition.



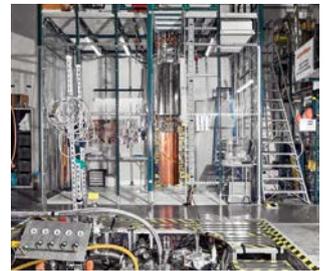
P. 48

SANTÉ PUBLIQUE

DE NOUVELLES ARMES CONTRE LES MOUSTIQUES

Dan Strickman

Les maladies transmises par les moustiques tuent plus que les guerres. Mais l'espoir est permis: pour neutraliser ces insectes, les scientifiques mettent au point tout un arsenal de méthodes innovantes: manipulations génétiques, pièges efficaces...



P. 56

PHYSIQUE DES PARTICULES

MATIÈRE NOIRE: LA COTE DE L'AXION MONTE

Leslie Rosenberg

Alors que le candidat favori pour expliquer la masse cachée de l'Univers est en perte de vitesse, celui qui porte le nom d'axion gagne en popularité. Dédiée à sa recherche, l'expérience ADMX traque désormais cette particule.



P. 64

Océanographie

BIENTÔT DES MINES AU FOND DES OCÉANS?

Thomas Peacock
et Matthew H. Alford

Les grands fonds océaniques comportent de riches gisements de métaux, que l'on s'appête à exploiter. Scientifiques et organismes régulateurs recherchent des solutions pour limiter les dégâts environnementaux.



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. 72

HISTOIRE DES SCIENCES

**EMMY NOETHER,
LE CENTENAIRE
D'UN THÉORÈME**

David E. Rowe

Figure dominante de l'école allemande d'algèbre durant les années 1920-1933, Emmy Noether a aussi marqué le développement de la physique théorique en démontrant qu'à toute symétrie continue d'un système physique correspond une grandeur conservée.



P. 26

BIOLOGIE VÉGÉTALE

**QUAND LES PLANTES
FONT DES MATHS**

Teva Vernoux, Christophe Godin et Fabrice Besnard

Spirales croisées, arrangement régulier des feuilles le long des tiges, organisation des écailles de pommes de pin... Les végétaux fabriquent des géométries complexes qui fascinent depuis longtemps. On commence aujourd'hui à comprendre les mécanismes biologiques qui produisent ces motifs géométriques.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

**CES GRILLES DE TIGES
ARTICULÉES
SONT-ELLES RIGIDES?**

Jean-Paul Delahaye

Comment savoir si un assemblage plan de tiges articulées est déformable ou rigide? En appelant à la rescousse la théorie des graphes, qui fournit des algorithmes efficaces.

P. 86

ART & SCIENCE

**Autant en emportent
les données**

Loïc Mangin



P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

**Des ondes cobra
avec des bâtonnets**

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION

**Les dinosaures
changent d'arbre**

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

**De l'intérêt
de défaire et refaire**

Hervé This

P. 98

À PICORER

A

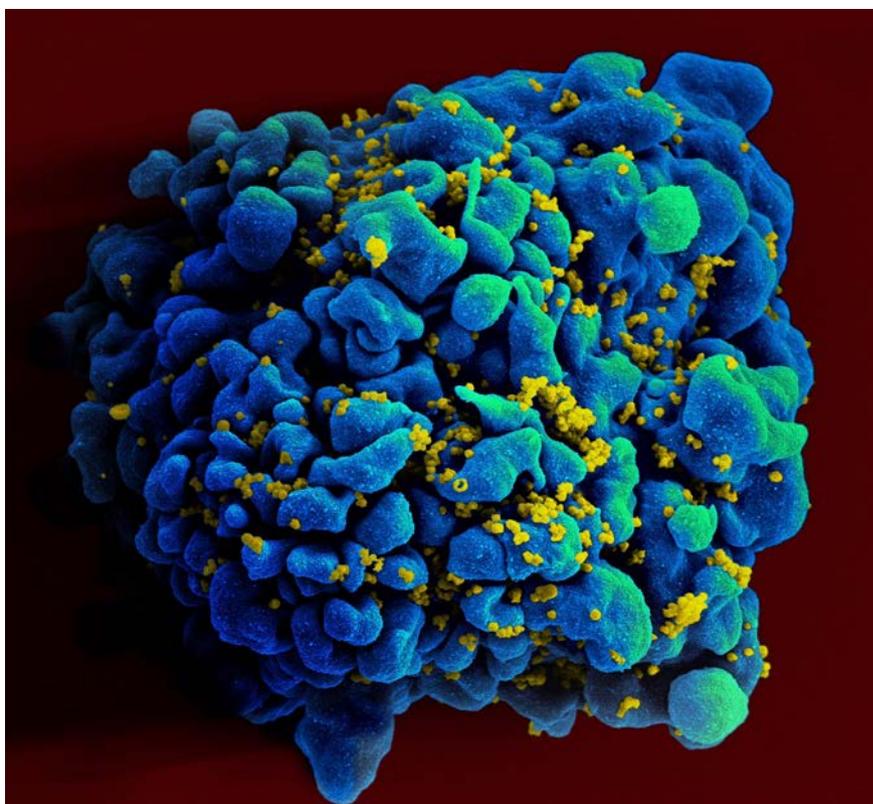
ACTUALITÉS

P.6 Échos des labos
 P.18 Livres du mois
 P.20 Agenda
 P.22 Homo sapiens informaticus
 P.24 Cabinet de curiosités
 sociologiques

IMMUNOLOGIE

DU NOUVEAU SUR LA PISTE DES CONTRÔLEURS DU VIH

Un lymphocyte T humain (en bleu) infecté par le virus du sida (en jaune). Les lymphocytes T CD4+ sont les premières cibles du virus. Mais chez les contrôleurs du VIH, ils sont malgré tout présents en nombre...



Chez certains porteurs du virus du sida, des cellules immunitaires connues pour alerter leurs consœurs se sont révélées capables de tuer elles-mêmes les cellules infectées.

A lors que le virus du sida (VIH) a encore entraîné la mort de un million de personnes dans le monde en 2016, selon l'Organisation mondiale de la santé, un petit nombre d'individus infectés résistent au virus sans l'aide d'une quelconque thérapie. Ces « contrôleurs du VIH », recrutés au niveau national dans la cohorte ANRS Codex, intéressent les chercheurs depuis longtemps, mais les mécanismes qui leur confèrent cette résistance sont encore loin d'être bien compris. Les équipes de Lisa Chakrabarti, au

laboratoire Virus et immunité, à l'institut Pasteur à Paris, et de Stéphanie Gras, à l'université Monash, en Australie, viennent d'en découvrir un nouveau. Elles ont montré que des cellules du système immunitaire connues habituellement comme lanceuses d'alerte, des lymphocytes T CD4+, deviennent capables de tuer des cellules infectées par le VIH lorsqu'elles présentent certaines caractéristiques.

Les lymphocytes T CD4+ sont des acteurs clés du système immunitaire: ils envoient des signaux qui déclenchent la production d'anticorps dans d'autres cellules ou qui alertent des cellules tueuses,

tels les lymphocytes T CD8+, de la présence de cellules infectées à éliminer. Ils gardent aussi une mémoire des agents pathogènes rencontrés. Par ailleurs, à partir des années 1980, plusieurs travaux sur diverses maladies virales ont suggéré qu'ils étaient aussi capables d'intervenir directement pour tuer les cellules infectées.

Toutefois, dans le cas du VIH, ces cellules étant les premières cibles du virus, on a longtemps pensé qu'elles ne constituaient pas la meilleure piste pour contrôler son expansion. Les chercheurs se sont donc concentrés sur les lymphocytes T CD8+ des contrôleurs du VIH et, de fait, ils ont mis en évidence chez ces patients une population spécifique de cellules plus efficaces que les autres pour reconnaître le virus et ses mutants. Mais était-ce le seul mécanisme à l'œuvre?

Manifestement non. Depuis quelques années, en effet, plusieurs études suggèrent que des lymphocytes T CD4+ contribueraient aussi à l'élimination des cellules infectées chez les contrôleurs du VIH, et Lisa Chakrabarti et ses collègues apportent à présent une confirmation de cette hypothèse en révélant le mécanisme qui transforme ces cellules en tueuses.

En 2016, l'équipe avait déjà franchi une étape. Elle avait montré que des lymphocytes T CD4+ des contrôleurs du VIH sont particulièrement efficaces pour reconnaître un fragment très conservé de la capsid du virus, le peptide Gag293, grâce à des récepteurs étonnants. Lors d'une infection, des cellules immunitaires capturent les virus rencontrés et les digèrent, puis en présentent les fragments à d'autres cellules immunitaires, dont les lymphocytes T CD4+. Ces cellules reconnaissent alors les fragments à l'aide de récepteurs, les TCR. Chaque humain exprime près de 20 millions de versions de ces récepteurs parmi l'énorme répertoire des TCR (>10¹⁵), et deux individus partagent environ 5% de versions, nommées « TCR publics ». Or les chercheurs ont détecté une forte fréquence de TCR publics chez les contrôleurs du VIH. De plus, ces TCR publics se sont révélés capables de reconnaître le fragment viral même si la molécule qui le leur présentait – HLA – variait. Comme les TCR, les molécules HLA sont propres à chaque individu et, en général, un TCR ne reconnaît qu'un type de HLA. Or certains des TCR publics sont capables d'identifier le peptide Gag293 présenté par cinq molécules HLA différentes !

Dans leur dernière étude, les chercheurs ont décrit le mécanisme qui rend ces TCR publics si performants. Par cristallographie, ils ont montré que ces TCR reconnaissent une région précise du peptide Gag293 et que celle-ci n'est pas modifiée lorsqu'elle est présentée par l'un ou l'autre type de HLA. Par ailleurs, ces TCR entrent surtout en contact avec le peptide et peu avec HLA, ce qui limite l'influence de cette molécule. Enfin, transférés à des lymphocytes T CD4+ et T CD8+ de donneurs sains, ces TCR les rendaient capables de tuer des cellules infectées par le VIH en culture. Les chercheurs tentent maintenant de mettre au point un traitement par transfert de ces TCR. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

M. Galperin *et al.*, *Science Immunology*, vol. 3(24), article eaat0687, 2018

La fonte de l'Antarctique s'accélère

À l'occasion des 60 ans de la création du Comité scientifique de la recherche en Antarctique, une équipe internationale de chercheurs a dressé le bilan de l'évolution du continent blanc. Valérie Masson-Delmotte, climatologue et coprésidente du groupe de travail n° 1 du Giec, commente ces résultats.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE
climatologue au LSCE,
laboratoire des sciences
du climat et de
l'environnement du CEA

Quelle est la situation de l'Antarctique ?

L'Antarctique abrite près de 90 % des glaces terrestres. En 2014, le rapport du Giec résumait nos connaissances sur leur évolution : les pertes étaient estimées à près de 30 milliards de tonnes par an, en moyenne, pour la période 1992-2001 et 147 milliards pour la période 2002-2011. Mais ces valeurs étaient marquées par des incertitudes importantes et une forte variabilité régionale qui restaient à préciser.

Quelles sont les nouvelles conclusions ?

Grâce à la prise en compte des données satellitaires précises, les chercheurs montrent que, depuis 25 ans, le rythme de la fonte a été multiplié par 5 dans la région de la péninsule Antarctique (de 7 milliards de tonnes par an en 1992 à 33 milliards de tonnes en 2017) et par trois dans l'Ouest de l'Antarctique, où les pertes sont passées de 53 milliards de tonnes par an à 159 milliards.

Les incertitudes restent assez grandes pour la partie orientale du continent, du fait des difficultés à estimer la distribution spatiale et temporelle de l'enneigement. Mais le bilan de masse indique une certaine stabilité (voire une légère augmentation de l'enneigement).

Au total, l'Antarctique aurait perdu près de 2 700 milliards de tonnes de glace en 25 ans, à un rythme qui s'est accru au cours des dernières années.

Quelles sont les conséquences de cette fonte importante ?

L'effet le plus direct concerne la hausse du niveau des océans : l'apport d'eau de fonte a conduit à une élévation de quasiment 8 millimètres en 25 ans. Rappelons que l'Antarctique abrite assez d'eau pour provoquer une hausse du niveau des océans de 58 mètres ! Il est donc crucial de comprendre

sa dynamique actuelle et d'anticiper comment elle évoluera.

Avec plusieurs collègues, vous posez la question du futur de l'Antarctique en comparant deux scénarios antagonistes. Comment avez-vous procédé pour réaliser cette étude ?

Nous nous sommes projetés en 2070, c'est-à-dire dans à peine 50 ans, pour montrer que le destin de l'Antarctique peut être très différent d'un scénario à l'autre selon les décisions que nous prenons aujourd'hui.

La fonte des glaces est directement liée au réchauffement climatique dû aux émissions anthropiques de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. Nous avons donc comparé un scénario où les rejets de gaz à effet de serre ne sont pas contrôlés et continuent au rythme actuel avec un autre où une politique forte de maîtrise de ces émissions est mise en place. Nous avons alors comparé des indicateurs physicochimiques (température, pH et niveau des océans, etc.) en utilisant des modèles climatiques, mais aussi d'autres facteurs tels que la pêche et le tourisme dans cette région, l'arrivée d'espèces invasives, etc.

Quels sont les résultats ?

L'élévation de la température atmosphérique moyenne en Antarctique (par rapport à 1986-2005, la période de référence) est de 0,9 °C dans le scénario optimiste et de 3 °C dans l'autre. La fonte des glaces contribue à, respectivement, 6 et 27 centimètres de la hausse du niveau des océans. Dans ce dernier scénario, on s'attend aussi à voir augmenter, en Antarctique, l'activité humaine (pêche, exploitation minière, tourisme...) et une modification du biotope.

Avec cette étude, nous avons voulu souligner le fait que, malgré les très nombreux défis, tout n'est pas joué. Il est encore possible d'agir à l'échelle internationale pour limiter les conséquences de l'activité humaine sur le climat de la planète. ■

Collaboration IMBIE, *Nature*, vol. 558, pp. 219-222, 2018 ; S. R. Rintoul *et al.*, *ibid.*, pp. 233-241

PALÉONTOLOGIE

LES PREMIERS TÉTRAPODES, SORTIS D'EAUX SAUMÂTRES?

Avant leur conquête de la terre ferme, les tétrapodes s'étaient adaptés aux marais côtiers, estuaires, lagunes et autres milieux aquatiques de salinité variable.

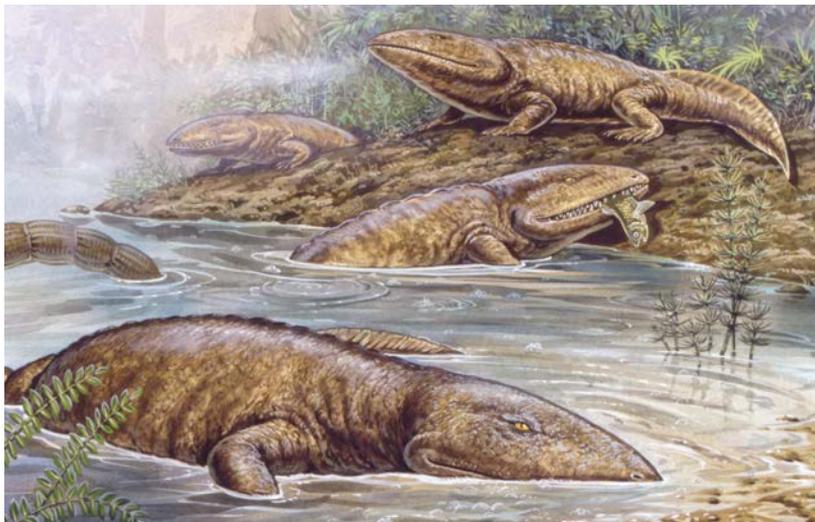
Il y a 375 millions d'années, voire avant, des tétrapodes originaires de milieux aquatiques ont commencé à coloniser les terres émergées. Une équipe franco-chinoise dirigée par Jean Goedert et Christophe Lécuyer, de l'École normale supérieure de Lyon, vient de montrer que cette « sortie des eaux » s'est effectuée à partir des estuaires, lagunes, marais et autres milieux de salinité variable.

Des fossiles suggèrent que c'est vers la fin du Dévonien (419,2 à 358,9 millions d'années), que s'est produite la diversification des premiers tétrapodes vivant sur la terre ferme. Ces animaux à quatre membres munis de doigts, dont nous faisons partie, descendent des tétrapodes aquatiques, qui descendent eux-mêmes des sarcoptérygiens, les poissons à nageoires charnues.

Au Dévonien, tandis que le supercontinent du Gondwana dominait dans le froid du Sud, de plus petits continents, la Sibéria et la Laurussia, s'étendaient plus au nord et sous les tropiques. À cette époque, *Ichthyostega* et *Acanthostega*, les premiers tétrapodes sans doute capables d'une forme de reptation à terre, vivaient dans les chaleurs du Groenland. Comme on les a découverts dans les « vieux grès rouges » groenlandais, réputés produits par le dépôt de sédiments fins dans des bassins sédimentaires terrestres, on a supposé que les premiers tétrapodes terrestres et la faune associée vivaient dans des milieux d'eau douce. C'est cette idée, qui s'est progressivement imposée malgré la découverte de quelques fossiles donnant une autre impression, que l'équipe de Jean Goedert et de Christophe Lécuyer a voulu tester.

Les chercheurs ont étudié les rapports de concentrations d'isotopes de l'oxygène, du soufre et du carbone ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) dans plusieurs fossiles de tétrapodes du Dévonien et dans des vertébrés actuels. Ces rapports isotopiques varient selon les conditions qui règnent dans le milieu de vie des organismes. Ainsi, les vertébrés marins ont des rapports $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ compris entre 14,8 et 22,8‰ dans les os et entre 17,4 et 19,8‰ dans les muscles, des valeurs proches du rapport constaté dans l'eau de mer (21‰).

Ces rapports dépendant des concentrations de sulfates dans l'eau, ils sont nettement



Cette restitution d'*Ichthyostega* montre cet organisme du Dévonien groenlandais dans l'une des lagunes tropicales où, semble-t-il, vivaient ces premiers vertébrés à avoir arpenté les terres.

21 %

C'EST LA VALEUR DU RAPPORT ISOTOPIQUE $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ DANS L'EAU DE MER ACTUELLE. ELLE AURAIT ATTEINT 25 % AU DÉVONIEN. DANS LES OS DES ORGANISMES MARINS, CE RAPPORT ISOTOPIQUE A DES VALEURS VOISINES.

supérieurs à ceux qu'on trouve chez les vertébrés d'eau douce. Or les chercheurs ont constaté que le rapport $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ dans les os de tétrapodes dévoniens de Chine et du Groenland varie entre 12,5‰, valeur correspondant plutôt à de l'eau douce, et 31,8‰, valeur correspondant à de l'eau de mer. Ces variations sont similaires à celles observées chez les poissons d'estuaire. En revanche, le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, marqueur caractéristique du régime alimentaire, s'est révélé comparable à celui de prédateurs marins, tels les requins. Quant au rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, les valeurs trouvées sont bien plus basses que celles d'eaux de mer très oxygénées, ce qui suggère un environnement pauvre en oxygène, et elles sont par ailleurs incompatibles avec un milieu d'eau douce.

La conclusion qui s'impose est que les tétrapodes du Dévonien étaient des animaux adaptés à la salinité variable des estuaires, lagunes et autres marais saumâtres. Ce résultat confirme l'idée que les tétrapodes terrestres descendent de tétrapodes aquatiques qui se sont d'abord adaptés à ce type de milieux avant de survivre à des séjours terrestres brefs, puis de plus en plus longs. ■

FRANÇOIS SAVATIER

J. Goedert et al., *Nature*, vol. 558, pp. 68-72, 2018

UNE LIGNÉE DE PANDAS ÉTEINTE

Le panda géant est une espèce peu diversifiée : comptant moins de 3 000 individus à l'état sauvage, elle se prête mal aux analyses génétiques. Albert Min-Shan Ko, de l'Académie chinoise des sciences, à Pékin, et ses collègues ont alors eu l'idée d'étudier l'ADN d'un crâne de panda vieux de 22 000 ans, découvert dans la grotte de Cizhutuo en 2014. Ce fossile s'est révélé appartenir à une lignée de pandas tropicaux aujourd'hui éteinte. De plus, il a permis de dater à 10 millions d'années la divergence évolutive entre les pandas géants et les ours, leurs proches cousins.

CURIOSITY ET LE CARBONE MARTIEN

En 1976, les sondes Viking avaient trouvé très peu de matière organique à la surface de Mars. Cette absence s'expliquait en partie par la présence de sels de perchlorate très réactifs et capables de décomposer la matière organique. Maintenant, grâce à l'analyseur SAM plus précis du rover Curiosity, Caroline Freissinet, du Latmos, et ses collègues ont étudié des échantillons d'argilite vieux de trois milliards d'années. Ils y ont trouvé des thiophènes, des molécules carbonées cycliques.

VERS 120 ANS ET AU-DELÀ ?

Même si cela reste rare, de plus en plus de personnes vivent au-delà de 105 ans. Si le risque de mourir dans l'année augmente avec l'âge, Elisabetta Barbi, de l'université La Sapienza, à Rome, et ses collègues ont montré qu'après 105 ans, ce risque se stabilise à 47 %. Ce taux de mortalité semble également diminuer au fil des générations. La limite biologique de la longévité humaine pourrait donc être repoussée. Vivrons-nous un jour jusqu'à 140 ans ?

LE BOUT D'ADN QUI FAIT LE MÂLE

Chez l'humain comme chez les autres mammifères, le sexe d'un individu est déterminé par ses gènes. Si la mise en place de l'appareil reproducteur féminin se fait spontanément au cours du développement embryonnaire, celle de l'appareil masculin nécessite, elle, l'expression de gènes particuliers, notamment de *Sox9*. Robin Lovell-Badge, de l'institut Francis-Crick, à Londres, et son équipe viennent de découvrir que la suppression d'une petite séquence d'ADN, *Enh13*, qui régule l'expression de *Sox9*, suffit à bloquer la mise en place des testicules et provoque, de ce fait, l'apparition d'ovaires chez une souris mâle.

Dans les années 1990, Robin Lovell-Badge et son équipe travaillaient déjà sur la détermination du sexe et avaient découvert que les cellules testiculaires n'apparaissent qu'en présence d'un signal moléculaire spécifique codé par le gène *SRY*. Ce gène, situé sur le chromosome Y, active à son tour l'expression du gène *Sox9*, sur un autre chromosome. Celui-ci contrôle alors l'expression de milliers de gènes et constitue le « chef d'orchestre » de la masculinisation de l'appareil reproducteur. Toutefois, le lien entre le gène *SRY* et le gène *Sox9* restait mal connu.

L'équipe de Robin Lovell-Badge a récemment montré chez la souris que la protéine *SRY*



À droite, une souris femelle ; à gauche, une souris mâle dont la séquence *Enh13* est non fonctionnelle. Les deux souris ont des organes génitaux externes féminins.

(codée par le gène du même nom) se fixe sur une petite séquence d'ADN, *Enh13*, et que cette fixation entraîne l'expression du gène *Sox9*. De ce fait, l'altération de *Enh13* conduit à elle seule, chez de jeunes souris mâles, au développement d'ovaires ! Des résultats d'autant plus intéressants que la séquence *Enh13* existe chez l'homme. « Il y a fort à parier que *Enh13* joue un rôle semblable chez l'humain et qu'il est impliqué dans de nombreux troubles du développement sexuel », affirme Francis Poulat, chercheur à l'Institut de génétique humaine de Montpellier et coauteur de cette étude. ■

CORALINE MADEC

R. Lovell-Badge *et al.*, *Science*, en ligne, 14 juin 2018

LE SOMMEIL DES OTARIES

L'otarie à fourrure du Nord est un animal semi-aquatique qui a la particularité de dormir en mer, à la façon des dauphins. Elle garde un hémisphère actif pendant que l'autre est au repos et ne présente pas de phase de sommeil dit paradoxal. À terre, le sommeil de l'otarie est bilatéral (les deux hémisphères sont au repos) avec des phases de sommeil paradoxal. De nombreuses hypothèses sont formulées sur le rôle du sommeil paradoxal chez les mammifères, comme l'apprentissage ou la mémorisation. Des rats privés de sommeil paradoxal manifestent des troubles. Ils ont des phases de sommeil paradoxal plus longues quand ils récupèrent après une privation. Or Oleg Lyamin, de l'université de Californie à Los Angeles, et ses collègues ont montré que l'otarie ne présentait pas de



Le cerveau des otaries à fourrure du Nord se comporte différemment selon qu'elles dorment en mer ou sur terre.

phase de récupération même après des semaines en mer sans sommeil paradoxal. Ces chercheurs suggèrent que, sur terre, le sommeil paradoxal réchaufferait le cerveau inactif avant l'éveil de l'otarie. Il serait inutile en mer, puisqu'un hémisphère reste toujours actif. ■

CLAIRE HEITZ

O. I. Lyamin *et al.*, *Current Biology*, vol. 28(12), pp. 2000-2005, 2018

UNE PHOTOSYNTHÈSE EFFICACE SOUS INFRAROUGE

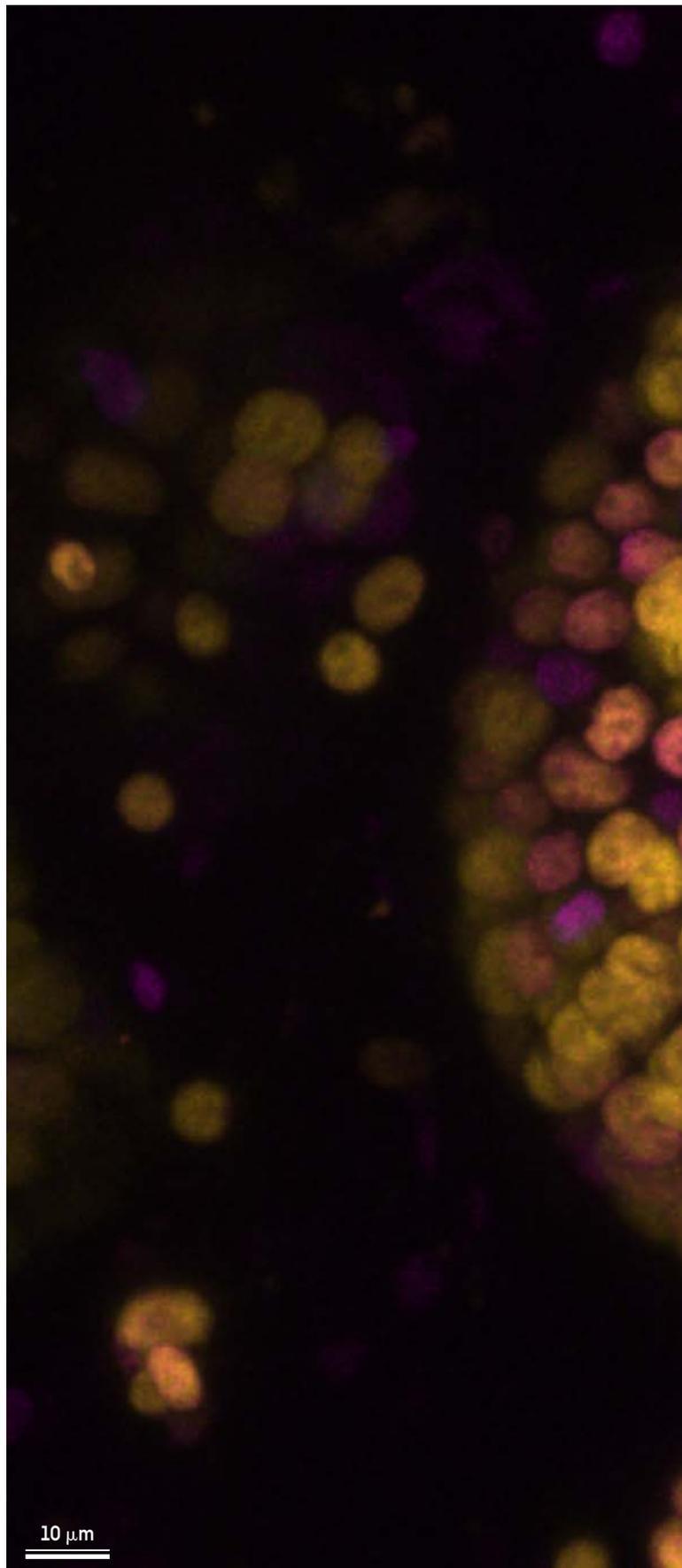
À l'ombre, rien ne pousse? Pas sûr. On a longtemps pensé que la photosynthèse, le processus par lequel les végétaux, les algues et les cyanobactéries convertissent de l'énergie lumineuse en énergie chimique, n'était possible qu'en lumière visible (de longueur d'onde comprise entre 400 et 700 nanomètres à peu près).

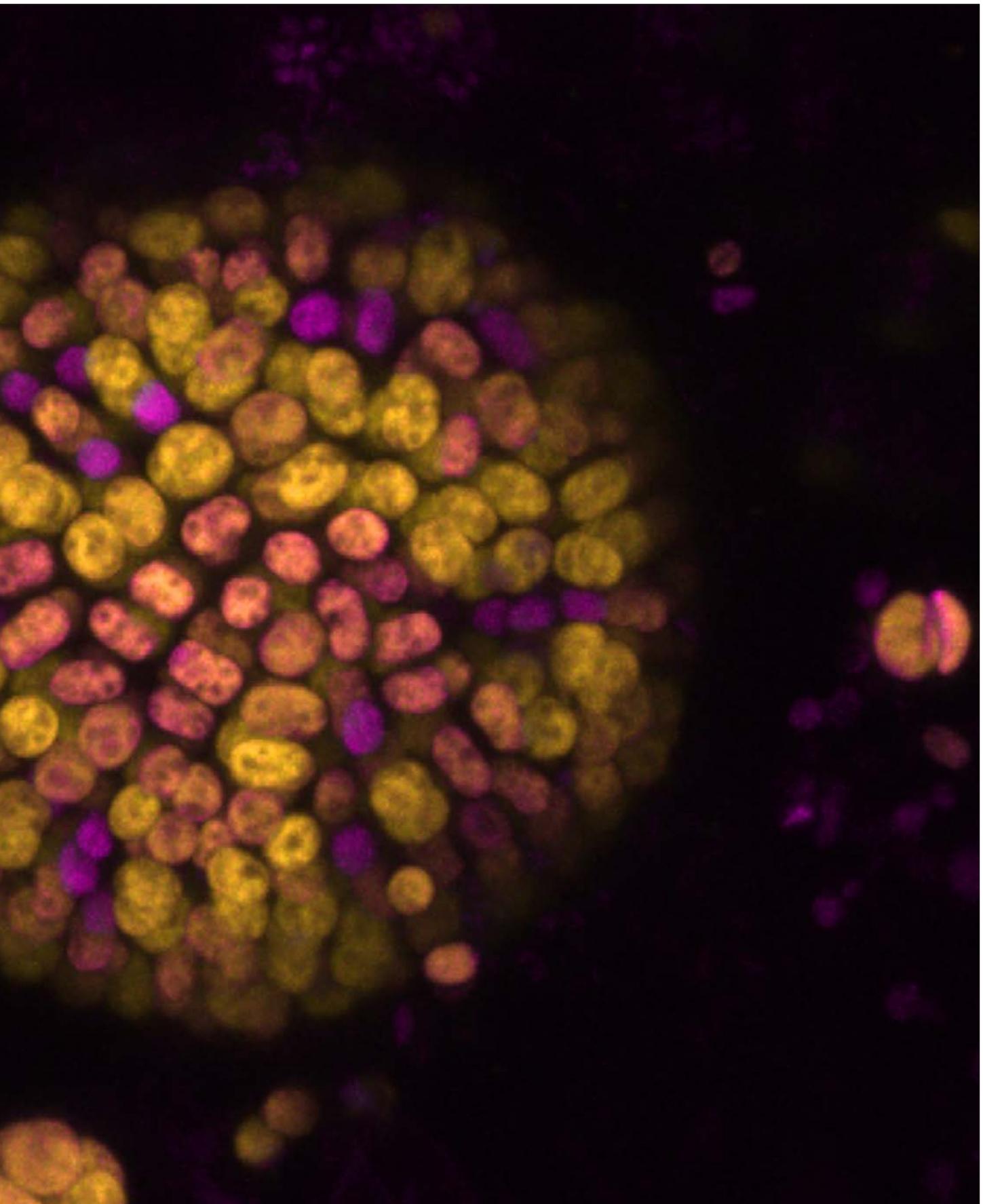
La chlorophylle *a* est une molécule clé de cette photosynthèse: sous une lumière rouge, entre 680 et 700 nanomètres de longueur d'onde, elle perd un de ses électrons et amorce ainsi la chaîne de production d'énergie chimique. Jusqu'à récemment, on pensait qu'elle était la seule capable de le faire. Or Dennis Nürnberg, à l'Imperial College de Londres, et ses collègues viennent de montrer que certaines *Chroococcidiopsis thermalis*, des cyanobactéries très répandues, réalisent la photosynthèse en partant d'un autre pigment connu, la chlorophylle *f*. Celle-ci peut céder un électron sous un rayonnement infrarouge à 750 nanomètres de longueur d'onde (sur la photographie au microscope ci-contre, en fausses couleurs, les cyanobactéries *C. thermalis* réalisant la photosynthèse classique, en magenta, et celles exprimant la photosynthèse avec la chlorophylle *f*, en jaune). Cette chlorophylle permet donc de réaliser une photosynthèse à basse énergie (les rayonnements de plus grandes longueurs d'onde étant moins énergétiques).

Cette découverte est fondamentale pour la recherche de vie extraterrestre, car elle conduit à revoir à la baisse la «limite rouge», l'énergie lumineuse minimale requise pour qu'il y ait photosynthèse. Or 70% des étoiles de la Voie lactée sont des naines rouges, émettant dans le rouge et l'infrarouge. Redéfinir la «limite rouge» revient donc à reconsidérer de nombreuses planètes où la photosynthèse était jugée jusqu'à présent impossible. ■

C. M.

D. J. Nürnberg *et al.*, *Science*, vol. 360, pp. 1210-1213, 2018





© D. J. Nürnberg

NEUROSCIENCES

ALZHEIMER: L'EFFET DES BÊTA-AMYLOÏDES IDENTIFIÉ

Ces protéines, qui tendent à s'agréger dans les neurones des malades, altèrent la plasticité synaptique. Et réduiraient ainsi les capacités d'apprentissage et de mémorisation.

D'après l'Organisation mondiale de la santé, près de 47 millions de personnes étaient atteintes de la maladie d'Alzheimer en 2017. De nombreuses équipes de chercheurs sont mobilisées pour trouver des traitements et comprendre les mécanismes par lesquels se développe cette maladie. Dans le cerveau, la dégénérescence fibrillaire, la formation d'agrégats de protéines bêta-amyloïdes et la perte de neurones sont des lésions caractéristiques. Mais leur rôle exact vis-à-vis des symptômes, notamment les pertes cognitives et les troubles de la mémoire, est encore mal connu. Récemment, l'équipe de Daniel Choquet, du CNRS et de l'université de Bordeaux, a déterminé comment les agrégats amyloïdes limitent la plasticité synaptique des neurones, un mécanisme essentiel pour l'apprentissage et la mémorisation.

Dans le cerveau, les neurones sont connectés les uns aux autres par des prolongements nommés axones et dendrites. La zone de contact entre un axone et une dendrite est nommée synapse. C'est *via* cette connexion que le signal nerveux est transmis, par voie chimique, d'un neurone à l'autre. Des neurotransmetteurs sont produits et libérés à l'extrémité de

l'axone et captés par des récepteurs postsynaptiques de la dendrite. La mémorisation d'une information passe par le renforcement de certaines connexions entre des neurones, processus dit de potentialisation à long terme. Divers mécanismes se mettent alors en action pour augmenter le signal chimique dans la synapse. Cette capacité d'ajustement du signal est la «plasticité synaptique».

Chez les personnes touchées par la maladie d'Alzheimer, les premiers symptômes sont une altération précoce des facultés cognitives, surtout une perte de la mémoire à court terme. Daniel Choquet et ses collègues ont donc exploré plus précisément comment les agrégats amyloïdes pourraient perturber la plasticité synaptique et donc, potentiellement, le processus de mémorisation. Les chercheurs se sont intéressés à une molécule clé de la plasticité synaptique, l'enzyme CaMKII, dont on savait qu'une mauvaise régulation est corrélée à la maladie d'Alzheimer. En l'absence de protéines bêta-amyloïdes, cette enzyme est activée par un apport d'ions calcium et déclenche une cascade de réactions impliquant le recrutement de nouveaux récepteurs postsynaptiques et le renforcement de la synapse.

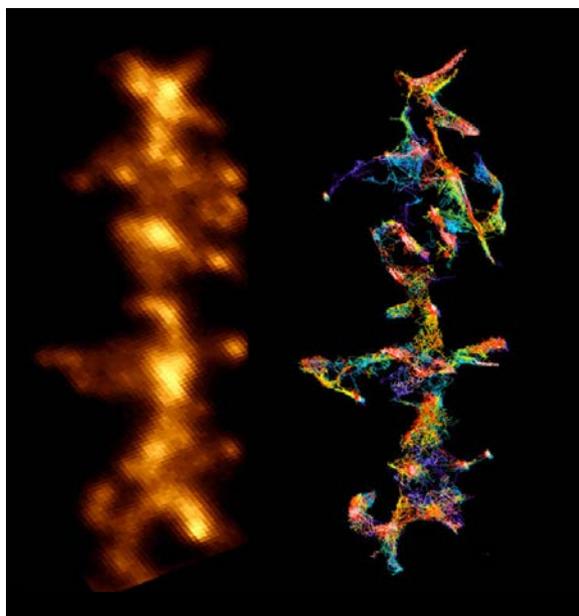
Daniel Choquet et son équipe ont étudié *in vitro* des neurones de l'hippocampe de rats avec des molécules CaMKII fluorescentes afin d'en suivre l'activité. Lorsque les chercheurs ont mis des agrégats amyloïdes en présence des neurones, ils ont constaté une activation précoce des molécules CaMKII. Ces enzymes étaient alors indisponibles pour mobiliser des récepteurs postsynaptiques lors de la potentialisation à long terme. Ce blocage entraînait, à terme, la disparition de la synapse.

L'activation précoce des enzymes CaMKII par les agrégats amyloïdes expliquerait les premiers symptômes cognitifs de la maladie d'Alzheimer. Pour l'équipe de Daniel Choquet, l'un des objectifs est à présent d'examiner la possibilité d'empêcher cette interaction des enzymes CaMKII et des agrégats amyloïdes, afin de préserver la plasticité synaptique et les synapses elles-mêmes. ■

S. B.

P. Opazo *et al.*, *Cell Reports*, vol. 23, pp. 3137-3145, 2018

Une dendrite de neurone d'hippocampe de rat en culture (à gauche). Elle contient des protéines CaMKII, fluorescentes afin d'en suivre l'activité. Les déplacements des récepteurs postsynaptiques qui résultent de cette activité ont été modélisés et sont figurés en couleurs (à droite).



DINOS : UN OS HYOÏDE COURT

L'os hyoïde soutient la langue. Celui de la plupart des dinosaures était court et simple, et se connectait à une langue aussi peu mobile que celle des alligators. C'est à cette conclusion qu'est parvenue une équipe sino-américaine menée par Zhiheng Li, de l'Académie des sciences chinoise. Ces paléontologues ont comparé les os hyoïdes de dinosaures, de ptérosaures et d'alligators après les avoir tomographiés aux rayons X. Les os hyoïdes des ptérosaures, des oiseaux et des dinosaures aviens se sont révélés, eux, très divers. Les os hyoïdes des oiseaux, par exemple, leur confèrent des langues très mobiles, ce qui est sans doute utile à ces animaux depuis que l'évolution a transformé leurs bras en ailes.

Les représentations de dinosaures tirant impoliment la langue sont désormais caduques : l'os hyoïde de ces reptiles montre que leur insolence devait s'exprimer par un autre moyen. ■

F. S.

Z. Li et al., *PLoS One*, vol. 13(6), article e0198078, 2018

PHYSIQUE

LE BRUIT DU ROBINET QUI FUIT

Ploc, ploc, ploc... Ce bruit de robinet qui fuit au-dessus d'une bassine a de quoi agacer. Mais quelle est l'origine précise de ce son si caractéristique ? Au cours des cent dernières années, de nombreux chercheurs ont étudié le phénomène, notamment à l'aide de photographies. Peter Jordan, de l'institut Pprime, du CNRS, et ses collègues s'y sont intéressés aussi et ont utilisé pour la première fois une caméra ultrarapide, simultanément avec un microphone et un hydrophone.

Les chercheurs ont montré qu'une bulle entraînée sous la surface de l'eau par la goutte produit le son caractéristique. Mais l'onde acoustique ne fait pas que se propager de la bulle vers l'air. Elle fait également vibrer la surface juste au-dessus de la bulle, qui agit comme un porte-voix et amplifie le son. La tension de surface joue un rôle crucial dans ce mécanisme. Dès lors, en ajoutant un peu de savon à vaisselle dans l'eau, il est possible d'atténuer ce son si agaçant... en attendant de réparer le robinet! ■

S. B.

S. Phillips et al., *Scientific Reports*, vol. 8, article 9515, 2018

RÉCUPÉRER L'EAU DE L'ATMOSPHÈRE EN PLEIN DÉSERT



Les chercheurs préparent leur dispositif pour capter l'humidité de l'air. Il contient un composé poreux qui piège l'eau durant la nuit, puis libère le liquide dans la cuve fermée durant la journée.

Dans le roman de science-fiction *Dune*, de Frank Herbert, les habitants de la planète désertique Arrakis utilisent des pièges à vent pour capter l'humidité de l'air. De tels dispositifs existent réellement, mais ne fonctionnent pas en situation très aride. Omar Yaghi et ses collègues, de l'université de Californie à Berkeley, viennent de montrer qu'un dispositif passif, composé de matériaux de type MOF (des réseaux métalloorganiques poreux), est capable de récupérer efficacement de l'eau à partir de l'air, même si son humidité est très faible.

Le MOF-801, à base de zirconium, a été identifié comme ayant une remarquable capacité à absorber de l'eau. Chauffé ensuite à 65 °C, ce matériau relargue le liquide. Il était cependant nécessaire d'utiliser un dispositif de refroidissement externe. Omar Yaghi et ses collègues ont modifié le MOF-801 en le chargeant avec du graphite non poreux à hauteur de 33% de sa masse afin d'améliorer sa conductivité thermique et sa capacité d'absorption de l'eau. Le dispositif exploite alors les variations des conditions atmosphériques dans le désert de Sonora, dans l'Arizona, entre la nuit (10 à 15 °C, 40% d'humidité) et le jour (35 à 40 °C, 5% d'humidité). Le MOF-801 est placé sur un plateau à l'intérieur d'un récipient qui sert de collecteur d'eau liquide. La nuit, ce récipient est ouvert : le MOF-801 se charge en eau issue de l'air. Le jour, le récipient est fermé, par un couvercle transparent, et correctement orienté face au soleil. La température du MOF augmente considérablement et entraîne la désorption de l'eau. Ce dispositif a produit 55 grammes d'eau liquide potable à partir de 825 grammes de MOF-801 en un seul cycle jour/nuit. D'autres MOF à l'étude, moins onéreux, ont montré en laboratoire des performances plus remarquables encore. Omar Yaghi et ses collègues imaginent donc que leur dispositif a un avenir prometteur. ■

MARTIN TIANO

F. Fathieh et al., *Science Advances*, vol. 4(6), article eaat3198, 2018

GÉOSCIENCES

CROÛTE PRÉCOCE
POUR MARS

Le Système solaire est né il y a environ 4,567 milliards d'années. Les planètes auraient rapidement aggloméré de la poussière et des gaz. Elles auraient ensuite connu une période où leur surface était recouverte d'un océan magmatique avant de se refroidir et de se solidifier. On pensait que Mars avait atteint cette étape de solidification en environ 100 millions d'années. Mais ce processus aurait été bien plus rapide, d'après l'équipe internationale de Laura Bouvier et de Maria Costa, du Muséum d'histoire naturelle du Danemark. Ces chercheurs ont retracé l'histoire de la naissance de la planète rouge en étudiant un échantillon de la météorite martienne NWA 7034 trouvée dans le désert du Sahara en 2011.

L'équipe en question a analysé sept grains de zircon provenant de cette météorite. Le zircon est un minéral très robuste, capable de résister aux processus géologiques les plus agressifs, tels que la fusion magmatique. Grâce à des méthodes de datation radiométriques, il est possible, à partir de sa composition, de déterminer son âge, mais aussi son histoire.

Les chercheurs ont analysé le contenu en uranium et en plomb (sous-produit de la désintégration radioactive de l'uranium) et plusieurs isotopes du hafnium. Ils montrent



La météorite NWA 7034, surnommée « Black beauty », provient de la croûte martienne.

ainsi que ces minéraux proviennent de la fusion d'une croûte très ancienne, constituée 10 à 20 millions d'années après la formation du Système solaire. Cette croûte primordiale aurait subsisté pendant 100 millions d'années avant de refondre, probablement sous l'effet d'impacts de météorites.

Ces résultats attestent donc de la solidification rapide de la planète rouge et de la formation précoce d'une croûte martienne, probablement des dizaines de millions d'années avant celle de la Terre. ■

DONOVAN THIEBAUD

L. C. Bouvier *et al.*, *Nature*, vol. 558, pp. 586-589, 2018

CLIMATOLOGIE

DES CYCLONES
PLUS LENTS

En compilant des données acquises depuis la fin des années 1940, James Kossin, de la NOAA (l'agence états-unienne de météorologie), a observé une diminution notable de la vitesse de déplacement des cyclones (à ne pas confondre avec leur vitesse de rotation). Cela implique que les cyclones tropicaux resteraient plus longtemps au-dessus des mêmes régions côtières, entraînant des dégâts plus destructeurs par les pluies et les vents associés.

James Kossin a montré qu'entre 1949 et 2016, la vitesse de déplacement a diminué en moyenne de 10%. Cette baisse varie cependant d'un bassin océanique à l'autre : elle est, par exemple, de 20% au-dessus du Pacifique Nord-Ouest et de 15% au-dessus du Pacifique Sud.

L'origine de ce phénomène de ralentissement est encore mal comprise. Comme la



L'ouragan Harvey, en 2017, a provoqué d'importantes inondations aux États-Unis, ici près de Houston.

formation et l'évolution des cyclones tropicaux dépendent beaucoup des conditions atmosphériques et de la température des océans, James Kossin suggère que le phénomène pourrait être lié à la hausse globale de température de 0,5°C mesurée autour du globe sur la même période. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

J. P. Kossin, *Nature*, vol. 558, pp. 104-107, 2018

EN BREF

LA NUIT, REFUGE
DES MAMMIFÈRES

Les mammifères, très diversifiés, incluent des espèces aussi bien diurnes que nocturnes. Kaitlyn Gaynor, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont constaté que, au contact des humains, beaucoup de ces animaux, comme le coyote aux États-Unis, deviennent de plus en plus nocturnes. Cette stratégie d'évitement aura peut-être chez ces mammifères un impact sur leur capacité de reproduction, de protection face à la prédation et de recherche de nourriture. Ce qui pourrait, à terme, modifier de façon importante les écosystèmes.

UNE VOLÉE DE
PROTOPLANÈTES

Les techniques de détection d'exoplanètes sont inefficaces pour trouver des planètes en formation dans le disque de gaz et de poussière qui entoure les étoiles jeunes. Mais en étudiant la dynamique du gaz autour de l'étoile HD 163296 grâce au réseau *Alma*, au Chili, deux équipes ont identifié des perturbations dues à la présence de trois protoplanètes géantes. Et Miriam Keppler, de l'institut Max-Planck d'astronomie, à Heidelberg, et ses collègues ont utilisé l'instrument *Sphere* du *VLT*, aussi au Chili, pour obtenir une image directe d'une autre protoplanète autour de l'étoile PDS 70.

LA FIBRE POUR
TRAQUER LES SÉISMES

La quasi-totalité des sismomètres sont installés sur les continents, qui ne couvrent que 30% de la surface de la planète. Giuseppe Marra, du Laboratoire britannique de physique, et ses collègues proposent d'utiliser les fibres optiques de télécommunications terrestres et sous-marines et des dispositifs sensibles de mesure de fréquence pour suivre les séismes sous les océans. On aurait ainsi un réseau global efficace et à moindre coût.

DES VIRUS GÉANTS FABRIQUENT LEURS PROPRES NOUVEAUX GÈNES

Le génome des pandoravirus est si atypique que les chercheurs pensent que ces virus géants produisent eux-mêmes de nouveaux gènes de façon spontanée et aléatoire.

Depuis la découverte des premiers virus géants en 2003, ces organismes brouillent la frontière entre le monde des organismes cellulaires, comme les bactéries, et celui des virus.

Leur taille et celle de leur génome les rapprochent en effet davantage des bactéries que des virus. Grâce à la découverte de trois nouveaux virus géants de la famille des pandoravirus, l'équipe de Jean-Michel Claverie et Chantal Abergel, de l'université Aix-Marseille et du CNRS, apporte un nouvel éclairage sur l'évolution de ces microorganismes. Ces biologistes avancent une hypothèse étonnante: de nombreux nouveaux gènes se formeraient spontanément et de façon aléatoire au sein du génome des pandoravirus!

Avec au total six représentants des pandoravirus, l'équipe de Jean-Michel Claverie et Chantal Abergel espérait mieux comprendre l'origine et les particularités de cette famille de virus géants, dont le génome contient près de 2500 gènes codant des protéines. Première constatation: les trois nouveaux virus ont des tailles comparables à celles des autres pandoravirus, un génome gigantesque et la même forme d'amphore. Ensuite, les génomes des six virus ne partagent qu'entre 54% à 88% de leurs gènes codants, ce qui est assez faible pour des membres d'une même famille.

Plus étonnant, pas moins de 90% des gènes des pandoravirus sont orphelins, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas d'équivalents ailleurs dans le règne vivant (autres virus, protistes unicellulaires, animaux, plantes). Or il est peu probable que ces gènes orphelins proviennent d'un ancêtre commun à ces pandoravirus, car ils diffèrent d'une souche à l'autre.

Jean-Michel Claverie et son équipe suggèrent que ces gènes ont été formés dans les pandoravirus eux-mêmes, au sein des longues régions non codantes de l'ADN séparant des gènes préexistants. Considérée comme statistiquement peu probable, l'apparition, dite *de novo*, de gènes codants a cependant trouvé des arguments favorables ces dernières années avec l'observation de nouveaux gènes apparus chez des organismes eucaryotes (levure, petits vers, et même la mouche du vinaigre).



Le virus géant *Pandoravirus quercus* a été trouvé près de Marseille. Il mesure environ un micromètre de long.

**0,2
MICROMÈTRE :**
C'ÉTAIT LA TAILLE
MAXIMALE DES VIRUS
CONNUS JUSQU'À
LA DÉCOUVERTE
DES VIRUS GÉANTS
EN 2003. UNE TAILLE
BIEN INFÉRIEURE
À CELLE DES
BACTÉRIES !

Il reste cependant à identifier le mécanisme de cette création *in situ* et *de novo* de gènes codants chez les pandoravirus. Il nécessiterait une fréquence de mutations très élevée dans les parties non codantes du génome. Cela pourrait s'expliquer, par exemple, par l'absence d'enzymes de réparation du génome chez ces virus. De nombreuses questions se posent encore sur ce scénario, mais si l'hypothèse d'une création efficace et *de novo* de gènes se confirme, l'ancêtre des pandoravirus pourrait avoir enrichi son génome grâce à ce mécanisme.

Cette hypothèse offre aussi une vision très différente de celle du scénario standard d'un *big bang* évolutif initial où des prototypes de gènes sont apparus assez vite, l'évolution résultant ensuite du seul remaniement de ce matériel initial. Ici, les biologistes proposent un processus plus progressif et encore actif aujourd'hui. Enfin, ces résultats relancent la question de la place des virus géants dans l'arbre du vivant. Sont-ils des bizarreries de l'évolution ou au contraire un moteur ancestral de cette évolution? Seule la découverte de nouveaux membres de la famille des pandoravirus permettra d'en savoir plus. ■

S. B.

M. Legendre et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 2285, 2018

ASTROPHYSIQUE

LA MATIÈRE BARYONIQUE DE L'UNIVERS ENFIN RETROUVÉE

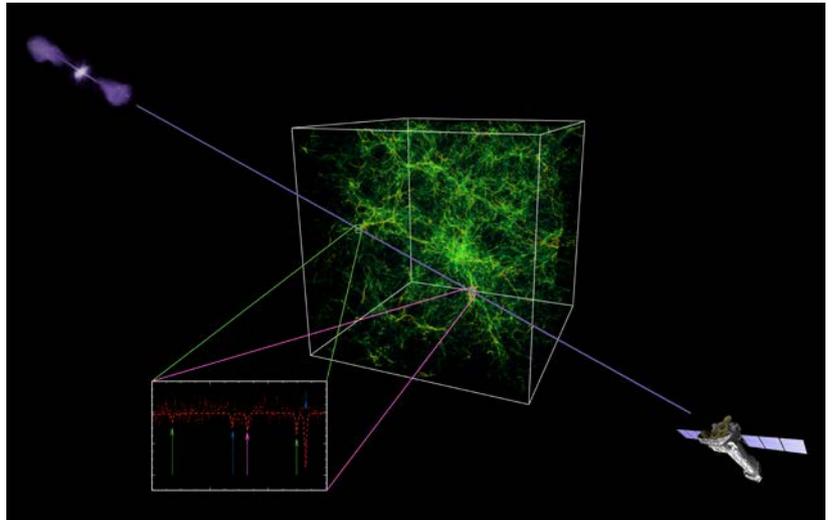
Dans le bilan du contenu de l'Univers, une grande part de la matière ordinaire manquait à l'appel. De nouvelles observations en rayons X ont permis de la mettre au jour.

Énergie sombre, matière noire et matière ordinaire, voilà en résumé les constituants de l'Univers. Les deux premiers sont de nature inconnue et pourtant, d'après différentes observations cosmologiques, ils représentent 95% du contenu de l'Univers. Cela peut déjà paraître embarrassant, mais en plus, près de la moitié des 5% restants – la matière ordinaire composée d'atomes, dite baryonique – manquait à l'appel! Grâce à de nouvelles observations, Fabrizio Nicastro, de l'observatoire astronomique de Rome, et ses collègues ont confirmé des indices suggérant qu'on a retrouvé la matière ordinaire manquante dans le milieu intergalactique.

La question de la matière baryonique était d'autant plus intrigante que l'étude du rayonnement émis par des quasars très lointains (des galaxies émettant un fort rayonnement, dû à l'absorption de grandes quantités de matière par le trou noir supermassif tapi en leur centre) montrait que la quantité de matière baryonique dans le cosmos est bien de 5% du contenu total de l'Univers. Mais ce résultat n'est valide que pour l'Univers âgé de moins de 3 milliards d'années. Après, le compte n'y est plus, et près de la moitié de la matière baryonique semble manquer à l'appel. Où est-elle donc passée?

Pour répondre à la question, les astrophysiciens ont entrepris de recenser avec précision la matière baryonique dans l'Univers proche. Les étoiles et les gaz qui composent les galaxies et les amas de galaxies ne représentent que 18% de la matière ordinaire. Cependant, d'après les modèles de formation des grandes structures cosmiques, la matière (noire et baryonique) s'est accumulée au fil du temps dans les galaxies, mais a aussi tissé un réseau de filaments reliant les galaxies et qui contiendraient la matière baryonique manquante.

Le gaz de ces régions intergalactiques, très peu dense, émet un rayonnement très faible, donc difficile à détecter. Une partie du gaz des filaments intergalactiques a malgré tout été observée, ce qui a porté le total de matière ordinaire recensée à 61%. Manquaient à l'appel les gaz ionisés les plus chauds (au-dessus de 500000 degrés)...



La lumière émise par le quasar (en haut à gauche) traverse l'Univers. Elle est absorbée à certaines longueurs d'onde (en bas à gauche) par les gaz chauds du milieu intergalactique (au centre) avant d'être captée par le télescope spatial XMM-Newton (en bas à droite) puis analysée.

180

SECONDES APRÈS LE BIG BANG, SE SONT FORMÉS LES ÉLÉMENTS LÉGERS, (HYDROGÈNE, HÉLIUM, ETC.). LA NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE DÉCRIT CE PROCESSUS. EN TENANT COMPTE DES OBSERVATIONS ASTRONOMIQUES, LES PHYSICIENS EN ONT CONCLU QUE LA MATIÈRE BARYONIQUE REPRÉSENTE 5% DU CONTENU TOTAL DE L'UNIVERS.

Ces dernières années, de nombreuses équipes d'astronomes ont obtenu des indices de la présence d'un tel gaz chaud. Pour en avoir la confirmation et estimer sa contribution au bilan total, Fabrizio Nicastro et ses collègues ont analysé le rayonnement X du quasar 1ES 1553+113, qui a mis 4 milliards d'années à nous parvenir. Ils ont montré que ce rayonnement présente des raies d'absorption dues à la présence d'oxygène ionisé, caractéristique de nuages de gaz intergalactiques très chauds présents sur le chemin de la lumière. Celle-ci aurait traversé deux nuages avant de nous parvenir. À partir de ces observations, l'équipe a estimé que ce gaz intergalactique chaud représenterait 30% à 40% des baryons.

Cependant, il reste des incertitudes sur le calcul de sa densité. Et le gaz observé pourrait aussi provenir, en partie, de l'intérieur des galaxies sur la ligne de visée. Pour préciser ces observations, il faudra attendre le futur télescope spatial de l'Agence spatiale européenne, *Athena*, prévu pour 2028, dont l'étude de la matière baryonique intergalactique est l'un des principaux objectifs. ■

S. B.

F. Nicastro et al., *Nature*, vol. 558, pp. 406-409, 2018

PHYSIQUE

SOUPLE DANS L'OBSCURITÉ

En présence de lumière, la sphalérite – un semi-conducteur utilisé pour ses propriétés luminescentes, optiques et photocatalytiques – est cassante. Yu Oshima et ses collègues, de l'université de Nagoya, au Japon, ont eu la surprise de constater que si la sphalérite est plongée dans le noir, elle devient plastique et peut se déformer sans se briser.

Les chercheurs ont montré que le cristal de sphalérite présente, à l'échelle microscopique, des défauts de type « dislocation ». En principe, si les lignes de dislocation se déplacent dans le matériau, les plans atomiques finissent par glisser les uns par rapport aux autres : le cristal se déforme sans se briser. C'est ce qui se passe dans l'obscurité. Mais en présence de lumière visible ou ultraviolette, le rayonnement apporte de l'énergie aux électrons du matériau qui deviennent alors mobiles. Or l'accumulation des charges le long des dislocations restreint la mobilité de ces dernières. Sous l'effet d'une contrainte, des microfissures se forment alors et le matériau se casse. ■

M. T.

Y. Oshima et al., *Science*, vol. 360, pp. 772-774, 2018

ARCHÉOLOGIE

LES OUTILS D'ÖTZI PROUVENT SON DÉSARROI



En haut, le poignard en silex d'Ötzi, qui semble avoir été un marqueur social plutôt qu'un instrument vraiment utilisé ; en bas, l'une des deux pointes de flèche de l'homme des glaces.

ARCHÉOLOGIE

LES CHAPEAUX DE L'ÎLE DE PÂQUES

Les moaïs, les fameuses statues de l'île de Pâques, étaient surmontées de coiffes de pierre rouge de plusieurs tonnes nommées pukaos. Ces coiffes étaient taillées en forme de cylindre dans des carrières distantes de plusieurs kilomètres et roulées jusqu'aux statues. Mais comment étaient-elles hissées sur le crâne des moaïs ? Sean Hixon, de l'université d'État de Pennsylvanie, et ses collègues expliquent que les statues, lors de leur érection, restaient inclinées de 15 degrés. Cela permettait la construction d'une rampe d'environ 45 mètres avec une déclivité de 12 degrés pour atteindre le sommet.

À l'aide de cordes, le pukao était roulé par pas plus de 15 personnes. La base du moaï était ensuite taillée pour le redresser. Reste à comprendre comment et avec quels matériaux les cordes étaient fabriquées. ■

HÉLOÏSE MONNEROT-DUMAINE

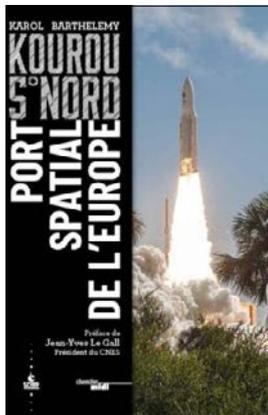
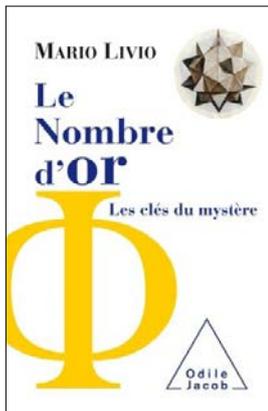
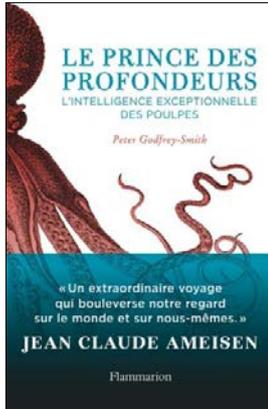
S. W. Hixon et al., *Journal of Archaeological Science*, en ligne le 31 mai 2018

En 1991, deux touristes découvraient fortuitement dans un glacier italien la momie d'un homme que l'on a nommé Ötzi. Cet individu, apprendra-t-on plus tard, a été tué d'une flèche fichée dans son épaule il y a environ 4600 ans. Il avait sur lui quelques outils de pierre et un retoucheur, qui ont été réétudiés de près par Ursula Wierer, de la Surintendance archéologique de Florence, et ses collègues, dont Jacques Pelegrin, du CNRS. Ces travaux apportent un éclairage sur l'origine et l'emploi des outils ainsi que sur les derniers moments qu'a vécus Ötzi.

Les chercheurs ont établi que les silex du poignard, du grattoir, du perceur et des flèches de cet homme de l'âge du Cuivre proviennent d'au moins trois secteurs différents et distants de son lieu de vie supposé. Cela suggère que ces matériaux circulaient dans la région au sein d'un réseau. L'étude a aussi montré qu'Ötzi n'est pas le tailleur initial de ses outils, mais qu'il était capable, à l'aide de son retoucheur par pression, de les entretenir lui-même, ce qu'il a fait plusieurs fois dans les jours qui ont précédé sa mort. À plusieurs reprises, il a coupé des plantes siliceuses (des céréales, les graminées fourrant ses chaussures?), et il est frappant qu'il n'ait pas utilisé à cette fin son couteau, mais plutôt une pointe de flèche. Son poignard, un type d'objet alors répandu dans les sociétés alpines, était manifestement un objet d'apparat, davantage destiné à servir de marqueur social qu'à un usage quotidien. Enfin, il est clair qu'Ötzi était mal préparé au combat. Seulement deux de ses flèches étaient fonctionnelles. Son carquois contenait par ailleurs un faisceau d'andouillers (ramifications des bois de cerfs), pouvant aussi servir à façonner des pointes moins dures que celles de silex ; mais Ötzi n'a visiblement pas eu le temps d'effectuer le travail nécessaire pour confectionner des flèches. De plus, après avoir été blessé à la main droite, lui qui était droitier, il n'en était plus capable. ■

F. S.

U. Wierer et al., *PLoS One*, vol. 13(6), article e0198292, 2018



BIOLOGIE

LE PRINCE DES PROFONDEURS
Peter Godfrey-Smith

Flammarion, 2018
352 pages, 21 euros

Les poulpes fascinent et inspirent les philosophes de la nature depuis Aristote. On en saisit les raisons en lisant ce livre. L'histoire évolutive et les extraordinaires comportements des céphalopodes (pieuvres, seiches, calmars) sont des leviers sur lesquels l'auteur appuie et articule ses réflexions quant à notre position au sein du vivant. Il explique d'abord comment des successions de contraintes et d'occasions ont engendré la diversité des organismes. Lorsqu'il imagine ce qui nous sépare de la pieuvre, il parvient à se représenter la fantastique diversification des espèces qui est intervenue au Cambrien (il y a entre 480 et 540 millions d'années). Dans la suite de ses réflexions, l'auteur décrit comment les organismes ont développé la perception de leurs environnements. Les systèmes sensoriels sont devenus de plus en plus complexes. Avec le système nerveux, certains signaux deviennent « informations » et la communication apparaît. La sophistication progressive des mécanismes d'intégration des informations voit naître des formes d'états subjectifs, puis l'intelligence et la conscience.

Avec son cerveau et ses fantastiques capacités sensorielles et motrices, la pieuvre constitue à elle seule une résultante remarquable de toutes ces étapes évolutives. L'auteur se demande ensuite si la conscience peut prendre d'autres formes chez les animaux. Il aborde enfin le sens évolutif et adaptatif du vieillissement et de la mort des êtres vivants; les pieuvres ont en effet une vie « compressée », leur mort étant programmée au bout de deux ans, durée pendant laquelle elles ne se reproduisent qu'une seule fois!

Cet ouvrage rare nous montre que la pieuvre possède une autre forme d'intelligence que celle des animaux qui nous sont plus familiers comme les mammifères ou les oiseaux.

LUDOVIC DICKEL
UNIVERSITÉ DE CAEN

MATHÉMATIQUES

LE NOMBRE D'OR
Mario Livio

Odile Jacob, 2018
320 pages, 24,90 euros

Tous les esprits curieux, et particulièrement ceux qui le sont de mathématiques, apprécieront ce livre. Le nombre d'or, une proportion géométrique simple, fut défini par Euclide. Depuis, il hante l'esprit des mathématiciens, des esthètes, mais aussi, malheureusement, des amateurs d'ésotérisme, qui lui prêtent un abracadabrant pouvoir explicatif. Cette « divine proportion », croient-ils, se retrouverait dans les pyramides d'Égypte, dans le Parthénon, dans les tableaux de Léonard de Vinci ou ceux de Manet, chez Bach et Bartók, mais aussi dans les pétales de fleurs et la spirale des coquillages... Bref, le nombre d'or serait partout et expliquerait à peu près tout. Pour sortir de ces illusions, l'auteur présente l'apparition du nombre d'or et ses multiples propriétés depuis l'Antiquité. Joignant les descriptions du contexte historique, notamment de la vie de nombreux mathématiciens célèbres – Kepler, Fibonacci, Mandelbrot – qui y ont fait référence, il échafaude une histoire de la notion de nombre.

On apprend ainsi de nombreuses choses intéressantes, comme les raisons de la popularité de la base 12 et de l'écriture en base 60 (12 est le nombre de phalanges que l'on peut compter avec un pouce sur les autres doigts d'une main). On découvre ainsi « la géométrie secrète des artistes », qui explique que le nombre d'or ait fini par apparaître comme une « divine proportion ». Le plus fascinant est que, au-delà du cas anecdotique du nombre d'or, l'auteur développe une réflexion sur la cohérence structurelle de la pensée mathématique et sur sa « déraisonnable efficacité » pour modéliser le monde physique.

PIERRE BERTRAND
UNIVERSITÉ CLERMONT-AUVERGNE

KOUROU 5° NORD, PORT SPATIAL DE L'EUROPE

Karol Barthelemy

Le Cherche-Midi, 2018

152 pages, 29 euros

Au début du xx^e siècle, les pionniers de l'aéronautique rêvaient aux voyages interplanétaires, mais ils n'imaginaient probablement pas toutes les applications des satellites.

Le rôle des lanceurs allait ainsi devenir essentiel. À partir des années 1950, la France s'est engagée dans le développement d'engins de lancement avec la base d'Hammaquir en Algérie, abandonnée en 1967. Le Cnes, créé en 1961, a donc dû réfléchir à une autre implantation. La Guyane française avait des avantages considérables. Le site guyanais, situé près de l'équateur et tourné vers le nord et l'est sur l'océan Atlantique, fait bénéficier les lancements de la vitesse de rotation de la Terre, environ 1650 kilomètres par heure.

La base de Kourou est donc devenue un atout majeur pour l'Europe avec les fusées *Ariane* et *Vega*. Le site est aussi utilisé par la Russie avec *Soyouz*, ce qui permet d'augmenter la charge utile de 66% par rapport à Baïkonour.

Ce livre, publié à l'occasion du cinquantième anniversaire du premier lancement depuis Kourou, celui de la fusée *Véronique*, raconte l'aventure du centre spatial guyanais, où de multiples opérations sont effectuées. En effet, il ne suffit pas d'avancer une allumette pour produire le départ d'une fusée. Les installations de la base sont adaptées aux opérations de préparation, d'assemblage, de test des lanceurs et des satellites. Et cela avec l'exigence de sécurité et de réussite maximales.

Le centre est équipé pour mettre en orbite des satellites aux fonctions diverses. Cela implique des lanceurs aux caractéristiques variées. Le Centre spatial guyanais doit ainsi s'adapter en permanence aux demandes des clients.

Outre les aspects techniques, l'ouvrage, riche et instructif, présente aussi les aspects humains de l'implantation en Guyane, ainsi que l'engagement du Cnes dans de nombreuses actions.

JEAN COUSTEIX

ONERA

LE « MAGENTA » DU NAUFRAGE À LA REDÉCOUVERTE

Max Guérout et Jean-Pierre Laporte

CNRS Éditions, 2018

312 pages, 24 euros

Les chercheurs et les plongeurs qui, de 1994 à 1998, ont exploré l'épave du *Magenta* ont eu affaire à un naufrage vieux à la fois de 120 ans et de 2000 ans! En effet, le *Magenta*, frégate cuirassée, navire amiral de l'escadre de Méditerranée, a pris feu en rade de Toulon et a coulé en 1875. Or il avait embarqué en Tunisie des stèles funéraires provenant des ruines de Carthage, datant des III^e-II^e siècles avant notre ère, ainsi que la statue de l'impératrice Sabine, épouse d'Hadrien (II^e siècle). Une partie de ces antiquités a été retrouvée peu après le naufrage. Puis le naufrage a disparu des mémoires locales. Il n'était cependant pas totalement oublié. Un spécialiste de Carthage y fit allusion en 1992 dans un livre que lut un archéologue amateur de plongée. L'histoire de la redécouverte du *Magenta* s'enclenche alors: campagnes de localisation de l'épave, puis de fouilles. Les plongeurs remontèrent aussi bien des restes archéologiques d'époque romaine ou punique que des objets en usage dans la marine française du XIX^e siècle.

Le livre rend compte des fouilles, raconte l'histoire des stèles et de leur découverte en Tunisie, décrit la carrière du *Magenta*. Il est très richement illustré: dessins techniques; images du sinistre de 1875 tirées de la presse d'alors; photos des antiquités prises les unes avant le naufrage, les autres après la récupération au fond de la rade de Toulon. Par la force des choses, les lieux et les époques se mêlent: Carthage, Toulon, l'Antiquité, le XIX^e siècle, le XX^e.

Tout en témoignant de l'extrême rigueur qu'exige l'archéologie, ce livre suscite les songeries qui nous sont naturelles lorsque nous imaginons la « vie » sous-marine d'une épave. Cela lui confère un attrait vertigineux.

DIDIER NORDON



BIOLOGIE DU POUVOIR

Jean-Didier Vincent

Odile Jacob, 2018

272 pages, 23 euros

L'auteur entreprend de passer en revue les bases neurobiologiques du pouvoir. Pourquoi renonçons-nous à notre liberté pour obéir? Selon lui, cela s'explique par plusieurs traits psychiques tels que l'empathie, le besoin de justice, celui de faire confiance, le plaisir des contacts sociaux, etc., dont l'ensemble constitue le « cerveau social ». Ce dispositif psychique complexe tend notamment à nous faire trouver notre place dans la hiérarchie sociale, en équilibre entre autorité personnelle et soumission à d'autres. Dans la dernière partie, anthropologique, l'auteur accumule les observations sur ce phénomène si intrinsèquement humain.

LES ABEILLES SAUVAGES

Nicolas Vereecken et Bernhard Jacobi

Glénat, 2018

128 pages, 10,50 euros

Des abeilles, nous ne connaissons en général que l'abeille dite domestique, *Apis mellifera*. Pourtant, on en connaît à ce jour plus de 20 000 espèces. La plupart vivent en solitaires dans toutes sortes de nids, avec une alimentation souvent bien plus spécialisée que celle des abeilles domestiques. Or ces précieux agents de la nature sont en déclin aussi. Ce guide pratique n'est bien sûr pas exhaustif, mais, avec sa quarantaine de fiches détaillées, il permet d'identifier l'abeille masquée commune ou encore le bourdon des champs.

LES SENS DU MOT SCIENCE

Jean Lilensten

EDP Sciences, 2018

118 pages, 19 euros

L'auteur, astrophysicien et passionné de philosophie, vise dans ce petit ouvrage émaillé d'exercices et d'anecdotes à montrer ce qui caractérise la science et ses différentes branches. Mais il ne s'agit pas seulement de lever des ambiguïtés et d'éviter des confusions.

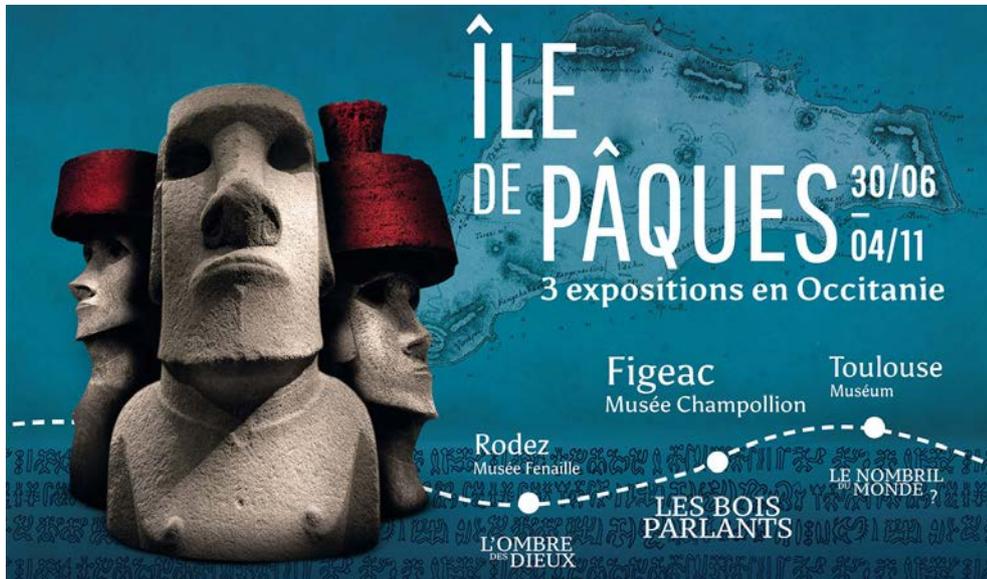
Jean Lilensten donne aussi des points de vue plus personnels, et argumente par exemple en faveur d'un dialogue entre les sciences de la nature, celles « de la culture » (les sciences de l'homme et de la société) et celles de l'ingénieur, si l'on veut améliorer la vie sur la planète.

FIGEAC, RODEZ ET TOULOUSE

DU 30 JUIN AU 4 NOVEMBRE 2018

Musée Champollion (Figeac), Musée Fenaille (Rodez), Muséum de Toulouse
musee-champollion.fr, musee-fenaille.rodezagglo.fr, museum.toulouse.fr

Île de Pâques



Cet été, partez pour un long voyage vers un « pays à moitié fantastique, une terre de rêve », vers l'île de Pâques, qui a hanté l'écrivain Pierre Loti toute sa vie. Manque de temps ? Qu'à cela ne tienne, restez en France et enchaînez trois musées de la région Occitanie qui se sont associés pour présenter trois expositions complémentaires dédiées à cet îlot perdu au milieu du Pacifique. À Figeac, vous découvrirez les mystères du rongorongo,

l'écriture encore indéchiffrée des anciennes populations pascuanes. À Rodez, vous vous émerveillerez devant les belles sculptures en bois et en pierre. À Toulouse, vous apprendrez l'histoire naturelle et culturelle de l'île. Ce sera l'occasion de faire tomber quelques idées reçues... Ainsi, le déboisement n'a pas entraîné l'effondrement de la culture locale. N'hésitez pas, les trois expositions ont reçu le label « Exposition d'intérêt national » en 2018. ■

NANTES

JUSQU'AU 7 JANVIER 2019

Muséum de Nantes
museum.nantes.fr

Au fil des araignées



Non, les araignées ne sont pas des insectes, et le visiteur comprendra la différence. Il prendra aussi conscience de leur diversité, de leur histoire évolutive, de la façon dont elles vivent (élevages à l'appui), de leur rôle écologique, des propriétés de leurs fils et de leurs venins, qui intéressent l'industrie et la médecine... ■

NÎMES

JUSQU'AU 24 SEPTEMBRE 2018

Musée de la Romanité
museedelaromanite.fr

Gladiateurs, héros du Colisée



Le musée de la Romanité vient d'ouvrir et propose sa première exposition temporaire, dont la commissaire est la conservatrice du Colisée de Rome. Maquettes, courts-métrages, reconstitutions interactives et pièces prêtées par une dizaine de musées italiens donnent vie au monde souvent méconnu des gladiateurs et jeux d'arène. ■

ET AUSSI

Les 3, 4 et 5 août
afastronomie.fr

LES NUITS DES ÉTOILES

Comme chaque année, plusieurs centaines de sites en France accueillent le public pour contempler la voûte céleste et s'initier aux joies et concepts de l'astronomie. Le thème choisi pour 2018 est : « Mars, la petite sœur de la Terre. »

Du 4 au 10 août
Fleurance (Gers)

festival-astronomie.fr
FESTIVAL D'ASTRONOMIE DE FLEURANCE

Comme les précédents, ce 28^e festival, parrainé par Hubert Reeves, met l'astronomie à l'honneur durant toute une semaine, pour petits et grands : rencontres avec les plus de 50 chercheurs présents, animations, conférences, soirées d'observation...

Jusqu'au 2 septembre
Médiathèque José-Cabanis, Toulouse

bibliotheque.toulouse.fr
HOMO NUMERICUS

À travers des animations, cette exposition itinérante propose de se familiariser avec les concepts sur lesquels repose l'informatique et de comprendre leurs enjeux.

Jusqu'au 2 septembre
Musée Bernard-d'Agesci, à Niort

Tél. 05 49 78 72 00

VESTIGES DE PORT BOINOT

Trois sculptures d'un sanctuaire antique ont été découvertes au début de 2018. Ce musée les expose, en expliquant le contexte archéologique et historique.

Jusqu'au 17 septembre
Muséum de Rouen
museumderouen.fr

WILDLIFE PHOTOGRAPHER OF THE YEAR

Les splendeurs de la nature vues à travers une sélection de clichés du prestigieux concours international des photographes de la nature pour l'année 2018.

ROUEN

JUSQU'AU 25 FÉVRIER 2019
Musée national de l'Éducation (Munaé)
munaé.fr

Belles plantes



En 1828, le D^r Louis Auzoux fonde une usine pour fabriquer et diffuser des modèles anatomiques à vocation pédagogique et réalisés en papier mâché. La production sera étendue dans les années 1850 aux modèles botaniques (fleurs, fruits, spécimens agricoles...), agrandis plus de dix fois et démontables en plusieurs parties. Le musée national de l'Éducation conserve une trentaine de ces pièces remarquables par la technique de leur fabrication, leur esthétique et le rôle qu'elles ont rempli dans l'enseignement des sciences. Il les présente pour la première fois dans leur intégralité. ■

SAINT-LÉGER-SOUS-BEUVRAY (SAÔNE-ET-LOIRE)

JUSQU'AU 11 NOVEMBRE 2018
Musée de Bibracte - Mont Beuvray
bibracte.fr

Monnaie, monnaies!

Inventée il n'y a pas si longtemps (au VII^e siècle avant notre ère), la monnaie est l'un des moyens que les populations humaines utilisent pour quantifier et s'échanger des biens et des services. Comme le rappelle cette petite exposition, cet instrument économique est loin de se réduire à des pièces ou des billets: bijoux, broches à rôtir, haches, sculptures florales en métal, etc., ont été utilisés au gré des peuples et des époques, sans oublier les formes dématérialisées que la monnaie revêt aujourd'hui. Et son rôle n'est pas seulement économique, puisque les pièces de



monnaie ont parfois une dimension symbolique et véhiculent, par les images gravées dessus, des signes de pouvoir, des légendes...

Voir cette exposition, qui accorde une bonne place aux monnaies celtiques, apparues vers 300 avant notre ère, est aussi l'occasion de visiter ou revisiter le joli site archéologique gallo-romain de Bibracte et son écrin de nature, ainsi que son magnifique et instructif musée. ■

PARIS

JUSQU'AU 6 OCTOBRE 2018
Fondation Groupe EDF
fondation.edf.com



1, 2, 3 data

Et si les données devenaient un matériau de création? C'est l'idée de cette exposition où les œuvres présentées sont fondées sur les quantités phénoménales de données recueillies en de très nombreuses circonstances: matière première des sciences du *big data*, elles le sont également pour les artistes et les designers. Les créations sont organisées ici selon trois axes: exposer, expliquer et explorer. Au cours de la visite, le public passe progressivement d'une position contemplative à une autre plus active. Et se familiarise avec les données et leur énorme potentiel. ■

SORTIES DE TERRAIN

Vendredi 3 et lundi 13 août
Col des Bagenelles
(Haut-Rhin)
Tél. 06 47 29 16 20

LE COL DES BAGENELLES

Promenade de deux heures à la découverte de la géologie de cet endroit, où des roches d'origines profondes révèlent l'histoire d'une chaîne de montagnes.

Vendredi 10 août à 9 h
Saint-Michel-en-Brenne
Tél. 02 54 28 12 13

PRAIRIE AUX PIES-GRIÈCHES

La Brenne est surtout connue pour ses étangs et l'avifaune associée. Cette excursion fait découvrir d'autres milieux intéressants, les prairies et les landes naturelles, riches en insectes et en certaines espèces d'oiseaux.

Samedi 18 août, 9 h 30
Itteville (Essonne)

Tél. 01 60 91 97 34

RHINOCÉROS EN ESSONNE

Une visite guidée du site géologique de la Sablière du Chemin d'Orgemont, où le public pourra voir des fossiles, des figures géologiques et des reconstitutions paléo-environnementales.

Samedi 25 août à 8 h
Près de Plan-d'Aups (Var)
Tél. 04 42 20 03 83

SUR LA PISTE DU GUIGNARD D'EURASIE

Dans les crêtes du massif de Sainte-Baume, une sortie à la journée pour bons marcheurs à la rencontre de cet oiseau rare et peu farouche, ainsi que d'autres membres de la gent ailée.

Nuit du 25 au 26 août
Lieux divers et nombreux
nuitdelachauvesouris.com
NUIT INTERNATIONALE DE LA CHAUVE-SOURIS

Saviez-vous que la France métropolitaine compte 34 espèces de chauves-souris, toutes menacées? Profitez de cette nuit, animée par de nombreux bénévoles, pour découvrir le monde des chiroptères.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LE DOUBLE HÉRITAGE DE BLETCHLEY PARK

Haut lieu de l'histoire de l'informatique, Bletchley Park est aussi empreint de son passé militaire durant la Seconde Guerre mondiale.



La machine Enigma, inventée dans les années 1920, était utilisée par l'armée allemande pour chiffrer ses messages.

Un épisode important de l'histoire de l'informatique s'est déroulé au cours de la Seconde Guerre mondiale dans la petite ville anglaise de Bletchley, à la Government Code and Cypher School, structure installée sur le domaine de Bletchley Park. J'ai récemment eu l'occasion de visiter cet endroit transformé en musée. Un lieu un peu déconcertant par son double héritage, militaire et informatique.

Ce qui s'est joué à Bletchley Park fait partie de l'histoire de la cryptographie. Depuis l'Antiquité, les armées chiffrent leurs messages pour les transmettre en les protégeant des regards ennemis. Pour ce faire, un algorithme simple consiste à choisir une clé constituée d'un nombre n compris entre 1 et 25, et à substituer à chaque lettre du message celle située n places plus loin dans l'alphabet. Par exemple, quand la clé est le nombre 3, un d est substitué aux a , un e aux b , etc. Pour déchiffrer un tel message, il suffit de connaître la clé et d'effectuer la substitution inverse.

Depuis que les armées chiffrent leurs messages, celles des ennemis tentent de les cryptanalyser, c'est-à-dire de les déchiffrer sans en connaître la clé. Dans le cas de l'algorithme élémentaire présenté, il suffit d'essayer les 25 clés possibles. Bien sûr, durant la Seconde Guerre mondiale, les armées de l'Axe chiffrèrent leurs messages

Un lieu déconcertant par son double héritage, militaire et informatique

à l'aide d'algorithmes beaucoup plus élaborés. La Government Code and Cypher School, à Bletchley Park, était le service chargé de cryptanalyser ces messages.

Quel rapport avec l'informatique ? Pour chiffrer leurs messages, les armées de l'Axe utilisaient des machines électromagnétiques complexes – les fameuses Enigma et Lorenz –, et les Britanniques

ont construit, à Bletchley Park, pour cryptanalyser ces messages, des machines plus complexes encore : les machines Bombe et Colossus, qui annonçaient les premiers ordinateurs construits quelques années plus tard. Colossus, par exemple, est la première machine binaire de l'histoire. Par ailleurs, plusieurs pionniers de l'informatique, en particulier Alan Turing, ont participé à ces travaux.

Bletchley Park est donc, pour les informaticiens, un peu ce que le mont Palatin est pour les Romains : c'est, selon le mythe, le lieu où tout a commencé. Mais Bletchley Park n'est pas que cela, car, selon certains historiens, sans les informations obtenues par la cryptanalyse des messages des nazis, la victoire des Alliés était loin d'être acquise. Ainsi, Bletchley Park n'est pas seulement le lieu de naissance de l'informatique, c'est aussi, selon un autre mythe, l'endroit où la Seconde Guerre mondiale a basculé.

L'existence de la Government Code and Cypher School a été tenue secrète jusqu'en 1974 et le parc n'a été transformé en musée qu'en 1993. Ce musée, qui reflète la dualité du lieu, hésite entre la science et la guerre, entre le palais de la Découverte et le musée de l'Armée, et laisse le visiteur avec une impression étrange. Certaines salles présentent les machines Bombe et Colossus et expliquent comment elles préfigurent les ordinateurs à venir. D'autres célèbrent le dévouement des soldats qui ont libéré l'Europe de la tyrannie.

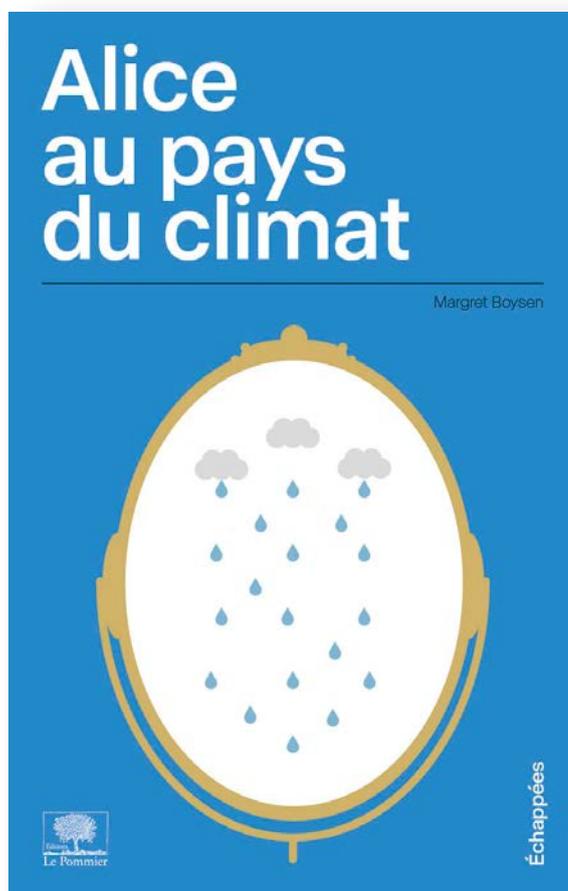
L'administration de Bletchley Park tente cependant de créer un peu plus de cohérence : depuis 2008, le parc abrite un minuscule second musée, le National Museum of Computing, consacré à l'histoire de l'informatique en général et non uniquement à celle de l'informatique pendant la Seconde Guerre mondiale. Si cette évolution se poursuit, le parc abritera peut-être un jour deux musées indépendants. À moins qu'il ne décide de continuer à nous rappeler qu'un événement particulier appartient toujours simultanément à plusieurs histoires. ■

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



Climat : le pari de l'imaginaire

Quand Alice passe
de l'autre côté du miroir...
c'est pour se retrouver
au cœur des modèles
climatiques !



Margret Boysen, 400 p. – 21€



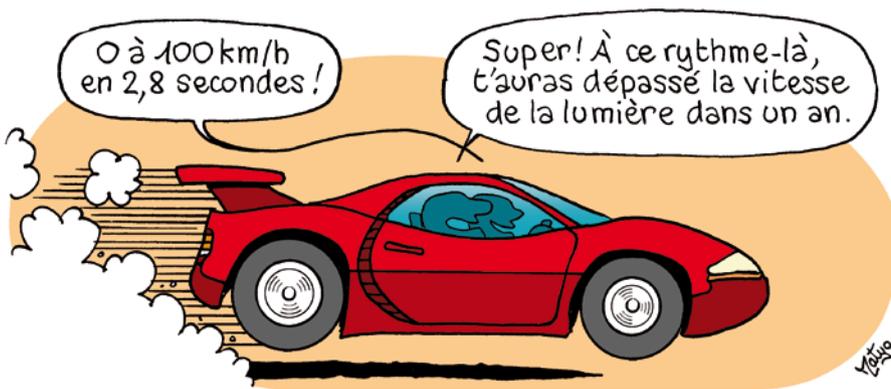
Retrouvez toutes nos nouveautés
sur notre site
www.editions-lepommier.fr



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

LA TANGENTE AU PRÉSENT ET L'ORDINATEUR QUANTIQUE

Lorsqu'on estime des progrès futurs, on tend à extrapoler le rythme actuel des avancées. Ce biais conduit souvent à des prévisions trop optimistes, ou trop pessimistes.



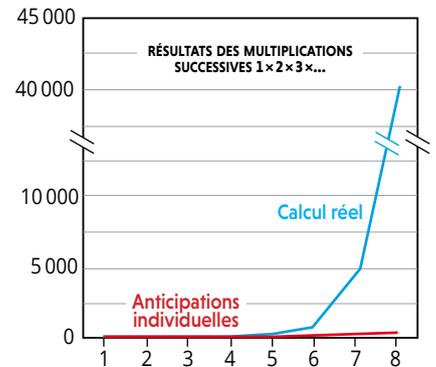
Le directeur technique de Microsoft France a déclaré récemment: «Beaucoup d'experts prévoient l'arrivée de l'ordinateur quantique d'ici à dix ou quinze ans. Je serais très surpris que cela prenne autant de temps.» Un tel optimisme est fréquent, mais, compte tenu de l'immense défi technique que représente la réalisation d'un ordinateur quantique, il est probablement exagéré. Il y a de fortes raisons de douter qu'on parvienne à relever le défi aussi vite et   un coût économiquement rationnel, rappellent nombre d'experts et parmi eux le Prix Nobel de physique Serge Haroche.

La croyance que l'ordinateur quantique serait pour demain s'explique sans doute par une représentation biaisée du progrès et de son rythme. Il faut reconnaître qu'en la matière, notre cerveau est aidé par la

popularité de la «loi de Moore», qui s'est, jusqu'à présent, assez bien vérifiée. Cette pseudo-loi vient de la constatation que fit Gordon Moore, l'un des fondateurs de la société Intel, concernant les progrès de la

L'optimisme vis-à-vis de l'ordinateur quantique est aidé par la popularité de la loi de Moore

fabrication des microprocesseurs.  nonc e en 1965, Gordon Moore la précisa dix ans plus tard en affirmant que le nombre de transistors par microprocesseur doublerait tous les deux ans.



Une telle spéculation part du principe implicite que ce qui a été vrai hier et aujourd'hui le sera probablement demain. Ce principe est enraciné dans une disposition de notre esprit à anticiper le futur en extrapolant selon une tangente au présent. Dans les années 1970, les psychologues Amos Tversky et Daniel Kahneman l'ont bien mis en exergue expérimentalement.

Ces chercheurs israéliens proposèrent à des sujets de calculer mentalement le produit $1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8$. Le calcul n'était pas très difficile, mais ils interrompaient les sujets avant qu'ils aient pu l'achever en leur demandant: «  votre avis, quel sera le résultat final?» La médiane des estimations était de 512, alors que la bonne réponse est 40 320.

Cette sévère sous-estimation venait de ce que les individus proposaient leur approximation à partir des données partielles (là où ils en étaient de leur calcul) et tiraient mentalement une sorte de tangente à la courbe représentant les résultats successifs des opérations (*résultats qu'indique le graphique ci-dessus*).

Cette heuristique mentale nous rend inaptes à penser les brusques accélérations ou décélérations d'un phénomène: puisque nous nous appuyons sur la tangente, à l'état présent, de son évolution, nous avons tendance à surestimer ou sous-estimer l'évolution future. C'est l'un des éclairages possibles à notre optimisme vis-à-vis de certaines innovations, qu'elles soient en cours de développement ou qu'elles soient, comme l'ordinateur quantique, encore au stade de la recherche fondamentale. ■

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

Tous les papiers se recyclent,
alors trions-les tous.

**C'est aussi
simple à faire
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio.



Quand les plantes font des **maths**

Les nombreuses feuilles d'*Aloe polyphylla*, une espèce originaire d'Afrique du Sud, forment de magnifiques spirales qui tournent dans les deux sens.



L'ESSENTIEL

> Au fil de leur croissance, les plantes produisent d'étonnants motifs géométriques.

> En particulier, chez nombre de végétaux, l'angle entre deux organes successifs n'est autre que l'angle d'or, relié au nombre d'or.

> Depuis quelques années, les biologistes ont identifié

divers mécanismes intervenant dans la mise en place de ces motifs géométriques.

> Tout se passe dans les méristèmes, de minuscules niches de cellules souches où naissent les organes selon un plan qui n'est peut-être pas aussi déterministe qu'on le pensait.



TEVA VERNOUX
directeur de
recherche au CNRS
au sein du
laboratoire
Reproduction
et développement
des plantes, à l'ENS
de Lyon



**CHRISTOPHE
GODIN**
directeur de
recherche à l'Inria
au sein du même
laboratoire



FABRICE BESNARD
chargé de
recherche à l'Inra
au sein du même
laboratoire

Spirales croisées, arrangement régulier des feuilles le long des tiges, organisation des écailles de pommes de pin... Les végétaux fabriquent des géométries complexes qui fascinent depuis longtemps. Aujourd'hui, des chercheurs commencent à comprendre les mécanismes biologiques qui produisent ces motifs géométriques.

Qui n'a pas déjà été intrigué par la beauté des motifs végétaux? Et en particulier par les régularités et les symétries quasi cristallines que forme ce que l'on nomme la phyllotaxie? Du grec *phyllo* (feuille) et *taxie* (ordre), il s'agit de l'arrangement des feuilles (et par extension de tout élément botanique) le long des tiges d'une plante. Ces arrangements fascinants sont une source d'inspiration inépuisable pour l'art humain, comme le suggèrent les motifs déployés par exemple dans l'art musulman ou l'art nouveau, mais ce n'est pas tout. Ils ont aussi des propriétés mathématiques étonnantes dont on commence à décrypter les dessous biologiques.

Au-delà des implications en termes d'évolution (voir l'encadré page 28), les mécanismes qui assurent l'autoorganisation de géométries aussi complexes ont longtemps laissé les scientifiques perplexes. Comment émergent ces motifs réguliers, des molécules jusqu'à la plante entière?

Bref: comment les plantes font-elles des mathématiques? Depuis plus de deux cents ans, des chercheurs allient mathématiques, physique, informatique et biologie pour répondre à ces questions, mais ces vingt dernières années, des avancées majeures ont été obtenues. Depuis une dizaine d'années, notamment, plusieurs équipes interdisciplinaires, dont la nôtre, ont mis au point des approches qui combinent les dernières avancées de la biologie moléculaire et des outils de modélisation pour mieux disséquer le fonctionnement de ce système complexe.

L'ÉTONNANT POUVOIR ORGANISATEUR DU MÉRISTÈME

Pour commencer cette histoire, observons, au bout des tiges, les petites zones des plantes qui fabriquent leur phyllotaxie: les méristèmes, des tissus spécialisés qui contiennent des cellules souches et produisent en permanence de nouveaux organes (voir la photo page 31). Dans cet espace réduit (plus petit qu'une tête d'épingle chez de nombreuses plantes), chaque nouvel organe se forme à un moment précis et

À QUOI ÇA SERT LA PHYLLOTAXIE ?

Mais à quoi ça sert ? Cette question revient inmanquablement en biologie. Dans le cadre de la théorie de l'évolution, elle se reformule plutôt ainsi : les phyllotaxies procurent-elles aux plantes un avantage sélectif particulier ? Autant le dire tout de suite, nous n'avons pas la réponse. Il faut toutefois se méfier de la tendance spontanée de l'esprit humain à considérer tout élément biologique comme étant le fruit d'une sélection positive *ad hoc*.

Prenons le lieu commun qui considère la phyllotaxie comme une adaptation permettant de capter au mieux la lumière, car elle minimiserait le recouvrement entre feuilles. Cette assertion ne résiste pas longtemps à l'analyse. D'abord, elle fait fi de la diversité des phyllotaxies existantes : beaucoup de plantes présentent une phyllotaxie avec des recouvrements importants et pourtant manifestement viable. De plus, la phyllotaxie ne détermine que l'insertion des feuilles sur la tige. Dans bien des cas, les



La phyllotaxie ne maximise souvent pas la captation de l'énergie lumineuse, comme ici chez une véronique arbustive (genre *Hebe*), de phyllotaxie verticillée très compacte.

feuilles se réorientent par des mouvements de croissance, de flexion ou de torsion mécanique dans la direction de la lumière. Par ailleurs, toutes les plantes n'ont pas intérêt à maximiser leur exposition au soleil, en particulier dans les environnements arides. À notre connaissance, il n'a en outre pas été établi de corrélation entre le taux de recouvrement

possibles ont été proposés. Par exemple, dès 1873, le médecin anglais Hubert Airy suggérait que le caractère compact de ces structures protégerait les jeunes organes des stress externes (températures, blessures, prédation, etc.). Aussi intéressantes soient-elles, ces hypothèses posent un problème majeur : elles sont difficiles à tester expérimentalement, car il est difficile de comparer différentes phyllotaxies ou de les modifier expérimentalement sans que d'autres caractères de la plante ne changent. Sans compter que mesurer rigoureusement des avantages sélectifs n'est pas chose aisée.

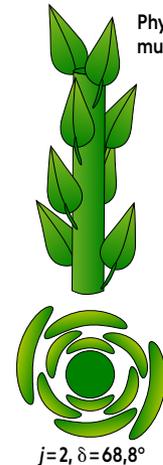
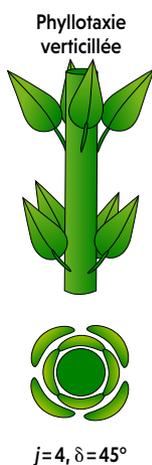
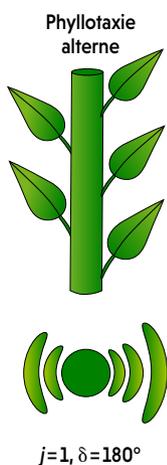
Une alternative à ces hypothèses adaptationnistes serait que les motifs géométriques des phyllotaxies ne soient qu'une conséquence indirecte – et donc non objet de la sélection en tant que tel – de la façon dont les plantes se développent, véritable objet de la sélection. La façon dont les plantes fabriquent leurs organes explique beaucoup des propriétés géométriques des phyllotaxies. Mais cette explication n'exclut pas que ces propriétés émergentes ne puissent conférer un avantage sélectif particulier, qui *in fine* favoriserait la sélection des mécanismes contrôlant la formation des organes...

T. V., C. G. et F. B.

Les différentes hypothèses sont difficiles à tester expérimentalement

des phyllotaxies et le taux d'ensoleillement que les plantes subissent. Enfin, cet argument ignore la nature des structures impliquées. La phyllotaxie ne concerne pas que les feuilles, mais aussi beaucoup d'éléments botaniques non photosynthétiques, pour qui la maximisation de l'éclairage n'est pas pertinente : écailles de pommes de pin, «fleurons» (petites fleurs) des marguerites, organes d'une fleur (hormis les sépales).

Hormis l'optimisation de la captation de la lumière, d'autres intérêts adaptatifs



Les principaux types de phyllotaxie, caractérisés par le nombre j d'organes insérés au même nœud de la tige, et par l'angle δ de divergence entre les organes successifs.

- > à une place précise tout près du centre du méristème. La croissance continue de la tige et des organes dilate ensuite cet arrangement microscopique et produit les motifs phyllotaxiques que nous observons à l'œil nu. Cette phase d'allongement secondaire des organes n'apporte pas en général de changement critique dans leur disposition relative. La phyllotaxie est donc déterminée de façon très précoce, au moment même de

éléments voisins dessine d'autres spirales, bien visibles cette fois, les unes tournant dans un sens, les autres dans l'autre. Et si l'on compte le nombre de ces spirales, nommées parastiches, dans chaque sens, on trouve dans la grande majorité des plantes deux nombres qui ne doivent rien au hasard, comme le fit remarquer en 1831 le botaniste allemand Alexander Braun (*voir l'encadré page 30*). Ce sont deux nombres consécutifs de la suite de Fibonacci. Chaque nombre de cette suite est la somme des deux précédents, en partant de 1 et 1 :

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, ...

Ainsi, une pomme de pin fait en général apparaître 8 spirales dans un sens et 13 dans l'autre, une marguerite 21 spirales dans un sens et 34 dans l'autre, etc.

L'ANGLE D'OR DANS LES SPIRALES DES PLANTES

Identifiée et étudiée pour la première fois par Léonard de Pise (Leonardo Fibonacci) au XIII^e siècle, cette suite a de très nombreuses et remarquables propriétés mathématiques. En particulier, si l'on considère la suite constituée des rapports successifs entre deux termes consécutifs (suite des ratios de Fibonacci) :

$1/1, 2/1, 3/2, 5/3, 8/5, \dots$,

celle-ci converge et tend vers $(1+\sqrt{5})/2$, c'est-à-dire le nombre d'or Φ (égal à environ 1,618). Pendant des siècles, ce nombre a été considéré comme une proportion harmonieuse, voire divine, dans les traités d'architecture, de dessin et même de musique. Dans le contexte des plantes, ce nombre est en particulier dissimulé dans l'angle relativement constant que forment deux organes successifs dans une phyllotaxie spiralée: cet angle vaut en moyenne 137,5 degrés. Si l'on multiplie 137,5 par le nombre d'or 1,618, on trouve un angle de 222,5 degrés, soit exactement son angle complémentaire (leur somme fait 360 degrés, soit un tour exactement!). Nos Anciens auraient pu dire que l'angle 137,5 degrés, baptisé «angle d'or», partage le cercle d'une façon harmonieuse (*voir le glossaire ci-contre*).

Réciproquement, on montre mathématiquement que si un motif est généré en créant périodiquement des organes séparés successivement par un angle voisin de l'angle d'or dans un mouvement concentrique, alors des spirales secondaires apparaissent (les parastiches), et les nombres de spirales dans chaque sens sont deux nombres consécutifs de la suite de Fibonacci.

La présence de l'angle d'or rend la question de la formation de la phyllotaxie plus intrigante encore... Comment des cellules dans un tissu (le méristème) déterminent-elles avec une telle précision le lieu où un nouvel organe se forme? Et pourquoi l'angle d'or apparaît-il si fréquemment dans la croissance des plantes?

Au cours des XIX^e et XX^e siècles, devant l'impossibilité d'observer expérimentalement >

Comment des cellules déterminent-elles avec précision le lieu où se forme un organe?

GLOSSAIRE

PHYLLOTAXIE

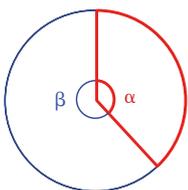
Géométrie qui caractérise la disposition autour d'un axe de croissance de tout élément botanique : feuille, branche, bourgeon, écailles, fruits, fleurs, pétales, étamines...

MÉRISTÈME

Tissu végétal indifférencié qui permet à la plante de créer de nouveaux tissus ou organes et de croître tout au long de sa vie.

ANGLE D'OR

En géométrie, il est défini comme le plus petit des deux angles complémentaires α et β tels que $\beta/\alpha = 2\pi/\beta$. Cette définition implique que $\beta/\alpha = \Phi$ (le nombre d'or) et que l'angle d'or $\alpha = 2\pi/\Phi^2$, soit environ 137,5°.



l'apparition des organes dans le méristème. Comment alors le groupe de quelques cellules qui donnera naissance au futur organe est-il déterminé au sein d'un tissu de quelques centaines de cellules? Pour le comprendre, observons tout d'abord attentivement l'organisation des motifs phyllotaxiques.

L'analyse quantitative de ces motifs géométriques a révélé des propriétés étonnantes. Il existe différentes phyllotaxies, que l'on classe en utilisant deux critères: le nombre d'éléments insérés sur un nœud, c'est-à-dire au même endroit de la tige (la jugacie, du latin *jugare*, lier) et l'angle de divergence qui sépare deux éléments (ou groupes d'éléments) successifs. Quatre grands types sont ainsi définis: les phyllotaxies alternes, spiralées, verticillées et multi-juguées (*voir l'encadré page ci-contre*).

Des études botaniques, bien que non exhaustives, semblent indiquer que les phyllotaxies spiralées sont les plus répandues. Et c'est leur étude qui a propagé un parfum d'ésotérisme sur la phyllotaxie. En effet, on distingue plusieurs spirales dans ces arrangements. La première relie les organes dans l'ordre où ils ont été produits dans le temps, du plus jeune au plus vieux, par exemple. Souvent peu visible, cette spirale génératrice s'enroule longitudinalement autour de la tige, feuille après feuille, comme les marches d'un escalier en colimaçon.

Lorsque les structures restent compactes (imaginez un escalier en colimaçon très comprimé dans le sens de la hauteur!), comme dans une pomme de pin, la proximité visuelle des

> ce qui se passe précisément à l'intérieur des méristèmes, trop petits et très bien protégés par la plante, les scientifiques ont imaginé des mécanismes qui pourraient rendre compte de l'autoorganisation des motifs phyllotaxiques et de leur diversité. À l'instar de la façon dont les astrologues prénewtoniens avaient construit différents modèles du mouvement des astres dans le ciel, les chercheurs ont donc spéculé sur les mécanismes biologiques sous-jacents en se servant d'observations et d'expérimentations macroscopiques.

LE TOURNANT DE L'ÉPILOBE

Plusieurs observations, par exemple, indiquent que l'angle de divergence n'est pas déterminé de manière intrinsèque à la plante, génétiquement notamment. En effet, on constate régulièrement des phyllotaxies différentes au sein de la même espèce, qui ne semblent donc pas héréditaires génétiquement. Par exemple, on a observé chez quelques spécimens de tournesol des phyllotaxies spiralées avec un angle de divergence proche de 99,5 degrés au lieu du classique 137,5 degrés, et des nombres de parastiches se conformant à la suite de Lucas (une variante de la suite de Fibonacci).

Ces variants sont assez spontanés dans la nature. Il existe même des plantes ayant des phyllotaxies différentes entre branches (pourtant génétiquement identiques)! Chez certains végétaux, un même méristème change parfois de phyllotaxie au cours de sa vie. Ces observations ont reçu une confirmation de poids avec les expériences originales menées par les Britanniques Mary et Robert Snow dans les années 1930.

Grâce à des manipulations microchirurgicales, ils perturbèrent le fonctionnement de méristèmes chez différentes plantes. Dans une de leurs expériences clés, ils incisèrent en deux le méristème au sommet des tiges d'un épilobe à grandes fleurs (*Epilobium hirsutum*), une plante dont les feuilles sont opposées. Les deux moitiés des méristèmes ont alors continué à fonctionner indépendamment, mais cette fois avec une phyllotaxie spiralée! Ce résultat indique bien que l'angle de divergence n'est pas déterminé chez une plante. Il suggère aussi qu'un même mécanisme produit les différentes phyllotaxies.

Ces expériences ont peu à peu conduit à l'hypothèse que ce sont les interactions entre organes et les conditions initiales (nombre et position des organes présents avant la formation d'un nouveau) qui sont responsables de la formation du motif. Un principe que l'on peut résumer avec cette règle simple: un organe se forme à la périphérie de la zone centrale du méristème au moment et à l'endroit où la croissance finit par laisser une place suffisante.

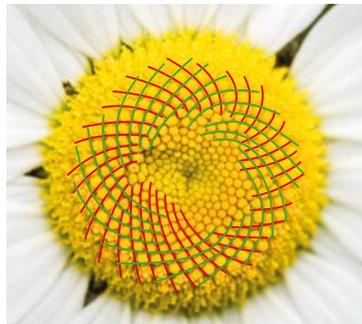
Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, divers chercheurs ont exploré le potentiel de

LE NOMBRE D'OR : RÉALITÉ SCIENTIFIQUE OU CONSTRUCTION SUBJECTIVE ?

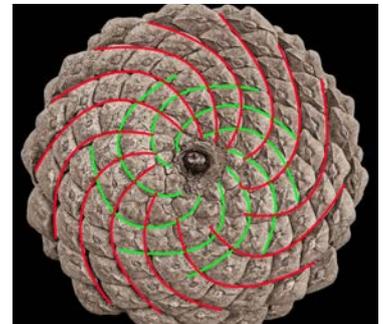
Les phyllotaxies spiralées sont reliées à la suite de Fibonacci de deux façons au moins : par la paire de nombres comptant les spirales horaires et anti-horaires (voir les photos ci-dessous) et par l'angle d'or (voir la photo page ci-contre). La présence du nombre d'or a souvent été invoquée dans différents contextes : architecture antique, peinture des maîtres du Cinquecento, astrologie... On trouve aussi de multiples mentions de l'existence du ratio d'or, aussi bien dans la forme des coquillages de nautilus que dans les rapports de proportionnalité entre différents segments du corps humain. Ces données sont à prendre avec prudence. Parfois, l'analyse précise et rigoureuse des échantillons suggère plutôt que la présence du nombre d'or résulte d'arrondis grossiers, de délimitations arbitraires ou de biais des échantillons mesurés... Après tout, quoi de plus facile que de trouver un rapport qui avoisine vaguement 1,6 ? La différence avec le nombre attendu sera expliquée par une inhérente variabilité biologique ou par l'incertitude de la mesure. Il en est de même de l'angle de divergence de la phyllotaxie : lorsqu'il est mesuré chez l'arabette, il est rarement égal à 137,5 degrés. Mais, statistiquement, en moyenne, il est proche de cette valeur.

En revanche, les nombres comptant les spirales étant des entiers et non des arrondis, leur correspondance avec les termes de la suite de Fibonacci ne laisse pas la place au doute. À notre connaissance, c'est d'ailleurs le seul exemple biologique où cette suite et, grâce à elle, le nombre d'or peuvent être associés de manière solide. De plus, cette association est confortée par les connaissances que nous avons sur la façon dont ces motifs se forment. Toutefois, il reste parfois un biais subjectif dans la façon dont la phyllotaxie est présentée : l'attention se focalise sur les phyllotaxies spiralées de Fibonacci et moins sur les autres types de phyllotaxies, variations, erreurs, désordres... Un des enjeux des recherches actuelles est d'expliquer le plus de motifs possible, tant par la modélisation que par la biologie.

T. V., C. G. et F. B.

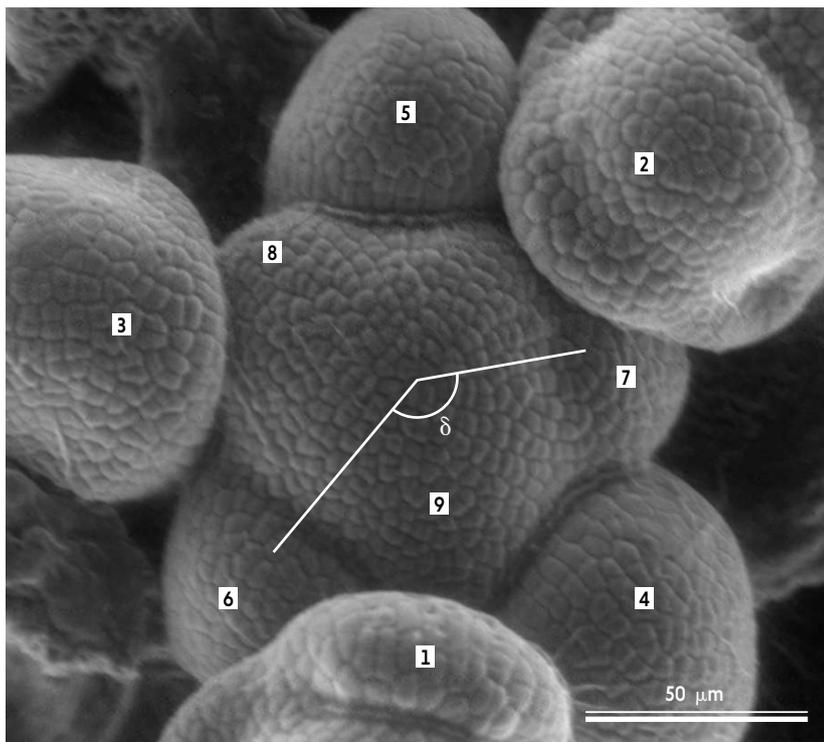


Cette marguerite a une phyllotaxie spiralée de type (21, 34) : ses fleurons dessinent 21 parastiches dans un sens (en vert) et 34 dans l'autre (en rouge) – deux nombres consécutifs de la suite de Fibonacci.



Cette pomme de pin a une phyllotaxie spiralée de type (8, 13) : ses écailles dessinent 8 parastiches dans un sens (en vert) et 13 dans l'autre (en rouge) – deux autres nombres consécutifs de la suite de Fibonacci.

ce principe autoorganisateur. De nombreux modèles ont ainsi été élaborés à l'échelle du tissu et des organes en formation. Ces travaux ont abouti à l'identification d'un principe élémentaire commun à tous les systèmes phyllotaxiques: les organes récemment créés à l'extrémité des tiges d'une plante inhibent la formation de nouveaux organes dans leur voisinage immédiat en diffusant autour d'eux un signal d'inhibition. La superposition de tous ces signaux crée un champ d'inhibition à la surface des méristèmes, qui détermine le moment et le lieu de croissance des nouveaux organes. C'est ainsi que, au début des années 1990, Yves Couder et Stéphane Douady, à l'École normale



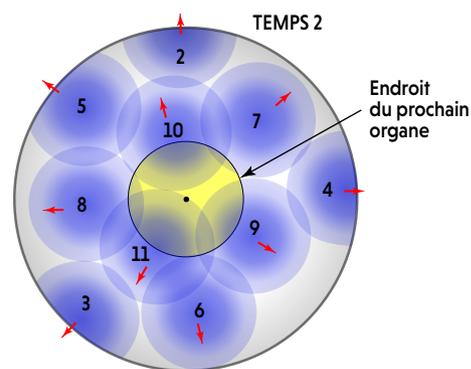
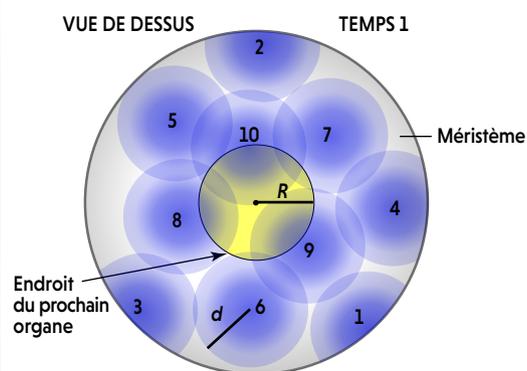
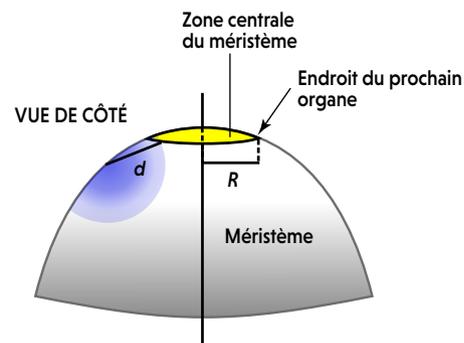
MÉRISTÈME, ANGLE D'OR ET MODÉLISATION

Un méristème (ci-dessus celui au bout d'une tige d'une arabette des dames) est une niche de cellules souches qui, durant toute la vie de la plante, d'une part se renouvellent et, d'autre part, construisent ses organes. Dans une phyllotaxie spiralée, comme ici, l'angle δ entre deux organes vaut en moyenne 137,5 degrés, une valeur très proche de l'angle d'or. Un modèle où chaque nouvel organe (les numéros, du plus vieux au plus jeune) crée un champ inhibiteur de portée d autour de lui (les disques violets), et où aucun organe ne peut se former dans un rayon R du centre fait émerger cet angle d'or. Chaque nouvel organe apparaît au bord de la zone centrale, là où la résultante des champs inhibiteurs est la plus faible. Au fur et à mesure que la plante croît, les champs inhibiteurs s'estompent en s'éloignant du centre.

supérieure, à Paris, ont construit un modèle physique de la phyllotaxie.

Les deux physiciens ont observé que des gouttelettes de fluide métallique placées dans un champ magnétique reproduisent, en se repoussant et en s'éloignant du centre, les grands types de phyllotaxie. Ils ont ensuite repris le principe de cette expérience dans un modèle mathématique avec l'objectif de synthétiser et unifier les efforts de modélisation précédents. Dans ce modèle, le méristème en croissance est considéré comme un système dynamique déterministe. Il confirme qu'il est possible de générer des angles de divergence d'une très grande précision sans qu'ils soient fixés à l'avance : l'angle entre deux organes consécutifs comme le temps qui les sépare sont des propriétés émergentes des mécanismes d'inhibition entre organes et de la croissance de la plante.

Mais la plus grande force de ce modèle est sa puissance explicative : le même mécanisme permet de reproduire l'ensemble des phyllotaxies observées – les grands types (voir l'encadré page 28), mais aussi les motifs plus rares, les transitions naturelles entre phyllotaxies et



même certaines expériences de perturbation comme celles de Mary et Robert Snow. Dans ce modèle, l'émergence du motif de phyllotaxie est contrôlée par la variation d'un paramètre géométrique unique, $\Gamma = d/R$, où d est la portée du champ inhibiteur émis par chaque organe et R le rayon de la zone centrale, où aucun organe ne peut se former (voir la figure ci-dessus).

UN MÊME MODÈLE POUR TOUTES LES PHYLLOTAXIES

Au début de la croissance d'un axe, le méristème est petit (donc R , qui varie avec la taille du méristème, est petit et Γ est grand). Imaginons que le premier organe crée dans l'espace du méristème un large champ d'inhibition. Le prochain organe a alors plus de chance d'apparaître à l'opposé du premier organe, c'est-à-dire à 180 degrés. Puis le méristème grossit (R augmente et Γ diminue). L'organe suivant, lui, ne pourra pas apparaître exactement à 180 degrés du dernier, car il subira encore une légère influence du premier organe si la croissance n'est pas trop rapide. Il apparaîtra alors à un angle un peu inférieur à 180 degrés, etc.

> Il est possible de montrer que, au fur et à mesure que la croissance se poursuit et que le paramètre de contrôle Γ diminue, les organes suivants seront piégés entre des angles de type $2\pi(1-1/b)$, où b est un élément de la suite des ratios de Fibonacci. Comme cette suite tend vers le nombre d'or Φ , l'angle de divergence tend vers $2\pi(1-1/\Phi)$, qui n'est autre que l'angle d'or. L'angle d'or apparaît donc chez les plantes du fait de la dynamique de croissance, qui tend à faire diminuer le paramètre de contrôle Γ , et des propriétés géométriques de la croissance des méristèmes, qui tendent à piéger l'angle de divergence entre des valeurs le conduisant peu à peu vers l'angle d'or.

À la fin du xx^e siècle, la communauté scientifique s'accordait à dire que ce principe géométrique déterministe d'inhibition entre jeunes organes est le mécanisme à l'origine d'une grande partie des motifs phyllotaxiques, spirales ou non, observés chez les plantes. En

d'autres termes, les plantes ne font pas des maths à proprement parler: elles ne font qu'«empiler» les organes au fur et à mesure de leur formation, selon la formule de Stéphane Douady et Yves Couder. Leurs propriétés mathématiques ne sont que le fruit indirect, mais au combien étonnant et esthétique, de ce processus d'autoorganisation.

EN QUÊTE D'UN SIGNAL INHIBITEUR

Le modèle géométrique déterministe de la phyllotaxie s'appuie sur des règles de base relativement simples: un centre qui ne peut pas produire d'organes, des organes qui inhibent la formation de nouveaux organes dans leur voisinage immédiat et un éloignement progressif du centre par rapport aux organes déjà créés. Mais cette simplicité est un défi pour les biologistes: comment les plantes mettent-elles en œuvre ces règles «simples»? Et en particulier, quelle est la

LA PHYLLOTAXIE DES MOUSSES: UN MÉCANISME DIFFÉRENT

Et si on reposait le problème depuis le début? Comme une enquête où l'objectif serait le même – comprendre la phyllotaxie –, mais le déroulement tout autre, car les plantes en question fonctionneraient différemment de celles dont nous avons traité jusque-là.

Ces plantes sont les mousses, un groupe de végétaux terrestres apparu il y a entre 340 et 440 millions d'années, soit bien plus ancien que celui des plantes à fleurs comme l'arabette, dont l'origine remonte à seulement 200 à 245 millions d'années. L'ancêtre commun de ces deux groupes ne présentait probablement pas de feuilles. Cet organe serait apparu indépendamment et aurait été maintenu au cours de l'évolution des deux groupes, sans doute parce qu'il représente une solution optimale à la captation de l'énergie lumineuse pour la photosynthèse. On parle ici d'un processus d'évolution convergente des formes. La ressemblance ne s'arrête pas là. Les mousses aussi disposent leurs feuilles de façon régulière autour d'une tige, à la différence près que le méristème qui les produit est constitué d'une

seule cellule, contre des centaines pour les méristèmes des plantes à fleurs.

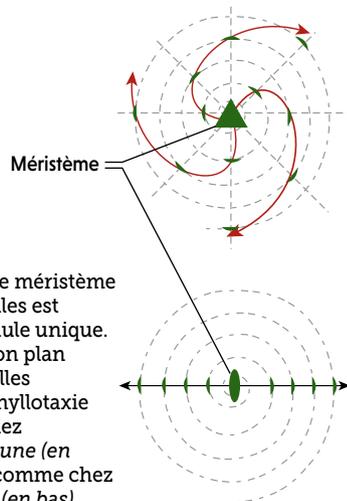
À chaque fois que cette cellule se divise, l'une des deux cellules résultantes deviendra une feuille et l'autre se maintiendra comme méristème à la pointe de la tige. La disposition des feuilles serait donc principalement déterminée par la forme de la cellule méristématique et la position de son plan de division. Comme chez les plantes à fleurs, la production rythmique de feuilles conduira à une phyllotaxie très régulière pouvant être spiralee ou distique (voir la figure).

Champs inhibiteurs pour les plantes à fleurs contre forme et plan de division cellulaire pour les mousses, les mécanismes semblent donc très différents. Mais se pourrait-il quand même que les signaux moléculaires contrôlant la phyllotaxie chez les plantes à fleurs jouent un rôle chez les mousses? Ce n'est pas impossible, car on trouve de l'auxine et des cytokinines chez ces plantes. Ayant un répertoire limité de molécules de signalisation, les plantes les recyclent constamment dans diverses combinaisons au cours de l'évolution. L'auxine est vraisemblablement présente dans le méristème des mousses et son export vers les feuilles par les transporteurs membranaires PIN, eux aussi détectés chez les mousses, est nécessaire pour son bon fonctionnement.

Il a été montré que l'accumulation d'auxine en l'absence des pompes PIN bloque la formation des feuilles, mais le rôle que joue ce processus sur la façon dont elles s'organisent autour de la tige demeure inconnu. Les cytokinines, elles, régulent la prolifération cellulaire et l'amorce des tiges chez les mousses, mais là aussi leur rôle exact dans la phyllotaxie n'a pas encore été démontré. Beaucoup de pistes restent donc à explorer pour comprendre dans quelle mesure des plantes très éloignées évolutivement peuvent prendre une apparence similaire...

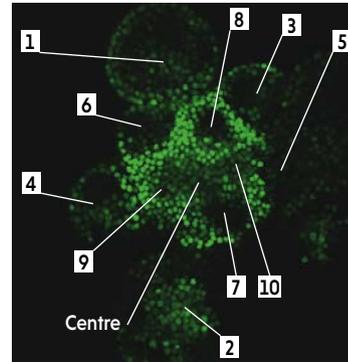
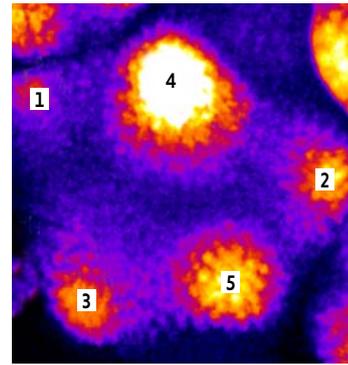
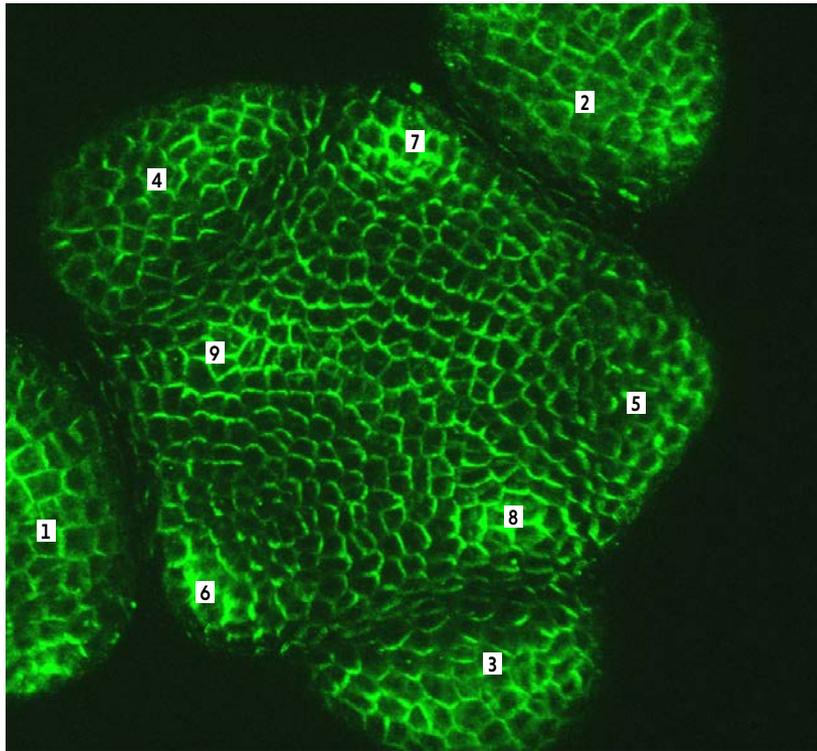
YOAN COUDERT

Laboratoire Reproduction et développement des plantes, université de Lyon, ENS de Lyon, UCB Lyon 1, CNRS, Inra, Inria



Chez les mousses, le méristème qui produit les feuilles est constitué d'une cellule unique. Selon sa forme et son plan de division, les feuilles construisent une phyllotaxie spiralee, comme chez *Polytrichum commune* (en haut), ou distique, comme chez *Fissidens taxifolius* (en bas).





LES MOLÉCULES DE LA PHYLLOTAXIE

Dans le méristème, plusieurs molécules influent sur le lieu et le moment où apparaîtra le prochain organe : une hormone, l'auxine, s'accumule dans les organes en formation (en bas à droite, repérée avec un biocapteur fluorescent dégradé par l'auxine) grâce à des transporteurs, les pompes PIN, qui l'aident à franchir la membrane des cellules (à gauche). Sans

auxine, pas d'organe ! En accumulant l'hormone, celui-ci en prive son voisinage direct. Une autre protéine, AHP6, s'accumule elle aussi dans les lieux des futurs organes (en haut à droite). Tant qu'elle y est assez concentrée, elle inhibe l'activité d'une autre hormone, la cytokinine, ce qui retarde leur croissance. Ainsi, les organes poussent l'un après l'autre...

nature des champs inhibiteurs prédits par ce modèle? Même si de nombreuses questions persistent, beaucoup de progrès ont été accomplis au cours des quinze dernières années, notamment en étudiant la formation des fleurs chez l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*), une plante facile à cultiver en laboratoire.

Paradoxalement, la quête d'un signal inhibiteur a d'abord commencé par la découverte... d'un activateur ! En effet, en 2000, Cris Kuhlemeier, de l'université de Berne, en Suisse, et ses collègues démontrent que chez l'arabette et la tomate, une hormone végétale, l'auxine, et plus particulièrement son transport dans les tissus sont nécessaires à la formation de nouveaux organes. On sait depuis longtemps que cette hormone se déplace dans la plante de manière active grâce à des transporteurs membranaires – des molécules qui l'aident à franchir la membrane des cellules. Cris Kuhlemeier et ses collègues ont montré que si l'on supprime ce transport actif, les fleurs ne se forment plus chez l'arabette. Mais si l'on applique localement de l'auxine sur une plante dont le transport est compromis, alors une fleur se remet à pousser !

Cette expérience clé suggère que le transport d'auxine entraîne une accumulation locale de cette hormone, laquelle est nécessaire à la

formation d'un organe. Mais qu'en est-il des champs inhibiteurs? L'expérience des biologistes suisses fournit aussi une piste de réponse : pour empêcher la formation d'un organe à un endroit, il suffit peut-être d'empêcher l'auxine de s'y accumuler. Et si les fleurs en formation concentraient si bien l'auxine qu'elles en privaient les cellules de leur voisinage?

Pour tester cette hypothèse dans des réseaux de cellules observées au microscope, plusieurs équipes dans le monde ont combiné études biologiques et modélisation informatique. En particulier, leurs résultats indiquent que la disposition du réseau des transporteurs membranaires d'auxine et sa dynamique sont compatibles avec les modèles où les fleurs en formation accumulent de l'auxine tout en privant leur voisinage de cette hormone (voir la figure ci-dessus). En outre, ils montrent que la zone centrale du méristème est insensible à l'auxine.

Tous ces phénomènes ont lieu dans l'épiderme, la couche cellulaire la plus externe de la plante. Pour se débarrasser rapidement de l'excès d'auxine, les jeunes organes en formation dissipent l'hormone accumulée dans les tissus internes, grâce à la construction précoce de leur système vasculaire. À mesure qu'elles grandissent, les fleurs se séparent du méristème et cessent d'entrer en compétition avec les plus

► jeunes pour l'auxine. Ce modèle moléculaire a depuis reçu des confirmations chez d'autres plantes évolutivement assez éloignées de l'arabette comme la tomate, le maïs ou l'orge.

Une seule molécule pour jouer le rôle d'activateur et d'inhibiteur: le mystère des champs inhibiteurs de la phyllotaxie est-il levé? Pas si sûr, la réalité est plus complexe. D'abord, le mécanisme moléculaire qui permet aux transporteurs de s'orienter correctement dans les cellules pour accumuler ou dissiper l'auxine reste inconnu. Plusieurs hypothèses s'affrontent sans qu'on puisse encore les départager: les transporteurs s'orientent-ils vers la cellule qui est la plus concentrée en auxine? Ou s'orientent-ils pour maximiser l'intensité des flux de cette hormone? On sait donc que les champs inhibiteurs correspondent à des zones de faibles concentrations en auxine créées par les transporteurs, mais on ne sait pas encore quels mécanismes contrôlent les transporteurs!

UN SIGNAL MÉCANIQUE ?

Par ailleurs, le signal chimique fourni par l'auxine pourrait bien être secondé par un signal mécanique. En effet, entourées d'une paroi rigide, les cellules végétales sont mises sous pression par l'eau qu'elles emmagasinent. De plus, la forme des tissus engendre des tensions locales qui modifient le comportement de molécules du cytosquelette, de grands polymères qui contrôlent la mécanique et l'architecture des cellules. Et lorsque le tissu grandit et se déforme, les cellules et leur cytosquelette réagissent à ces tensions nouvelles en modifiant les propriétés des parois cellulaires (rigidité et direction de croissance), ce qui modifie en retour les forces mécaniques. Des champs mécaniques complexes émergent donc du tissu en croissance. Donneraient-ils une information qui positionnerait les nouveaux organes? Un tel rôle direct n'a encore pas été démontré. En revanche, chez l'arabette, la mécanique semble intervenir de manière indirecte.

Tout d'abord, notre laboratoire a montré que les forces mécaniques influent sur l'orientation des transporteurs d'auxine. Ensuite, grâce à l'étude de mutants, de perturbations génétiques ciblées ou à des suivis précis de la croissance en microscopie, plusieurs équipes ont mis en évidence que l'accumulation locale d'auxine promeut la synthèse des composés de la paroi des cellules et la ramollit, tout en favorisant la croissance cellulaire. Tous ces événements sont probablement essentiels pour déclencher la croissance de la feuille ou fleur.

Deux signaux: est-ce suffisant cette fois? L'une de nos découvertes récentes permet d'en douter. Car, à force de chercher, nous avons finalement trouvé un inhibiteur diffusant autour des organes en formation: il s'agit d'une petite molécule, nommée AHP6, qui, quand elle



est suffisamment concentrée, inhibe l'activité d'une autre hormone végétale, la cytokinine (voir la figure page 33). Étonnamment, le champ que produit AHP6 ne perturbe pas l'angle entre deux organes, mais impose un rythme régulier à la formation des organes: la formation de deux organes successifs est bien séparée dans le temps, ce qui conduit à un agencement plus régulier des fleurs le long des tiges.

L'image qui émerge est donc celle d'un champ inhibiteur à plusieurs composantes. La répartition d'auxine en est l'élément central, mais d'autres facteurs contribuent à la robustesse du motif. Pourquoi l'auxine n'est-elle pas la seule productrice du champ inhibiteur? Cette question, encore sans réponse, est l'une des voies de recherche actuelles.

Enfin, la quête de la nature des champs inhibiteurs a quelque peu oblitéré d'autres éléments du modèle: quels facteurs assurent une croissance continue? Pourquoi les organes ne peuvent-ils pas se former au centre du méristème, même si, comme nous l'avons démontré, l'auxine s'y accumule? Qu'est-ce qui fait varier le paramètre de contrôle prédit par les modèles déterministes? Est-ce juste la croissance de la plante comme supposé ou un autre mécanisme plus spécifique, encore inconnu? Des éléments de réponse disparates existent dans la littérature scientifique, mais leur intégration au sein d'un modèle moléculaire cohérent fait toujours défaut.

Il est aussi possible que les modèles déterministes soient insuffisants pour décrire les phyllotaxies. Une grande partie de la force d'un modèle scientifique réside dans son pouvoir explicatif, voire prédictif. Plus il reproduit d'observations réelles, plus on est en mesure de proposer des explications aux phénomènes observés en étudiant les paramètres et le fonctionnement du modèle. Or le modèle géométrique

Les cactus arborent souvent de magnifiques motifs géométriques, comme celui-ci, de phyllotaxie de type (8,13), à l'instar de la pomme de pin.



déterministe peine à reproduire certaines de nos observations. En effet, au fil de nos études de la phyllotaxie spiralee chez *Arabidopsis thaliana*, nous avons accumulé des mesures qui montrent des variations dans le motif, des imperfections par rapport à la séquence attendue. Notamment, l'angle de divergence s'écarte de l'angle d'or lorsqu'on le mesure le long des tiges. Toutefois, ces variations ne sont pas du bruit aléatoire: elles ont une structure stéréotypée très frappante. Leur étude statistique et mathématique, couplée à l'observation de la formation des organes en temps réel, nous indique qu'elles correspondent à des organes se formant en même temps et dont l'ordre se trouve de temps en temps permuté le long de la tige.

Ces permutations sont relativement courantes chez *Arabidopsis thaliana* et on les observe facilement dans la nature sur des plantes ayant, comme l'arabette, une tige allongée qui sépare les éléments botaniques. Or, bien que possibles dans le cadre du modèle déterministe, les permutations obtenues n'atteignent jamais ni l'intensité ni la complexité que l'on a mesurées.

LA PART DU HASARD

Ces variations dessinent en filigrane les mécanismes à l'œuvre. Comment donc modifier les mécanismes du modèle déterministe pour corriger ses écarts à la réalité? Dans ce modèle, le niveau local du champ inhibiteur détermine si un organe va se former. À chaque pas de temps et pour toute position sur le pourtour du disque central d'un méristème, l'ordinateur calcule si les champs des organes voisins inhibent la croissance d'un organe, selon qu'ils dépassent ou non un certain seuil. Il génère alors un organe dans chaque zone où ce seuil est dépassé. Pourtant, de plus en plus d'études indiquent que le déclenchement de la formation d'un organe n'est pas aussi déterministe. Nous avons donc élaboré un nouveau modèle qui reprend les aspects géométriques du précédent, mais dans lequel ce déclenchement est probabiliste.

Un organe est produit selon une probabilité qui dépend du niveau d'inhibition (intensité et temps d'exposition) que les cellules perçoivent localement. L'introduction de cette nouvelle hypothèse dans le modèle permet de reproduire de manière plus fidèle les permutations mesurées chez *Arabidopsis thaliana*. De plus, nous en avons dérivé de nouveaux paramètres de contrôle du système, reliés à des propriétés observables comme la géométrie de la phyllotaxie, le nombre de permutations ou l'intervalle de temps qui sépare la formation des organes.

Ce nouveau modèle stochastique nous a aussi permis de remonter à des propriétés encore non observables, comme la sensibilité des cellules aux champs inhibiteurs. En

particulier, il suggère que la perception des signaux par les cellules est un facteur important à prendre en compte pour expliquer les motifs de phyllotaxie. Surtout, comme tout modèle, il offre un cadre pour proposer de nouvelles expériences et tester sa validité.

LES DÉFIS DES BIOLOGISTES

Tester un modèle n'est cependant pas une chose aisée, encore faut-il disposer des outils adéquats pour réaliser les expériences suggérées. Un premier défi consiste aujourd'hui à mesurer de façon précise et rapide plusieurs paramètres macroscopiques de l'architecture des plantes. Que ce soit pour étayer statistiquement les résultats ou pour distinguer les effets de différents gènes, la génétique nécessite souvent de mesurer de nombreuses plantes. Pourtant, l'étude de grosses cohortes n'est pas encore envisageable pour mesurer des paramètres comme l'angle de divergence, le nombre de permutations, la taille des tiges, le temps qui sépare la formation de deux organes, etc. Des procédures d'automatisation de ces mesures sont en développement, mais elles sont indispensables pour réaliser ce saut du qualitatif au quantitatif dans l'étude de la phyllotaxie.

Le deuxième défi est de relier quantitativement les paramètres de contrôle parfois assez abstraits définis dans les modèles à des données moléculaires ou cellulaires mesurables expérimentalement. Quelle est la taille d'un champ inhibiteur? Quelle est celle de la zone centrale où aucun organe ne peut se former? La difficulté provient cette fois du fait que ces paramètres ne sont pas nécessairement morphologiques, donc accessibles par la simple observation, mais fonctionnels. Il est donc nécessaire de connaître un minimum d'informations sur les bases moléculaires de ces fonctions pour en suivre la trace.

Par exemple, si les champs inhibiteurs correspondent aux concentrations d'auxine dans le méristème, il suffirait de suivre celles-ci au cours du temps pour déduire la dynamique des champs. Or jusque très récemment, il n'existait pas de moyen de mesurer quantitativement les niveaux d'hormones dans le méristème avec une sensibilité suffisante, à la résolution cellulaire. Mais en 2012, notre équipe a levé cet obstacle en élaborant un nouveau biocapteur (une protéine fluorescente sensible à la concentration d'auxine, voir la figure page 33) qui indique les concentrations d'auxine que les cellules perçoivent. En couplant ce biocapteur d'auxine avec d'autres marqueurs de l'activité et de la différenciation des cellules, il devient possible de suivre la dynamique spatiotemporelle de la distribution des signaux et de l'autoorganisation du méristème. Face aux modèles informatiques, la biologie moléculaire n'a donc pas dit son dernier mot! ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Refahi et al., **A stochastic multicellular model identifies biological watermarks from disorders in self-organized patterns of phyllotaxis**, *eLife*, vol. 5, article e14093, 2016.

C. Golé et al., **Fibonacci or quasi-symmetric phyllotaxis. Part I : Why ?**, *Acta Soc. Bot. Pol.*, vol. 85(4), article 3533, 2016.

F. Besnard et al., **Cytokinin signalling inhibitory fields provide robustness to phyllotaxis**, *Nature*, vol. 505, pp. 417-421, 2014.

G. Brunoud et al., **A novel sensor to map auxin response and distribution at high spatio-temporal resolution**, *Nature*, vol. 482, pp. 103-106, 2012.

T. Vernoux et al., **The auxin signalling network translates dynamic input into robust patterning at the shoot apex**, *Mol. Syst. Biol.*, vol. 7, article 508, 2011.

L'ESSENTIEL

> Au début du **xv^e** siècle, les colonies vikings du Groenland se sont mystérieusement vidées de leurs habitants.

> Les chercheurs ont longtemps expliqué leur déclin par le refus obstiné des Vikings d'adapter leurs coutumes européennes aux conditions de cette terre arctique.

> Pourtant, des fouilles archéologiques montrent que les Vikings du Groenland ont bien su évoluer.

> Un jeu complexe d'influences culturelles et politiques provenant de l'étranger aurait provoqué leur disparition.

L'AUTEUR



ZACH ZORICH journaliste indépendant vivant au Colorado, aux États-Unis. Ancien archéologue, il contribue à diverses publications telles que le magazine *Archaeologia*, *Nature* et *Science*

L'énigme des Vikings du Groenland





Après avoir mené une vie prospère au Groenland pendant cinq siècles, les Vikings ont subitement quitté l'île au xv^e siècle.

Quelles sombres menaces ont effrayé ces Scandinaves, que l'on imagine intrépides et endurants ? De nouvelles découvertes archéologiques expliquent leur mystérieuse disparition.



An 1000, le long de la côte ouest du Groenland. Une embarcation à six rames emmène un équipage de Vikings vers le bout du monde ou du moins ce qu'on considère comme tel à l'époque. Le vent, la pluie et les embruns d'eau salée glaciale transforment le périple en cauchemar. Les risques de noyade et d'hypothermie guettent à chaque instant. Finalement, après quinze jours de navigation, le bateau accoste dans un golfe, aujourd'hui appelé baie de Disko. Des morces se languissent sur les plages, où ils sont venus se reposer et s'accoupler. Les animaux, une vraie aubaine, constituent des cibles faciles et leurs défenses d'ivoire valent certainement une fortune en Europe. Les Vikings se réjouissent. Leur voyage éreintant est grassement remboursé.

Pendant des centaines d'années, les Vikings, également connus sous le nom de

Northmen («Hommes du Nord»), ont régné sur cet avant-poste arctique. Ils y ont établi deux colonies florissantes qui, à leur apogée, comprenaient des milliers de membres. Mais dans la première moitié du xv^e siècle, celles-ci ont disparu. Les Vikings s'étaient comme volatilisés. Que s'est-il donc passé ?

L'explication classique de la fin de l'implantation viking au Groenland tient en deux mots : la force de l'habitude. Les colons se seraient accrochés obstinément au mode de vie européen, s'entêtant à aménager des pâturages pour leurs vaches et leurs moutons sans s'aviser que ce type d'agriculture était mal adapté au climat froid et au terrain rocailleux de la région. Toutefois des preuves archéologiques, de plus en plus nombreuses, nous racontent une autre histoire, plus complexe.

D'abord, les Vikings auraient bel et bien su s'écarter de la tradition européenne pour s'adapter aux défis uniques que posait le Groenland. Ils ont appris, par exemple, à

Ces artefacts révèlent les facettes de la vie des Vikings au Groenland. Un anneau et le bâton de la tombe d'un évêque (1) témoignent de l'influence de l'Église sur les colonies. Les Vikings du Groenland entretenaient des liens culturels avec l'Europe, embrassant leurs modes vestimentaires (2) et leurs coutumes.



chasser le morse pour compléter leur alimentation. L'ensemble de ces adaptations auraient permis aux colonies de perdurer, malgré un refroidissement climatique qui rendait chaque année la vie un peu plus difficile dans cet environnement déjà hostile. Autre élément nouveau apporté au dossier par l'archéologie: les changements politiques et culturels à l'œuvre dans le reste du monde n'auraient pas épargné les Vikings du Groenland en dépit de leur isolement. Ces bouleversements les auraient marginalisés et auraient finalement constitué pour eux un péril encore plus dangereux que le changement climatique.

L'EXIL DU REDOUTABLE ERIK

Les Vikings ne se seraient peut-être jamais installés au Groenland si le redoutable Erik le Rouge n'avait pas commis une série de crimes. Selon les sagas islandaises – des œuvres en prose du XIII^e siècle qui mêlent histoire et légende et narrent la vie et les hauts faits des colonisateurs de l'Islande –, Erik et son père étaient de petits propriétaires fonciers vivant en Norvège. Impliqués dans plusieurs meurtres, ils furent condamnés à l'exil en Islande. Peu prompt à retenir les leçons, Erik fut plus tard banni de l'île volcanique pour avoir violemment réglé un différend entre voisins.

Mais vers quelle terre mettrait-il le cap cette fois? Ayant épuisé toutes les destinations connues, Erik navigua vers une région encore peu explorée: l'ouest. Il découvrit alors le

rivage d'une terre qui fut ensuite baptisée Groenland. Il dut s'y plaire, car à la fin de son exil, en 985, il retourna en Islande et persuada un groupe de colons de le suivre là-bas. Ils entassèrent leurs biens dans 25 embarcations et cinglèrent vers la terre promise. Seuls 14 bateaux survécurent au voyage.

La raison qui poussa d'autres Vikings à s'installer au Groenland est floue. Les historiens et les anthropologues qui ont étudié la question ont longtemps pensé qu'il s'agissait d'un acte guidé par la nécessité: toutes les bonnes terres agricoles d'Islande et des îles Féroé étant cultivées, les Vikings auraient cherché de nouveaux espaces pour y élever du bétail. Selon une autre théorie, ils auraient été victimes de la publicité mensongère d'Erik, qui aurait malicieusement baptisé de *Groenland* (littéralement «Terre verte») un continent rocheux et couvert de glace pour attirer plus de colons.

Poussés par le désespoir ou des visions de paradis, les Vikings ont donc commencé à affluer de l'Islande et l'Europe vers le Groenland, lors d'une première vague de migration qui s'est déroulée aux alentours de l'an 1000. Ils se sont alors installés sur la plupart des meilleures terres agricoles et des meilleurs sites portuaires. Ceux qui arrivèrent plus tard durent en revanche se contenter de lieux moins favorables. Une société commença à prendre forme à mesure que ces fermiers faisaient venir des parents, qui transformaient à >

Mais ils exportaient aussi leurs propres marchandises, comme l'ivoire de morse qui servait en Europe aux ornements et dans lequel ont été taillées les figurines de Lewis, des pièces de jeu d'échecs (3). En naviguant le long des côtes, les Vikings ont rencontré des groupes indigènes, qui auraient sculpté dans le bois le portrait des nouveaux venus (4).



3

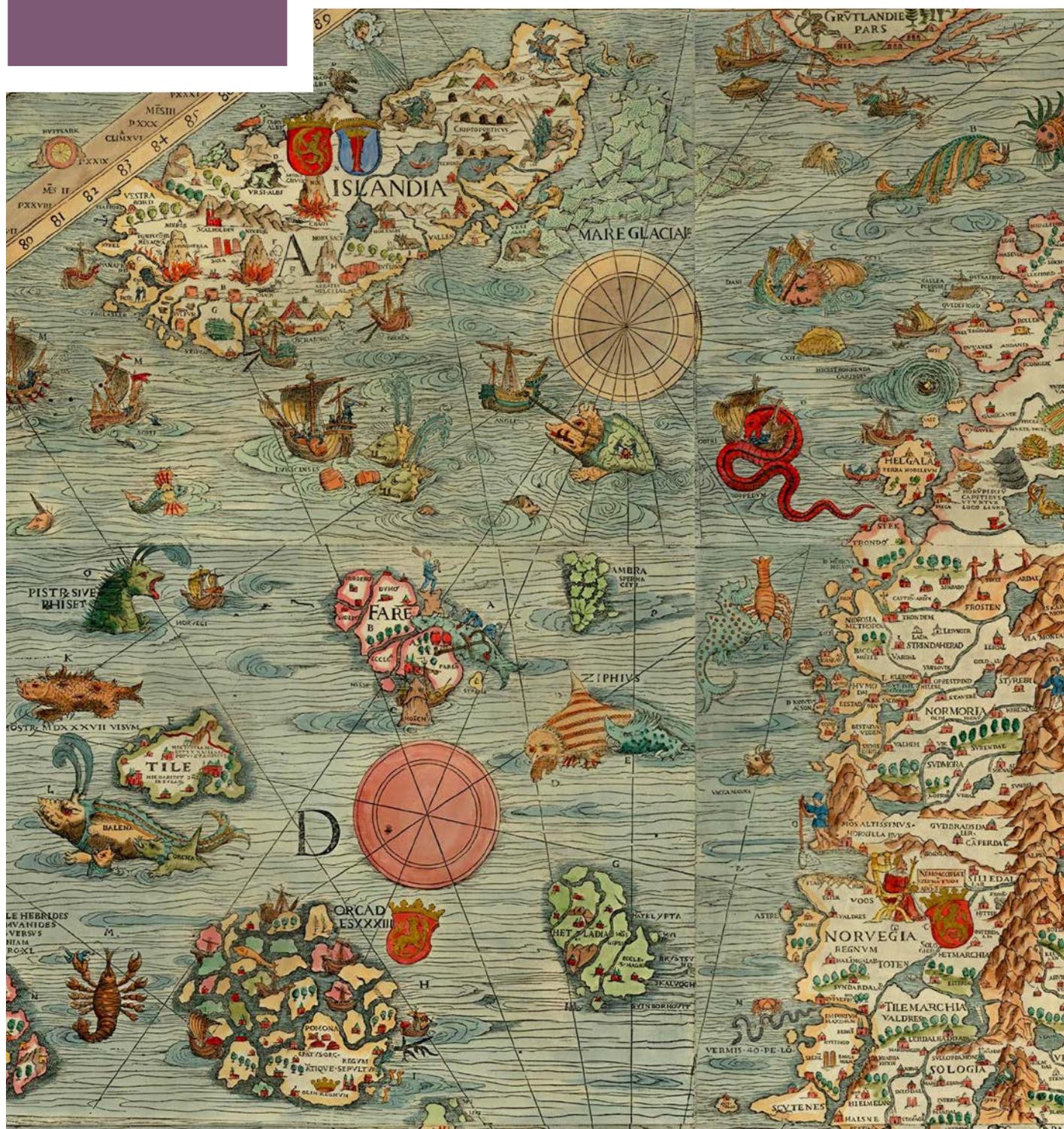


4

L'AUTRE « OR » VIKING: L'OURS ET LA BALEINE

Comment matérialiser le pouvoir quand on vit sur une terre dépourvue de métaux précieux? Au Groenland, à défaut de mines d'or et d'argent, les Vikings utilisèrent les ressources locales à leur disposition pour

afficher leur richesse et leur puissance. La chasse à l'ours et à la baleine, qu'ils pratiquaient en plus de celle des phoques et des morses, ne leur fournissait pas seulement des matières premières utiles au quotidien, elle leur offrait aussi des biens à haute valeur marchande et symbolique.



Notre connaissance sur l'intérêt que portaient les Vikings à ces deux animaux provient pour l'essentiel de sources textuelles. *L'Historia Norwegiae* (l'histoire de la Norvège), rédigée vers 1150, offre un panorama coloré de la Norvège et du Groenland et mentionne notamment la chasse à la

baleine que l'on menait sur les deux territoires. Il en va de même avec un autre texte norvégien, écrit vers 1250: le *Miroir royal*. Vingt-deux types de baleines y sont répertoriés. Par ailleurs, les sagas islandaises évoquent divers animaux qui interfèrent avec les aventures des protagonistes, colonnes vertébrales des sagas. À ces textes répondent des données archéozoologiques. Les sites de fouilles sont nombreux (explorés notamment par Thomas McGovern du Hunter College) et donnent vie aux textes.

Grâce à l'ensemble de ces données, nous en savons un peu plus sur les bénéfices immédiats que tiraient les hommes du Nord de ces bêtes. Ainsi la baleine était-elle une mine de ressources: avec sa peau, on faisait des cordages; avec ses os, des outils (comme des pelles) ou du mobilier (ses vertèbres donnaient des chaises). Ces usages compensaient l'absence de bois au Groenland. En outre, les fanons de baleine permettaient de coudre les vêtements. Quant à l'ours, on utilisait sa fourrure ou ses os. Par ailleurs, la chair des deux mammifères constituait une importante ressource alimentaire en cas de chasse prodigue. Le *Miroir royal* présente d'ailleurs comme comestibles 16 des 22 sortes de baleines connus.

Mais la chasse de l'ours et de la baleine représente aussi pour les Vikings un moyen de s'enrichir, notamment grâce à l'exportation des surplus. Le Groenland est en effet une colonie très dépendante des centres de gravité scandinaves du Moyen Âge: l'Islande occidentale et la Norvège méridionale. En cela, l'exotisme d'un produit comme une peau d'ours blanc est un atout pour le commerce, mais aussi dans le cadre de relations diplomatiques. Au XIII^e siècle, dans une courte saga islandaise intitulée *Dit des Groenlandais*, l'auteur mentionne parmi des cadeaux diplomatiques reçus un ours du Groenland: «Einar avait emporté un

ours du Groenland avec lui et il le donna au roi Sigurd.»

Enfin, les chefs locaux utilisaient les ressources animales, reflets de leur richesse, pour asseoir leur pouvoir à diverses occasions. Par exemple, l'huile de baleine constituait un faire-valoir durant la nuit polaire. Pour maintenir leur statut social en cette période où la lumière du jour se fait rare, les chefs se devaient d'assurer un éclairage constant dans leurs habitations. Cette tradition illustre la forte compétition sociale qui existait entre les chefs.

L'huile de baleine constituait un faire-valoir durant la nuit polaire

Cette compétition pourrait expliquer l'origine des cadavres inhumés découverts à Brattahlíð, sur le site même où Erik le Rouge avait installé sa première colonie. L'un d'eux avait été blessé ou tué avec un couteau, et l'arme était encore plantée entre ses côtes lorsque les archéologues ont découvert le corps. De plus, dans une fosse commune du cimetière de Brattahlíð, les archéologues ont mis au jour les ossements de treize hommes et d'un enfant d'une dizaine d'années. Sur ces quatorze corps, trois ont connu une mort violente, comme en témoignent les blessures au crâne causées par des objets tranchants. Leur fin pourrait être mise en parallèle avec un épisode semblable à celui raconté dans la *Saga des frères jurés*: une baleine s'échoue dans les Strandir (Islande) et un combat à mort s'ensuit entre plusieurs hommes pour récupérer ce *rek-hvalr* (baleine échouée). En s'appropriant la dépouille d'une baleine, un chef viking s'assurait d'augmenter son prestige.

Les Scandinaves chassaient nombre d'animaux marins. La *Carta Marina* (1539) d'Olaus Magnus, évêque et cartographe suédois, montre des scènes de chasse de ces bêtes, mais aussi des monstres de la mer.

MAXIME DELLIAUX
professeur certifié d'histoire-géographie, chercheur en histoire médiévale (master de recherche à l'université du Littoral-Côte d'Opale de Boulogne-sur-Mer sous la direction d'Alban Gautier)



© Wikimedia Commons - James Ford Bell Library, université du Minnesota

> leur tour un espace vierge en pâture pour leurs moutons et leurs vaches. Les fermes étaient concentrées dans deux secteurs de la côte ouest de l'île: la «colonie de l'Ouest», située à quelque 800 kilomètres au sud de la baie de Disko, et la «colonie de l'Est», localisée 500 kilomètres plus loin encore au sud.

Des ruines découvertes à Vatnahverfi, près de la pointe méridionale du Groenland, ont aidé les archéologues à imaginer les implantations vikings. Vatnahverfi semble avoir été l'une des zones agricoles les plus riches de la colonie de l'Est. La côte déchiquetée y forme des langues rocheuses qui s'enfoncent dans l'océan. Entre les rives étroites et empierrées pousse sur le sol une herbe grasse que paissent, comme il y a 700 ans, des troupeaux de moutons. Des tas de pierres recouverts de mousse sont tout ce qui reste des anciens bâtiments vikings. Leur disposition correspond aux fermes médiévales de Scandinavie et d'Islande: le bâtiment principal est dressé au centre du meilleur pâturage et est entouré de bâtiments plus petits où les gens pouvaient vivre quand ils déplaçaient leurs troupeaux. À la fin des années 2000, une équipe de fouilles dirigée par Konrad Smiarowski, alors docteurant du Hunter College, à l'université de la ville de New York, y a identifié au total 47 domaines agricoles organisés autour d'un noyau central de 8 fermes.

DES HUTTES POUR TONDRE LES MOUTONS

À Vatnahverfi, les fermes vikings s'étendaient sur de si vastes étendues que les fermiers devaient construire des «*shielings*» (ce mot anglais vient du norrois, la langue des Vikings, et signifie «hutte»), des sortes de petites habitations d'estive qui servaient d'abris temporaires aux troupeaux et où ils pouvaient traire les vaches, tondre les moutons et transformer les produits laitiers et la viande. L'équipe de Konrad Smiarowski a localisé 86 *shielings* dans cette région au cours des douze dernières années. Ces découvertes et celles d'autres équipes suggèrent que la communauté agricole de Vatnahverfi comptait entre 255 et 533 membres.

Plusieurs archéologues, dont Thomas McGovern du Hunter College et Jette Arneborg du Musée national du Danemark, à Copenhague, soutiennent l'idée que l'activité agricole a structuré la hiérarchie sociale des Vikings du Groenland. L'élite qui possédait la terre avait un besoin vital de main-d'œuvre pour l'exploiter. Elle logeait donc les familles des fermiers et leur accordait l'accès aux pâturages en échange d'une partie des bénéfices que ceux-ci en tiraient. Ce système de fermage a permis aux colonies du Groenland de prospérer et de croître jusqu'à atteindre une population d'environ 3000 individus entre 1200 et 1250.

Mais très rapidement après l'arrivée des hommes du Nord sur les «terres vertes», les conditions climatiques se sont détériorées, les forçant à relever un certain nombre de défis. Les tempêtes ont redoublé de violence. L'approvisionnement en foin pour nourrir les porcs et les vaches en hiver devint difficile et convainquit les agriculteurs de passer à l'élevage de moutons. Là où les pâturages régressaient, les enclos se peuplèrent de chèvres, des animaux capables de se nourrir d'à peu près tout. Le lait des moutons et des chèvres remplaça le lait de vache comme base du régime alimentaire. La viande rouge et le porc, en revanche, étaient réservés aux grandes occasions ou aux tables des riches.

Les fermes n'étant pas assez productives pour subvenir aux besoins de tous les colons, les Vikings durent trouver de nouvelles sources de nourriture. Les dépôts d'ordures mis au jour par l'archéologie montrent qu'ils ont alors commencé à chasser intensément les phoques. Cette chasse se déroulait sans doute dans les eaux libres des fjords à l'aide de bateaux et de filets qui permettaient de rassembler les animaux avant de les harponner.

À leur tableau de chasse s'ajoutèrent également le caribou et le morse. Difficile et éprouvante, la mise à mort de ces animaux réclamait certainement que les hommes unissent leurs forces et acceptent de se placer sous l'autorité d'un meneur. Les Vikings se sont probablement pliés à ces contraintes sans mauvaise volonté, car ils travaillaient déjà de façon communautaire dans les fermes. Au bout du compte, l'organisation des fermes leur a fourni un cadre pour gérer efficacement tant la chasse que les ressources alimentaires. Ces nouvelles pratiques de chasse et d'agriculture sont ainsi devenues une adaptation propre à l'environnement du Groenland.

Les Vikings n'ont cependant pas créé ces stratégies de toutes pièces. Elles faisaient



La communauté agricole de Vatnahverfi comptait entre 255 et 533 membres



certainement partie de leur héritage culturel importé d'Islande et de Scandinavie continentale. Les écologues nomment cet héritage – c'est-à-dire l'ensemble des comportements et des techniques accumulés par un peuple pendant des générations au contact de l'environnement – le « savoir écologique traditionnel ». Par exemple, nous savons que la chasse au phoque était déjà pratiquée dans la mer Baltique et en Islande, même si elle concernait une espèce différente de celle principalement chassée au Groenland. Quant aux morses, les Vikings ont pu apprendre comment les tuer en Islande. Dans les deux cas, les colons ont dû adapter des techniques déjà connues aux circonstances singulières rencontrées au Groenland.

DES ÉGLISES POUR ASSEoir LE POUVOIR

Mais l'approvisionnement en nourriture n'était pas l'unique préoccupation des colons, du moins pas de tous. Tandis que les simples travailleurs s'échinaient à produire des vivres, l'élite propriétaire cherchait des moyens d'amplifier son influence. Une solution consista à construire des églises et des cimetières. En effet, les fermes étant dispersées, l'installation de lieux de rencontre centraux s'imposait pour créer du lien social. « Les colons n'avaient pas le choix, ils devaient former une communauté d'une façon ou d'une autre », avance Konrad Smiarowski. Les églises devinrent un moyen de rassembler les gens pour les mariages, les funérailles et les services réguliers.

Elles remplirent aussi une autre fonction: en 1123, les autorités religieuses donnèrent le titre d'évêque du Groenland à un prêtre nommé Arnald. En d'autres termes, l'Église commençait à considérer le Groenland comme une ressource économique.

À mesure que le commerce entre l'Europe et le Groenland s'intensifiait, les colons commencèrent à chercher des moyens de faire fructifier cette relation. Ils obtinrent de Haakon IV, le roi de Norvège, l'intégration du Groenland dans son royaume. Les Groenlandais se mirent à payer des impôts à la Norvège et, en retour, le roi garantissait qu'un navire (appelé le « Transporteur du Groenland ») se rende chez eux chaque année pour acheter et vendre des marchandises. Ces missions commerciales maintinrent le Groenland dans l'économie et la culture européennes. De même, elles expliqueraient pourquoi les Vikings portaient des robes et se coiffaient avec des peignes à chevrons semblables à ceux des Européens.

Les navires marchands tels que le Transporteur du Groenland ont peut-être également embarqué des biens et des personnes pour le compte de l'Église catholique. En 1341, l'évêque de Bergen, en Norvège, envoya un

LES LIENS AVEC L'EUROPE

Les Vikings du Groenland ont commencé à affluer de l'Islande et d'autres parties de l'Europe vers l'an 1000. Ils y ont établi deux colonies, situées à quelques centaines de kilomètres l'une de l'autre. Malgré leur isolement, ils ont continué à maintenir des liens politiques et culturels avec l'Europe. L'un des sites sur lesquels ils se sont installés, Vatnahverfi, montre qu'ils pratiquaient l'élevage de vaches et de moutons comme en Scandinavie et en Islande. Pour trouver de nouvelles

sources de nourriture et de revenus, ils ont commencé à chasser les phoques et les caribous. À bord de petits bateaux, ils montaient le long de la côte ouest jusqu'à la baie de Disko pour y abattre des morses afin de récupérer leurs défenses en ivoire. Les Vikings ont exporté de l'ivoire et des fourrures en Europe via un navire envoyé depuis Bergen, en Norvège. Le commerce a été florissant jusqu'à ce que ces produits de luxe tombent en disgrâce sur les marchés européens.



prêtre au Groenland pour y dresser une liste des églises et de leurs possessions. Or à l'époque, le clergé était friand d'ornements en ivoire. Pour Mikkel Sørensen, un expert en histoire et archéologie du Groenland à l'université de Copenhague, l'évêque s'est peut-être rendu là-bas pour s'assurer du bon fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement entre le Groenland et l'Église. Jette Arneborg discute cependant cette hypothèse: selon elle, les autorités ecclésiastiques étaient plus intéressées par l'argent du commerce de l'ivoire que par l'ivoire lui-même.

PRIS DANS LA TOURMENTE DU PETIT ÂGE GLACIAIRE

D'une manière ou d'une autre, les rois norvégiens contrôlaient ce qui était pratiquement la seule source d'ivoire en Europe à l'époque. Les relations commerciales semblent avoir été profitables aux deux parties pendant plus d'un siècle. Des débris d'ivoire de morse ont été découverts sur des sites d'ateliers médiévaux de la Scandinavie jusqu'à l'Irlande et l'Allemagne, ce qui montre l'appétit des Européens pour l'or blanc.

Des changements dramatiques se préparaient toutefois. L'analyse de carottes de sédiments provenant des fonds marins du >

> nord-ouest de l'Islande montre que vers 1250, le climat est entré dans une phase appelée le petit âge glaciaire. Pendant cette période, les températures ont chuté et les systèmes météorologiques se sont déréglés. Les tempêtes sont devenues plus fréquentes et violentes. Selon Thomas McGovern, les dangers qu'affrontaient les bateaux durant la longue traversée entre l'Islande et le Groenland ont pu décourager les navigateurs venus chercher fortune en terre arctique.

Même si les colonies ont encore perduré pendant 200 ans, de nombreux chercheurs ont considéré l'entrée dans le petit âge glaciaire comme l'amorce du déclin des Vikings du Groenland : leur société aurait ensuite périclité par refus ou incapacité de changer.

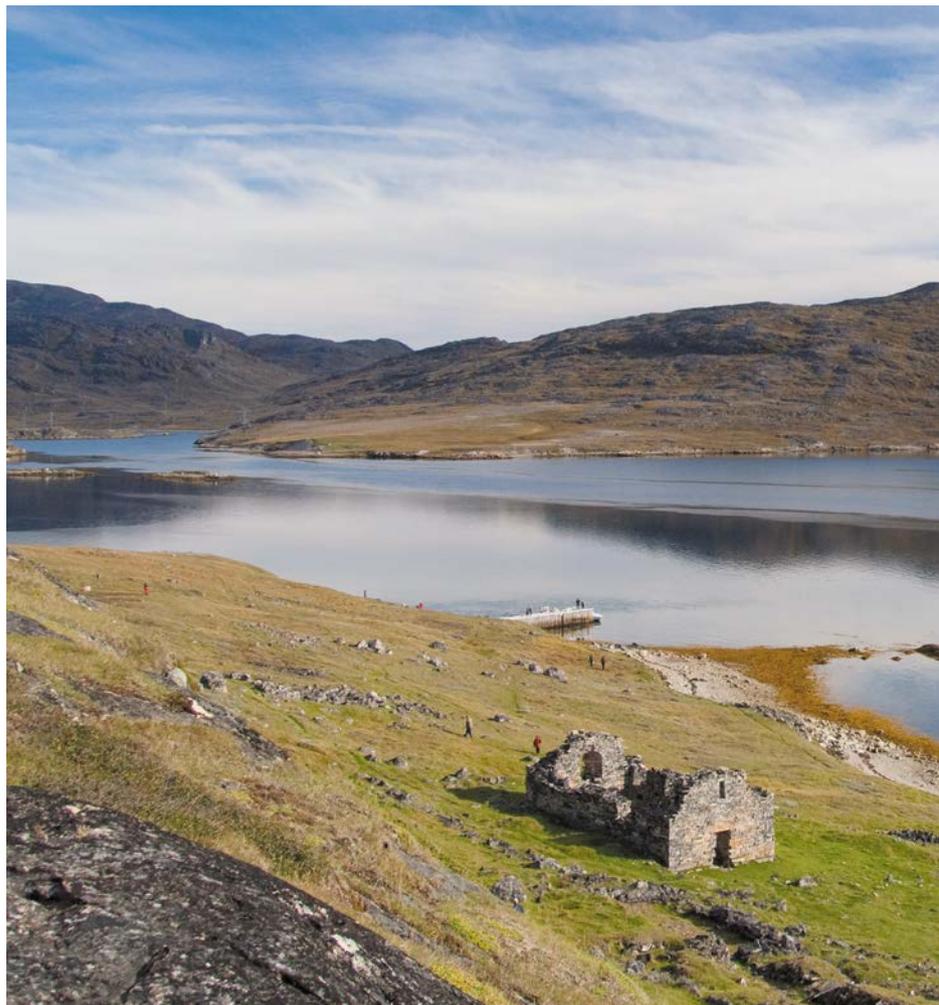
Mais Thomas McGovern doute que les bouleversements climatiques aient entraîné la chute de la société viking : « En 1250, les Groenlandais se trouvaient là depuis de nombreuses années déjà et leur vie n'était pas de tout repos. Ils avaient vécu des moments difficiles, bravé des tempêtes et, parfois, des gens se noyaient durant les traversées, mais ils y étaient habitués. »

Contrairement à l'image classique qui les dépeint comme prisonniers de leurs habitudes, les Vikings semblent avoir affronté le changement climatique assez efficacement. Les os trouvés dans les ruines des fermes médiévales à travers le Groenland indiquent qu'ils ont concentré leur élevage encore davantage sur les moutons et les chèvres, des espèces assez robustes pour survivre avec de moindres quantités d'herbe. Malgré tout, les petits propriétaires terriens ont dû souffrir de cette nouvelle donne météorologique et lutter pour nourrir leurs troupeaux. Un choix s'offrait à eux : soit ils s'agrandissaient en louant des parcelles aux riches propriétaires, soit ils vendaient leurs biens et trouvaient une nouvelle façon de gagner leur vie. Nécessité faisant loi, ils optèrent pour la première solution et survécurent ainsi, au moins un temps.

L'ÉROSION DU COMMERCE D'IVOIRE

Mais loin du Groenland, le monde continuait de changer et, cette fois, cela n'avait rien à voir avec le climat. Par un jeu complexe d'influences culturelles et politiques, ces changements condamnèrent les colonies vikings du Groenland.

D'abord, les Vikings essuyèrent la chute du cours de l'ivoire, consécutive à une série d'événements à l'échelle mondiale. Jusqu'au XIII^e siècle, les guerres entre chrétiens et musulmans au Moyen-Orient avaient contribué à faire du Groenland un acteur majeur du commerce de l'or blanc. Les conflits avaient



favorisé l'émergence d'une piraterie larvée sur la mer Méditerranée, dont les raids entravaient le transport de l'ivoire d'éléphant d'Afrique et d'Asie vers l'Europe. Avec la raréfaction de l'ivoire d'éléphant, le voyage de 2800 kilomètres à partir de l'Europe pour rapporter de l'ivoire de morse du Groenland était devenu une option marchande plus rentable que les routes plus courtes, mais plus dangereuses, vers l'Afrique et l'Asie. Toutefois, quand les tensions au Moyen-Orient s'apaisèrent, le

L'ancienne église de Hvalsey a été bâtie sur un domaine agricole de la colonie viking orientale. Sa construction remonte sans doute au XIV^e siècle.



Les Vikings essuyèrent d'abord la chute du cours de l'ivoire





commerce avec l'Afrique et l'Asie reprit. Pour Søren Sindbæk, professeur d'archéologie médiévale à l'université d'Aarhus, au Danemark, les Vikings du Groenland auraient alors vu baisser leurs commandes d'ivoire.

Un autre facteur accentua l'effondrement de la demande: la mode de l'ivoire passait. Matériau rare et prisé pour la sculpture, la bijouterie et l'ornement de meubles ou de livres, l'ivoire tomba en disgrâce auprès des élites à partir de 1200. Comme le remarque Thomas McGovern, cette tendance semble avoir coïncidé avec un déplacement du commerce européen vers de nouveaux types de marchandises. On passa du commerce à l'unité de biens précieux tels que l'or, les fourrures et l'ivoire, à la vente en gros de marchandises comme les ballots de poisson séché et les rouleaux de tissu en laine d'Islande. «L'ivoire de morse n'a de valeur que si les gens lui en prêtent une», souligne Thomas McGovern. Tandis que le poisson et la laine peuvent nourrir et habiller des armées.

Cette transition a marqué un changement fondamental dans le fonctionnement de l'économie européenne. «Les Groenlandais

étaient figés dans la vieille économie, observe Thomas McGovern. Les Islandais étaient mieux lotis pour tirer profit du commerce montant des marchandises en vrac, et c'est ce qu'ils ont fait.»

Par ailleurs, les ravages de la peste noire en Europe ont asphyxié un peu plus l'économie du Groenland. L'épidémie tua environ un tiers des Européens entre 1346 et 1353. La Norvège fut particulièrement touchée et perdit environ 60% de sa population. Affaibli, le pays n'envoya aucun navire vers le Groenland après 1369, empêchant les Vikings de vendre leurs fourrures et l'ivoire de morse, dont la demande déclinait déjà.

Les Vikings rencontrèrent aussi de nouvelles menaces sur leur propre territoire: des envahisseurs venus du nord. Quand Erik le Rouge s'était installé dans la baie de Disko, le Groenland semblait être une terre vierge et inhabitée. Il est toutefois possible qu'un peuple connu aujourd'hui sous le nom de Paléo-Eskimos (les Dorsétiens) y ait vécu, dans une région située loin au nord de la baie, sur un territoire hors de vue et inexploré des Vikings. Plus tard, au cours du xiv^e siècle, un groupe d'Inuits connu aujourd'hui sous le nom de peuple de Thulé (localité du Groenland où leurs restes archéologiques ont été découverts pour la première fois) commença à se frayer un chemin le long de la côte vers les territoires de chasse des Vikings. Les Inuits naviguaient à bord d'*umiaks*, des bateaux dont la coque était constituée de peaux de phoque ou de morse tendues sur une armature en bois ou en os de baleine.

DE NOUVEAUX VOISINS ENVAHISSANTS

Le peuple de Thulé était spécialisé dans la chasse à la baleine et les *umiaks* organisaient la société de la même manière que les fermes régentaient celle des Vikings. Chaque embarcation accueillait une quinzaine de personnes et son propriétaire était le chef du groupe. Les Inuits suivaient probablement la piste de céta-cés lorsqu'ils ont vu les Vikings pour la première fois dans la baie de Disko. Un document du xiv^e siècle intitulé *Description du Groenland* indique que la rencontre fut loin d'être pacifique. Les Vikings se seraient contentés de les combattre, sans pourparlers. Et ils seraient sortis perdants des affrontements avec leurs nouveaux voisins.

Vers 1350, en effet, ils désertèrent la colonie de l'Ouest, celle la plus proche du territoire des morses. La raison pour laquelle ils ont abandonné leurs 80 fermes et un terrain de chasse giboyeux est débattue. Mais selon Thomas McGovern, toutes les références aux Inuits dans les sagas islandaises évoquent des combats entre les deux camps. Si les Vikings sont partis, c'est >

> sans doute qu'ils ont fini par baisser les armes devant l'envahissant peuple de Thulé.

La détérioration du climat, l'évolution de la géopolitique et de la mode, l'épidémie de peste et l'arrivée d'envahisseurs constituèrent donc un ensemble de menaces inédites pour les hommes du Nord. L'aide que leur apportaient leurs connaissances traditionnelles de l'environnement était bien maigre face à ces périls. La gravité de la situation impliquait des décisions radicales, difficiles à prendre, s'ils voulaient continuer à vivre sur leurs terres froides. Se rabattraient-ils davantage sur des stratégies éprouvées, comme la chasse en groupe, qui avaient permis à leurs aïeux de résister au climat arctique? Ou innoveraient-ils et inventeraient-ils de nouveaux modes de subsistance? Selon Jette Arneborg et Thomas McGovern, les Vikings ont misé sur la chasse et les autres techniques qui avaient si bien réussi aux premiers colons, et ce jusqu'à la toute fin.

Les riches propriétaires ont même continué à embellir leurs églises jusqu'à ce que les colonies soient abandonnées ou presque, ce qui a pu contribuer au problème. «Si vous investissez dans des bâtiments, dans une église, ces dépenses vous amarrent à un lieu», explique Marten Scheffer, chercheur en mathématiques appliquées à l'université de Wageningen, aux Pays-Bas. Marten Scheffer a consacré une grande partie de sa carrière à élaborer des modèles mathématiques simulant l'effondrement des sociétés. Selon lui, quand une société se rapproche d'un point de basculement, elle surmonte difficilement les épreuves, même les plus banales. Tout ce qui confère à la société sa résilience – la nourriture, la richesse, la technologie – se raréfie, ce qui entrave ses capacités d'adaptation.

LES VIKINGS AURAIENT-ILS PU ÉVITER LA CHUTE ?

Mais un autre phénomène freine la résilience, que Marten Scheffer nomme les «effets de coûts irrécupérables». Selon lui, il existe d'abondantes preuves empiriques que les humains ont d'autant plus de mal à renoncer à un plan d'action, même défaillant, qu'ils ont investi dedans. Autrement dit, plus une société dépense dans la construction de bâtiments et d'équipements, plus elle hésitera à les abandonner pour chercher des conditions favorables ailleurs.

Dans le cas des Vikings, ces objets d'attachement étaient les bateaux et l'équipement pour la chasse au phoque et au morse, mais aussi les édifices à fort pouvoir symbolique qui les reliaient à l'Europe, comme les nouvelles églises. Les efforts que les Vikings ont déployés pour produire ces structures les ont empêchés de les laisser derrière eux, même si ce renoncement faisait sens sur le plan économique.

Les Vikings ont sans doute fini par baisser les armes devant le peuple de Thulé

«Les peuples dont la société s'effondre ont tendance à rester trop longtemps au même endroit, explique Marten Scheffer. Ils partent quand tout est fini. La décision est très longue à venir, et ils partent alors massivement.» C'est ce qui serait arrivé aux Vikings, selon lui.

Les colonies auraient-elles survécu en faisant d'autres choix? Certains spécialistes ont suggéré que les Vikings auraient dû adopter un mode de vie plus proche de celui des Inuits. Après tout, ces derniers ont très bien réussi leur adaptation aux conditions du Groenland et y vivent encore aujourd'hui (dans des conditions évidemment très différentes). Mais cet argument néglige la raison pour laquelle les Vikings sont venus en premier lieu. Tout à leur quête de fortune *via* la vente de défenses de morse sur le marché européen, ils auraient sans doute trouvé bien peu d'intérêt au rêve des Inuits: devenir capitaine de son propre *umiak*. «Ils étaient à la marge de tout le système européen, il était donc très important d'être connecté par le commerce, souligne Mikkel Sørensen. Ils voulaient être de vrais Européens dans leurs lointaines contrées. C'est vraiment une question d'identité.»

Au début du xv^e siècle, la pression pesant sur les Vikings devait être terrible. Même les individus les plus riches, pourtant propriétaires de grandes fermes et des plus belles églises, ont dû se poser la question: puisque rester au Groenland signifiait continuer à endurer la famine ou mourir au combat, pourquoi alors ne pas charger ses biens sur un bateau et rentrer en Europe? Pourtant, les Vikings n'ont pas immédiatement déserté les lieux. Peut-être les perspectives en Europe les inquiétaient-elles encore davantage? Sans doute étaient-ils conscients qu'ils retourneraient dans une Europe en proie à un nouveau système économique qui offrait peu de place aux chasseurs de phoques et de morses. Les Vikings ont peut-être conquis le Groenland, mais les forces à l'œuvre au-delà de ses rivages glacés ont fini par les submerger. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. M. Frei et al., **Was it for walrus? Viking age settlement and medieval walrus ivory trade in Iceland and Greenland**, *World Archaeology*, vol. 47(3), pp. 439-466, 2015.

Paul M. Ledger et al., **Vatnahverfi: A green and pleasant land? Palaeoecological teconstructions of environmental and land-use chang**, *Journal of the North Atlantic*, vol. 6, pp. 29-46, 2014.

M. Scheffer, **Critical Transitions in Nature and Society**, Princeton University Press, 2009.

R. Hall, **The World of the Vikings**, Thames & Hudson, 2007.

Pierre Bauduin

LES VIKINGS

Que
sais-je?



Marins, Marchands et Guerriers

Suivez-nous
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com

De nouvelles armes contre les moustiques

Les maladies transmises par les moustiques tuent plus que les guerres. Mais l'espoir est permis : pour neutraliser ces insectes, les scientifiques mettent au point tout un arsenal de méthodes innovantes, allant de manipulations génétiques à des pièges efficaces.

La lutte contre les moustiques vecteurs de maladies dure depuis des siècles. Avec seulement deux piqûres, la première qui prélève un pathogène chez un individu et la seconde qui l'inocule à un autre individu, les insectes sont à l'origine de multiples épidémies à travers le monde.

En Afrique, le paludisme a explosé avec le développement de l'agriculture. Dans les années 1870, quand l'urbanisation et le transport fluvial dans le Tennessee ont concentré les personnes infectées et les moustiques aux mêmes endroits, la fièvre jaune a failli rayer Memphis de la carte. Et selon certains archéologues, les maladies >



L'ESSENTIEL

> Plus de 725 000 décès annuels sont imputables aux moustiques : ce sont les animaux les plus dangereux.

> Les experts du contrôle vectoriel ont appris des erreurs commises avec le DDT et mettent au point de nouvelles armes pour neutraliser les

moustiques : pièges astucieux, techniques de stérilisation, manipulations génétiques...

> Jamais autant d'argent n'a été investi dans cette lutte par les fondations privées, les agences gouvernementales et l'Organisation mondiale de la santé.

L'AUTEUR



DAN STRICKMAN
entomologiste médical,
chef des opérations
de contrôle vectoriel
à la fondation Bill &
Melinda Gates



> transmises par les moustiques auraient même précipité la chute de l'Empire romain.

Le bilan des morts dues aux moustiques s'élève à 725 000 personnes par an, d'après les estimations de la fondation Bill & Melinda Gates, dont je dirige les actions en matière de contrôle vectoriel. Ce chiffre est à comparer aux quelque 475 000 morts annuelles causées par les humains eux-mêmes. Globalement, les moustiques ont davantage tué que toutes les guerres de l'histoire réunies. Dans certains territoires où la population est exposée aux insectes durant la plus grande partie de l'année, comme l'Afrique subsaharienne et quelques régions d'Amérique du Sud et d'Asie, ces insectes entravent la croissance économique.

DÉSILLUSION APRÈS LE DDT

Pourtant, un jour, on a bien cru que l'on parviendrait à s'en débarrasser. En 1939, Paul Hermann Müller venait de découvrir que le dichlorodiphényltrichloroéthane, plus connu sous son nom abrégé de DDT, était une arme

redoutable contre ces insectes. Ce produit chimique a alors été pulvérisé dans les maisons, dans les fermes et dans les bases militaires. Et le miracle s'est produit : le paludisme a disparu de quelques-unes des régions les plus lourdement frappées par la maladie. La découverte de Müller lui a valu un prix Nobel en 1948.

Il y avait cependant un revers à la médaille : les conséquences pour la santé humaine étaient inconnues, tandis que l'environnement a payé un lourd tribut. Le poison s'est accumulé dans les poissons, les plantes et les tissus gras des mammifères, puis à travers toute la chaîne alimentaire. Lorsque certains oiseaux, tels que les pygargues à tête blanche, les balbuzards et les faucons, consommaient des poissons contaminés par le DDT, ils pondaient des œufs plus fragiles. Les effectifs de leurs populations ont chuté de façon vertigineuse.

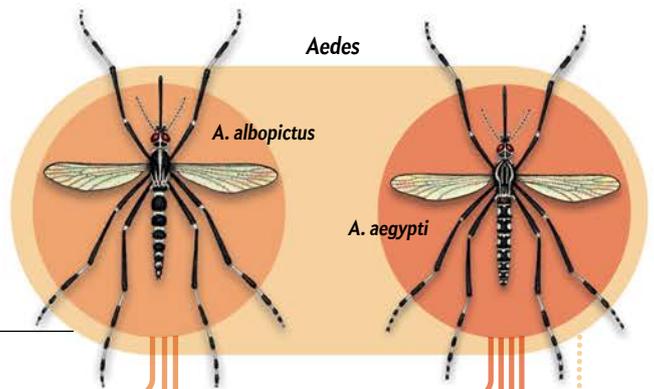
En conséquence, l'usage du DDT a été fortement limité au début des années 1970 – pour le plus grand bonheur des moustiques, qui se sont à nouveau multipliés et qui ont entraîné de nouvelles flambées de paludisme.

PETITES BÊTES, GROS IMPACT

Parmi les 3 500 espèces de moustiques qui peuplent la planète, seules quelques centaines sont nuisibles et transmettent des maladies.

DES ACTEURS MAJEURS

Certaines espèces de moustiques sont vectrices de plusieurs maladies à la fois. Le moustique *Aedes aegypti*, par exemple, qui vit dans les mêmes régions que la moitié de la population mondiale, peut transmettre les virus de la fièvre Zika, de la dengue, du chikungunya et de la fièvre jaune.



CHIKUNGUNYA

SYMPTÔMES : fièvre, douleurs articulaires, maux de tête, douleurs musculaires, éruption cutanée.

QUELQUES FAITS : au cours des cinq dernières années, la maladie s'est propagée dans 45 pays, et plus de 2 millions de cas ont été rapportés.

AGENT INFECTIEUX : virus

DENGUE

SYMPTÔMES : fièvre, migraines, douleurs articulaires et aux yeux, éruption cutanée, diminution du taux de globules blancs.

QUELQUES FAITS : avant 1970, seulement quelques pays avaient connu de sérieuses épidémies de dengue.

La maladie est maintenant présente dans plus de 100 pays.

AGENT INFECTIEUX : virus

FIÈVRE ZIKA

SYMPTÔMES : souvent asymptomatique, mais possibilité de fièvre, éruption cutanée et maux de tête.

QUELQUES FAITS : l'épidémie de fièvre Zika en 2015 et 2016 avait provoqué une déclaration d'état d'urgence de portée internationale. En plus des piqûres des moustiques, le virus peut être transmis par rapport sexuel ou de la mère à l'enfant et cause, dans certains cas, des anomalies à la naissance, telles que la microcéphalie.

AGENT INFECTIEUX : virus

PALUDISME

SYMPTÔMES : fièvre, frissons, sueurs, maux de tête, nausées, vomissements.

QUELQUES FAITS : environ 445 000 personnes sont mortes du paludisme en 2016, principalement en Afrique. Cette année-là, 216 millions de cas au total ont été déclarés dans 91 pays.

AGENT INFECTIEUX : parasite unicellulaire

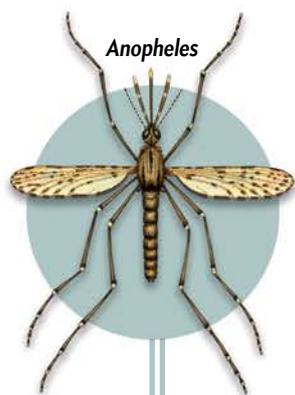
Le changement climatique et la mondialisation ont amplifié la menace

Au cours des dernières décennies, le changement climatique et la mondialisation ont amplifié la menace: les maladies véhiculées par les moustiques sont devenues de plus en plus fréquentes en de nombreux endroits.

L'année dernière, aux États-Unis, environ 2 000 personnes ont contracté le virus du Nil

occidental. Depuis les années 1970, le nombre de pays affectés par la dengue n'a cessé de croître: l'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime le nombre de cas annuels à 50 millions. Au cours des cinq dernières années, le chikungunya, qui cause de sévères douleurs articulaires, s'est propagé dans 45 pays: plus de 2 millions de cas ont été rapportés. Quant au virus Zika, il a touché pour la première fois le continent américain en 2015, au Brésil. Le virus s'est ensuite répandu dans différents pays et territoires d'Amérique du Sud et centrale, ainsi qu'en Afrique, au Cap Vert, puis en Guyane, en Martinique, en Guadeloupe et à Saint-Martin. En tout, plus de 47 000 cas de maladies humaines transmises par des piqûres de moustiques ont été rapportés à travers les États-Unis et ses territoires en 2016; une décennie plus tôt, ils étaient moins de 7 000.

Les meilleures stratégies pour contrôler les vecteurs visent à tuer suffisamment d'individus d'une espèce qui véhicule un agent pathogène pour en freiner la transmission. Mais les armes >



Anopheles



Haemagogus



Culex

FIÈVRE JAUNE

SYMPTÔMES : apparition soudaine de fièvre, frissons, maux de tête aigus, mal de dos, vomissements.

QUELQUES FAITS : à la différence de la plupart des maladies transmises par les moustiques, un vaccin éprouvé existe pour cette maladie. Ces dernières années, des pénuries de stock ont entraîné une recrudescence de la maladie.

AGENT INFECTIEUX : virus

FILARIOSE LYMPHATIQUE

SYMPTÔMES : épaissement de certaines parties du corps, dont les membres et les organes génitaux, fièvre.

QUELQUES FAITS : appelée aussi éléphantiasis, plus de 856 millions de personnes à travers l'Asie, l'Afrique, l'ouest du Pacifique, des parties des Caraïbes et de l'Amérique du Sud sont menacées par cette maladie parasitaire.

AGENT INFECTIEUX : ver parasite

FIÈVRE DU NIL OCCIDENTAL

SYMPTÔMES : souvent asymptomatique, mais peut causer fièvre, maux de tête, fatigue, vomissements, éruption cutanée.

QUELQUES FAITS : en 2017, aux États-Unis, environ 2 000 personnes ont contracté le virus du Nil occidental, dont plus de 120 sont décédées.

AGENT INFECTIEUX : virus

DES IMPACTS SUR L'ÉCONOMIE

Dans les régions où la population est exposée aux moustiques durant une grande partie de l'année, ces insectes freinent la croissance économique. Ainsi, au Kenya, plus de la moitié des pertes agricoles ont été attribuées aux perturbations dues aux cas de paludisme parmi les travailleurs et leurs familles.

► utilisées actuellement se heurtent à de multiples obstacles. Notamment, les insectes ont développé des résistances aux insecticides et, comme l'illustre l'expansion récente de la fièvre Zika, il est de plus en plus difficile de tuer certaines espèces de moustiques, telle *Aedes aegypti*, qui vivent dans les maisons et peuvent se développer dans de petites quantités d'eau stagnante.

Pour lever ces obstacles, des scientifiques issus de plusieurs dizaines de pays travaillent d'arrache-pied pour mettre au point de nouveaux outils: des insecticides améliorés, des pièges plus efficaces ainsi que des procédés de stérilisation des moustiques utilisant l'irradiation ou des manipulations génétiques. Les principes de base de ces techniques datent parfois de plusieurs décennies. Mais les progrès techniques, le soutien financier de nombreux organismes, dont le nôtre, ainsi que l'idée largement admise que le contrôle des moustiques vecteurs est indissociable du combat contre la maladie ont fini par remettre ces procédés au goût du jour.

Parmi les maladies véhiculées par les moustiques, le paludisme est au premier rang. En 2016, 216 millions de personnes à travers le monde ont contracté la maladie, et 445 000 en sont mortes. Certaines espèces de moustiques du genre *Anopheles* sont porteuses du parasite responsable de la maladie, un protozoaire du genre *Plasmodium*. Lorsque les moustiques femelles piquent les humains (les mâles ne piquent pas) afin de puiser dans leur sang les protéines nécessaires au développement de leurs œufs, elles peuvent aspirer en même temps le parasite. Ce dernier se multiplie ensuite dans le système digestif du moustique, avant de migrer jusqu'aux glandes salivaires de l'insecte. Environ une semaine plus tard, lorsque la femelle se nourrit à nouveau, le parasite est inoculé à un nouvel hôte humain. Il finira par gagner le foie puis le sang de la personne, qui tombe alors malade.

DES PIÈGES D'UN TYPE NOUVEAU

En réaction à la progression du paludisme dans de nombreuses régions du globe, les sources de financement se sont multipliées: 2,7 milliards de dollars (2,3 milliards d'euros) ont été dépensés en 2016 pour combattre la maladie. Toutefois, comme l'a illustré l'histoire de l'utilisation du DDT, la difficulté est toujours la même: trouver des moyens de neutraliser les moustiques tout en minimisant les risques sur la population humaine et l'environnement.

Comment relever le défi? De nouveaux pièges déployés dans les maisons dans certains pays d'Afrique constituent l'une des voies possibles. L'idée de ces pièges part d'une simple observation: en zone tropicale, les moustiques

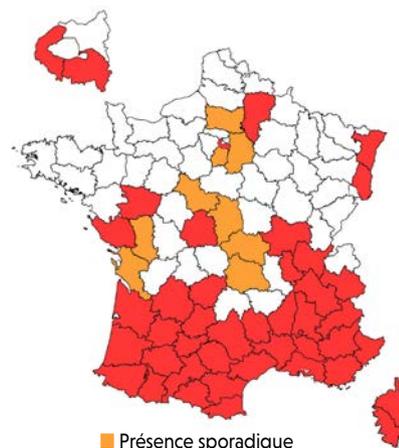
pénètrent souvent à l'intérieur des maisons via les ouvertures d'aération situées en haut des murs sous les toits. Ces insectes sont notamment attirés par le dioxyde de carbone que dégagent les personnes. Les pièges en question sont des tubes équipés d'un écran électrostatique, qui permet de retenir le moustique, et sur lequel a été saupoudré un produit insecticide. Insérés dans les ouvertures d'aération, ces dispositifs, nommés *eave tubes* en anglais («tubes d'avant-toit»), transforment les maisons en pièges à moustiques où les humains servent d'appâts.

Des chercheurs ont testé ces dispositifs sur le terrain pendant près d'une décennie. Des résultats préliminaires et non encore publiés d'une étude menée en 2016 et 2017 en Côte d'Ivoire, par l'université d'État de Pennsylvanie et des partenaires européens et africains,

EN FRANCE, LA MENACE DU MOUSTIQUE-TIGRE

Parmi la soixantaine d'espèces de moustiques présentes en France métropolitaine, le moustique-tigre, *Aedes albopictus*, fait les gros titres. Depuis son arrivée en 2004, sa population ne cesse d'enfler: l'insecte sévit à présent dans 42 départements.

Enrayer la propagation de ce moustique, vecteur potentiel de plusieurs virus, est un véritable défi. Il est particulièrement difficile à combattre, car il vit à l'extérieur et pique le jour. Sa seule nuisance, aussi insupportable soit-elle, ne justifie pas un épandage massif d'insecticides et les pièges vendus aujourd'hui ne suffiront pas à l'arrêter. Cependant, les petites réserves d'eau dans lesquelles les femelles pondent sont souvent dues aux activités humaines: chacun a donc un rôle à jouer en supprimant ces lieux de ponte des jardins. Dans les laboratoires, on peaufine de nouvelles stratégies susceptibles d'être utilisées dans l'Hexagone, comme la technique de



■ Présence sporadique
■ Présence bien établie

stérilisation des mâles par irradiation, actuellement testée à la Réunion, où sévit une forte épidémie de dengue.

« On peut s'attendre à des microépidémies chaque année en France, commente Frédéric Simard, biologiste à l'Institut de recherche pour le développement à Montpellier. Mais pas à des épidémies massives, car le système de santé est prêt à intervenir très rapidement. » Ainsi, dès qu'un médecin diagnostique la dengue, la fièvre Zika ou le chikungunya chez un patient (souvent de retour d'un pays tropical), une intervention est réalisée au domicile de la personne pour supprimer les moustiques et empêcher le développement de l'épidémie.

HÉLÈNE GÉLOT



Au Mali, des employés du Centre de recherche et de formation sur le paludisme de l'université de Bamako vérifient un piège à moustiques utilisant un appât sucré.

montrent que la transmission du paludisme a été réduite de 40% chez les enfants vivant dans les habitations munies de ces pièges. On espère que les tubes d'avant-toit finiront par remplacer la pulvérisation d'insecticide à l'intérieur des maisons, méthode qui fonctionne mais qui requiert une quantité plus importante d'insecticide. Les tubes ont aussi l'avantage d'être hors de portée des enfants. En outre, pendant que les insectes essaient de se dégager du piège, leur corps s'enduit entièrement d'insecticide, ce qui n'est pas le cas lorsqu'ils atterrissent brièvement sur des surfaces traitées: le dispositif tue plus sûrement et il est donc moins probable que les moustiques confrontés à ces pièges développent une résistance aux insecticides.

Cependant, les moustiques ne s'alimentent pas tous à l'intérieur des habitations, lesquelles ne sont en outre pas toutes adaptées au déploiement de ces dispositifs. Aussi des scientifiques israéliens ont-ils développé d'autres types de pièges: des appâts au sucre mêlés à des insecticides qui attirent à la fois les moustiques mâles et femelles. Incapables de résister au sucre, les insectes se posent sur le piège, qui

est de la taille d'une feuille de papier, et, en cherchant à s'alimenter, transpercent de petites cavités remplies de l'appât et d'insecticide. Les essais de terrain menés au Mali ont montré que la structure du piège permet aux moustiques et à d'autres insectes se nourrissant de sang d'accéder au poison alors que celui-ci est hors de portée des pollinisateurs tels que les abeilles.

En novembre dernier, lors d'une conférence de la Société américaine de médecine et d'hygiène tropicale, des chercheurs ont rapporté que lorsqu'ils accrochaient deux pièges à l'extérieur de chaque maison dans un village malien, près de la moitié des moustiques présents dans le voisinage immédiat avaient consommé du poison (pour que l'on puisse compter les moustiques ayant visité le piège, des colorants ont été mélangés à l'appât empoisonné, ce qui teintait l'abdomen de ces moustiques). À la suite de cette intervention, 90% des moustiques femelles de cette zone sont mortes avant d'avoir pu piquer et transmettre le paludisme.

Et si, plutôt que de chercher à tuer les moustiques, on les empêchait de naître? Plusieurs organismes, dont l'Agence internationale de l'énergie atomique, se consacrent actuellement à la technique dite des insectes stériles: on élève des moustiques mâles en laboratoire, et on les irradie pour les rendre stériles. Les radiations bloquent la croissance cellulaire dans les testicules et le développement des spermatozoïdes. L'idée est de relâcher ensuite ces mâles dans le milieu naturel, pour qu'ils s'accouplent avec des femelles, dont les œufs n'éclosent jamais. Puisque les femelles ne s'accouplent en général qu'une fois dans leur vie, cette méthode pourrait réduire considérablement les populations de moustiques.

LÂCHERS DE MÂLES STÉRILISÉS

Dans un projet soutenu par les Nations unies et mené par l'Institut de recherche de médecine tropicale du Soudan, des moustiques *Anopheles arabiensis*, responsables de la transmission du paludisme dans ce pays, sont élevés en grandes quantités et stérilisés en laboratoire. Le projet est encore en phase de test, mais il y a des raisons d'être optimiste. En effet, au début des années 1950, l'entomologiste américain Edward Knippling a utilisé cette technique contre la lucilie bouchère, une mouche dont les larves transforment de simples coupures en plaies ouvertes et purulentes, chez les humains comme chez le bétail. Cela a pris des décennies, mais en 2006, la lucilie bouchère avait complètement disparu de l'Amérique du Nord et de l'Amérique centrale.

La stérilisation offre l'espoir d'une solution quasi permanente au problème des moustiques pour des régions étendues. Mais cette méthode requiert beaucoup d'organisation et de >



VACCINER LES MOUSTIQUES

Et si, au lieu de tenter à tout prix de neutraliser les moustiques, on les vaccinait contre les agents infectieux qu'ils transmettent ? Plusieurs techniques sont en cours de mise au point. La première, développée par l'équipe de Scott O'Neill, de l'université Monash, en Australie, et déjà testée sur le terrain pour combattre la dengue, nécessite le recours à la bactérie *Wolbachia*. Les chercheurs infectent en laboratoire les moustiques du genre *Aedes* avec une certaine souche de la bactérie qui bloque la réplication du virus de la dengue chez l'insecte. Une femelle porteuse de *Wolbachia* ne pourra alors plus transmettre ces virus aux humains en piquant et léguera en outre la bactérie à sa progéniture.

Des scientifiques de l'université de Californie à Irvine, menés par Anthony James, ont choisi quant à eux de manipuler génétiquement les moustiques en utilisant l'outil CRISPR-Cas. Ils insèrent chez les moustiques anophèles un gène codant un anticorps antiparasitaire qui bloque le développement de l'agent du paludisme. Grâce au forçage génétique, le gène est transmis à la quasi-totalité de la descendance. Jusqu'à présent, ces moustiques génétiquement modifiés n'ont jamais quitté les murs des laboratoires.

Dans les deux cas, l'idée est de relâcher dans la nature les moustiques élevés et modifiés en laboratoire dans l'espoir qu'ils se reproduisent avec les moustiques sauvages. Cela propagerait la bactérie ou le gène d'intérêt au sein de la population des moustiques vecteurs, et protégerait les humains alentour.

H. G.

> logistique, avec peu de perspectives de profits financiers. Cette solution a donc été exploitée par des organismes gouvernementaux plutôt que par des entreprises privées.

Encouragées par le regain d'intérêt à l'égard de la lutte antivectorielle qui a suivi la crise liée au virus Zika, des sociétés privées misent sur un autre type de stérilisation, plus rapide, plus simple et plus robuste. Pour combattre le virus Zika et celui de la dengue au Brésil, l'entreprise Oxitec a relâché des moustiques génétiquement modifiés dans la nature. En s'accouplant avec des femelles sauvages, ces mâles transmettent à leur progéniture un gène qui bloque leur développement : les larves meurent avant leur maturité. Après un lâcher de ces moustiques dans un quartier de la ville de Juazeiro, dans le Nord-Est du Brésil, le nombre de moustiques *Aedes aegypti* a chuté de 95% en l'espace de neuf mois. Deux autres villes brésiliennes ont connu des succès similaires. Mais la méthode reste controversée et essuie de nombreuses critiques, liées aux conséquences imprévisibles sur l'environnement.

Avec la technique des mâles stériles fondée sur le génie génétique, il faudrait attendre des années avant qu'elle ait un impact sur une

étendue significative. Mais d'autres outils existent pour aller plus loin. D'après des chercheurs de l'Imperial College à Londres, la clé du succès pour vaincre le paludisme résiderait dans le «forçage génétique». Cette méthode, qui est une amélioration de la technique CRISPR-Cas de modification du génome, défie les lois naturelles de l'hérédité. Lors de la reproduction sexuée, un caractère porté par un chromosome d'un des deux parents n'a qu'une chance sur deux d'être transmis à la génération suivante. Grâce au forçage génétique, le caractère est transmis à la quasi-totalité de la descendance. Et ce à chaque génération.

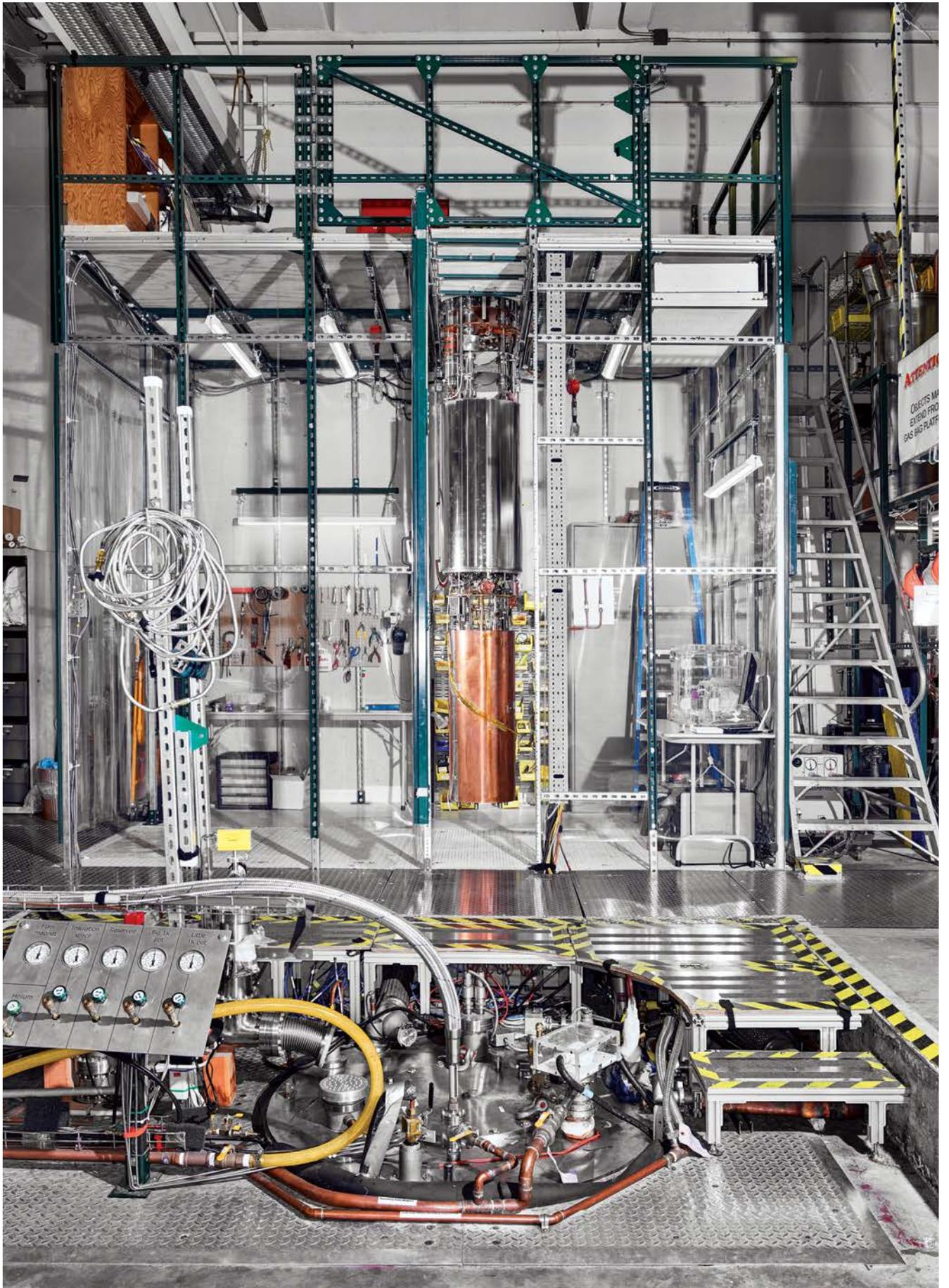
Cette technique peut être utilisée à plusieurs fins. Des chercheurs de l'université de Californie à Irvine y ont recours pour empêcher une population d'anophèles de transmettre le parasite grâce à un gène qui bloque son développement chez l'insecte (voir l'encadré ci-contre). L'équipe de l'Imperial College, elle, s'en sert afin de détruire une population d'anophèles soit en déséquilibrant, au fil des générations, le rapport des sexes au profit des mâles, soit en répandant au sein de la population un gène récessif de stérilité.

Les techniques de stérilisation par irradiation ou par manipulation génétique (sans forçage génétique) sont relativement similaires. Mais le recours au forçage génétique permet de relâcher moins de moustiques, puisque le gène d'intérêt se transmet rapidement au sein de la population. Mais les recherches dans ce domaine restent pour l'heure cantonnées dans l'enceinte des laboratoires. Les conséquences de cette pratique sur l'environnement sont difficiles à prédire et certains scientifiques craignent que les moustiques sauvages développent avec le temps une résistance au gène inséré, ce qui s'est déjà produit en laboratoire.

L'ÉRADICATION COMPLÈTE EST UN FANTASME

Quelles que soient les méthodes qu'on utilisera dans le futur, éliminer tous les moustiques relève du fantasme. Aux États-Unis, les villes qui ont vu les populations de moustiques décliner notablement dépensent entre 1 et 10 dollars par an et par personne pour pulvériser des insecticides, supprimer les points d'eau stagnante et défricher la végétation appréciée des moustiques. Et malgré toutes ces mesures, les moustiques ne disparaissent jamais complètement.

Par ailleurs, les conséquences d'une disparition complète des moustiques sur les chaînes alimentaires et la pollinisation des plantes sont difficiles à prévoir, mais pourraient être négatives. En outre, seules quelques centaines parmi les 3500 espèces connues de moustiques piquent les humains et transmettent des maladies : rayer l'ensemble des moustiques



L'ESSENTIEL

> L'Univers contiendrait une grande part de particules invisibles, la « matière noire ». Celle-ci ne se manifesterait que par ses effets gravitationnels. Mais on ignore quelle est sa nature précise.

> L'axion désigne une particule hypothétique qui expliquerait la matière noire, et à laquelle

les physiciens s'intéressent de plus en plus. Son existence résoudrait aussi un problème lié à l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques.

> L'expérience ADMX a récemment atteint un niveau de sensibilité suffisant pour tester les versions les plus plausibles des axions.

L'AUTEUR



LESLIE ROSENBERG
professeur de physique
à l'université de
Washington, à Seattle,
aux États-Unis

Matière noire

La cote de l'axion monte

Alors que le candidat favori pour expliquer la masse cachée de l'Univers est en perte de vitesse, celui qui porte le nom d'axion gagne en popularité. Dédiée à sa recherche, l'expérience ADMX a franchi une étape décisive : sa sensibilité lui permet désormais de traquer cette particule invisible.

Le cosmos est constitué en majeure partie de quelque chose que nous ne pouvons pas voir. Telle est la conclusion qui s'est peu à peu imposée aux astronomes à partir des années 1930. Les premiers indices sont venus de l'observation des amas de galaxies, dont la cohésion ne pouvait être assurée que par un supplément de matière qui échappait à la détection. Les scientifiques ont vraiment pris au sérieux l'idée de « matière noire » à partir des années 1970, quand les astronomes qui étudiaient la rotation des galaxies sont parvenus à la même conclusion. Les chercheurs ont rapidement compris que la matière noire n'est probablement pas constituée de matière ordinaire. Désormais, il est quasiment certain que plus de 90% de la matière qui s'agrège sous l'effet de la gravité est un matériau exotique, probablement des particules vestiges du Big Bang et dont la nature reste à préciser.

Pendant longtemps, les physiciens avaient un candidat favori pour la matière noire : le wimp (acronyme de *Weakly Interacting Massive Particle*, particule massive interagissant faiblement), qui s'inscrit dans une théorie populaire mais spéculative, celle de la supersymétrie. Cependant, malgré une sensibilité toujours accrue, les expériences qui visaient à détecter les wimps n'en ont trouvé aucune trace au terme de plusieurs décennies de recherches. Il est trop tôt pour enterrer les wimps, mais ces résultats négatifs ont incité les physiciens à considérer d'autres candidats au titre de la matière noire.

L'un de ces candidats est l'axion, une particule hypothétique beaucoup moins massive que le wimp, mais qui interagirait aussi peu avec la matière ordinaire. Si la matière noire est effectivement constituée d'axions, il s'en trouverait partout en abondance : autour de vous, chaque centimètre cube en contiendrait des dizaines, voire des centaines de billions. >

Le cœur de l'expérience ADMX est à l'abri dans une salle blanche (en arrière-plan), pour le protéger des poussières. Lors d'une prise de données, le dispositif est descendu dans un trou (ici recouvert et au premier plan) pour le protéger des perturbations extérieures.

> Leur seul effet sur le reste de l'Univers serait gravitationnel – leur masse cumulée serait assez importante pour expliquer le mouvement des étoiles dans les galaxies ainsi que celui des galaxies dans les amas.

Depuis plus de vingt ans, je participe à la recherche de ces particules dans le cadre de l'expérience *ADMX* (*Axion Dark Matter eXperiment*). Et même si nous ne les avons pas encore trouvées, nous continuons d'améliorer notre détecteur. En 2016, *ADMX* a amorcé une nouvelle phase. Le dispositif est maintenant assez sensible pour être en mesure, d'ici cinq à dix ans, de détecter des axions ou d'exclure les scénarios d'axions les plus plausibles. Nous avons franchi un seuil important, et nous devrions avoir bientôt des nouvelles passionnantes, qu'elles aillent dans un sens ou dans l'autre.

DES AXIONS POUR RÉSOUDRE UN PROBLÈME DE LA QCD

Dans les années 1980, peu de temps avant le début de ma thèse, l'idée des axions avait été émise pour répondre à un problème soulevé par la QCD, la chromodynamique quantique. La QCD est la théorie de l'interaction forte, qui assure la cohésion des composants du noyau atomique et du noyau lui-même. Les expériences de physique des particules présentent un accord remarquable avec les prédictions de cette théorie, sauf en ce qui concerne ce que l'on nomme le « problème de la violation de CP pour l'interaction forte » (CP signifiant « charge-parité »).

La QCD suggère que si vous inversez la charge et la parité d'une particule (c'est-à-dire si vous inversez sa charge électrique et si vous la regardez dans un miroir), elle ne suivrait plus exactement les mêmes lois physiques. Pourtant, rien dans les résultats expérimentaux n'indique que c'est le cas. Ce conflit entre la théorie et les expériences constitue une énigme sérieuse, une fissure dans le bel édifice du modèle standard, notre meilleur modèle de la physique des particules. Cette fissure constitue le « problème CP fort ».

En 1977, alors qu'ils étaient tous deux à l'université Stanford, Helen Quinn et Roberto Peccei se sont rendu compte qu'ils pouvaient aborder le problème CP fort de façon simple et élégante en utilisant l'idée des symétries brisées. Ce concept, l'une des idées récurrentes de la physique, se résume simplement ainsi : parfois les lois de la nature ne sont pas invariantes lorsqu'on applique certaines opérations de symétrie, alors qu'on pense qu'elles devraient l'être. Par exemple, si vous posez un crayon verticalement sur sa pointe, la symétrie de rotation fait qu'il a autant de chances de tomber dans une direction que dans une autre. Mais le crayon finit par tomber dans une direction particulière, et la symétrie est donc

« brisée ». Quand une telle brisure se produit dans le contexte de la physique des particules, elle implique l'existence d'une particule qui préserve d'une certaine façon la symétrie sous-jacente, même si elle semble, en surface, avoir été brisée. La symétrie n'est pas nécessairement évidente ; il peut s'agir d'une symétrie mathématique abstraite.

Avec une intuition que je qualifierais de brillante, Helen Quinn et Roberto Peccei ont appliqué cette idée à l'interaction forte. Ils ont supposé qu'une symétrie cachée liée à cette force a été brisée. Si tel était le cas, cela annulerait les effets de la symétrie CP attendus par la théorie et que l'on n'observait pas dans les expériences. Problème résolu. Peu après, grâce à une autre intuition brillante, Steven Weinberg, à l'université du Texas à Austin, et Frank Wilczek, au MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), ont remarqué que le mécanisme de Peccei-Quinn implique l'existence d'une nouvelle particule : l'axion. (D'après le folklore de la physique, ce nom reprend celui d'une marque de lessive parce que la particule fait disparaître la tache que constitue le problème CP fort.) Dès le milieu des années 1980, les physiciens ont suggéré que des axions auraient été produits en grande quantité durant le Big Bang et rendraient compte de la matière noire.

La théorie ne nous renseigne pas sur la masse des axions, ni sur leur probabilité d'interagir avec la matière ordinaire. Mais nous



Produits en nombre durant le Big Bang, les axions formeraient la matière noire



savons qu'ils doivent très peu interagir avec la matière ordinaire, parce que les collisionneurs de particules et d'autres expériences n'en ont encore jamais mis en évidence. S'ils sont extrêmement inertes, la théorie indique qu'ils sont aussi extrêmement légers.

En 1987, un événement cosmique majeur a fourni aux physiciens des contraintes sur la masse de l'axion : la supernova qui a explosé dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine voisine de la nôtre. Presque toute l'énergie de l'effondrement gravitationnel de l'étoile

sur elle-même s'est échappée sous forme de neutrinos, dont certains ont atteint les détecteurs ici sur (ou plutôt sous) Terre. Si les axions avaient une masse d'au moins quelques milliélectronvolts, en unités d'énergie (un peu plus d'un milliardième de la masse de l'électron), ils auraient été produits en grandes quantités lors de l'explosion et auraient modifié le temps mis par les neutrinos pour s'échapper de l'astre. Mais puisque les observatoires et les détecteurs de neutrinos n'ont enregistré aucune distorsion de ce genre, nous savons que les axions doivent être de masse inférieure.

Des axions aussi légers ont des interactions extrêmement faibles avec la matière ordinaire et la lumière. Par exemple, une particule relativement banale, le pion neutre, est instable et se désintègre en deux photons en environ 10^{-16} seconde. Un axion léger pourrait subsister 10^{45} ans avant de se désintégrer en deux photons, une durée bien supérieure à l'âge de l'Univers (par près de 35 ordres de grandeur). L'axion serait, parmi toutes les particules connues, celle qui interagit le moins avec les autres (et de loin).

TROP DE MATIÈRE NOIRE SI L'AXION EST TRÈS LÉGER

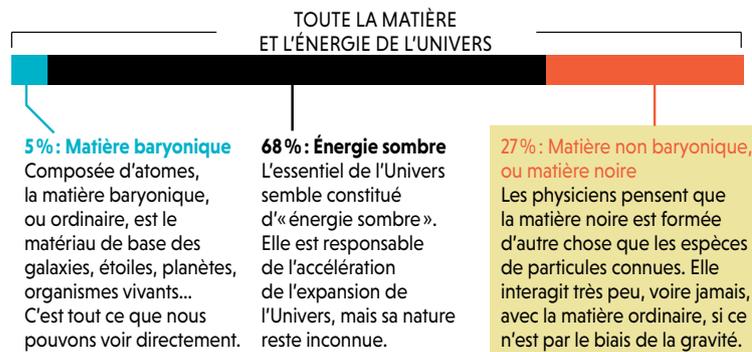
Cependant, d'autres problèmes émergent si la masse de l'axion est trop faible. L'analyse des processus qui décrivent la production des axions aux débuts de l'Univers, pendant le Big Bang, montre que plus la masse de l'axion est faible, plus le nombre d'axions produit est grand et, surtout, plus la densité en axions qui en résulte est grande. Ainsi, pour des masses d'axions inférieures à un certain seuil, le Big Bang aurait produit beaucoup plus d'axions qu'il n'en faut pour rendre compte de la matière noire. Certes, d'importantes incertitudes pèsent sur le mécanisme de production des axions et les théoriciens ont proposé des astuces pour contourner le problème. Mais, à mon avis, il est de plus en plus improbable que les axions aient une masse inférieure de beaucoup à un microélectronvolt.

En résumé, les axions ne peuvent pas être trop lourds, sinon nous les aurions déjà détectés dans les collisionneurs de particules ou au travers de leurs effets sur l'évolution des autres étoiles. Et ils ne peuvent pas non plus être trop légers, sinon il y aurait trop de matière noire. Déterminer ces contraintes de masse avec précision est très compliqué, mais on peut estimer que la plage raisonnable pour la masse de l'axion se situe entre un microélectronvolt et un milliélectronvolt.

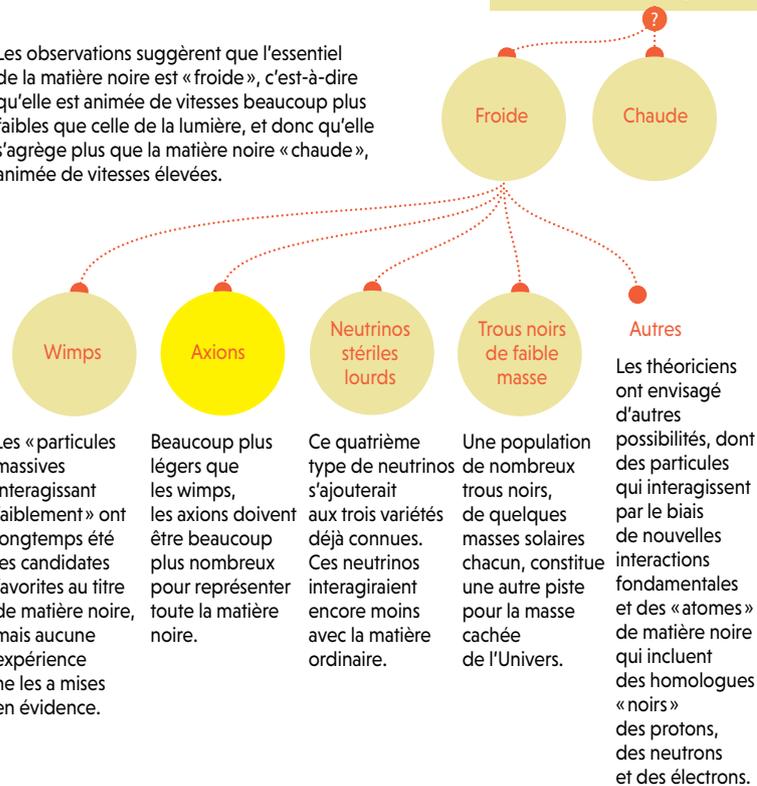
Si le modèle d'axions initialement proposé par Steven Weinberg et Frank Wilczek a rapidement été exclu par diverses contraintes expérimentales, deux autres modèles ont été proposés, nommés Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov (KSVZ) et Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky

PLUSIEURS HYPOTHÈSES POUR LA MATIÈRE NOIRE

Dans l'Univers, une entité invisible semble exercer une attraction gravitationnelle sur la matière ordinaire dont sont constitués les galaxies et les amas de galaxies. Mais quelle est sa nature ? Les physiciens ont développé plusieurs théories pour expliquer de quoi est faite cette « matière noire », qui représenterait plus d'un quart du contenu de l'Univers en masse et en énergie.



Les observations suggèrent que l'essentiel de la matière noire est « froide », c'est-à-dire qu'elle est animée de vitesses beaucoup plus faibles que celle de la lumière, et donc qu'elle s'agrège plus que la matière noire « chaude », animée de vitesses élevées.



(DFSZ) du nom des physiciens qui les ont développés. Dans ces modèles, l'interaction des axions avec la matière est encore plus rare que dans le modèle initial. Ainsi, dans la gamme de masses des axions intéressante pour la matière noire, la probabilité d'interaction est si faible que l'on parle d'« axions invisibles ».

Alors comment détecter les axions ? Quand Helen Quinn et Roberto Peccei ont théorisé >

► L'existence de ces particules, les physiciens de l'université Stanford et d'ailleurs se sont mis à les rechercher dans les collisions des accélérateurs de particules. Mais les propriétés mêmes qui font de l'axion un candidat intéressant au titre de matière noire (ses faibles interactions avec la matière ordinaire et le rayonnement) signifiaient qu'il était insaisissable et que sa recherche semblait vaine. Il était frustrant de savoir que nous baignons peut-être dans un océan de particules impossibles à mettre en évidence en laboratoire.

C'est alors que Pierre Sikivie, de l'université de Floride, a eu l'idée salvatrice de changer d'approche: au lieu d'essayer de créer les axions dans des accélérateurs, nous pourrions tenter de détecter les axions cosmiques qui constituent le vaste océan omniprésent de matière noire dans lequel nous sommes plongés en permanence. L'idée de Pierre Sikivie était d'utiliser une cavité cylindrique vide de tout sauf des axions cosmiques censés inonder l'espace. Un champ magnétique intense régnant dans l'enceinte inciterait des axions à se transformer en photons, qui seraient faciles à détecter. Une telle réaction se produirait avec une probabilité d'autant plus grande que la fréquence de résonance de la cavité (qui dépend de ses dimensions, du matériau qui la compose, etc.) est proche de la fréquence du photon produit par l'axion.

Comme la masse des axions est petite, et que ceux qui sont proches de nous se déplacent à des vitesses comparables au reste de la Voie lactée, leur énergie est minuscule. Dès lors, la fréquence du photon produit se situerait dans la gamme des microondes. Mais pour la définir exactement, il faudrait connaître la masse de l'axion, ce qui n'est pas le cas. C'est pourquoi les expérimentateurs devront changer en permanence la fréquence résonante de la cavité expérimentale afin de « balayer » la plage possible, dans l'espoir de tomber sur la fréquence qui correspond à la masse de l'axion.

Le signal résultant serait très faible, peut-être 10^{-21} watt ou moins, et accompagné d'un bruit à peu près du même ordre de grandeur. Mais des détecteurs de microondes très sensibles, collectant un signal sur un temps assez long, devraient être à la hauteur de la tâche.

J'ai obtenu mon doctorat quand j'étais à l'université Stanford dans les années 1980, alors que l'influence d'Helen Quinn et de Roberto Peccei y était encore forte, et l'idée des axions m'a fait grande impression. Ils semblaient résoudre deux grands mystères de la physique: le problème CP fort et la question de la matière noire. Et d'après l'article de Pierre Sikivie, il existait peut-être un moyen de les détecter malgré tout.

Après ma thèse, j'ai eu le privilège, à l'université de Chicago, de travailler sous la

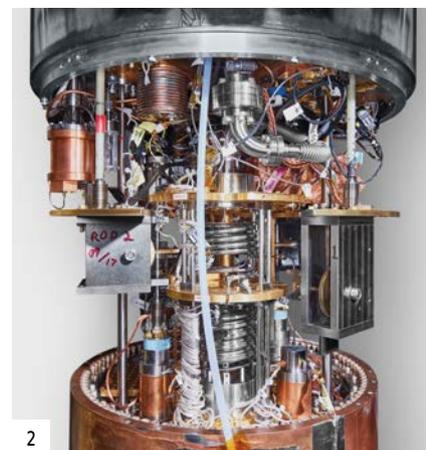


1

houlette de James Cronin (lauréat du prix Nobel en 1980 pour avoir mis en évidence, avec Val Fitch, la violation de la symétrie CP dans la désintégration de certaines particules). C'est là que j'ai pris connaissance des premières tentatives de mise en application de l'idée de Pierre Sikivie, comme l'expérience Rochester-Brookhaven-Fermilab et un projet à l'université de Floride. Bien que toutes deux vouées à l'échec du fait d'une sensibilité insuffisante, elles ont permis de développer le matériel qui sert depuis à toutes les expériences portant sur les axions.

UNE GRANDE CAVITÉ, UN FORT CHAMP MAGNÉTIQUE...

Tandis que j'étais à Chicago, j'ai eu l'occasion de discuter régulièrement avec Karl von Bibber, alors au laboratoire Lawrence Livermore, et avec David Tanner, de l'université de Floride, et nous avons remarqué que nous pourrions pousser plus loin ces premières expériences. Nous voulions d'abord construire une grande cavité où règne un champ magnétique intense pour augmenter la sensibilité. Il nous fallait ensuite de meilleurs amplificateurs de microondes: ce sont eux qui seraient la clé pour détecter le signal microondes extrêmement faible attendu des axions. Mais les amplificateurs de microondes à transistors disponibles à l'époque produisaient beaucoup trop de bruit. Nous rêvions d'amplificateurs limités uniquement par le bruit inévitable



2

Les scientifiques installent des détecteurs dans le dispositif expérimental d'ADMX (1). La cavité entourée de cuivre est surmontée d'un réservoir d'hélium liquide et de l'électronique de l'expérience (2).

LE DISPOSITIF D'ADMX

Si les axions sont partout autour de nous, l'expérience ADMX (*Axion Dark Matter eXperiment*) pourrait les mettre en évidence quand, exceptionnellement, un axion se désintègre en un photon microonde. L'expérience met en jeu un champ magnétique intense et une cavité radiofréquence qui, quand elle est réglée sur la même fréquence que les

photons produits par les axions, favoriserait leur transformation. En 2016, le projet est entré dans une nouvelle phase et a commencé sa recherche la plus sensible à ce jour.

Aimant de compensation

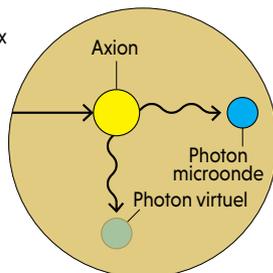
Cet aimant plus petit annule, ou «compense», le champ magnétique de l'aimant principal au voisinage de l'amplificateur à squid, qui doit détecter le minuscule champ magnétique dû aux photons.

Amplificateur à squid

Ce magnétomètre utilise des effets quantiques pour détecter et amplifier le minuscule signal créé quand un axion se désintègre en un photon.

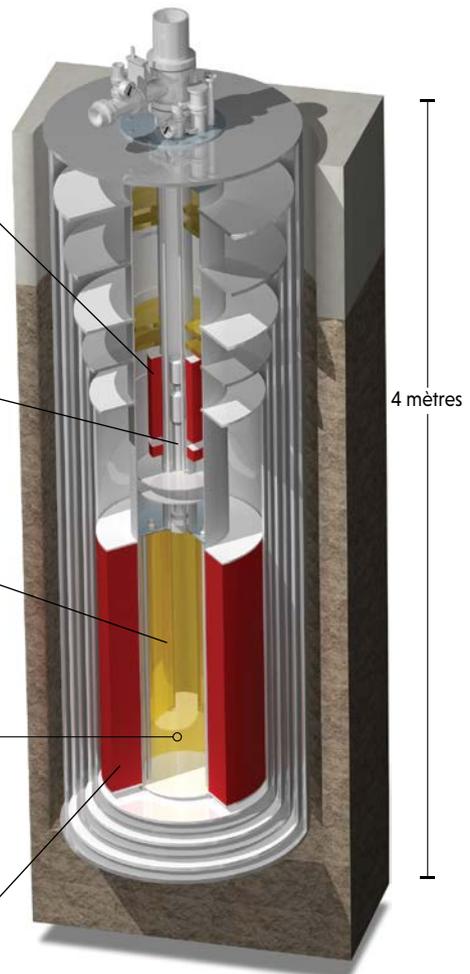
Cavité à microondes

Cœur de l'expérience, cette cavité vide de matière ordinaire est le lieu où les chercheurs s'attendent à ce que les axions ambiants, qui devraient être présents partout dans l'espace si ce sont bien eux qui constituent la matière noire, se transforment en photons microondes. L'axion interagit avec le champ magnétique de la cavité par l'intermédiaire d'un photon dit «virtuel» et se désintègre en un photon microonde.



Aimant de 8 teslas

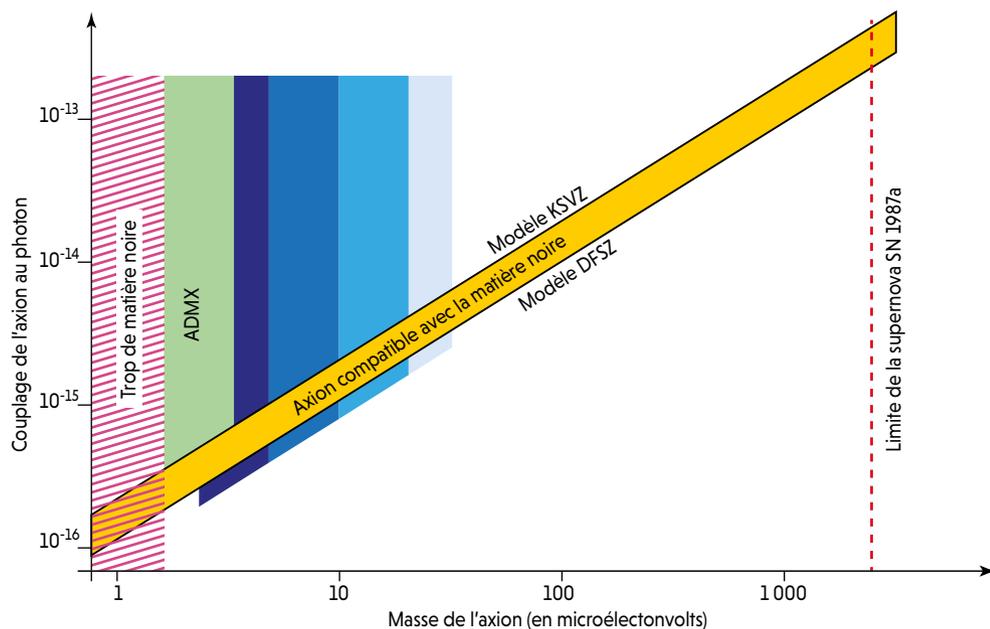
L'aimant principal de l'expérience emplit la cavité d'un champ magnétique qui stimule la désintégration des axions en photons.



d'origine quantique. Mais cela n'existait pas encore dans la gamme de fréquences qui nous intéressait.

C'est ainsi que le programme ADMX a vu le jour: nous commencerions avec un gros aimant, les meilleurs amplificateurs microondes disponibles et de l'hélium pour refroidir le dispositif à 4,2 kelvins afin de réduire le bruit. À moyen terme, nous nous concentrerions sur le développement d'amplificateurs microondes à limitation quantique. À long terme, nous ajouterions un «réfrigérateur à dilution», système qui refroidirait la cavité et les amplificateurs à des températures d'environ 100 millikelvins, ce qui réduirait encore plus le bruit. C'était un programme ambitieux, dont chaque phase durerait une dizaine d'années. Heureusement, nous avons le soutien de la division de la physique des hautes énergies du département américain de l'Énergie, et une vision porteuse.

En 1993, j'ai déménagé au MIT où j'étais nommé à un poste d'enseignant-chercheur. Avec mes collègues, nous avons alors mis sur pied une collaboration pour démarrer officiellement l'expérience. Le laboratoire Lawrence Livermore a fourni un gros aimant supraconducteur et le site de l'expérience. Notre collègue Wolfgang Stoeffl s'est chargé de la conception du système cryogénique initial, un dispositif que nous utilisons en grande partie encore aujourd'hui. David Tanner a conçu et développé les entrailles de l'expérience en s'inspirant du projet initial de l'université de Floride, et notre groupe du MIT a construit un détecteur de microondes ultrasensible. En 1998, nous avons publié les résultats initiaux de cette «phase zéro» d'ADMX, la première expérience sensible aux axions ayant une masse compatible avec le scénario de la matière noire. Nous n'avons pas trouvé ces particules si fugaces, mais nous partions sur de bonnes bases. >



Dans leur recherche des axions, les physiciens synthétisent les diverses contraintes dans des graphiques représentant le couplage de l'axion au photon en fonction de la masse de l'axion. La zone colorée en jaune correspond aux conditions pour lesquelles l'axion est un bon candidat au titre de matière noire. Si la masse de l'axion est très faible, trop de ces particules sont produites durant le Big Bang et on obtient trop de matière noire. Au-delà de 1000 microélectronvolts, certaines observations astrophysiques, sur les supernovæ (en particulier celle de 1987, notée SN 1987a), restreignent aussi les caractéristiques de l'axion. L'expérience ADMX a déjà commencé à explorer une partie des masses possibles pour l'axion (en vert). Les futures améliorations permettront d'aller plus loin (dégradé de bleus).

➤ Pendant ce temps, nous avons continué à avancer dans la quête d'un amplificateur qui serait sensible au minuscule signal attendu des axions. C'est à cette époque que j'ai assisté à une présentation de John Clarke, un spécialiste des dispositifs quantiques à l'université de Californie à Berkeley. Il travaillait sur des magnétomètres ultrasensibles, les squids (acronyme de *Superconducting Quantum-Interference Devices*), qui utilisent l'effet tunnel (un phénomène quantique par lequel une particule peut franchir une barrière de potentiel) et la supraconductivité (dans un matériau supraconducteur, la résistance électrique est nulle et le courant circule sans pertes). Si un photon passe à proximité d'un squid, son faible champ magnétique perturbe l'effet tunnel du détecteur de façon mesurable. Ces dispositifs sont extrêmement sensibles, mais ils n'existaient pas encore pour les signaux microondes. Grâce à une géométrie astucieuse, John Clarke a alors développé des squids dédiés à cette application.

C'était prometteur, mais il restait des obstacles. Les minuscules champs magnétiques du squid allaient être perdus dans le champ plus intense régnant au sein de la cavité. Le département américain de l'Énergie, lors d'une évaluation de notre expérience, a souligné que l'utilisation des squids était «à haut risque». Mes collaborateurs et moi avons décidé de diviser ADMX en deux phases: la «phase 1a» démontrerait que les squids fonctionnent correctement dans le fort champ magnétique de l'expérience. Une «phase 1b» ultérieure ajouterait alors le réfrigérateur à dilution dont nous avons besoin pour atteindre les basses températures requises.

Nous avons lancé la phase 1a en développant un système qui protège le squid du champ

énorme régnant dans la cavité. Pour ce faire, nous avons utilisé une série de boucliers gigognes et d'aimants entourant le squid, destinée à annuler (ou «compenser») le champ magnétique principal. Au milieu des années 2000, nous avons démontré que le système fonctionnait, et nous avons commencé à travailler sur le réfrigérateur à dilution, le principal élément nécessaire pour la phase 1b.

L'EXPÉRIENCE ARRIVE À MATURITÉ

Le département américain de l'Énergie et la Fondation américaine pour la science (NSF) ont mené une vaste réflexion sur le développement de détecteurs de matière noire dits de deuxième génération et notés «Gen 2» ayant des sensibilités améliorées par rapport à celles des expériences existantes. La plupart des projets qu'ils avaient en tête visaient les wimps, mais ils s'intéressaient aussi aux axions. Nos plans pour la phase 1b d'ADMX s'inséraient étroitement dans ce programme, et c'est ainsi que *ADMX Gen 2* est née.

L'expérience a été déplacée à l'université de Washington, à Seattle, sur un site plus moderne. Ainsi, *ADMX Gen 2* est entrée en service en 2016 et devrait durer jusqu'en 2021. Elle intègre le réfrigérateur à dilution qui, en diminuant le bruit, nous a fait gagner en sensibilité. Elle a plus que doublé le taux d'acquisition de données et l'ajout de nouveaux éléments a aussi contribué à améliorer la sensibilité de l'expérience. Le dispositif est en passe d'effectuer une recherche des axions pour des masses comprises entre 1 et 40 microélectronvolts.

En 2018, ADMX a publié un résultat intéressant. Jusque-là, l'expérience était capable d'exclure des axions de quelques microélectronvolts, mais elle n'était sensible qu'à des

probabilités d'interaction de l'axion et du photon correspondant au modèle KSVZ, pour lequel le couplage de l'axion aux photons est 2,7 fois plus intense que dans le modèle DFSZ. Cependant, grâce aux améliorations du dispositif, pour la première fois, les chercheurs ont pu exclure des axions du modèle DFSZ pour des masses comprises entre 2,66 et 2,81 microélectronvolts. Cet intervalle de masse semble modeste, mais il illustre les capacités d'ADMX et nous encourage à poursuivre sur cette voie.

Avec l'expérience ADMX, nous sondons désormais les masses les plus plausibles pour l'axion

L'expérience ADMX est constituée de nombreux systèmes complexes qui doivent fonctionner de concert, mais la plupart de ses éléments sont maintenant au point et leur fiabilité est confirmée. Au-delà de l'aspect technique de l'expérience, la collaboration a aussi connu des changements, elle s'est élargie et inclut désormais des physiciens de nombreux laboratoires et universités. Et une nouvelle équipe de direction d'ADMX a émergé, avec comme porte-parole Gray Rybka, de l'université de Washington, et Gianpaolo Carosi, du laboratoire Lawrence Livermore.

Nous sondons désormais la plage de masses la plus plausible pour les axions candidats à la matière noire, mais la nature peut toujours nous surprendre. Rechercher dans une plage de masses légèrement plus faibles n'est pas très compliqué; en revanche, adapter notre expérience pour rechercher des masses supérieures est un défi de taille.

Quand la masse des axions augmente, la fréquence de résonance de la cavité doit aussi augmenter. Cela implique de diminuer le diamètre de la cavité, ce qui réduit d'autant le volume dans lequel on peut rechercher les axions. Nous pourrions entasser un grand nombre de cavités à l'intérieur d'un unique gros aimant pour conserver un volume appréciable, mais nous serions alors confrontés au « problème de la montre suisse »: la complexité d'un tel système devient très difficile à gérer. Nous

pourrions aussi nous contenter d'une petite cavité, à condition d'augmenter l'intensité du champ magnétique pour compenser. Cette solution est coûteuse, mais elle est actuellement à l'étude. Il est possible que d'ici cinq à dix ans, une intensité accrue du champ magnétique (jusqu'à 32, voire 40 teslas) élargira la plage des masses de notre recherche.

Pour des masses de l'axion beaucoup plus grandes (proches de un milliélectronvolt), les astrophysiciens auraient les moyens de contribuer à la traque. Si de tels axions existent et forment des halos de matière noire autour des galaxies, les radiotélescopes pourraient détecter des raies d'émission très faibles.

À terme, ADMX et d'autres projets parviendront à explorer l'intégralité de la fenêtre théorique des masses possibles de l'axion candidat à la matière noire. Le fait que la plage des masses plausibles soit limitée et entièrement accessible par des expériences fait de l'axion un candidat attrayant, par rapport à d'autres possibilités impossibles à tester complètement.

LA TRACE DES AXIONS DANS LA STRUCTURE DE L'UNIVERS ?

Tandis que nos travaux expérimentaux se poursuivent, les théoriciens font eux aussi des progrès. Des modèles cosmologiques complexes simulés sur des supercalculateurs sont en passe de produire des prédictions plus fiables pour la masse de l'axion. Il est possible, par exemple, que les axions se soient accumulés au cours de l'histoire de l'Univers, sous l'effet de la gravité, selon une distribution différente de celle des wimps. Cela aurait des conséquences sur l'histoire de la formation des grandes structures cosmiques. Des programmes d'observations astrophysiques à venir, comme le LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*, grand télescope d'étude synoptique) qui sera opérationnel en 2019, établiront des cartes de la structure à grande échelle de l'Univers avec une précision suffisante pour permettre aux chercheurs de faire le tri entre les divers candidats à la matière noire.

Une autre possibilité encore est que les axions prédits par la chromodynamique quantique ne soient que la manifestation d'une théorie plus fondamentale œuvrant aux échelles énergétiques les plus hautes. L'une de ces théories en lice, la théorie des cordes, prédit des axions de masse beaucoup plus petite que celles qu'explore l'expérience ADMX. Mais la théorie des cordes est hautement spéculative, tout comme ses prédictions.

Il y a vingt ans, le consensus confortable était que la matière noire était constituée de wimps. Ces dernières années, les axions ont gagné en crédibilité. Dans un avenir pas trop lointain, nous devrions savoir si, oui ou non, ils sont la solution au mystère de la face invisible du cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Du et al., **Search for invisible axion dark matter with the Axion Dark Matter Experiment**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, article 151301, 2018.

P. Sikivie, **Axions, domain walls, and the early Universe**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, pp. 1156-1159, 1982.

S. Weinberg, **A new light boson ?**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 223-226, 1978.

F. Wilczek, **Problem of strong P and T invariance in the presence of instantons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 40, pp. 279-282, 1978.

Bientôt des mines

L'ESSENTIEL

> La demande en certains métaux augmente et les gisements terrestres s'épuisent, d'où l'idée d'exploiter ceux des grands fonds marins.

> À plus de 4 000 mètres de profondeur, sur le fond des océans, il existe d'immenses champs de nodules polymétalliques contenant des proportions importantes de nickel, de cuivre et de cobalt.

> L'utilisation de machines pour les ramasser disperserait des masses de sédiments en tous sens. Les navires d'exploitation feraient de même en surface après avoir trié le matériel dragué.

> Dès lors, avant que ne démarre cette nouvelle activité industrielle, il importe d'étudier comment minimiser son impact environnemental.

LES AUTEURS



THOMAS PEACOCK
professeur de génie
mécanique à l'institut
de technologie du
Massachusetts (MIT),
aux États-Unis



MATHEW H. ALFORD
professeur
d'océanographie
physique
à l'institut Scripps,
aux États-Unis

Les grands fonds océaniques comportent de riches gisements de métaux. Mais leur exploitation, qui pourrait démarrer prochainement, aura des impacts environnementaux négatifs. Scientifiques et organismes régulateurs recherchent des solutions pour limiter les dégâts.

Février 2018, à 50 kilomètres au large de San Diego. Le navire océanographique *Sally Ride* flotte sur 1 000 mètres d'eau. À son bord, huit conteneurs grands comme une voiture familiale sont remplis de sédiments dragués au fond du Pacifique. Nous sommes en train de les mélanger avec de l'eau de mer dans un énorme réservoir. Puis nous ferons passer le contenu par une conduite d'évacuation plongeant depuis notre

bord jusqu'à 60 mètres sous la surface. L'objectif est de décrire la dynamique du nuage de boue créé. À l'aide de tout un réseau de capteurs reliés au navire, nous allons mesurer sa forme et suivre son évolution; nous mesurerons la concentration des particules de sédiment dans la colonne d'eau. Les données recueillies nous aideront à nourrir une réflexion générale sur l'exploitation minière en mer, une nouvelle industrie qui pourrait bientôt avoir un impact important sur l'océan. >

au fond des océans?



Les grands fonds sont parfois tapissés de nodules polymétalliques. Ils abritent des formes de vie fragiles, comme ce gros poisson à croissance très lente.

> Après des années d'essais, plusieurs États et entreprises commencent à prospecter les grands fonds marins à la recherche de nickel, de cuivre, de cobalt et d'autres métaux de valeur. Il existe plusieurs types de gisement, mais les plus intéressants à exploiter consistent en accumulations, à plusieurs milliers de mètres de profondeur, de concrétions rocheuses riches en métaux de la taille du poing: des nodules polymétalliques.

Pour les récolter, les industriels veulent construire des machines capables de travailler à ces profondeurs. Ces machines collectrices avanceraient lentement sur le plancher océanique en aspirant la couche supérieure qui contient les nodules, opération qui s'accompagnerait du relargage vers l'arrière d'un important nuage de sédiments. Elles remonteraient les nodules sur de grands navires par des tuyaux de plusieurs kilomètres de long. En triant le matériel prélevé, on obtiendrait des millions de nodules par jour. Les sédiments restants seraient renvoyés dans la mer où ils formeraient cette fois un nuage plongeant.

Quel impact une activité d'extraction ainsi menée aura-t-elle sur les organismes vivant sur le plancher océanique et dans la colonne d'eau? L'expérience de pollution volontaire décrite plus haut vise à apporter des éléments de réponse à cette question.

UNE DEMANDE CROISSANTE EN NICKEL, CUIVRE ET COBALT

Les mines terrestres à fortes teneurs commencent à s'épuiser. Dans le même temps, l'augmentation de la population mondiale, l'urbanisation, la croissance de la consommation mondiale et le développement rapide de technologies dépendant de certains métaux tirent les prévisions de marchés futurs vers le haut.

On estime par exemple que la demande mondiale de nickel – environ 2 millions de tonnes actuellement – devrait augmenter de moitié d'ici à 2030. Et les gisements terrestres en contiendraient encore environ 76 millions de tonnes de nickel. Or, à elle seule, la zone de fracture de Clarion-Clipperton, c'est-à-dire la plaine abyssale s'étendant de Hawaï à la Basse-Californie, en contient à peu près autant! Pour le cobalt, la situation est similaire: les réserves terrestres sont évaluées à environ 7 millions de tonnes, mais les nodules de cette même zone de fracture en contiennent autant ou plus. C'est pourquoi plusieurs entreprises, telles que la GSR (la société belge Global Sea Mineral Resources) ou la société anglaise UK Seabed Resources, se tournent vers l'exploitation minière en mer profonde, qu'elles espèrent moins coûteuse à terme.

Du reste, certains pays disposant de peu de ressources minérales terrestres, comme le Japon et la Corée du Sud, veulent déjà prospecter les

océans à la recherche de gisements. Ils ont donc commencé par explorer leur zone économique exclusive (ZEE). En septembre 2017, la Jomtec (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) a ainsi effectué dans ces eaux territoriales l'un des premiers essais à grande échelle. Une excavatrice prototype a récolté des tonnes de zinc et d'autres métaux en plusieurs endroits situés à 1600 mètres de profondeur, au large d'Okinawa.

De petites nations insulaires, comme les Tonga et les Îles Cook, ont des ressources trop limitées pour développer elles-mêmes une telle industrie. Elles négocient donc des droits d'exploitation minière à l'intérieur de leurs zones économiques exclusives. S'agissant du plancher océanique sous-jacent aux eaux internationales, c'est l'Autorité internationale des fonds marins, ou AIFM (sigle anglais: ISA), communément appelée l'«Autorité», qui l'administre depuis Kingston, en Jamaïque. Pour le moment, l'Autorité a accordé 28 permis d'exploration à des organismes de 20 pays.

Pendant que les entreprises prospectent les ressources, les chercheurs s'efforcent d'en savoir le plus possible sur les éventuels effets destructeurs de la nouvelle industrie et de déterminer dans quelle mesure on pourrait les réduire. Des gouvernements, des industriels, l'AIFM, des universités et des organismes scientifiques (en France, l'Ifremer et le CNRS) s'associent afin de lancer et de mener les projets de recherche nécessaires.

Trois types de gisement sont prometteurs. Le premier est celui des «amas sulfurés». Il s'agit d'accumulations de sulfures métalliques (FeS₂, PbS, Au₂S...) créées par les sources hydrothermales présentes sur les dorsales océaniques, ces longues chaînes volcaniques sous-marines qui marquent la frontière entre deux plaques tectoniques. Les amas sulfurés contiennent des masses notables de zinc, de plomb et d'or. La Papouasie-Nouvelle-Guinée a accordé à la société canadienne Nautilus

La plupart des projets d'extraction en eau profonde concernent les nodules polymétalliques

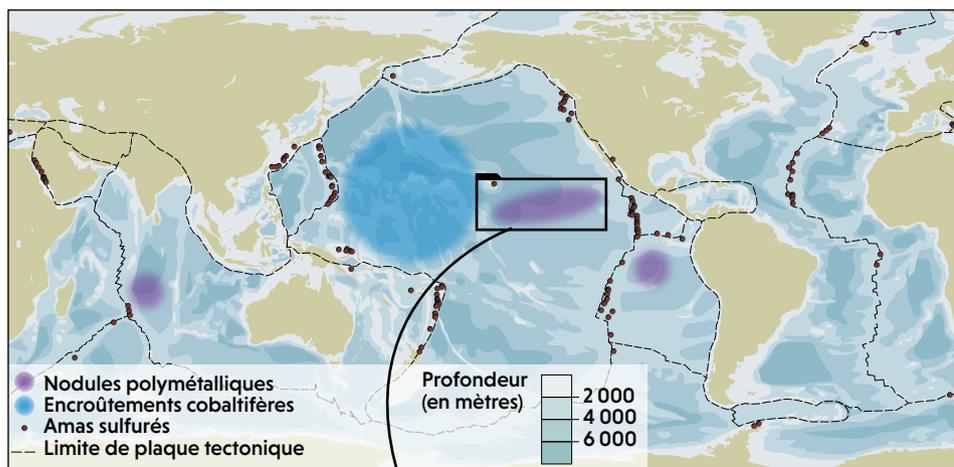
CHASSE AU TRÉSOR

De nombreux pays et entreprises exploitent les fonds marins peu profonds à la recherche de pétrole, de sable et de diamants. Nombre d'entre eux se sont aussi mis à prospecter les grands fonds à la recherche de métaux critiques, tels le nickel et le cobalt. Les chercheurs ont cartographié dans

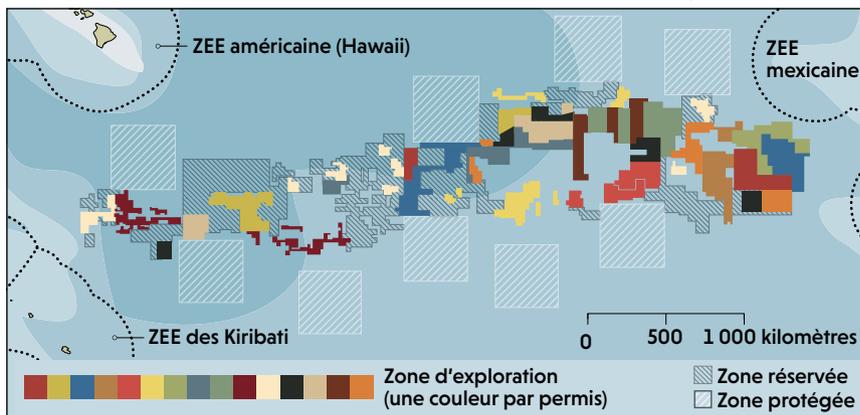
les eaux internationales trois types de gisement qui semblent particulièrement prometteurs (*régions colorées*). Sur le plan économique, ce sont les nodules polymétalliques, que l'on nomme aussi des nodules de manganèse, qui pourraient être les plus intéressants.

CONCENTRATIONS MÉTALLIQUES DANS LES FONDS MARINS

C'est l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM) qui régleme l'exploitation minière dans les eaux internationales. Cet organisme a déjà émis 16 permis d'exploration (*ci-dessous*) à la recherche de nodules de manganèse dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton, une région du plancher de l'océan Pacifique grande comme l'Europe. L'essentiel de ces concrétions rocheuses se trouve à une profondeur de plus de 4 000 mètres.



PERMIS D'EXPLORATION



Quand l'AIFM accorde un permis, elle définit des zones réservées à une exploitation future par des pays en développement, et des zones protégées où aucune extraction ne peut avoir lieu. Certains pays mènent également des recherches dans leur propre zone économique exclusive (ZEE), c'est-à-dire l'espace maritime qu'ils ont le droit d'exploiter.

Minerals un permis d'extraction de ces sulfures sur le site hydrothermal inactif de Solwara 1. De son côté, l'AIFM a émis sept permis d'exploration sur des sites d'anciennes sources hydrothermales se trouvant dans les eaux internationales. Les scientifiques ont, eux, demandé un moratoire pour les sites actifs, afin de protéger leurs écosystèmes uniques.

Le deuxième type de gisement intéressant est celui des encroûtements cobaltifères. Le contact entre les courants marins et les flancs ou sommets de montagnes sous-marines entraîne en effet la précipitation des métaux contenus dans l'eau de mer. Cela finit par créer des amas considérables: même s'ils ne grossissent que de quelques millimètres par million

d'années, ils finissent par atteindre des épaisseurs de 5 à 10 centimètres. Outre du cobalt, ces amas contiennent du nickel et d'autres métaux intéressants. L'AIFM a émis quatre permis d'exploration pour l'Ouest du Pacifique, mais l'extraction de ces encroûtements cobaltifères sera un défi: il est difficile de les arracher au substrat rocheux, tandis que les pentes abruptes où ils se trouvent constituent un terrain difficilement praticable.

Dès lors, la plupart des projets d'exploration minière en eau profonde portent sur le troisième type de gisement: les nodules polymétalliques. On les nomme aussi nodules de manganèse, parce que ce métal y domine. Dans de nombreuses régions du plancher océanique, >

► ils jonchent le fond, à moitié enterrés dans les sédiments. Leur formation est très lente: sur un quelconque morceau de matière détritique, les métaux contenus dans l'eau se mettent à précipiter, formant un noyau dont le diamètre augmentera ensuite d'environ 1 centimètre par million d'années.

À ce jour, l'AIFM a accordé 16 permis d'exploration à la recherche de nodules dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton. Bien que les proportions varient d'un endroit à l'autre, un nodule contient typiquement 3% de son poids en nickel, en cuivre et en cobalt; c'est cela qui fait son prix, bien plus que les 25% de manganèse qu'il contient aussi. Le reste est du matériau durci sans intérêt économique.

RUÉE VERS LES NODULES

L'évaluation de l'intérêt minier d'un site potentiel à l'aide d'instruments et de collecteurs d'échantillons embarqués dans des véhicules autonomes sous-marins prend plusieurs mois. En raison de l'étendue des surfaces à explorer, on extrapole les résultats de l'échantillonnage sur l'ensemble du champ pressenti. Un site passe pour économiquement viable s'il promet au moins 10 kilogrammes de nodules par mètre carré, si peu ou pas de sédiments les recouvrent et si la pente du fond océanique est inférieure à 10%, afin que les machines collectrices, roulant sur de lourdes chenilles, puissent s'y déplacer sans trop de difficulté.

L'outil crucial de l'extraction minière sous-marine est la machine collectrice, alimentée par un câble électrique relié au navire. Elle doit être conçue pour exploiter la couche superficielle du fond océanique sur environ 50 kilomètres par jour, sans doute par allers et retours à l'intérieur d'une bande large d'un kilomètre. Des véhicules sous-marins autonomes aideraient à guider l'engin et à explorer les environs immédiats.

Après avoir aspiré ou ramassé à la pelle les nodules et les sédiments qui les accompagnent, la machine effectuerait un tri grossier en expulsant derrière elle le plus possible de boue. Un long tube équipé d'une série de pompes ferait ensuite remonter le matériau issu de ce premier tri jusqu'à un navire de traitement; les industries gazière, pétrolière et de dragage utilisent déjà couramment ce type de colonne ascendante. Le navire séparerait les nodules et renverrait le reste des sédiments dans l'océan par un tuyau d'évacuation. De gros navires minéraliers achemineraient ensuite les nodules jusqu'à une usine de traitement située à terre, qui en extrairait les métaux.

On estime que, pour que cette collecte soit économiquement rentable, les entreprises minières devront ramasser 3 millions de tonnes de nodules par an, soit environ 37000 tonnes de nickel, 32000 tonnes de cuivre, 6000 tonnes de cobalt et 750000 tonnes de manganèse.



Des nodules de manganèse contenant des métaux économiquement intéressants sont remontés du fond du Pacifique au cours d'une mission d'échantillonnage de la société canadienne Nautilus Minerals.

L'AIFM a été instaurée sous l'égide de la CNUDM, c'est-à-dire de la Convention de Nations unies sur le droit de la mer. Celle-ci stipule notamment qu'une nation signataire doit prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger l'environnement marin. L'AIFM accorde des permis d'exploration par zones de 150000 kilomètres carrés. Comme les pays ayant ratifié la CNUDM ou l'ayant rejointe (167 États et l'Union européenne) considèrent le fond des océans comme une ressource «pour le patrimoine commun de l'humanité», toute entreprise ou organisme qui souhaite y pratiquer une activité minière doit être parrainé par un pays ayant ratifié la CNUDM. Une fois les études prospectives faites, l'entreprise divise chaque parcelle en deux moitiés, dont l'une est choisie par l'Autorité et réservée pour une exploitation éventuelle par un pays en développement.

Les études suggèrent que sur une parcelle de 75000 kilomètres carrés alloués, une entreprise ne trouvera vraisemblablement que 10000 kilomètres carrés exploitables économiquement (soit environ 0,2% de la zone de fracture de Clarion-Clipperton).

La machine collectrice aspirerait les 10 à 15 centimètres superficiels du fond de l'océan

et compacterait le plancher océanique partout où elle passerait. Or une grande diversité d'organismes d'une taille dépassant la cinquantaine de micromètres vivent dans les nodules ou dans les sédiments. La plupart de ces organismes ne résisteront pas au prélèvement de la couche superficielle du fond ou au nuage de sédiments qui se redéposera.

Des microorganismes plus petits, notamment des bactéries, constituent le reste de la biomasse. On ne sait pas exactement ce qui arrivera à ces minuscules espèces. Projetées vers le haut avec les sédiments, elles se redéposeront au fond quelques kilomètres plus loin. Celles dont l'existence dépend des nodules auront sans doute du mal à survivre. Comme les nodules mettent des millions d'années à se former et que, dans l'océan profond, les communautés biologiques éloignées des événements hydrothermaux sont très lentes à se développer, il est probable que les régions exploitées ne retrouveront pas leur état antérieur avant une durée bien plus longue que la vie humaine.

Ainsi, il y a près de 30 ans, des chercheurs allemands ont utilisé un traîneau pour simuler le dragage le long d'un chemin d'extraction; quand les lieux ont été revisités en 2015, les traces de passage de l'engin semblaient encore toutes fraîches.



L'impact des nuages de sédiments relâchés par les navires est très difficile à évaluer



L'impact du nuage de sédiments émis par la machine collectrice est un autre sujet de préoccupation. Des courants de quelques centimètres par seconde parcourent le fond de l'océan; ils pourraient emporter les particules à plusieurs kilomètres du lieu d'extraction. Majoritairement très fines, avec un diamètre de l'ordre de 0,02 millimètre, ces particules sédimentent à une vitesse d'environ 1 millimètre par seconde. Comme les nuages de sédiments émis par les machines atteindront une dizaine de mètres de haut au sein des courants de fond, ces particules pourraient être déplacées d'une dizaine de kilomètres de leur lieu d'émission.

Cette estimation est peut-être trop simpliste, car les particules fines ont tendance à flocculer, c'est-à-dire à former des agrégats se déposant plus vite que les particules isolées, ce qui limite l'étendue des nuages. Mais comme le taux de sédimentation dans les grands fonds est extrêmement faible, de l'ordre du millimètre par millier d'années seulement, les biologistes pensent que même le dépôt de très faibles quantités de sédiments émis par les machines collectrices suffirait à étouffer la vie sur le plancher océanique jusqu'à des distances dépassant la dizaine de kilomètres.

Le compactage du fond par le passage de la machine collectrice est aussi un problème. L'étude des effets des tempêtes abyssales qui, de temps à autre, raclent les sédiments des grands fonds fournira peut-être des éléments d'information précieux à cet égard.

Quant à l'impact des nuages de sédiments relâchés par les navires sur l'environnement marin et son écologie, il est très difficile à évaluer. Les courants qui animent les couches supérieures de l'océan sont plus rapides et plus turbulents. La conduite rejetant les sédiments pourrait descendre à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Elle émettra un nuage de forme plus ou moins conique, qui sera dilué et distordu par les courants, puis transporté sur plusieurs kilomètres par jour.

Au cours de l'expérience que nous avons menée au large de San Diego en février 2018, nous avons suivi le nuage à l'aide de plusieurs instruments. Nous avons constaté que les courants océaniques le rendaient sinueux, et observé la formation de filaments entremêlés. Un appareil sous-marin et remorqué en a prélevé des échantillons. Nous analysons les données recueillies afin d'en tirer les principales informations, telles que les concentrations en sédiments à proximité ou à distance de la conduite.

Les chercheurs tentent aussi de savoir dans quelle mesure la destruction de la vie dans une zone minière affectera les écosystèmes locaux, ainsi que les communautés abyssales adjacentes ou distantes de plusieurs kilomètres. Au sein de la zone de fracture de Clarion-Clipperton, l'AIFM a décidé de protéger neuf grandes régions et travaille aussi à l'établissement de zones protégées au sein de chaque zone contractuelle. Des spécialistes surveilleront en outre ces sanctuaires afin d'évaluer l'impact de l'extraction.

Il importe aussi de comparer les avantages et inconvénients de l'extraction minière en mer et sur terre. En République démocratique du Congo, qui fournit 60% du cobalt utilisé sur la planète, l'exploitation minière se traduit par de la déforestation et de la pollution atmosphérique, sans parler de l'exploitation des enfants dans les mines. Dans certains pays, les >

ET LA FRANCE DANS TOUT CELA ?

Dans les années 1970, la France a été pionnière dans la découverte des sources hydrothermales métallifères et dans l'exploration des zones à nodules de la zone de fracture de Clarion-Clipperton (CCFZ), située dans le Pacifique Nord équatorial. L'exploration du fond de l'océan à la recherche de gisements métallifères a ensuite connu un fort ralentissement en raison de la situation sur le marché des métaux. Puis, dans les années 2000, l'intérêt pour les trois types de ressources minérales marines profondes – les nodules polymétalliques dans les plaines abyssales, les amas sulfurés le long des dorsales océaniques et des bassins proches des arcs volcaniques, et les encroûtements cobaltifères sur les pentes des monts sous-marins – est revenu.

C'est pourquoi, dans le cadre de la stratégie nationale relative à l'exploration et à l'exploitation minières des grands fonds marins, l'État français patronne l'Ifremer (l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), qui a signé deux contrats d'exploration des ressources minières en océan profond avec l'Autorité internationale pour les fonds marins (AIFM), et en assure la gestion.

Signé en 2001, le contrat d'exploration des nodules dans la zone de Clarion-Clipperton concerne les nodules polymétalliques dans un secteur de 75 000 kilomètres carrés et court jusqu'en 2021. Les recherches effectuées sur la zone dans les années 1970 et 1980, puis pendant les 15 premières années du contrat, ont permis d'aboutir à une



Quelques exemples de nodules polymétalliques rapportés de l'océan profond. Une telle concrétion contient typiquement 25 % de son poids en manganèse et 3 % en cobalt, en cuivre et en nickel.

première estimation de la ressource, ainsi qu'à une meilleure connaissance de l'écosystème benthique. Les recherches se concentrent aujourd'hui sur les impacts qu'aurait une exploitation, notamment sur la vie marine profonde.

Signé en 2014, le contrat d'exploration des sulfures a été signé pour 15 ans. Il vise à explorer les sulfures polymétalliques d'une zone de la dorsale médioatlantique localisée entre 21° N et 26° N, par une profondeur moyenne de 3 400 mètres. Les travaux d'exploration menés ont pour objectifs l'évaluation des minéralisations, la recherche de sites hydrothermaux, l'évaluation de la biodiversité et des facteurs environnementaux.

Une expertise collective sur les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales profondes a été menée

Pour compléter cet appui à la puissance publique, l'Ifremer explore aussi des grands fonds, y mène des recherches sur la formation des ressources minérales et développe des technologies de reconnaissance, d'observation et d'intervention sous-marine à plusieurs échelles. Avec le CNRS, il a aussi réalisé une expertise collective sur les impacts environnementaux de l'exploration et

de l'exploitation des ressources minérales profondes (voir la bibliographie ci-contre). L'institut a par ailleurs participé à un projet de recherche européen intitulé «Aspects écologique de l'activité minière en mer profonde» (Ecological aspects of deep-sea mining), qui visait à évaluer les impacts à long terme d'une exploitation des nodules polymétalliques sur l'environnement profond. La suite de cette action pilote s'articulera autour du suivi environnemental du test d'un prototype de collecteur de nodules prévu par le contractant belge GSR-Deme en 2019 dans la CCFZ.

Afin de mieux comprendre les organismes vivants autour des sources hydrothermales, leur cycle de vie, leur capacité de dispersion, etc., l'Ifremer pilote aussi un projet de recherche en collaboration avec l'université Pierre-et-Marie-Curie, le Muséum national d'histoire naturelle et l'Institut océanographique méditerranéen. Deux campagnes scientifiques ont déjà été réalisées en 2014 et 2018 (*Bicose 1 & 2*) sur le site du permis sulfures.

Enfin, en collaboration avec le CNRS et dans le cadre de l'infrastructure européenne Emso-Eric, l'Ifremer pilote le fonctionnement d'un observatoire du fond marin au sud des Açores sur le champ hydrothermal Lucky Strike. Cet observatoire est opéré depuis 2010 et vise à acquérir des séries temporelles de données sur les processus hydrothermaux, tectoniques, volcaniques et les écosystèmes d'un site hydrothermal actif de la dorsale médioatlantique.

**PIERRE-MARIE SARRADIN
ET SÉBASTIEN YBERT**
Ifremer

> entreprises qui extraient le minerai de nickel sont en train d'épuiser les gisements faciles d'accès, et se tournent vers des gisements dont l'exploitation exige plus d'énergie et davantage de traitements chimiques, et qui aura donc un plus fort impact environnemental.

L'impact des usines exploitant les nodules doit aussi être considéré. Si un nodule ne renferme que 30% de métaux intéressants, le reste constitue du déchet, généralement sous forme de boue. Aujourd'hui, les usines de traitement des minerais renvoient ces boues dans la mine d'où elles ont été tirées. Mais on ne saura pas quoi faire de celles produites par l'exploitation de millions de nodules océaniques. D'un autre côté, l'extraction minière marine présente l'avantage de ne laisser sur place aucune infrastructure lorsqu'un navire d'extraction quitte une zone pour une autre. Il n'en va pas de même à terre, où d'anciennes installations minières encombrant partout le paysage...

Afin de diminuer les besoins en minerais et les impacts environnementaux associés, il est essentiel que la société développe à l'échelle planétaire un recyclage efficace des métaux. Pour autant, la récupération ne suffira pas à satisfaire la demande, qui est en augmentation constante. Il est aujourd'hui difficile de dire si, à quantité de minerai équivalente, l'exploitation du plancher océanique aura des conséquences environnementales plus graves que celles de l'extraction terrestre.

Bien entendu, la régulation des activités minières aura un effet sur ce bilan. L'AIFM ne dispose pas de navires pour inspecter les exploitations, de sorte qu'elle partage cette responsabilité avec les nations parrainant les entreprises minières. Elle ne peut que révoquer le permis d'un pays ou d'une entreprise, suspendre les opérations ou imposer une amende si elle parvient à la conclusion que les opérations minières menées dans une zone ne respectent pas les normes environnementales.

Quatorze des pays membres des Nations unies ont signé la CNUDM, mais ne l'ont pas ratifiée (dont les États-Unis), et 15 autres membres ne l'ont pas signée. Ces 29 États pourraient essayer d'exploiter les eaux internationales sans respecter les règles de l'AIFM, laquelle devrait alors s'en remettre à la diplomatie internationale pour régler le litige.

L'organisation a publié une ébauche de la réglementation qu'elle prévoit pour l'exploitation minière dans les eaux internationales. Les règles correspondantes visent à tout couvrir à terme, de l'émission d'un permis d'exploration et d'exploitation jusqu'aux mesures à prendre pour protéger l'environnement marin. L'AIFM prévoit l'entrée en application de ces règles d'ici à 2020. Quant à l'activité dans les usines terrestres de traitement des nodules, sa régulation relèvera des pays les accueillant.

Un autre aspect important de la problématique posée par l'émergence d'une industrie minière en mer est l'exploitation au sein des zones économiques exclusives des différents pays. Certains pays n'ont pas de mers profondes dans cette zone qui s'étend jusqu'à 200 milles nautiques (370 kilomètres) à partir de la côte. D'autres en ont beaucoup, en particulier les États insulaires du Pacifique. Certains pays, telle la République des Palaos, ont purement et simplement rejeté l'exploitation minière de leur plancher océanique. D'autres, tels les Tonga, les Kiribati et les Îles Cook, mettent une régulation en place et recherchent des partenaires industriels. Les Îles Cook ont par exemple signé un contrat avec la société américaine Ocean Minerals, qui accorde à l'entreprise la priorité quant à la prospection à la recherche de nodules cobaltifères de ses 23 000 kilomètres carrés de zone économique exclusive.

L'EXPLOITATION MINIÈRE DES FONDS MARINS EST SUR LE POINT DE DEVENIR UNE RÉALITÉ

L'exploitation minière des grands fonds marins est ainsi sur le point de devenir une réalité. Étant donné son intérêt économique et stratégique croissant, certains États pourraient lancer une exploitation pilote dans les 5 à 10 prochaines années. Il est souhaitable dans cette perspective que toutes les parties concernées coopèrent, comme elles l'ont fait jusqu'à présent, les essais industriels à petite échelle se faisant conjointement aux indispensables recherches scientifiques.

De fait, une grande partie de ce que nous savons des écosystèmes et des ressources dans les zones économiques exclusives est le fruit d'études menées en conjonction avec les entreprises. Notre expédition de San Diego, par exemple, a été financée par le MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), l'institut Scripps d'océanographie en collaboration avec l'Autorité internationale des fonds marins, l'institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) et l'entreprise GSR. En 2019, le projet européen *JPI Oceans* effectuera une étude dans la zone de fracture de Clarion-Clipperton en collaboration avec l'AIFM et GSR.

Certaines des directives et normes à appliquer dans l'exploitation commerciale pourraient être inspirées des règles relatives à des industries existantes, et d'autres créées. Si les différents acteurs en présence parviennent à collaborer, l'exploitation minière du plancher océanique sera une référence éthique, puisque, jusqu'à présent, la réglementation n'a été établie qu'après la mise en exploitation d'une ressource naturelle. Nous pouvons cette fois réfléchir et réguler avant d'exploiter à tort et à travers. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Dymont et al. (coord.), **Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes**, Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, CNRS-Ifremer, 2014 (téléchargeable sur : www.cnrs.fr/fr/pdf/inee/SyntheseESCO/index.html#/1/).

Biodiversity, species ranges, and gene flow in the abyssal Pacific nodule Province : Predicting and managing the impacts of deep seabed mining, Étude technique de l'AIFM n°3, AIFM, 2008.

Site de l'AIFM :
www.isa.org.jm

Expérience Plumex de l'institut Scripps d'océanographie :
www.mod.ucsd.edu/plumex



L'ESSENTIEL

> Emmy Noether était une brillante mathématicienne allemande, dont la carrière a été entravée par divers facteurs.

> Ses importants apports à l'algèbre abstraite ont mis au second plan certains autres travaux, notamment deux théorèmes qu'elle a publiés en 1918.

> Ces théorèmes, dont le premier est davantage connu que le second, relient symétries d'un système physique et lois de conservation.

> Ils sont le résultat de recherches menées pour éclaircir des questions posées par la théorie de la relativité générale.

L'AUTEUR



DAVID E. ROWE
professeur émérite d'histoire
des sciences à l'université
Johannes-Gutenberg de Mayence,
en Allemagne

Emmy Noether le centenaire d'un théorème

Figure dominante de l'école allemande d'algèbre à Göttingen durant les années 1920-1933, Emmy Noether a aussi marqué le développement de la physique théorique en démontrant qu'à toute symétrie continue d'un système physique correspond une grandeur conservée.

Il y a cent ans, en 1918, la mathématicienne allemande Emmy Noether publiait un article intitulé «Invariantenprobleme» («Problèmes variationnels invariants»). Cet article et les théorèmes qu'il contenait sont aujourd'hui considérés comme l'un des grands jalons du développement de la physique théorique du xx^e siècle. Cependant, ces travaux ne sont devenus célèbres que de façon posthume. La condition de femme ainsi que l'opinion modeste qu'avait Emmy Noether de ses propres résultats ne sont que deux des facteurs qui expliquent pourquoi.

De son vivant et longtemps après sa mort en 1935, cette mathématicienne a eu son nom exclusivement associé à son rôle majeur dans le développement de l'algèbre abstraite moderne, dans les années 1920. En partie à cause de son influence et de son prestige en tant qu'algébriste, peu se souvenaient qu'Emmy Noether avait également joué un rôle éminent dans l'élucidation de certaines zones d'ombre mathématiques de la théorie de la relativité générale d'Einstein, et en particulier celles

entourant le statut des lois de conservation dans cette théorie.

Il convient cependant de souligner que le principal théorème qu'avait démontré Emmy Noether avait une grande généralité: il se rapportait tout autant à la mécanique classique qu'aux théories des champs (dont la théorie du champ électromagnétique ou celle de la relativité générale sont des exemples). En fait, le théorème de Noether fournit un éclairage profond sur les lois de conservation dans presque tout type de système physique, en les liant étroitement à des symétries – ou des invariances – du système.

En particulier, parmi les applications de ce théorème clé, on retrouve les lois de conservation usuelles portant sur la quantité de mouvement, le moment cinétique et l'énergie. Par exemple, le théorème de Noether fait apparaître la conservation de la quantité de mouvement totale d'un système physique isolé comme la conséquence de la symétrie ou invariance du système par des translations dans l'espace. Ici, «symétrie par des translations dans l'espace» signifie que les équations >

Portrait d'Emmy Noether peint (acrylique sur toile) par Jennifer Mondfrans, une artiste qui vit à San Francisco. Ce portrait est inspiré d'une photographie de la mathématicienne prise vers 1907, quand elle avait moins de 30 ans.

> décrivant la dynamique du système restent inchangées quand le système subit une translation (modification de l'origine du système de coordonnées utilisé ou, ce qui est équivalent, changement de la position occupée dans l'espace).

De la même façon, la conservation du moment cinétique traduit une symétrie du système par rotation (c'est-à-dire que le système n'est pas modifié si l'on change son orientation); et la conservation de l'énergie correspond à une symétrie par translation dans le temps (c'est-à-dire que le système n'est pas modifié si on décale l'origine de l'axe des temps).

NON PAS UN, MAIS DEUX THÉORÈMES FONDAMENTAUX

De nos jours, le théorème de Noether occupe une bonne place dans les manuels de physique moderne. Pourtant, comme la mathématicienne française Yvette Kosmann-Schwarzbach l'a montré dans son ouvrage de 2006, qui fait référence, les physiciens ont mis du temps à se rendre compte pleinement de la signification de ce résultat. Même à ce jour, peu de commentateurs ont souligné que l'article originel d'Emmy Noether contient en fait non pas un, mais deux théorèmes fondamentaux.

Qui plus est, ces deux théorèmes sont essentiels pour comprendre la motivation initiale de ses travaux, à savoir la distinction entre ce qu'Emmy Noether appelait les lois de conservation «propres» et «impropres» de la physique. Ces recherches ont été menées dans le cadre de discussions complexes sur le statut de la conservation de l'énergie dans la théorie de la relativité générale d'Einstein, cadre que je vais essayer de brièvement décrire ici.

Emmy Noether a été une mathématicienne dont la puissance et l'éclat ont mis du temps à s'affirmer. Certaines circonstances personnelles l'expliquent probablement en partie.



Une mathématicienne dont la puissance et l'éclat ont mis du temps à s'affirmer



INVARIANTS EN MATHÉMATIQUES ET EN PHYSIQUE

La théorie classique des invariants a des liens étroits avec la géométrie projective analytique, domaine où l'on étudie les propriétés de figures qui restent inchangées sous l'effet de transformations linéaires des coordonnées. Un exemple simple est constitué par les courbes algébriques de degré 2; une telle courbe est l'ensemble de points de coordonnées (x, y) qui satisfont une équation de la forme : $ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0$. Géométriquement, de telles courbes sont des coniques (intersections d'un plan avec un cône), et les quantités $a + c$ et $ac - b^2$ sont invariantes (à un facteur près commun aux deux quantités). Sauf cas particuliers, la courbe sera soit une ellipse, soit une hyperbole; son équation peut alors être transformée en $x^2/p^2 \pm y^2/q^2 = 1$, le signe \pm permettant de distinguer le type de la conique. On peut alors aisément voir qu'on a $a + c = 1/p^2 \pm 1/q^2$ et $ac - b^2 = \pm 1/(p^2 q^2)$.

En physique aussi, l'existence d'invariants est très fréquente. Un exemple élémentaire porte sur les vecteurs. Tout vecteur dans l'espace est caractérisé par une longueur et une direction. Dans un système de coordonnées donné, le vecteur $v_1 = (x_1, y_1, z_1)$ a pour longueur $\|v_1\| = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$. Cette longueur est un invariant : elle ne change pas si on translate le système de coordonnées ou si on le fait tourner. Pour deux vecteurs donnés v_1 et v_2 , on aura trois invariants par rapport aux mêmes transformations : les longueurs de chacun d'eux et leur produit scalaire $v_1 \cdot v_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2$. Tout autre invariant lié aux deux vecteurs donnés peut s'exprimer en fonction de ceux-là. En physique relativiste, les invariants fondamentaux font intervenir une quatrième coordonnée pour le temps, affectée d'un signe différent de celui des trois coordonnées de l'espace (une quantité invariante étant alors du type $x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$, où c désigne la vitesse de la lumière).

En théorie de la relativité restreinte, il s'agit d'invariants par rapport à un groupe de transformations de coordonnées nommé groupe de Lorentz. En théorie de la relativité générale, on autorise des transformations arbitraires des coordonnées, qui n'altèrent pas certaines grandeurs particulières (des invariants différentiels). Les équations du champ gravitationnel d'Einstein, qui régissent le mouvement de la matière et de la lumière, s'expriment en fonction de telles entités. Ces équations sont dites généralement covariantes, car elles gardent la même forme sous l'action des transformations arbitraires mentionnées précédemment.

D. R.



La rue de l'Université à Erlangen, en 1916. Emmy Noether est née dans cette ville et y est restée la plupart du temps jusqu'en 1915, année où elle est partie pour Göttingen à l'invitation de David Hilbert et Felix Klein.

Née en 1882 dans la petite ville d'Erlangen, en Franconie (dans le nord de la Bavière), elle est longtemps restée connue simplement en tant que la fille de Max Noether, un éminent géomètre algébriste. La famille Noether faisait partie de l'élite intellectuelle juive en Allemagne, et les mathématiques représentaient l'un des rares champs académiques où les jeunes hommes juifs avaient de réelles chances d'obtenir un poste de professeur d'université. Fritz, frère cadet d'Emmy, devint ainsi un professeur renommé de mathématiques appliquées, à Karlsruhe puis à Breslau (voir la photographie page 77).

Entre 1900 et 1902, on autorisa Emmy à assister, en tant qu'auditrice libre, à des cours de mathématiques et de langues modernes à l'université où exerçait son père. Elle fut l'une des deux seules femmes mêlées aux 984 hommes qui suivaient alors des cours à Erlangen. Toutefois, en 1903, la Bavière ouvrit ses universités aux femmes (les universités prussiennes firent de même en 1908). Emmy opta pour les mathématiques et suivit des cours donnés par son père et son collègue Paul Gordan. Après un semestre passé à Erlangen, elle partit pour Göttingen, alors en Prusse, où elle assista à des cours donnés par David Hilbert, Felix Klein, Hermann Minkowski, Otto Blumenthal et Karl Schwarzschild. Mais elle tomba malade et retourna donc à la tranquille Erlangen, où elle obtint en 1907 son doctorat avec les félicitations du jury (la mention *summa cum laude*).

Emmy Noether passa sa thèse de doctorat sous la direction de Paul Gordan, connu de ses contemporains comme le « roi de la théorie des invariants ». Gordan était l'un des derniers grands spécialistes en calculs algébriques compliqués et, sans surprise, la thèse d'Emmy Noether – qu'elle dénigra plus tard, car elle la considérait comme une œuvre de jeunesse trop immature – démontra sa capacité à manier de

LE CALCUL VARIATIONNEL EN MÉCANIQUE CLASSIQUE

Le calcul des variations, ou calcul variationnel, a été développé afin de résoudre des problèmes de minimisation ou de maximisation d'une certaine grandeur qui dépend du chemin pris parmi une multitude de chemins possibles. En 1696, le Suisse Jean Bernoulli posa le problème suivant : deux points dans un plan vertical étant donnés, trouver la trajectoire de chute libre allant de l'un à l'autre et pour laquelle la durée de la chute est minimale. Il résolut lui-même ce célèbre problème dit de la brachistochrone en s'appuyant sur une analogie optique (le principe de Fermat, selon lequel la lumière suit le trajet le plus rapide) et en en déduisant l'équation différentielle vérifiée par le chemin qui assure la descente la plus rapide (ce chemin se trouve être une courbe appelée cycloïde).

Plus tard, Leonhard Euler et Joseph-Louis Lagrange inventèrent des méthodes variationnelles pour résoudre

de tels problèmes, méthodes liées aux principes de l'« action » en physique. En mécanique classique, l'action A d'un système est donnée par une intégrale sur les temps t , entre deux instants t_1 et t_2 , d'une grandeur notée L et nommée lagrangien. Pour une particule, par exemple, le lagrangien L est une fonction de la position $x(t)$ et de la vitesse $v(t) = dx(t)/dt$. Le lagrangien correspond à la quantité $T - V$, où T est l'énergie cinétique et V l'énergie potentielle.

On peut alors obtenir les équations du mouvement du système en imposant que l'intégrale définissant l'action A soit minimale, ce qui représente une contrainte sur le chemin $x(t)$ adopté par le système. La formulation mathématique de cette contrainte mène aux équations dites d'Euler-Lagrange, qui sont équivalentes aux équations du mouvement obtenues par l'application directe des lois classiques de Newton.

Ces méthodes ont été utilisées pour formaliser le principe de moindre action, nommé plus tard principe de Hamilton, et pour le généraliser aux théories des champs comme l'électromagnétisme et la relativité générale.

D. R.

> tels calculs. En fait, la « mère de l'algèbre moderne » était elle-même une calculatrice de premier plan, même si c'est sa démarche conceptuelle qui l'a rendue célèbre.

Au cours des huit années suivantes, Emmy continua à mûrir en tant que mathématicienne, en particulier sous l'influence du successeur de Gordan, Ernst Fischer. Elle put finalement échapper à son isolement des débuts de la Première Guerre mondiale, quand les salles de cours de l'université se vidaient et que les tranchées se remplissaient. Au département de mathématiques de l'université de Göttingen, Hilbert et Klein étaient en effet continuellement à la recherche de nouveaux talents, et ils invitèrent ainsi Emmy Noether à venir les rejoindre au printemps de 1915.

Cette offre vint probablement avec l'assurance que la faculté de philosophie de Göttingen soutiendrait ensuite sa candidature pour son *Habilitation*, qualification nécessaire pour enseigner. Mais même l'appui de personnages aussi influents que Klein et Hilbert ne put garantir cette issue: cela ne vint qu'après la guerre, dans le climat plus libéral de la jeune république de Weimar.

LA CONDITION DE FEMME, OBSTACLE À LA CARRIÈRE

Déjà en 1907, des discussions avaient eu lieu sur la possibilité d'autoriser des femmes ayant les compétences requises à enseigner dans une université prussienne comme celle de Göttingen. Comme les professeurs s'y étaient opposés à la quasi-unanimité, le ministère de tutelle avait décidé de conserver, dans le règlement de l'*Habilitation*, la clause qui exclut explicitement les femmes. Lorsque le cas d'Emmy Noether se présenta à la faculté de Göttingen huit ans plus tard, la section des mathématiques et des sciences vota à 10 voix contre 7 pour une exemption au règlement. Tous les membres de la faculté participèrent alors à une réunion houleuse, au cours de laquelle Hilbert railla l'opposition en proclamant: « Nous sommes une université, pas un établissement de bains! »

En fin de compte, le ministère refusa de céder. Hilbert se rendit alors à Berlin pour négocier avec ses représentants, et réussit à obtenir d'eux une concession substantielle: à partir du semestre d'hiver 1916-1917, Hilbert put annoncer des cours donnés par « le Professeur Hilbert avec l'assistance de Mademoiselle le docteur Noether ». En fait, seule Emmy Noether dispensa ces cours.

Un autre personnage d'envergure ayant apporté son soutien à Emmy Noether était Albert Einstein, qui avait de bonnes relations avec les mathématiciens de Göttingen. Tout comme Klein et Hilbert, Einstein appréciait clairement les talents d'Emmy. Après avoir lu

LES DEUX THÉORÈMES DE NOETHER

Comme Emmy Noether le faisait remarquer au début de son article de 1918, son approche mêlait méthodes du calcul variationnel et théorie de Lie des équations différentielles invariantes par transformations infinitésimales. Tôt dans sa carrière, au XIX^e siècle, le mathématicien norvégien Sophus Lie avait eu l'idée que pour intégrer (c'est-à-dire résoudre) une équation différentielle, il fallait trouver une petite perturbation des courbes solutions de l'équation qui laisse invariante la famille de ces courbes (autrement dit, en appliquant la transformation aux solutions de l'équation, on reste à l'intérieur de l'ensemble des solutions).

Ainsi, s'inspirant de la théorie de Lie, Emmy a énoncé et prouvé un premier théorème, selon lequel pour un système physique décrit par un lagrangien (voir l'encadré page 75), le nombre de grandeurs

physiques conservées est égal au nombre de variations infinitésimales indépendantes qui laissent invariante l'« action » du système (cette action s'exprime sous la forme d'une intégrale portant sur le lagrangien).

Ce premier théorème se rapporte à des groupes de transformations qui dépendent d'un nombre fini de paramètres (par exemple, le groupe des rotations dans le plan dépend d'un seul paramètre, qui est l'angle de la rotation).

Le second théorème de Noether porte sur des groupes de transformations qui dépendent d'un nombre fini de fonctions et de leurs dérivées. En suivant Lie, elle nomma « groupes finis continus » les groupes du premier type, et « groupes continus infinis » ceux du deuxième type.

Le second théorème montre que pour une invariance sous des transformations d'un groupe infini, les équations d'Euler-Lagrange obtenues ne sont plus indépendantes les unes des autres, mais satisfont au contraire certaines identités. Dans le cadre de la relativité générale, ce groupe infini est constitué des transformations induites par des changements arbitraires des coordonnées. Emmy Noether donnait ainsi une explication aux quatre identités que Hilbert avait remarquées en 1915. Plutôt que de leur attribuer une signification physique, elle souligna que ces relations sont des lois de conservation impropres, qui n'ont aucun parallèle avec les lois de conservation de la mécanique classique ou de la relativité restreinte.

D. R.

son article de 1918, il écrira à Hilbert: « Je suis impressionné que l'on puisse considérer ces choses d'un point de vue si général. Cela ne ferait pas de mal aux troupes de retour à Göttingen après le champ de bataille de suivre les cours de M^{lle} Noether. Elle semble très bien connaître son affaire! »

Ce n'est qu'au printemps 1915, peu de temps après l'arrivée d'Emmy Noether à Göttingen, qu'Einstein vint y donner une série de cours sur la théorie de la relativité générale. Cette visite eut lieu quelques mois seulement avant des avancées spectaculaires réalisées en novembre 1915. C'est en effet à ce moment que Hilbert et Einstein découvrirent, chacun de son côté, des équations du champ gravitationnel satisfaisant au principe généralisé de relativité, selon lequel les lois de la physique doivent garder la même forme quel que soit le référentiel

ou système de coordonnées dans lequel on se place.

Les deux versions étaient très voisines, bien que les travaux de Hilbert et ceux d'Einstein aient été guidés par des hypothèses physiques et des méthodes mathématiques très différentes. L'approche mathématique développée par Hilbert était fondée sur des méthodes variationnelles, qui avaient joué un rôle important en mécanique classique depuis les contributions de Joseph-Louis Lagrange, au XVIII^e siècle (voir l'encadré page 75).

DES IDENTITÉS REMARQUÉES PAR HILBERT ET MAL COMPRISSES

Einstein avait aussi tenté une telle approche, mais Hilbert fut le premier à exploiter cette piste et à en déduire des équations du champ gravitationnel qui soient pleinement covariantes, c'est-à-dire qui gardent la même forme quel que soit le système de coordonnées adopté. Hilbert remarqua également que son système de quatorze équations satisfaisait quatre identités qu'il interpréta comme un lien entre gravité et électromagnétisme. Mais la nature précise de ces relations est restée obscure, jusqu'aux travaux d'Emmy Noether (voir l'encadré page 76).

Emmy Noether et Fritz, l'un de ses trois frères, en 1933. Cette année-là, avec l'arrivée des nazis au pouvoir, Emmy émigra aux États-Unis. Elle y mourut deux ans plus tard, à la suite de complications d'une opération chirurgicale. Fritz quitta aussi l'Allemagne en 1933. Après avoir occupé un poste de mathématicien à Tomsk, en Union soviétique, il fut arrêté en 1937 en raison de fausses accusations d'espionnage et fut finalement exécuté par les hommes de main de Staline en 1941.



© DR

Plus mystérieux encore était ce que Hilbert nomma son «équation de l'énergie invariante», fondée sur une construction complexe connue sous le nom de vecteur énergie de Hilbert. Emmy Noether commença à étudier les propriétés de cette grandeur un peu plus tard, même si elle ne publia rien à ce sujet. Ce qu'elle découvrit, cependant, est évoqué dans un échange tenu en janvier 1918 entre Klein et Hilbert sur le statut de la conservation de l'énergie en relativité générale, échange publié dans un volume (daté de 1917) de la revue *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*.

Klein y faisait remarquer : «Comme vous le savez, M^{lle} Noether me conseille continuellement au sujet de mes travaux, et en fait, c'est uniquement grâce à elle que j'ai compris ces questions.» Klein avait été à l'initiative de cet échange, dans lequel il insistait sur le fait que l'équation de l'énergie invariante de Hilbert était une identité générale, et non une véritable loi de conservation au sens de la mécanique classique. Une telle loi de conservation classique ne pouvait être découverte qu'en invoquant des propriétés physiques de la matière, alors que l'équation de Hilbert était la conséquence des équations du champ gravitationnel et de considérations purement formelles. Klein soulignait en outre qu'Emmy Noether l'avait déjà remarqué et qu'elle s'était occupée des détails dans un manuscrit. Hilbert répondit à Klein :

«Je suis tout à fait d'accord avec la substance de vos affirmations sur les théorèmes d'énergie. Emmy Noether, à qui j'ai demandé de l'aide il y a plus d'un an pour clarifier ce genre de question analytique à propos de mon théorème d'énergie, a trouvé à cette époque que [...] les composantes d'énergie que j'avais proposées – ainsi que celles d'Einstein – pourraient être transformées formellement en expressions dont la divergence est identiquement nulle [...].» Traduite en termes simples, la dernière partie de cette citation signifie que la loi de conservation que Hilbert a trouvée pour son «vecteur énergie» résultait de manipulations mathématiques purement formelles et constituait donc une identité, une sorte de tautologie sans conséquences sur la physique.

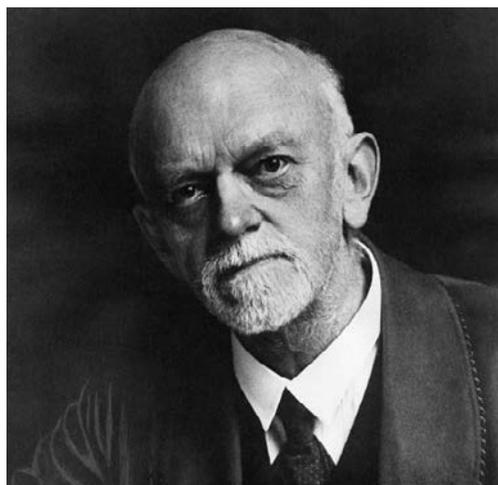
Ces mots échangés entre Klein et Hilbert, ainsi que des notes prises par Rudolf Humm, un étudiant suisse d'Emmy Noether, montrent que les résultats de la mathématicienne avaient de toute évidence anticipé les principaux arguments de Klein.

Hilbert n'était pas seulement d'accord, de façon générale, avec l'analyse de Klein concernant le statut des lois de conservation. Il alla plus loin en affirmant que l'absence d'analogie entre la conservation de l'énergie classique et sa propre équation d'énergie était une >

FELIX KLEIN, DAVID HILBERT ET GÖTTINGEN

Au début du XX^e siècle, le département de mathématiques de l'université de Göttingen était devenu un centre d'excellence mondial, jusqu'en 1933 (arrivée au pouvoir des nazis). C'est là notamment que s'est développée l'algèbre abstraite moderne, dont ont hérité plusieurs champs actuels de la recherche mathématique. L'essor de l'école de Göttingen est en grande partie dû aux efforts de deux mathématiciens brillants et influents, Felix Klein et David Hilbert. Klein, qui avait rejoint

Göttingen en 1886, est notamment connu pour son « programme d'Erlangen » de 1872, qui donnait de la géométrie une vision unifiée, axée sur la notion d'invariance sous des groupes de transformations. Hilbert, plus jeune, est arrivé à Göttingen en 1895. Considéré comme l'un des plus grands mathématiciens de son époque, il a énoncé en 1900, lors d'un congrès international à Paris, une liste célèbre de 23 grands problèmes ouverts, qui a inspiré beaucoup de recherches du XX^e siècle.



À gauche :
Felix Klein (1849-1925).
À droite :
David Hilbert (1862-1943).

> caractéristique de la relativité générale. Il fit même l'hypothèse qu'il était possible de le prouver à titre de théorème. Klein répondit : « Je serais très intéressé de voir la preuve mathématique à laquelle vous faites allusion dans votre réponse. » Pour lui, il s'agissait d'expliquer clairement ce que signifiait une loi de conservation ayant un contenu physique réel, par opposition à l'expression d'une propriété purement formelle. Cela devint le principal problème auquel s'attela Emmy Noether au début de 1918 dans ses travaux sur les « problèmes variationnels invariants ».

Après divers échanges avec Klein, Emmy Noether acheva ces travaux et présenta le 23 juillet ses résultats (voir l'encadré page 76) à la Société mathématique de Göttingen.

Concernant les interprétations physiques, elle nota que son premier théorème généralisait le formalisme sous-tendant les résultats usuels relatifs aux « intégrales premières » (les grandeurs conservées) en mécanique classique.

Elle caractérisa son second théorème comme étant « la généralisation, en termes de théorie des groupes, la plus générale possible de la "relativité générale" ». Non seulement les résultats fondamentaux qu'elle obtint clarifiaient le statut de l'équation d'énergie de Hilbert, mais ils décrivaient aussi les modalités selon lesquelles les lois de conservation apparaissent, que ce soit en mécanique classique ou dans les théories modernes des champs. Quant à l'hypothèse de Hilbert selon laquelle

l'absence d'une loi propre de conservation de l'énergie constituait une caractéristique de la théorie de la relativité générale, Emmy Noether la commenta ainsi dans son article :

« Pour que cette assertion soit littéralement valide, il est nécessaire de comprendre le terme de "relativité générale" dans un sens plus large qu'habituellement, et de l'étendre aux groupes mentionnés précédemment qui dépendent de fonctions. »

DES RÉSULTATS CONFORTANT LA VISION DE FELIX KLEIN

Klein soumit cet article à la Société scientifique de Göttingen le 26 juillet avec beaucoup de satisfaction. En fait, il voyait dans les découvertes d'Emmy Noether une justification de son célèbre « programme d'Erlangen », écrit en 1872 et qui donnait de la géométrie une vision unifiée en tant qu'étude des propriétés qui restent inchangées par des groupes de transformations. Klein adapta plus tard ses principes fondés sur la théorie des groupes pour en faire une doctrine générale pour la nouvelle physique. D'après son programme d'Erlangen, il fallait ainsi comprendre au sens large la théorie de la relativité comme la théorie des invariants relatifs à un certain groupe de transformations. De toute évidence, Emmy Noether considérait que ses travaux sur les lois de conservation dérivées de principes variationnels s'inscrivaient dans ce programme général. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. E. Rowe, **A Richer Picture of Mathematics. The Göttingen Tradition and Beyond**, Springer, 2018.

Y. Kosmann-Schwarzbach, **Les théorèmes de Noether. Invariance et lois de conservation au xx^e siècle**, École Polytechnique, 2006.

D. E. Rowe, **The Göttingen response to general relativity and Emmy Noether's theorems**, dans *The Symbolic Universe. Geometry and Physics, 1890-1930*, J. Gray (éd.), Oxford University Press, 1999, pp. 189-233.

R. Siegmund-Schultze, **Göttinger Felgraue, Einstein und die verzögerte Wahrnehmung [...]**, *Mitteilungen der DMV*, vol. 19, pp. 100-104, 2011.

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

CES GRILLES DE TIGES ARTICULÉES SONT-ELLES RIGIDES ?

Comment savoir si un assemblage plan de tiges articulées est déformable ou rigide? En appelant à la rescousse la théorie des graphes, qui fournit des algorithmes efficaces.

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)

Pour éviter qu'une chaise ne s'écroule quand on s'y assied, on consolide les angles où se rejoignent les pieds et les barres délimitant la surface horizontale du siège. Il est prudent aussi d'ajouter quelques barreaux transversaux. Le problème de la rigidité prend une forme plus générale avec un échafaudage complexe (comme la Tour Eiffel) fait de tiges attachées par leurs extrémités. Les mathématiciens se sont intéressés à cette question et l'ont résolue en déterminant où et comment placer un minimum de barres transversales pour rigidifier un ensemble de tiges articulées.

Des exemples simples du problème constituent déjà de petites énigmes amusantes à laquelle nous vous invitons à réfléchir quelques secondes en observant l'encadré 1.

Imaginons un réseau de barres placées dans un plan dont elles ne peuvent s'échapper, toutes de la même longueur et attachées par leurs extrémités. Sur le schéma *b*, nous avons représenté un réseau formant un rectangle 2×3 où quelques tringles obliques, des diagonales, ont été ajoutées. Parmi les six assemblages de tringles figurés, certains rendent rigide l'assemblage, d'autres non. Saurez-vous identifier les assemblages rigides? Saurez-vous aussi déterminer si le réseau *c* est rigide ou non? Comment formulerez-vous vos arguments? Autre question: combien faut-il au minimum de tringles transversales pour rigidifier un réseau rectangulaire de ce type ayant *a* carrés de haut et *b* carrés de large?

Bien sûr, une méthode pour découvrir la solution à ce type de problèmes consiste à prendre son Meccano, à fabriquer les structures et à les secouer! L'encadré 2 montre quelles structures de l'encadré 1 se déforment. Mais ce n'est guère satisfaisant et nous imaginons qu'un raisonnement doit donner la réponse sans nous obliger à prendre un tournevis.

Une idée naturelle, mais fautive, est de croire que, s'il y a au moins une tringle oblique dans chaque colonne et dans chaque ligne, alors la structure sera rigide. On verra plus loin qu'il peut même y avoir deux tringles obliques dans chaque ligne et dans chaque colonne, et que pourtant l'assemblage se déforme.

REGROUPEZ LES BARRES NÉCESSAIREMENT PARALLÈLES

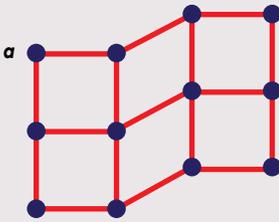
Découvrir la solution générale à ces problèmes de grilles rigides demande qu'on réfléchisse aux contraintes de parallélisme qui s'imposent aux barres du réseau. Considérons un réseau composé de 16 carrés comme celui de l'encadré 3, dessin *a*. La mécanique de l'assemblage indique qu'il existe 8 séries de cinq tringles telles que, dans chaque série, toutes les barres sont nécessairement parallèles, qu'on y ait ajouté des tringles obliques ou qu'il n'y en ait pas. En effet, quand le réseau se déforme, les carrés restent des carrés ou deviennent des losanges (quatre côtés égaux) et donc des parallélogrammes. Cela signifie que leurs côtés opposés sont et seront toujours parallèles. De proche en proche, dans une même ligne ou une même colonne, ces contraintes de parallélisme



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

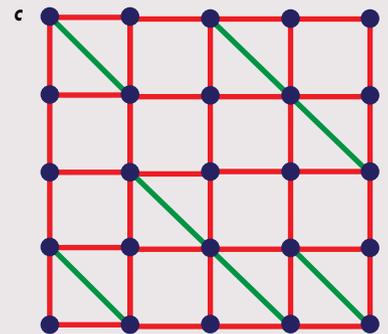
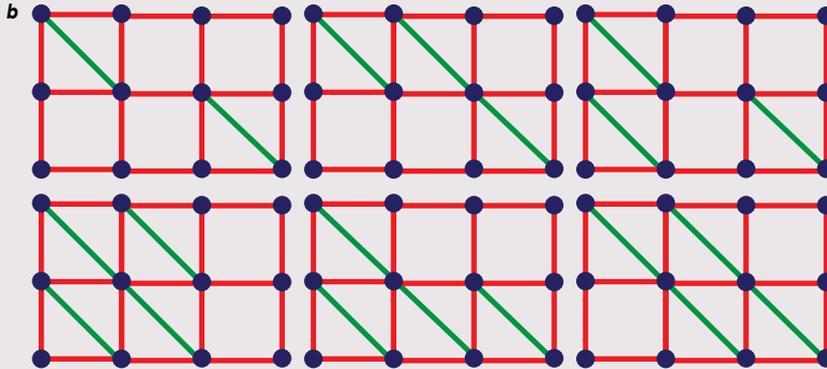
DÉFORMABLES OU RIGIDES ?

1



On considère des grilles faites de barres de même longueur attachées aux points de jonction. Les articulations (en bleu foncé) étant souples, une telle grille peut se déformer (a). On suppose toutefois que toutes les barres restent dans un même plan. Afin de rendre la grille rigide, on a ajouté des triangles obliques (en vert). Pour certains

assemblages, on a ajouté suffisamment de barres vertes, pour d'autres non. Serez-vous reconnaître quels assemblages, parmi les six dessinés en b et celui dessiné en c, sont rigides ? Pourquoi ? Quel est le nombre minimal de barres obliques qu'il faut ajouter à une grille rectangulaire de taille $p \times q$ pour qu'elle devienne rigide ?



des triangles déterminent 8 groupes de 5 triangles. L'un de ces groupes de 5 triangles toujours parallèles est figuré en rouge sur le schéma a de l'encadré 3, un autre est figuré en vert. En prenant en compte toutes ces contraintes de parallélisme, on sépare les 40 triangles en 8 groupes de 5 triangles. Ce sont, d'une part: (1) les 5 triangles en rouge au-dessus de la tringle x_1 ; (2) les 5 triangles au-dessus de x_2 ; (3) celles au-dessus de x_3 ; (4) celles au-dessus de x_4 . D'autre part, les triangles verticaux se regroupent en 4 groupes de 5: (5) celles à la même hauteur que y_1 ; (6) celles à la même hauteur que y_2 ; (7) celles (en vert) à la même hauteur que y_3 ; et (8) celles à la même hauteur que y_4 .

Nous désignerons chacun de ces 8 paquets de 5 triangles par le nom de la tringle «maîtresse» du bas ou de gauche. Les 8 paquets sont donc $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3$ et y_4 .

Remarquons maintenant qu'à chaque fois qu'on introduit 1 tringle transversale, on contraint 2 triangles de paquets différents à être orthogonales, et donc toutes les triangles d'un paquet à être orthogonales à toutes les triangles d'un autre paquet. Par exemple, en introduisant 1 tringle transversale (en gris dans le schéma a de l'encadré 3) dans la colonne x_1 et dans la ligne y_3 , on oblige les 5 triangles de x_1 (en rouge) à rester orthogonales aux 5 triangles de y_3 (en vert).

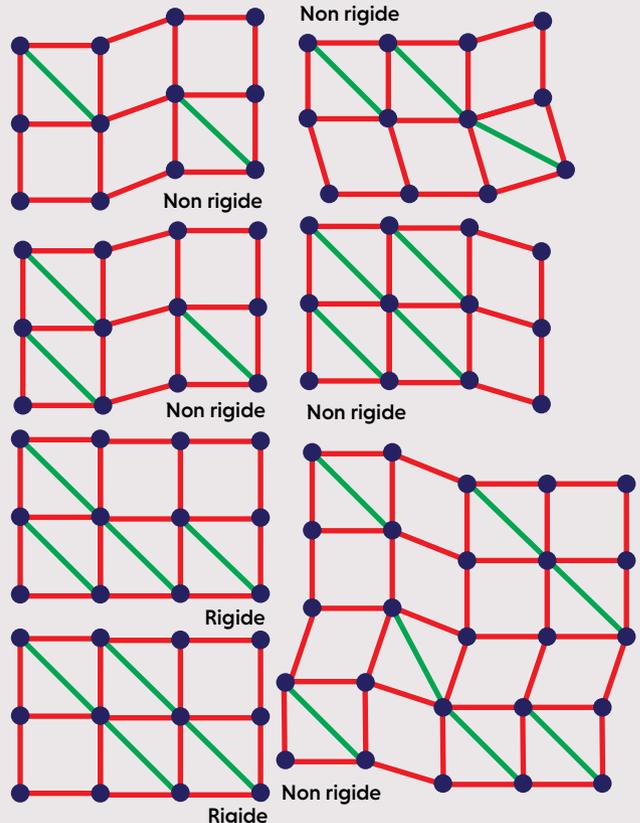
Quand plusieurs triangles transversales sont insérées dans le réseau, pour faire le bilan de contraintes d'orthogonalité créées, il est utile de dessiner un graphe dont les nœuds sont les huit groupes $x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4$ et dont les arcs sont ceux correspondant aux triangles >

LA RÉPONSE PAR LE BRICOLAGE

2

Pour résoudre les problèmes de l'encadré ci-dessus, on peut construire les grilles en Meccano et les secouer. Reste

la question : pour rigidifier une grille quelconque, combien de barres diagonales faut-il, et comment les placer ?



3

> transversales établissant des contraintes, comme nous l'avons vu avec x_1 et y_3 . Les graphes associés à deux grilles 4×4 (dont celle de l'encadré 1, schéma *c*) sont dessinés dans la figure *b* de l'encadré 3.

LA THÉORIE DES GRAPHES POUR COMPRENDRE

Dans ces graphes, si 2 paquets de tringles sont reliés par un chemin, cela signifie qu'ils sont rigidement associés. Si ce sont 2 paquets de tringles horizontales (ou 2 paquets de tringles verticales), c'est que les tringles des 2 paquets sont toutes parallèles; si l'un des 2 paquets est horizontal et l'autre vertical, c'est que chaque tringle de l'un des paquets est orthogonale à chaque tringle de l'autre.

Pour que le réseau soit rigide, il suffit donc que tous les nœuds du graphe soient reliés,

c'est-à-dire que le graphe associé au réseau soit « d'un seul tenant » ou, en termes de théorie des graphes, « connexe » (pas de nœuds ou de groupes de nœuds isolés).

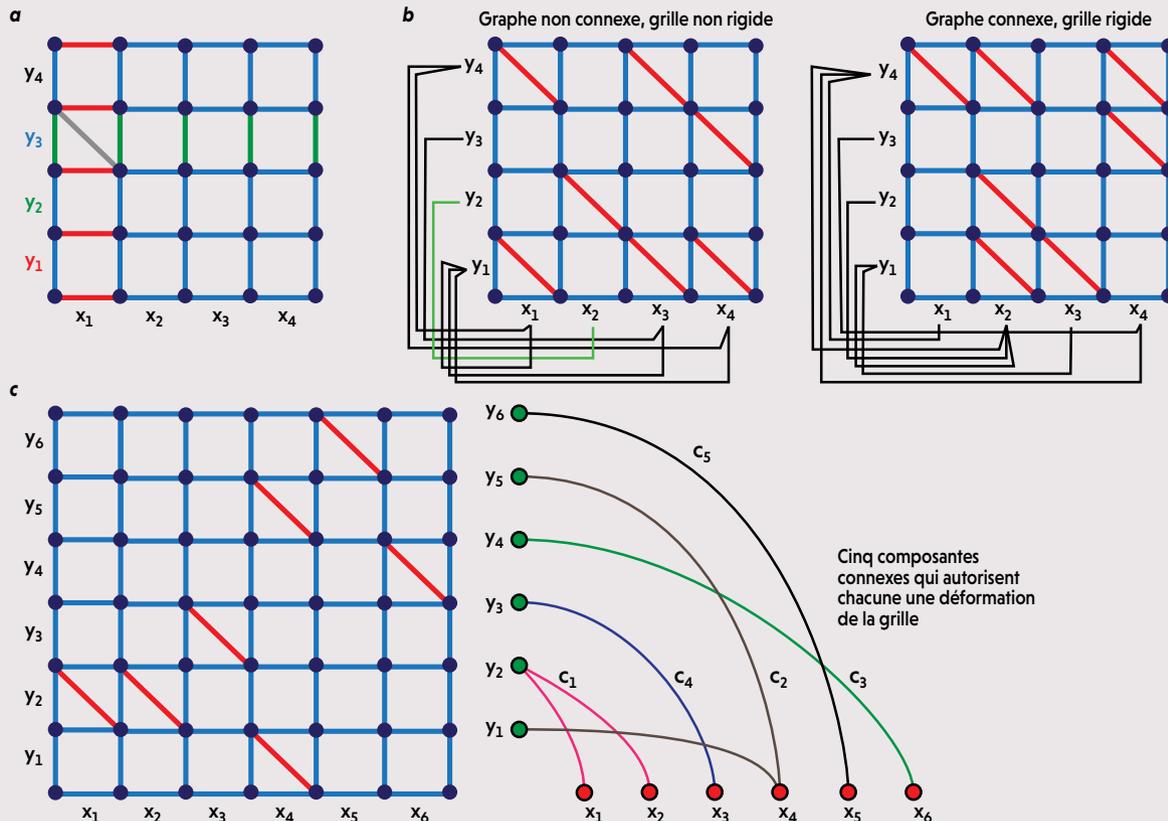
La réciproque est vraie aussi, comme les mathématiciens américains Ethan Bolker et Henry Crapo l'ont établi en 1979. Finalement, pour savoir si un réseau de ce type est rigide, il faut et il suffit que le graphe associé aux familles de tringles (les x_i et les y_j) soit connexe.

Pour illustrer cette propriété, on a dessiné dans l'encadré 3 (schéma *c*) un réseau 6×6 avec quelques tringles transversales et son graphe. Celui-ci comporte 5 composantes connexes, c'est-à-dire qu'il se décompose en 5 sous-graphes non liés entre eux: quand on est dans l'un des sous-graphes, on ne peut pas passer dans un autre en suivant les arcs du graphe. On a aussi dessiné 5 déformations possibles du

CONTRAINTES DE PARALLÉLISME ET D'ORTHOGONALITÉ

Quand une grille à articulations souples, comme celle représentée en *a*, se déforme, les carrés deviennent des losanges et donc toutes les barres horizontales d'une même colonne (par exemple celles indiquées en rouge) restent parallèles. De même, toutes les barres verticales d'une même ligne (par exemple celles indiquées en vert) restent parallèles. Cela détermine 8 ensembles de 5 barres qui seront toujours parallèles quand on ajoutera des tringles obliques et qu'on

déformera la grille. Chaque tringle oblique crée une contrainte d'orthogonalité (un carré doté d'une telle tringle est indéformable). L'ensemble de ces contraintes se représente par un graphe dont les 8 nœuds ne sont pas les tiges, mais les groupes de 5 tiges (4 groupes de 5 tiges horizontales, et 4 autres groupes de 5 tiges verticales). Pour que toutes les tringles soient solidaires, c'est-à-dire pour que l'assemblage soit rigide, il faut et il suffit qu'il y ait une contrainte entre toute paire de nœuds du graphe,



réseau, chacune associée à une composante connexe du graphe.

NOMBRE MINIMUM DE BARRES TRANSVERSALES

On peut maintenant assez facilement répondre à la question: combien faut-il au minimum de tringles obliques pour rigidifier un réseau rectangulaire de a carrés de large et de b carrés de haut? Le graphe associé au réseau comporte $a+b$ nœuds; on peut les joindre pour former un graphe connexe en utilisant $a+b-1$ arcs, par exemple de la façon suivante:

$$x_1-y_1, x_1-y_2, \dots, x_1-y_b, \\ x_2-y_1, x_3-y_1, \dots, x_a-y_1.$$

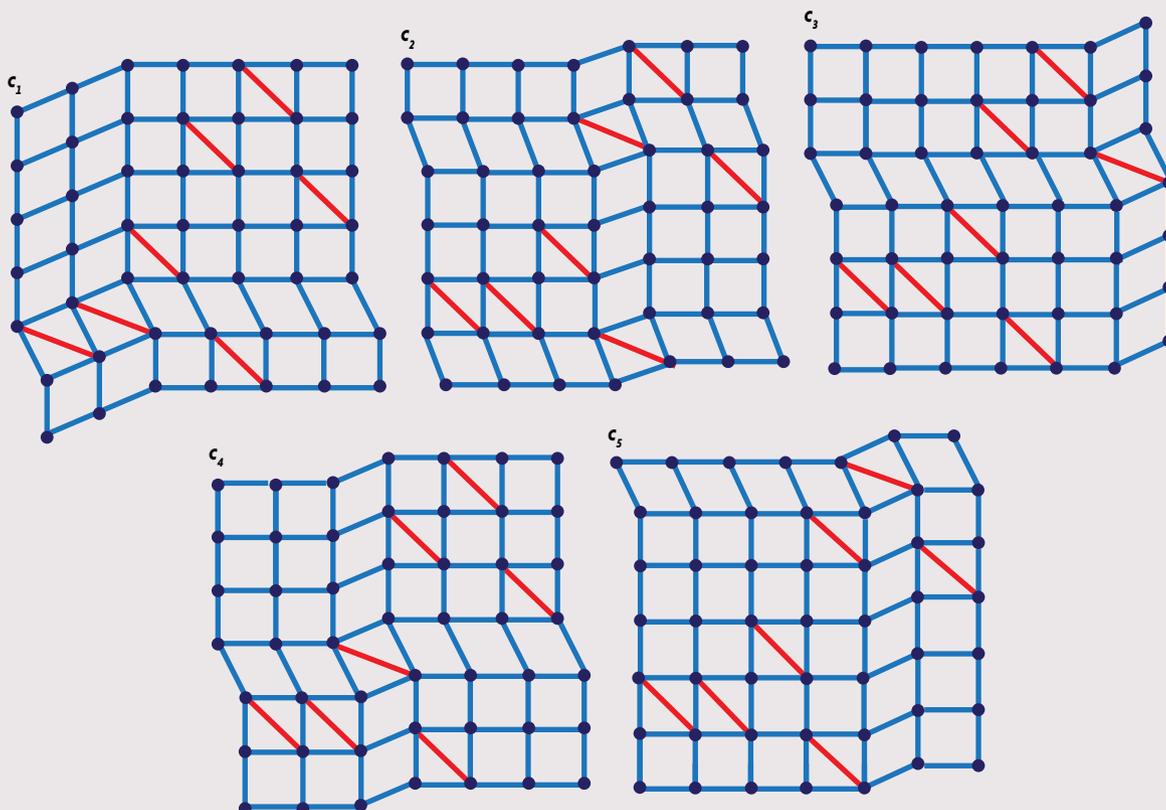
Il est impossible de rendre le graphe connexe en utilisant moins de $a+b-1$ arcs, car on montre facilement qu'un graphe connexe de k nœuds comporte au moins $k-1$ arcs.

On montre aussi que si un graphe de k nœuds est connexe et comporte plus de $k-1$ arcs, on peut enlever certains de ces arcs et n'en garder que $k-1$ tout en préservant la propriété de connexité. Dans notre problème, ce résultat se traduit de manière intéressante: si un réseau rectangulaire de taille $a \times b$ est rigide et comporte plus de $a+b-1$ tringles obliques, alors on peut enlever certaines de celles-ci jusqu'à n'en laisser que $a+b-1$ en préservant la rigidité.

Attention, nous n'avons pas dit que, dès qu'il y a plus de $a+b-1$ tringles obliques, le réseau est rigide: ce n'est vrai que si le graphe associé est connexe. Attention aussi, on ne dit pas non plus que n'importe quelle tringle oblique peut être enlevée: il faut bien choisir les $a+b-1$ tringles que l'on garde, de façon à préserver la connexité. >

c'est-à-dire qu'on puisse passer d'un nœud N du graphe à un autre N' pour toute paire $N-N'$. Dit autrement, il faut que le graphe associé à la grille soit connexe. Ce n'est pas le cas du premier graphe de la figure b à cause des nœuds x_2 et y_2 : ils sont liés entre eux, mais pas aux autres nœuds du graphe. Le premier assemblage de tringles n'est donc pas rigide, comme nous l'avons vu par bricolage (voir l'encadré 2). Le second graphe de b est, lui, connexe et c'est pourquoi l'assemblage auquel il correspond est rigide.

Le graphe associé à un assemblage permet d'identifier quels sous-ensembles de tringles sont liés et ce que cela implique en termes de mouvements. Le graphe associé à la grille 6×6 de la figure c comporte 5 composantes connexes, notées ici c_1, c_2, c_3, c_4 et c_5 . À chacune de ces composantes connexes correspond une déformation possible de l'assemblage (figures c_1 à c_5). D'autres déformations, qui associent plusieurs de celles représentées ici, sont possibles.

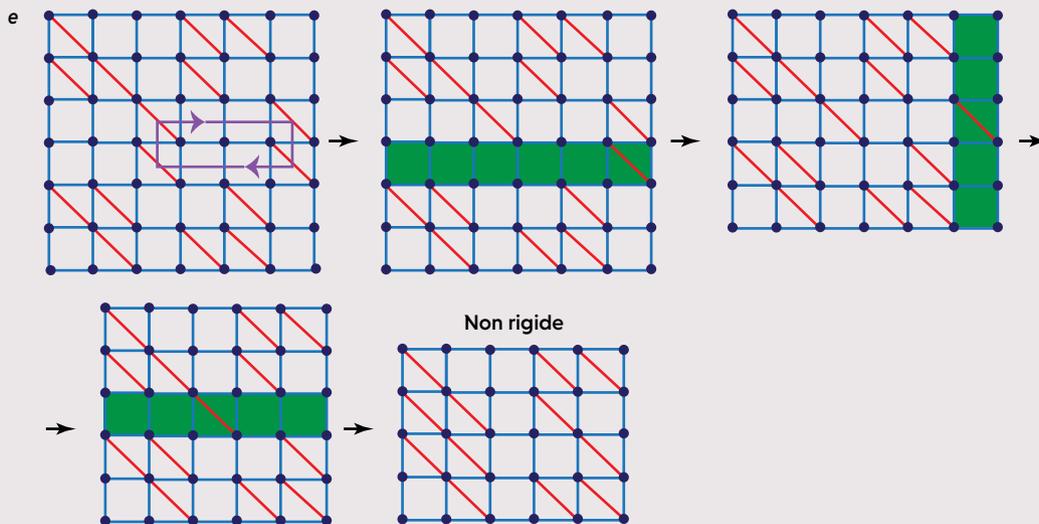
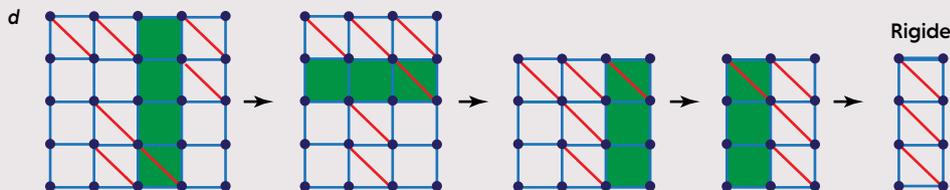
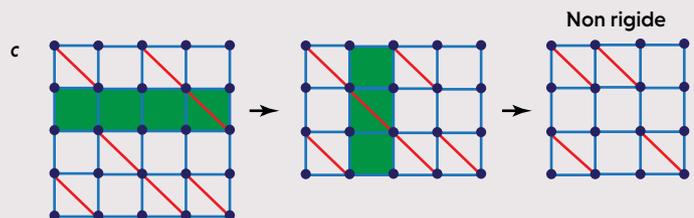
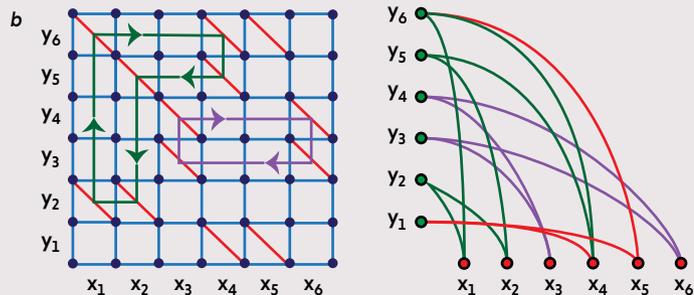
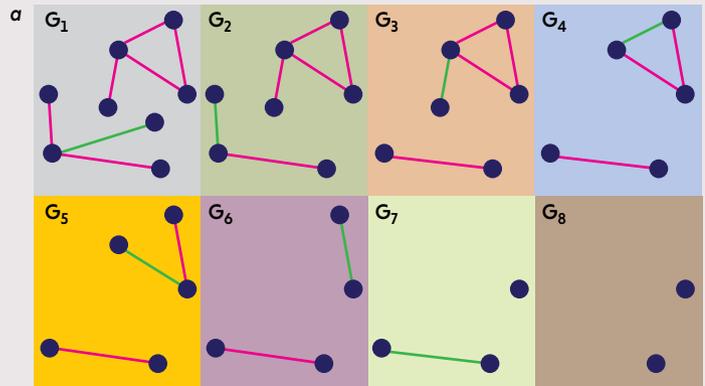


4 DÉSHABILLAGE D'UN GRAPHE ET RÉDUCTION PROGRESSIVE DES GRILLES

Le dessin a illustre les étapes de l'algorithme qui simplifie progressivement (de G_1 à G_8) un graphe sans en changer le nombre de composantes connexes. Quand on trouve un circuit (une suite d'arcs partant d'un nœud et y revenant), on enlève un arc quelconque du circuit. Quand un nœud n'a qu'un seul arc incident, on enlève le nœud et l'arc. Ici, après quelques étapes, on a réduit le graphe initial à 2 nœuds, ce qui signifie que le graphe initial comporte deux composantes connexes et qu'il n'est donc pas connexe.

La figure b représente une grille difficile à analyser et le graphe correspondant, qui n'est pas connexe. On voit qu'à chaque circuit du graphe correspond un circuit sur la grille. Pour appliquer l'algorithme de déshabillage du graphe dans le but de savoir s'il est connexe (et donc si la grille associée est rigide), on peut donc travailler directement sur la grille sans avoir à considérer les graphes : à chaque fois qu'une ligne ou une colonne ne comporte qu'une barre transversale, on supprime la ligne ou la colonne ; à chaque fois qu'on identifie un circuit, on enlève une barre transversale du circuit.

Les séries de dessins c, d et e représentent des applications de cet algorithme de test de rigidité.



> La présence d'une tringle oblique dans chaque colonne et chaque ligne, ou même en posséder 2, ou même 3, etc., n'est jamais une condition suffisante générale assurant la rigidité d'un réseau de ce type. Il faut prendre en compte le graphe associé, et c'est lui qui donne la réponse, celle-ci étant négative s'il n'est pas connexe (voir l'encadré 4 pour un exemple de grille déformable comportant 2 barres obliques au moins dans chaque ligne et chaque colonne).

DES ALGORITHMES POUR LES CAS LES PLUS DIFFICILES

Un algorithme de « déshabillage » permet de savoir si un graphe est connexe. Il résout la question des grilles rigides sans avoir à dessiner de graphes compliqués et emmêlés.

On part d'un graphe qu'on simplifie progressivement en lui ôtant nœuds et arcs en appliquant la règle suivante: quand on trouve un circuit, c'est-à-dire une suite d'arcs partant d'un nœud et y revenant, on supprime un arc quelconque de ce circuit; et quand un nœud n'a qu'un arc incident, on supprime le nœud et l'arc (voir l'encadré 4).

La justification de l'algorithme est facile, car il est clair que son application ne peut déconnecter le graphe s'il est connexe, ni le reconnecter s'il ne l'était pas. L'algorithme, quel que soit l'instant où on l'arrête, produit donc un graphe qui est connexe si celui de départ l'était, ou qui n'est pas connexe si celui de départ ne l'était pas. En fait, l'algorithme préserve exactement le nombre de composantes connexes du graphe de départ.

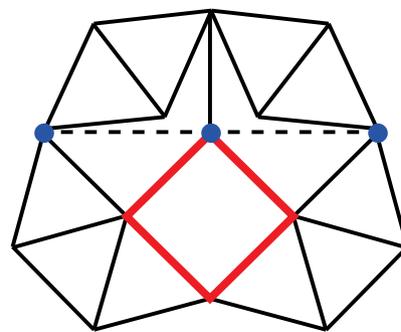
Notons que les circuits du graphe associé à une grille avec tringles transversales peuvent se voir directement sur la grille. En effet, il existe un circuit si l'on peut passer de barre oblique en barre oblique en ne se déplaçant que verticalement ou horizontalement (comme une tour au jeu d'échecs) et revenir à son point de départ. La figure 5 de l'encadré 4 illustre l'idée: deux circuits sont dessinés sur le graphe associé à la grille et les circuits correspondants directement visibles sur la grille sont aussi dessinés. Repérer les circuits directement sur la grille est plus facile que sur le graphe associé, souvent très emmêlé.

ALGORITHME DE TEST DE RIGIDITÉ D'UNE GRILLE

Comme indiqué dans l'encadré 4, si une ligne ou une colonne ne contient qu'une tringle oblique, on enlève toute la ligne ou toute la colonne. Si une série de tringles obliques forme un circuit, on enlève une tringle oblique quelconque du circuit. Quand on arrive à une grille qui est évidemment rigide ou non rigide, on a la réponse pour la grille initiale.

Il y a bien sûr plusieurs façons de rigidifier une grille donnée de taille $a \times b$ en y plaçant le

5



RIGIDIFIER UN CARRÉ

Si un carré de côté L est donné, combien faut-il introduire de tiges (ne se croisant pas) de longueur L liées et articulées par leurs extrémités pour immobiliser le carré, le tout restant dans un plan ? La meilleure réponse connue utilise 23 barres (voir la figure) ; elle a été trouvée par sept lecteurs de Martin Gardner, qui

avait posé la question dans sa célèbre rubrique mathématique dans *Scientific American*. Saurez-vous faire mieux, ou démontrer qu'on ne peut pas faire mieux ? Erich Friedman, de l'université Stetson, présente d'autres problèmes de ce type sur ses pages web (<https://www2.stetson.edu/~efriedma/mathmagic/0100.html>).

minimum possible ($a+b-1$) de tringles transversales. La caractérisation en termes de graphes connexes permet de décompter le nombre de façons de rigidifier une grille. Péter Dóbé et Gábor Domokos, de l'université de Budapest, ont montré en 2014 que le nombre de dispositions (minimales) rendant rigide la grille rectangulaire de taille $a \times b$ est $a^{b-1} b^{a-1}$.

Une petite subtilité doit être notée ici. Nous avons supposé que toutes les tringles étaient de même longueur. Si on renonce à cette hypothèse et qu'on envisage des grilles approximativement carrées, alors parfois un peu moins de tringles obliques sont nécessaires pour rigidifier l'assemblage. Bien évidemment, toutes sortes d'autres cas ont été étudiés, généralisant les résultats mentionnés à des grilles rectangulaires trouées, ou à des grilles en trois dimensions.

L'IMMOBILISATION DU CARRÉ

L'un des problèmes de rigidification les plus simples et les plus étonnants dans cette catégorie est celui du carré unique. On place un carré unique sur un plan et on cherche, à l'aide de tringles de même longueur que le côté du carré, liées comme précédemment par des articulations souples, à immobiliser pour qu'il ne puisse plus se plier. Combien faut-il au minimum de tringles obliques et comment faut-il les disposer pour réussir cette rigidification du carré ? La réponse est donnée dans l'encadré 5.

La théorie mathématique de la rigidité ne s'arrête pas à ces situations. Elle constitue aujourd'hui un domaine de recherche actif, qui produit régulièrement de nouveaux résultats. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Weisstein, **Braced polygon**, <http://mathworld.wolfram.com/BracedPolygon.html> (consulté en avril 2018).

P. Dóbé, **Efficient algorithms for sensitivity analysis of trusses, adapted for distributed computing infrastructures**, Thèse de l'université de Budapest, 2014.

P. Winkler, **Mathematical Mind-Benders**, CRC Press, 2007.

A. Kaveh, **Optimal structural analysis**, Wiley, 2006.

E. Bolker et H. Crapo, **Bracing rectangular frameworks I**, *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 36(3), pp. 473-490, 1979.

M. Gardner, **Martin Gardner's Sixth Book of Mathematical Diversions from Scientific American**, University of Chicago Press, 1971.

L'AUTEUR



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

AUTANT EN EMPORTENT LES DONNÉES

Plutôt que de la peinture ou du marbre, pourquoi ne pas utiliser les données pour créer des œuvres? C'est le choix de plusieurs artistes et designers pour, par exemple, donner à voir le vent souffler.

Léonard de Vinci avait choisi, entre autres, les pigments et les liants pour laisser son génie s'exprimer. Michel-Ange extrayait de blocs de marbre des chefs-d'œuvre. Après tout, rien que de très classique comme matière première. Et si l'on vivait avec son temps? Aujourd'hui, le monde bruisse d'une révolution annoncée, et pour certains déjà en marche, fondée sur l'or du XXI^e siècle: les masses de données, ou *big data*. Ces informations, recueillies à foison par d'innombrables capteurs (sachez que beaucoup

sont sur vos téléphones) s'accumulent à un rythme inimaginable dans des *data centers* gigantesques. L'avenir appartiendrait à ceux qui sauront faire parler ces données, les traiter, les exploiter... Les intelligences artificielles d'aujourd'hui s'en nourrissent goulûment. Mais on peut en faire bien autre chose!

C'est le pari de nombreux artistes et designers qui font de ces données le matériau à partir duquel ils créent. Leurs œuvres sont jusqu'à cet automne présentées à Paris dans le cadre de l'exposition «1, 2, 3 data». Elles ont été réunies à l'initiative de David Bihanic, maître de conférences à l'université Paris Panthéon-Sorbonne.

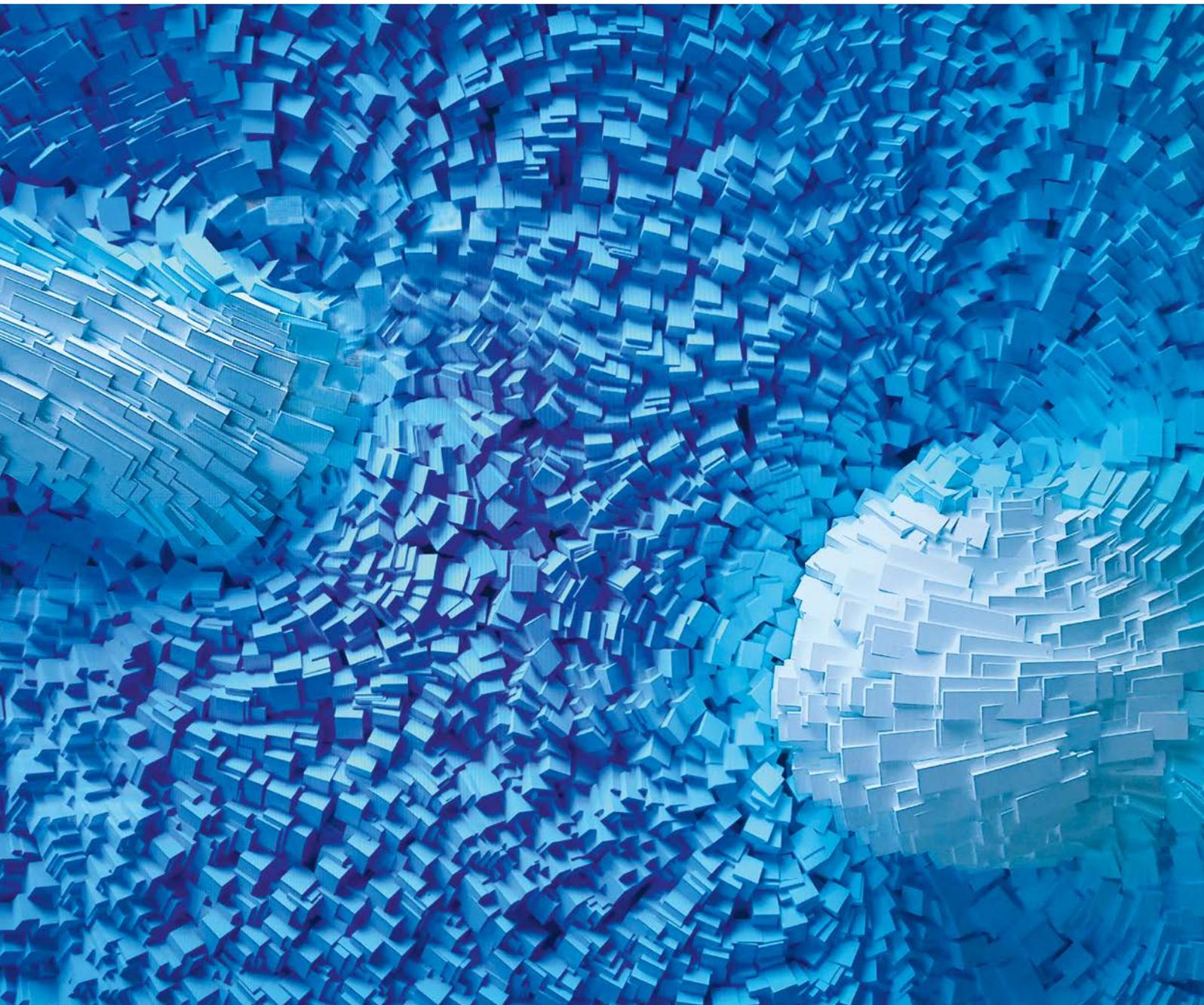
Le parcours s'organise selon trois axes. Dans la partie «Exposer», les données sont mises en forme et présentées, de façon contemplative, au sens presque traditionnel d'une œuvre. Puis vient le temps d'«Expliquer»: là, les données deviennent un vecteur de connaissances sur le monde.

Un ciel de Van Gogh?
Non, une
datavisualisation des
vents soufflant près
d'Istanbul!

Enfin, le public peut «Explorer» en manipulant les données, se les approprier. Ainsi, progressivement, l'interaction augmente et l'on se familiarise peu à peu avec l'infinie richesse des données.

Attardons-nous sur une œuvre de la première partie, *Wind of Istanbul* (ci-dessus), que l'on doit à Refik Anadol, artiste turc installé aux États-Unis, où il est chercheur à l'université de Californie à Los Angeles. Sur un écran se succèdent quatre tableaux animés mettant en scène des données sur les vents, recueillies pendant une année dans la région de l'aéroport Atatürk, à Istanbul.





Les animations résultent de divers algorithmes qui visualisent les vents selon quatre modalités différentes (les données traitées restent les mêmes). Dans la première, *Paysages cachés* (*Hidden Landscapes*), l'artiste se concentre sur les vents les plus violents. Dans *Souvenirs de porcelaine* (*Porcelain memories*), les données apparaissent sous la forme d'un paysage fin, blanc et fragile. *Brise de mer* (*Sea Breeze*) met en lumière les vents doux et chauds qui soufflent de la mer (*ci-dessus*). Enfin, *Rafales dans la ville* (*Gust in the city*) révèlent les interactions des bourrasques et des constructions urbaines.

Les logiciels développés par Refik Anadol permettent de lire, d'analyser et de visualiser la vitesse, la force des vents, leur direction et de croiser ces données avec d'autres informations météorologiques (température, hygrométrie...). Sur l'écran de télévision de 65 pouces ultra HD 4K où *Wind of Istanbul* est projeté, les vents, évanescents par essence, acquièrent une densité forte, riche en contrastes. Les souffles d'air ainsi matérialisés évoquent les coups de pinceau de Van Gogh dans certains de ces ciels, par exemple celui de *La Nuit étoilée*.

L'exposition se prolonge sur son site où une plateforme présente, par thème, une sélection de projets de *data design*, des dossiers d'information multimédia ainsi que des interviews d'experts. ■

« 1, 2, 3 data »,
jusqu'au 6 octobre 2018,
Fondation Groupe EDF,
6 rue Récamier, 75007 Paris.

Site web de Refik Anadol:
<http://refikanadol.com/>



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

DES ONDES COBRA AVEC DES BÂTONNETS

En entrelaçant convenablement des bâtonnets, on crée des structures étonnantes: lorsqu'on les déstabilise, l'énergie élastique qu'elles ont accumulée se libère de façon explosive!

En une fraction de seconde, le cobra se soulève. Il traverse la pièce et revient à vive allure – sans toutefois susciter d'effroi chez les spectateurs médusés. Car le cobra dont il est question ici n'a du redoutable serpent que le nom: il s'agit plus précisément de l'onde cobra, la propagation d'une réaction en chaîne le long d'une structure formée de bâtonnets entrelacés, un peu comme la chute d'une série de dominos.

De telles structures se défont de façon explosive, en projetant des bâtonnets dans toutes les directions, ou plus progressive, en formant une ondulation qui avance à une vitesse de plusieurs mètres par seconde. Quels mécanismes se cachent ici?

Ces «bombes de bâtonnets», *stick bombs* en anglais, sont réalisées en général avec des bâtonnets de bois semblables à ceux des glaces. Lorsqu'on entrelace

ces éléments, ils se déforment avec des fléchissements qui sont de l'ordre de leur épaisseur (voir l'encadré page 90, figure c), mais ils retrouvent leur forme initiale une fois libérés. Ils stockent donc de l'énergie élastique.

DES ENTRELAÇOS DE BÂTONNETS QUI STOCKENT DE L'ÉNERGIE ÉLASTIQUE

On estime la valeur de l'énergie stockée par bâtonnet à plusieurs dizaines, voire centaines, de millijoules. Compte tenu de la faible masse d'un bâtonnet (environ 2,5 grammes), cette énergie est considérable. Une énergie de 150 millijoules correspond ainsi à l'énergie potentielle de pesanteur d'un bâtonnet ayant atteint une altitude de 6 mètres, ou à son énergie cinétique si sa vitesse est de 11 mètres par seconde. On comprend mieux le potentiel explosif de bâtonnets fléchis!

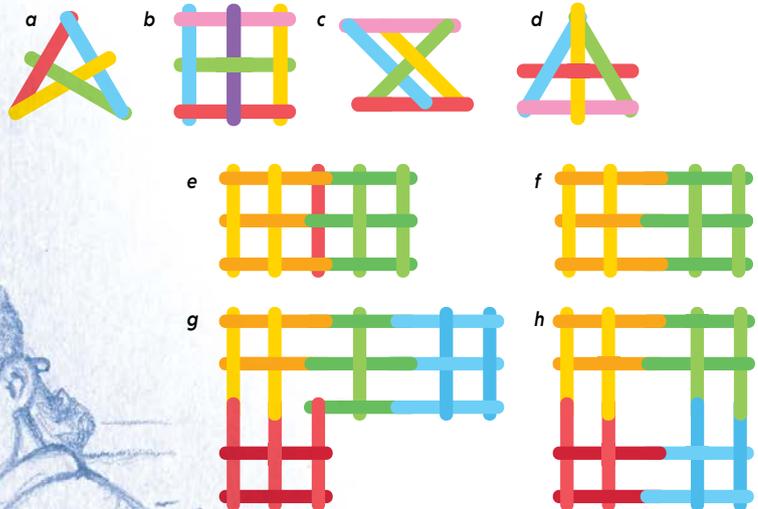
Cependant, la raideur en flexion de ces morceaux de bois est suffisante pour assurer une force pressante élevée entre les parties en contact dans un entrelacs: grâce aux forces de frottement, ces parties ne glissent pas et l'entrelacs, manipulé avec précaution, se révèle assez robuste. Mais si on le laisse tomber par terre, le choc peut déplacer les bâtonnets les uns par rapport aux autres et déstabiliser la structure. L'énergie élastique des bâtonnets se relâche alors brutalement et les éléments sont projetés avec force dans diverses directions, comme les éclats d'une bombe.

L'un des atouts ludiques de ces structures, outre la variété des entrelacements



DES BÂTONNETS ENTRELACÉS

Pour construire des bombes de bâtonnets, il existe de nombreuses possibilités. Quelques-unes sont illustrées ici, les bâtonnets étant colorés afin de visualiser plus facilement la façon dont ils sont entrelacés. On peut former de petites bombes avec seulement quelques bâtonnets (a à d). On peut aussi construire, par combinaison, des structures beaucoup plus étendues. Par exemple, on peut réunir deux structures du type d, puis enlever le bâtonnet commun (e, f) ; selon le même principe, on peut former un coude (g) ou une structure carrée plus grande (h).



possibles, est qu'on peut les combiner pour former des structures plus grandes.

Détaillons-le avec la « bombe carrée », composée de six bâtonnets et où trois d'entre eux, horizontaux, sont entrelacés avec trois bâtonnets verticaux (voir l'encadré ci-dessus, figures c à f). Chaque bâtonnet du périmètre peut servir à l'ajout d'une bombe supplémentaire. Si l'on se débrouille pour qu'aux points de contact les bâtonnets des deux carrés soient de part et d'autre du bâtonnet commun, il est possible d'enlever le bâtonnet commun sans que la structure se défasse. Et ainsi de suite, de telles additions permettent de réaliser des bombes

de bâtonnets en longues bandes, en virages à angle droit, en tapis...

Dans les petites bombes de bâtonnets, la déstabilisation détruit la structure d'un coup. Dans les grandes, en revanche, cette déstabilisation s'effectue de proche en proche : on observe une onde de destruction qui se propage à une vitesse de quelques mètres par seconde. Au passage du front d'onde, la structure se défait et les bâtonnets sont projetés en l'air à quelques dizaines de centimètres de hauteur.

Ce chiffre, comparé aux 6 mètres estimés à partir de l'énergie élastique, signifie que la conversion de l'énergie élastique en énergie cinétique et potentielle est peu

efficace (de l'ordre de quelques points de pourcentage). En fait, la plus grande part de l'énergie est dissipée lors du glissement des bâtonnets les uns sur les autres ou lors de leurs collisions.

On peut remarquer que, en comparaison avec les structures constituées de dominos, on a un avantage : les entrelacements étant plats, on peut les superposer. Et grâce à leur robustesse, le passage de l'onde de destruction ne détruit pas les >

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



> entrelacs placés en dessous; en outre, l'énergie libérée par bâtonnet est suffisante pour que l'onde ne soit pas perturbée par des bâtonnets retombés au hasard sur la structure.

La plupart de ces bombes de bâtonnets ont été inventées au début des années 1980 par l'Américain Timothy Fort, plus connu sous son surnom de Kinetic King. La structure la plus populaire qu'il a créée est l'«entrelacement cobra».

Pour tous les autres entrelacements, l'onde de destruction ne conduit qu'à la projection désordonnée des bâtonnets. Pour l'onde cobra, la structure se plie, se soulève et prend une forme caractéristique qui se propage comme un ébranlement le long d'une corde, en laissant derrière elle chaos et destruction. Ce phénomène tient au fait que l'entrelacement cobra définit un sens privilégié le long de la structure.

Pour le comprendre, considérons d'abord la situation élémentaire d'un bâtonnet immobilisé par trois autres: deux à ses extrémités, qui passent dessous, et un à son milieu, qui passe dessus. Quand on enlève l'un des bâtonnets extrêmes, on a un puissant effet de levier qui propulse et éjecte le bâtonnet considéré vers le bas, c'est-à-dire dans la direction d'appui du bâtonnet central. Par réaction, la structure subit une force vers le haut.

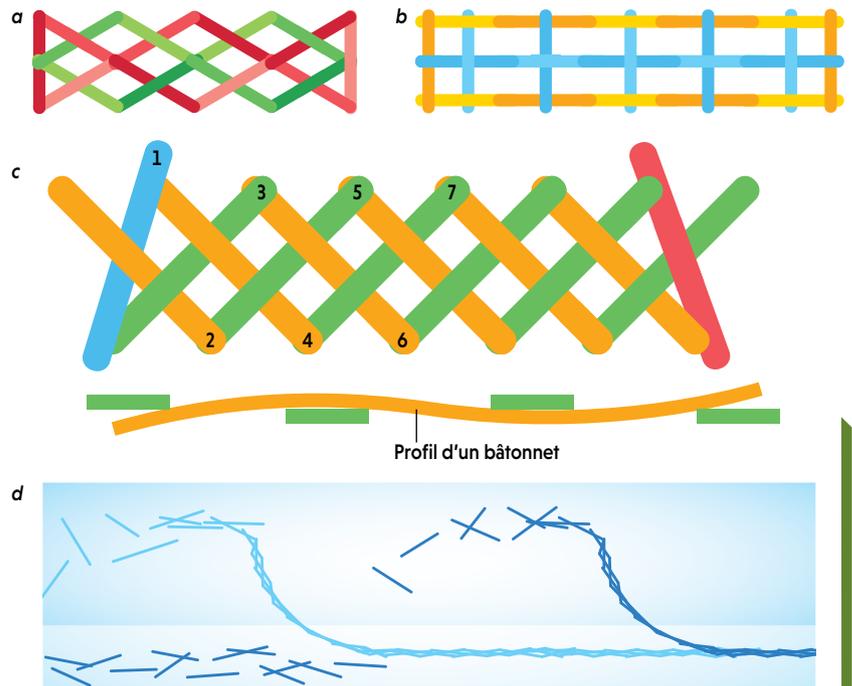
Si l'on prend, posée à plat, une structure comme celle obtenue en additionnant les carrés (nommée *ortho weave*, ou entrelacement orthogonal, voir l'encadré ci-contre, figure b) et qu'on la déstabilise en lui soustrayant un bâtonnet, on comprend qu'à cause de l'alternance des dessus-dessous, la moitié des bâtonnets seront propulsés vers le haut et l'autre moitié vers le bas. Aucune direction n'est privilégiée et la poussée moyenne exercée sur la structure par les bâtonnets éjectés est nulle.

UNE ONDE DE SOULÈVEMENT ET DE DESTRUCTION

Observons maintenant la structure de l'entrelacement cobra (figure c ci-dessus). Chaque bâtonnet est, cette fois, immobilisé par quatre autres, avec des appuis aux extrémités dans des sens opposés, mais tels que les extrémités de gauche (respectivement de droite) de tous les bâtonnets sont poussées dans le même sens, vers le bas (respectivement le haut) sur la figure. Conséquence: tous les bâtonnets sont projetés dans la même direction lorsque la structure se détruit, vers le bas si l'on déstabilise la structure à partir de la gauche. Ainsi, la poussée moyenne

DESTRUCTION AVEC OU SANS ONDE COBRA

Dans des structures telles que celles dessinées en a et b, l'entrelacement des bâtonnets présente une symétrie par rapport à l'axe transversal passant par le milieu de la tresse. Dans un tel cas, le retrait de l'un des bâtonnets déstabilise la construction de telle façon que les bâtonnets sont éjectés en tous sens. La situation est différente avec la structure représentée en c, où l'entrelacement présente un sens privilégié. Détaillons ce qui se passe lorsqu'on retire le bâtonnet 1 (en bleu). Le bâtonnet 2 n'est alors plus tenu que par les bâtonnets 3 et 5, qui font levier; l'extrémité gauche du bâtonnet 2 se redresse et est propulsée avec force vers le bas; le bâtonnet est ainsi éjecté. Le bâtonnet 3 se retrouve alors dans la même situation: il n'est plus tenu que par deux bâtonnets, les numéros 4 et 6. Il est à son tour propulsé vers le bas puis éjecté. Et ainsi de suite. Lorsque la structure est posée sur le sol, l'éjection se fait avec un appui sur le sol: les bâtonnets rebondissent, ce qui contribue à soulever la structure, et l'onde cobra (représentée en d à deux instants successifs) se constitue ainsi.



exercée sur la structure n'est plus nulle et, dans le cas où l'on déstabilise la structure à gauche, la force subie est vers le haut et la structure se soulève.

Pourquoi cela donne-t-il naissance à un ébranlement de forme caractéristique et comment les propriétés de l'onde sont-elles reliées à celles des bâtonnets et à leur agencement? Cette question difficile a intéressé récemment plusieurs équipes de physiciens (voir la bibliographie). Le lecteur curieux constatera que leurs conclusions diffèrent sur plusieurs points, notamment sur la relation entre la vitesse de l'onde et les dimensions des bâtonnets ou la vitesse d'éjection de ces derniers. L'onde cobra n'a manifestement pas encore révélé tous ses secrets. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. Boucher et al., **Popsicle-stick cobra wave**, *Physical Review Letters*, vol. 119, article 084301, 2017.

J. Sautel et al., **The physics of a popsicle stick bomb**, *American Journal of Physics*, vol. 85, pp. 783-790, 2017.

De nombreuses vidéos spectaculaires sont visibles sur Internet, par exemple : www.youtube.com/watch?v=GtnZc1dujgg

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



N° 488 (juin 18)
réf. PL488



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

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 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{er} réf. _____ 0,1 x 9,90 € = 9,90 €

2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

M. Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

Par chèque à l'ordre de Pour la Science

Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR

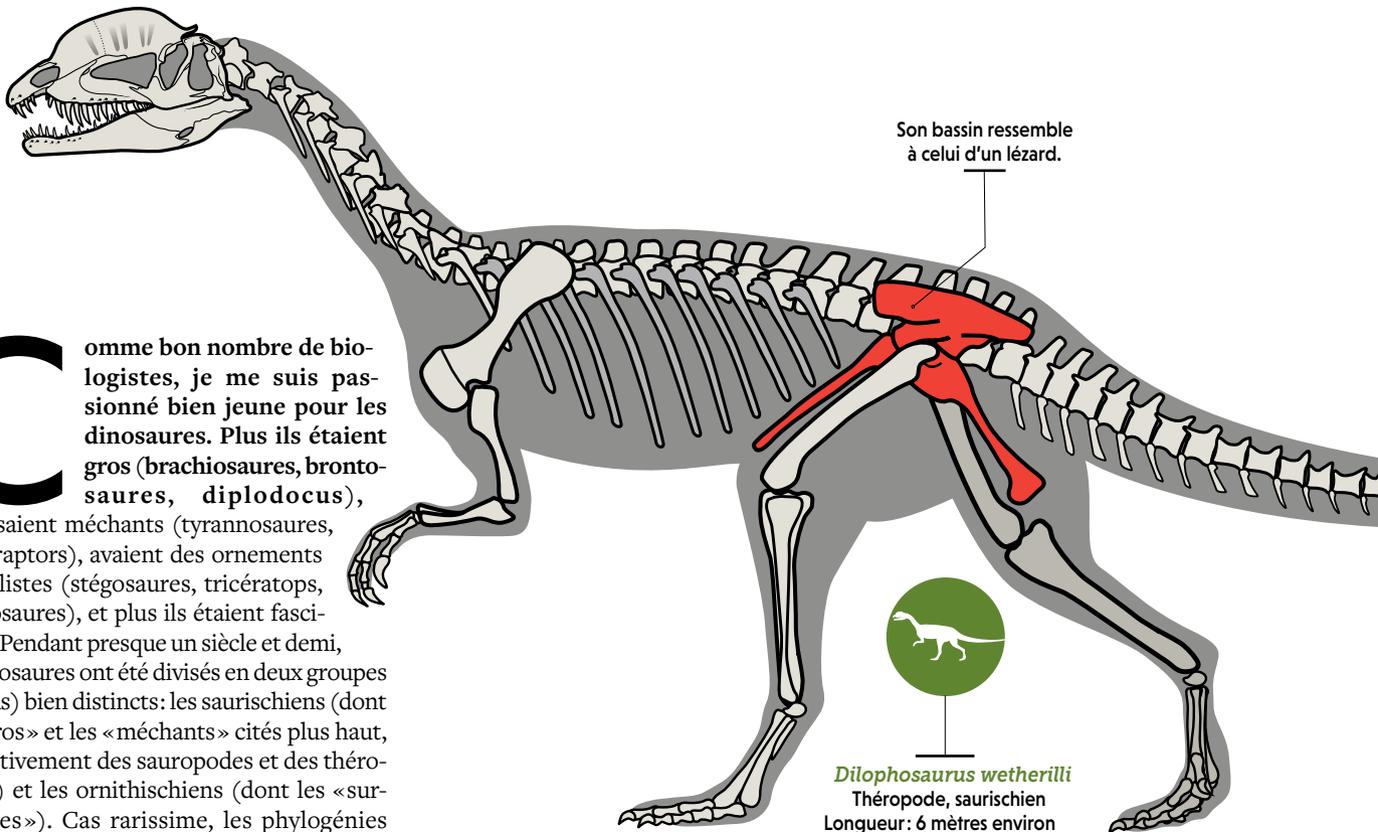


HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

LES DINOSAURES CHANGENT D'ARBRE

Pendant presque un siècle et demi, on a divisé les dinosaures en deux taxons bien distincts, les saurischiens et les ornithischiens. Il semble pourtant que cette distinction ne soit pas aussi claire...

Comme bon nombre de biologistes, je me suis passionné bien jeune pour les dinosaures. Plus ils étaient gros (brachiosaures, brontosaures, diplodocus), paraissaient méchants (tyrannosaures, vélociraptors), avaient des ornements surréalistes (stégosaures, tricératops, ankylosaures), et plus ils étaient fascinants. Pendant presque un siècle et demi, les dinosaures ont été divisés en deux groupes (taxons) bien distincts : les saurischiens (dont les « gros » et les « méchants » cités plus haut, respectivement des sauropodes et des théropodes) et les ornithischiens (dont les « surréalistes »). Cas rarissime, les phylogénies



modernes n'avaient pas démonté cette ancienne classification, pourtant problématique, nous allons le voir. Mais il y a quelques mois, Matthew Baron et ses collègues, de l'université de Cambridge et du Muséum d'histoire naturelle de Londres, lui ont donné un coup de grâce.

CURIEUX ORNITHISCHIENS

C'est le grand anatomiste britannique Richard Owen, le «Cuvier anglais», qui, en 1841, a forgé le terme de dinosaures – les «terribles lézards» – et les a classés suivant l'anatomie de leurs dents et de leurs pattes. Harry Seeley, autre paléontologue britannique, assistant du géologue Adam Sedgwick à l'université de Cambridge, comprit que la structure de leur bassin était essentielle et, en 1888, proposa de l'utiliser pour comparer les dinosaures. Il les sépara alors en deux grands groupes: les saurischiens à bassin de lézard et les ornithischiens à bassin d'oiseau. Seeley nota aussi d'autres différences essentielles, en particulier sur les vertèbres et le crâne. Plus tard, les saurischiens furent divisés en théropodes (animaux bipèdes munis de pattes à trois doigts, souvent carnivores comme les tyrannosaures) et en sauropodomorphes (animaux à «pieds de lézard» dont les sauropodes, quadrupèdes de grande taille, mais aussi de plus petits bipèdes comme les platéosaures).

La majorité des paléontologues pensaient alors que les dinosaures ne formaient pas un groupe naturel, issu d'un

ancêtre commun – un groupe monophylétique. Il fallut attendre la révolution cladistique pour qu'en 1986, Jacques Gauthier, alors à l'université de Berkeley, démontre la monophylie des dinosaures et l'origine des oiseaux dans les théropodes.

Quelle situation étrange! Non seulement les oiseaux sont des dinosaures, mais ce ne sont pas des ornithischiens, alors qu'ils ont un bassin d'oiseau! De tels paradoxes sont légion en biologie évolutive et s'expliquent en général par une convergence – deux émergences évolutives distinctes amenant au même résultat –, ce qui fut très probablement le cas ici. Dès lors, les chercheurs se sont plutôt focalisés sur la phylogénie des dinosaures eux-mêmes, afin de préciser l'évolution de familles majeures et comprendre, par exemple, le gigantisme des tyrannosauridés.

Comme le souligne Kevin Padian, paléontologue à l'université de Berkeley, les ornithischiens ont toujours paru «bizarres»: un curieux os supplémentaire

au menton; des incisives plus petites que celles de tous les autres dinosaures; des dents jugales régulièrement espacées comme des molaires; un bassin énigmatique... Enfin, ils sont tous clairement herbivores, comme le montrent leurs dents et leurs mâchoires. Mais leur plus grande étrangeté réside dans leur dynamique évolutive. Pour se diversifier, ils ont attendu le Jurassique précoce, il y a environ 200 millions d'années, alors que les autres groupes de dinosaures existent depuis le Trias tardif, au moins 30 millions d'années avant.

Évidemment, un tel décalage temporel suggérait que les ornithischiens avaient divergé à partir d'un de ces premiers groupes de dinosaures, peut-être parmi les sauropodes. Pourtant, en comparant leurs crânes, leurs dents et l'organisation de leur squelette, on a l'impression que les ornithischiens et les sauropodes sont devenus herbivores de deux manières différentes, donc indépendamment. L'origine des ornithischiens >

EN CHIFFRES

74

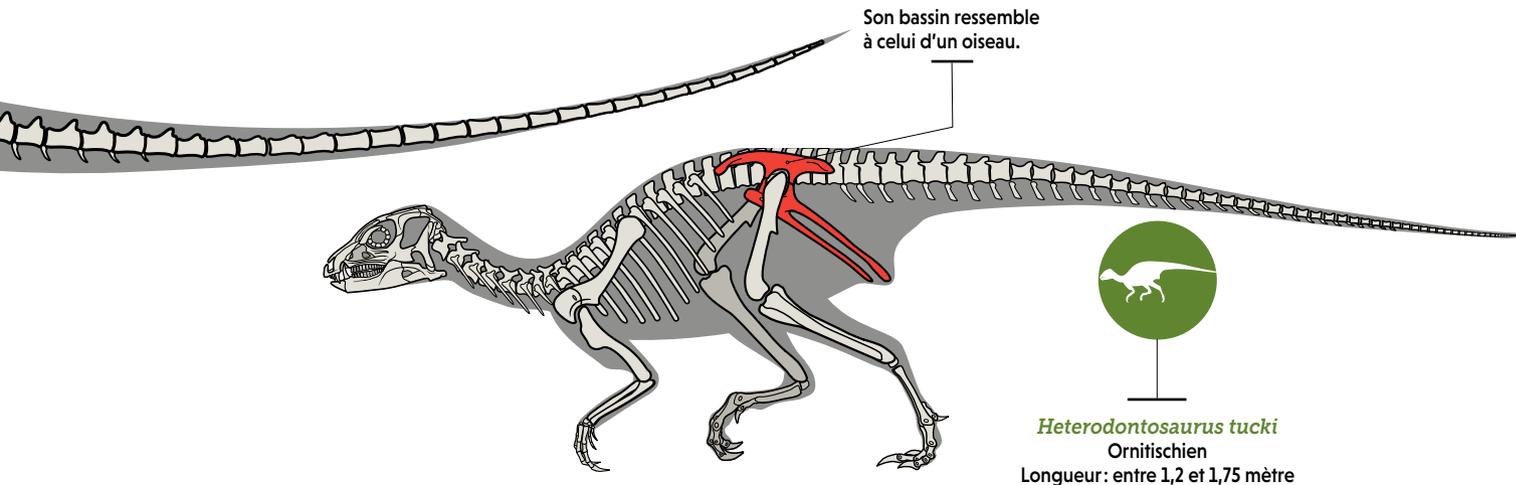
C'est le nombre de taxons utilisés dans la nouvelle phylogénie de Matthew Baron et ses collègues. Ils ont construit leur arbre de parenté des dinosaures à partir de la description de 457 caractères.

250 millions

L'ancêtre hypothétique commun des dinosaures aurait vécu au Trias, il y a environ 250 millions d'années.

25 mètres

Le sauropode *Giraffatitan* (ex-*Brachiosaurus*) *brancai* est le plus grand dinosaure connu. Il mesurait 25 mètres de long, 14 mètres de haut et pesait probablement entre 45 et 78 tonnes. Le plus petit dinosaure connu est actuel et mesure 5,5 centimètres pour un poids de 1,95 gramme: c'est l'oiseau-mouche colibri-abeille (*Mellisuga helenae*).

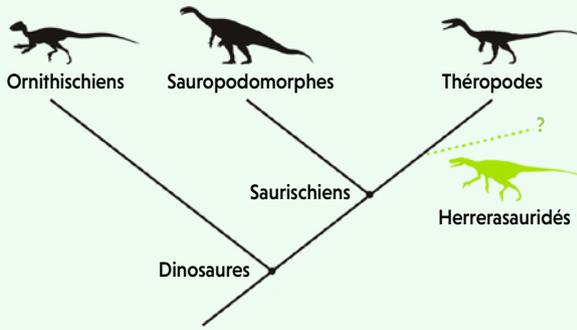


UNE NOUVELLE CLASSIFICATION DES DINOSAURES

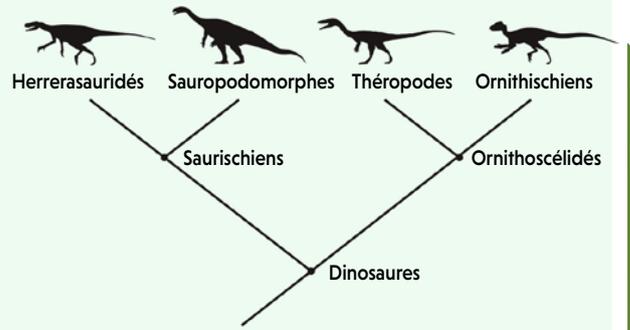
Dans la phylogénie traditionnelle (à gauche), les sauripodomorphes étaient un groupe frère des théropodes (qui comprennent les oiseaux actuels). Ensemble, ils formaient le taxon des saurischiens.

Dans la nouvelle phylogénie (à droite), les théropodes sont un groupe frère des ornithischiens, avec lesquels ils forment le taxon des ornithoscelidés. Les sauripodomorphes, quant à eux, s'allient aux herrerasauridés.

PHYLOGÉNIE TRADITIONNELLE



NOUVELLE PHYLOGÉNIE



➤ posait vraiment problème... jusqu'à ce que Matthew Baron et ses collègues proposent une nouvelle hypothèse sur les relations au sein des dinosaures.

Depuis l'article majeur de Jacques Gauthier, de nombreux fossiles de dinosaures ont été trouvés (un par semaine en moyenne actuellement !). Or, parmi eux, certains sont prodigieusement intéressants, car ils se trouvent proches de la racine de l'arbre des dinosaures, là où est situé leur ancêtre hypothétique commun (on dit qu'ils sont basaux). C'est ainsi que Matthew Baron et ses collègues ont tenu compte de nombreux fossiles datant des Trias moyen et tardif. De plus, ils ont pris soin de les décrire sans *a priori*, sans qualifier d'office leurs caractères de type saurischien ou ornithischien. C'est ainsi qu'ils attirent l'attention sur *Lesothosaurus diagnosticus*, l'un des ornithischiens les plus précoces, qui n'avait jamais été utilisé pour étudier les relations entre les deux grands groupes majeurs de la lignée dinosaurienne. On voit également apparaître des lignées connues des seuls spécialistes, tels les herrerasauridés, des carnivores du Trias moyen de l'Amérique du Sud considérés il y a encore peu comme des théropodes basaux.

LES THÉROPODES, FRÈRES DES ORNITHISCHIENS ?

Matthew Baron et ses collègues proposent une nouvelle phylogénie simple, mais révolutionnaire (voir l'encadré ci-dessus). Attention, on garde les mêmes termes, mais certains ont des acceptions différentes. Les dinosaures se partagent maintenant en deux groupes frères. Les ornithoscelidés comprennent les

ornithischiens et les théropodes. Les saurischiens (nouvelle définition) rassemblent les sauripodomorphes et les énigmatiques herrerasauridés. Pour simplifier, les théropodes quittent les sauripodomorphes pour s'acoquiner avec les ornithischiens.

Certaines conclusions tirées de l'ancienne classification restent valides. Par exemple, l'herbivorie des ornithischiens et des sauripodes est toujours considérée comme une convergence. Mais d'autres idées apparaissent. Ainsi, les dinosaures basaux et les animaux non-dinosauriens les plus proches (comme les ptérosaures, archosaures volants) sont petits, bipèdes, avec des pattes antérieures préhensiles. Ce serait la « condition dinosaurienne primitive », alors qu'un anthropomorphisme banal nous y ferait voir plutôt une condition dérivée. Il semble également que les dinosaures devaient être primitivement omnivores, les spécialisations herbivore ou carnivore étant apparues secondairement. Enfin, les dinosaures auraient émergé en Amérique du Nord plutôt qu'en Amérique du Sud, comme supposé auparavant (au Trias, ces deux continents faisaient partie de la Pangée).

En novembre dernier, une équipe internationale de paléontologues menée par Max Langer, de l'université de São Paulo, et Stephen Brusatte, de l'université d'Édimbourg, a remis en cause ce résultat. Les chercheurs critiquent les interprétations de certains caractères anatomiques de dinosaures basaux et montrent qu'avec leurs interprétations, on retrouve la phylogénie classique – toutefois avec un faible support statistique. Gageons que de nouveaux fossiles permettront de trancher définitivement cette question. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. G. Baron et al., **A new hypothesis of dinosaur relationships and early dinosaur evolution**, *Nature*, vol. 543, pp. 501-506, 2017.

K. Padian, **Dividing the dinosaurs**, *Nature*, vol. 543, pp. 494-495, 2017.

S. L. Brusatte, **Evolution : Uprooting the dinosaur family tree**, *Curr. Biol.*, vol. 17, pp. 390-392, 2017.

M. C. Langer et al., **Untangling the dinosaur family tree**, *Nature*, vol. 551, pp. E1-E3, 2017.

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

DE L'INTÉRÊT DE DÉFAIRE ET REFAIRE

En déstructurant des aliments solides puis en les restructurant différemment, on crée des préparations aux goûts nouveaux.

Le meilleur de la tradition peut s'allier à l'innovation, au bénéfice de la gourmandise. C'est ce que nous verrons, une fois de plus, ici. La tradition? Analysons la confection d'une terrine. On part de viande, c'est-à-dire d'un gel, un liquide (75% d'eau) étant piégé dans un solide (15% de protéines, notamment dans le tissu collagénique qui solidarise les fibres musculaires); on divise cette masse; puis, pour opérer une thermocoagulation, on la chauffe à l'intérieur d'un récipient en terre, d'où le nom du produit final.

À quoi bon ce double mouvement de destruction et de création? À donner du goût en assaisonnant, ce qui est difficile dans la masse initiale de viande, les marinades pénétrant peu la masse des tissus.

En résumé, on part d'un gel que l'on divise et que l'on restructure ensuite. On peut commencer avec des gels simples, tels ceux de gélatine ou d'agar-agar, obtenus en ajoutant un agent gélifiant à un liquide de goût choisi. Un coup de mixeur suffit à diviser le gel ainsi créé. On peut alors ajouter un assaisonnement, puis provoquer une régélification. On peut aussi changer d'agent gélifiant, comme quand on broie un gel d'agar-agar et qu'on régélifie la masse broyée avec de la gélatine. Les deux gélifiants ont des fonctions différentes: l'agar-agar donne un gel cassant, alors que la gélatine forme un réseau qui fond dans la bouche, cette dernière étant à une température (37°C) supérieure à celle de la gélification.

Bien sûr, rien n'empêche d'utiliser des gels plus complexes, par exemple à partir de confiture (gel de pectine), d'œuf dur, de fromage, de yaourt, de pain... Dans tous les cas, le produit final jouira des qualités de consistance et de goût des deux

Une terrine de viande est un exemple de gel que l'on fractionne pour mieux l'assaisonner, puis que l'on reforme et que l'on cuit pour le thermocoaguler.



systèmes. Le liquide emprisonné dans les particules du gel initial que l'on divise peut être différent de celui qui forme la phase continue du gel utilisé pour solidariser ces particules.

Jadis, de telles préparations auraient été laborieuses, car diviser se faisait au mortier et au pilon. Avec les appareils électriques, le broyage est devenu un jeu d'enfant, et l'on peut même, en ajustant la durée de broyage, obtenir des consistances variées.

Bien sûr, en général, on n'aura pas une dispersion de particules ayant toutes la même taille, mais il suffirait d'utiliser des tamis pour y remédier, ou au contraire pour récupérer des ensembles de particules de deux tailles différentes, par exemple. Dans ce contexte, il ne faut pas oublier que la taille de 10 micromètres est l'ordre de grandeur au-dessous duquel on ne sent plus les particules solides sous la dent. Cette taille correspond à l'épaisseur de ce papier que les dentistes nous font serrer entre les dents après avoir terminé un plombage, ou au travail bien fait des chocolatiers, lors de l'opération de conchage qui disperse le sucre dans le beurre de cacao, et qui divise les cristaux de sucre afin de produire une consistance très lisse.

Des particules plus grosses ne seraient pas nécessairement le signe d'un

travail mal fait, car l'art échappe aux règles, et l'on a vu mille défauts (les dissonances en musique, les tons sur ton en peinture, etc.) devenir des qualités. Mais la connaissance des faits techniques sera un atout pour choisir. ■

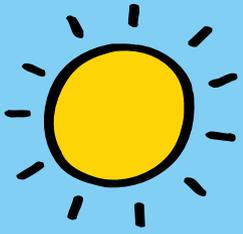


PREMIÈRE RECETTE

- 1 Faire un gel d'agar-agar à l'orange en ajoutant 5 % en masse d'agar-agar au jus d'une orange pressée. Porter à ébullition et laisser refroidir pour faire prendre.
- 2 Mixer le gel formé avec des abricots bien mûrs. Ajouter un peu de crème fouettée et des zestes râpés de citron.
- 3 Faire tremper des feuilles de gélatine dans l'eau froide, puis les dissoudre (en chauffant doucement) dans du jus de citron.
- 4 Ajouter ce jus gélatiné à la préparation mixée et laisser prendre à température ambiante (s'il fait moins de 36 °C).
- 5 Servir avec des raisins secs que l'on a gonflés dans un vin réduit avec du sucre et des amandes grillées.

SECONDE RECETTE

- 1 Mixer du fromage (Comté) avec de l'œuf battu et mettre dans une tasse.
- 2 Mettre au four à 80 °C durant 40 minutes.
- 3 Servir avec des dés de pommes de terre cuites à la vapeur.

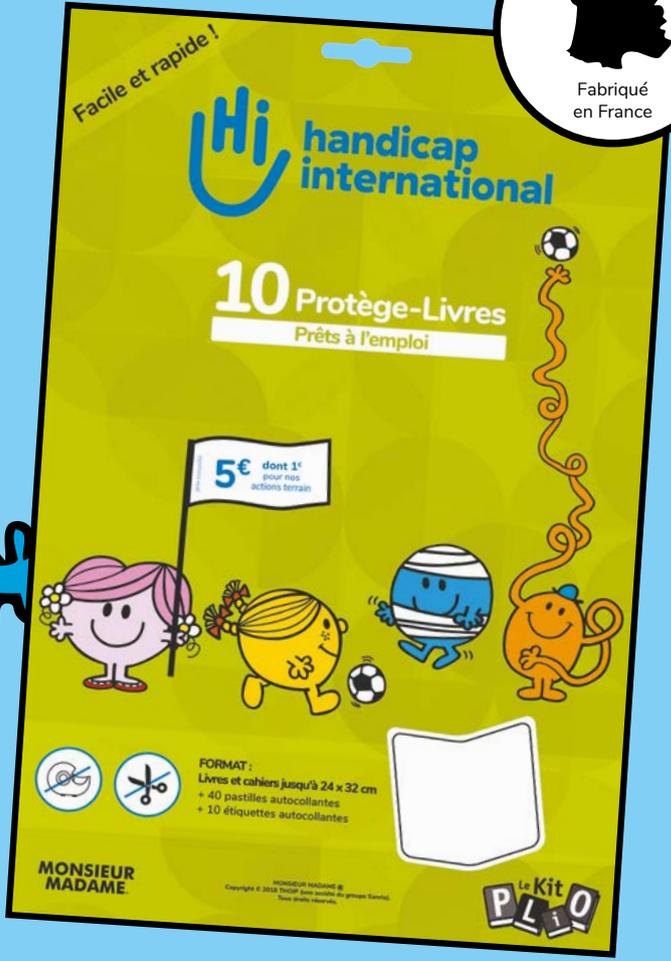


**PROTÈGE LIVRES
ASTUCIEUX**

 
**SANS CISEAUX
NI RUBAN
ADHÉSIF**

**UN GESTE
SOLIDAIRE
ET GÉNÉREUX**

prix conseillé
5€ dont 1€ pour nos actions terrain



A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.26

FIBONACCI

Dans la suite de Fibonacci, chaque nombre est la somme des deux précédents. Elle commence ainsi : 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, ... On retrouve cette suite dans certaines structures végétales.

P.36

REK-HVALR

Ce mot islandais désigne une baleine échouée. Pour les Vikings du Groenland, les baleines étaient un trésor inestimable. Avec leur peau, on faisait des cordages ; avec leurs os, des outils ou du mobilier ; les fanons servaient à coudre les vêtements. Ces usages compensaient l'absence de bois. Et le prestige que retirait le chef d'un clan en s'appropriant une dépouille était grand : l'abondance d'huile offrait un éclairage constant durant la nuit polaire...

P.7

« Au total, l'Antarctique aurait perdu près de 2700 milliards de tonnes de glace en 25 ans, à un rythme qui s'est accru au cours des dernières années »

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE
climatologue du CEA au LSCE

P.48

725 000

C'est le nombre de décès annuels imputables aux moustiques, vecteurs de nombreuses maladies : paludisme, chikungunya, dengue, fièvre Zika...

P.92

DRÔLES D'OISEAUX

Les dinosaures étaient, jusqu'à il y a peu, classés en deux grands groupes : les saurischiens à bassin de lézard et les ornithischiens à bassin d'oiseau. Pourtant les oiseaux descendent des théropodes, qui ont un bassin de lézard ! Ces derniers étaient classés parmi les saurischiens à cause de ce bassin. Aujourd'hui, on pense qu'ils sont plus proches des ornithischiens, mais cela ne change rien au problème des oiseaux...

P.24

LOI DE MOORE

Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, a énoncé la loi empirique selon laquelle le nombre de transistors par microprocesseur double tous les deux ans. Ce rythme a été vérifié au moins de 1972 à 2004. Des problèmes de dissipation de la chaleur tendent aujourd'hui à faire stagner cette progression.

P.64

NODULES

À plus de 4 000 mètres de profondeur, sur le fond des océans, des amas polymétalliques contenant du manganèse, du nickel, du cuivre, du cobalt, se forment. Ils mettent des millions d'années pour atteindre une taille de quelques centimètres.

L'Observatoire de Paris propose deux Diplomes 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

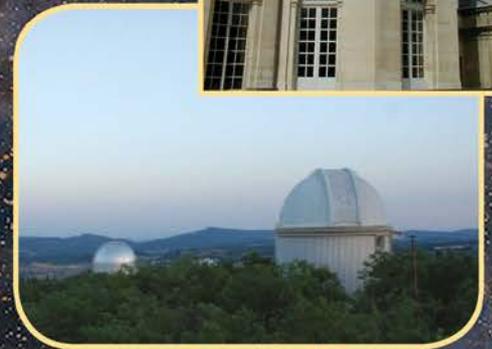
Des étoiles aux planètes : niveau L1-L2
Cosmologie et Astrophysique extragalactique : niveau L2
Mécanique Céleste : niveau L3
Fondamentaux pour l'astronomie et l'astrophysique : niveau L3
Sciences Planétaires : niveau L3
Fenêtres Sur l'Univers : niveau M1
Instrumentation, chaîne de mesure et projets : 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, Etoiles et milieu interstellaire, Galaxies, Cosmologie, Epistémologie.

Ces cours peuvent être suivis en présentiel ou à distance en vidéo (en direct ou en différé).

Un stage de travaux pratiques est proposé en mars à l'Observatoire de Meudon (en option et sous conditions ; nombre de places limitées).

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

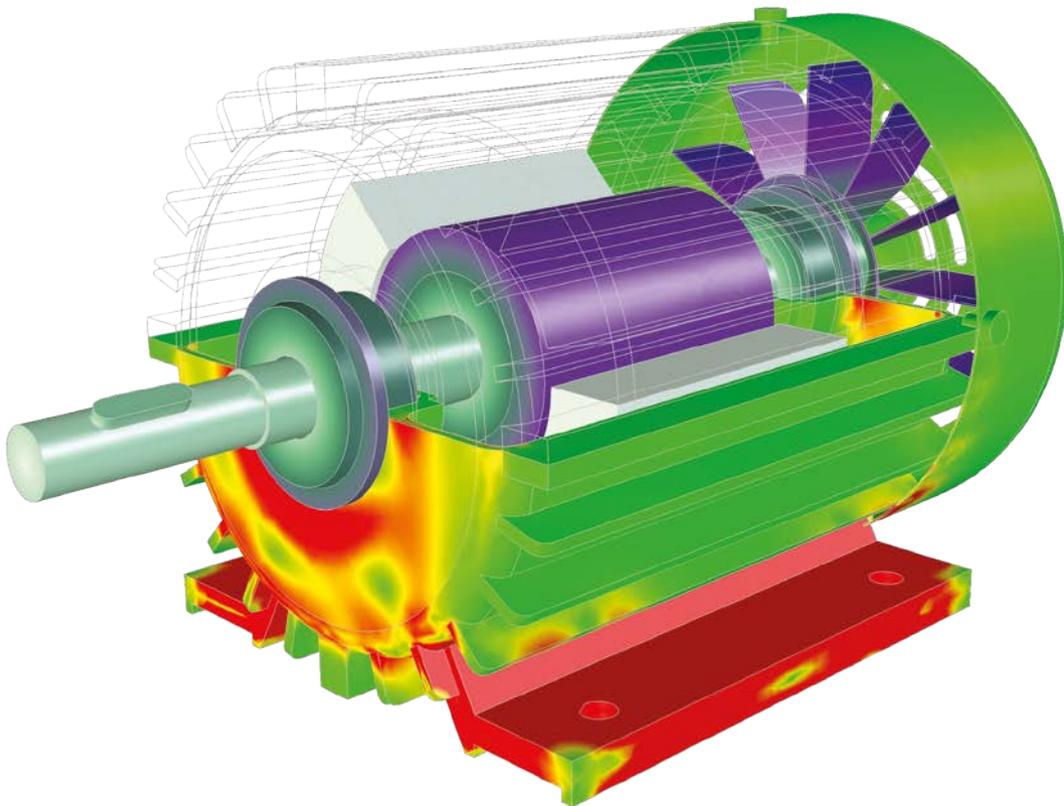
Renseignements

<http://ufe.obspm.fr/Diplomes-d-Universite/DU-en-presentiel>

contact.duecu@obspm.fr

Téléphone : 01.45.07.78.87

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



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

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

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

comsol.blog/induction-motor