POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

M 02687 - 507 F: 6,90 € - RD

JANVIER 2020
N° 507

LINGUISTIQUE
MOLIÈRE EST BIEN L'AUTEUR DE SES PIÈCES

ÉCONOMIE
LES INÉGALITÉS DE RICHESSE MODÉLISÉES

ÉGYPTOLOGIE
LES ENTRAILLES DES MOMIES VUES AU SCANNER

LES CRISTAUX TEMPORELS

Un nouvel état de la matière

BEL : 7,6 € - CAN : 11,6 CAD - DOM/S : 7,7 € - Réunion/A : 9,9 € - ESP : 7,6 € - GR : 7,6 € - ITA : 7,6 € - LUX : 7,6 € - MAR : 64 MAD - TOM : 1040 XPF - PORT. CONT. : 7,6 € - CH : 12,7 CHF - TUN/S : TND

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.

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

www.ademe.fr/theses

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONCEPTION & RÉALISATION : OLFA NEMSI

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaire: Lucas Gierczak

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Charlotte Calamel, Ingrid Leroy, Véronique Marmont, Raphaël Queruel
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys
Chef de produit: Charline Buché

Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilagra
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:
Lydéric Bocquet, Maud Bruguière, Eric Buffetaut, Georges Chapouthier, Christophe Chorro, Pierre-Marc Delaux, Vincent Favier, Lilian Guillemeney, Astrid Lamberts, Xavier Müller, Mathieu de Naurois, Thibaut Paumard, Christophe Pichon

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: https://boutique.pourlascience.fr
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél. 03 67 07 98 17
Adresse postale: Service des abonnements – Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Trouvard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Acting editor in chief: Curtis Brainard
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: 20 %
Impact sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
10-31-1282
pefc-france.org

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

DES CRISTAUX DANS LA QUATRIÈME DIMENSION

L'espace et le temps sont familier: la théorie de la relativité, dont nous a gratifiés Einstein il y a environ un siècle, a habitué les physiciens au fait peu intuitif que l'espace et le temps constituent deux entités interdépendantes de notre Univers. Avec cette interdépendance, les longueurs et les durées sont relatives à l'état de mouvement de l'observateur, et perdent ainsi le caractère absolu que la physique classique leur attribuait.

Mais les relations entre l'espace et le temps ne s'arrêtent pas là. [illegible] comme deux grandeurs presque équivalentes, traitées sur un pied d'égalité. Ainsi, bien qu'il y ait des différences importantes entre les deux entités (par exemple, l'écoulement du temps ne se fait que dans un seul sens), une certaine symétrie prévaut entre elles.

Or la notion de symétrie, qu'elle se rapporte à l'espace-temps ou à d'autres grandeurs physiques, s'est révélée extrêmement féconde pour la physique du XX^e siècle. Et il semble que ce soit loin d'être fini. En témoignent les «cristaux temporels» que le physicien théoricien Frank Wilczek, lauréat du prix Nobel en 2004, a imaginés en 2012 et qu'il nous décrit dans ce numéro *(voir pages 24 à 32)*.

L'idée était presque simple. Dans un cristal ordinaire, les atomes ou molécules sont disposés de façon régulière, les motifs moléculaires se répètent de façon strictement périodique dans l'espace. Peut-on alors, par esprit de symétrie, envisager des systèmes physiques dont l'agencement se répète à intervalles de temps réguliers? Telle est, à quelques subtilités près, l'idée des cristaux temporels. Laquelle a fait son chemin: les premières réalisations de tels systèmes, que certains qualifient de «nouvel état de la matière», datent de 2017. Simples curiosités scientifiques ou prémices d'une nouvelle branche de la physique riche en applications, aux horloges ultraprécises par exemple? L'avenir nous le dira. ■

SOMMAIRE

N° 507 /
Janvier 2020

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Un trou noir surprenant dans la Voie lactée
- Le gigantopithèque enfin mis à sa place
- Sortie des eaux des végétaux: un scénario revisité
- Un facteur aggravant pour l'Antarctique
- Mucoviscidose: une trithérapie
- Des autruches, des moutons et des chèvres
- La rougeole provoque un «amnésie immunitaire»
- Les plaques entraînent parfois le manteau
- Des sursauts gamma record
- Les abeilles championnes de la glisse

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
AGENDA

P. 20
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Stocker sur la durée, un défi!
Gilles Dowek

P. 22
QUESTIONS DE CONFIANCE
Une assiette sans foie ni loi
Virginie Tournay

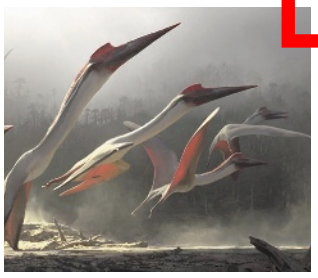
GRANDS FORMATS

P. 34
ÉGYPTOLOGIE
DANS LES ENTRAILLES DES MOMIES
Marie Zawisza

Les Égyptiens anciens ont développé des techniques d'embaumement de pointe. Pour percer leurs secrets, les chercheurs s'appuient aujourd'hui sur la scanographie. Fascinant.

P. 54
LINGUISTIQUE
MOLIÈRE EST BIEN L'AUTEUR DE SES ŒUVRES
Florian Cafiero et Jean-Baptiste Camps

On a longtemps soupçonné Molière de ne pas avoir écrit ses pièces, dont le véritable auteur serait Corneille. Mais l'étude de la langue de Molière et de ses contemporains rend à l'homme de théâtre ce qui lui est dû.



P. 44
PALÉONTOLOGIE
LES MAÎTRES DU CIEL MÉSOZOÏQUE
Michael Habib

Comment les ptérosaures, créatures géantes à la tête démesurée, pouvaient-ils voler? De nouveaux fossiles et la modélisation mathématique donnent des réponses.

P. 60
ÉCONOMIE
AUX SOURCES MATHÉMATIQUES DES INÉGALITÉS DE RICHESSE
Bruce M. Boghosian

Un modèle mathématique simple décrit la répartition de la richesse dans les économies modernes avec une précision sans précédent. Et remet en question quelques idées reçues sur le libre marché.

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

En couverture :
© Mark Ross Studio

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

À LA UNE

P. 68
ÉTHOLOGIE

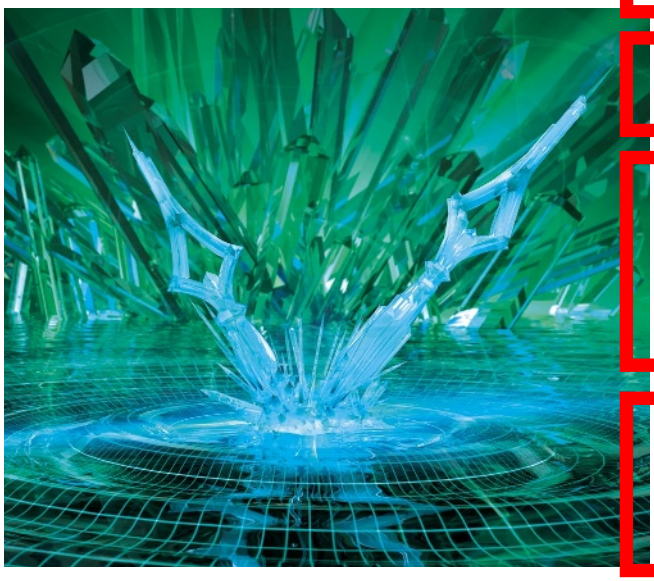
FILOU COMME UNE SEICHE
Barbara King

Homo sapiens n'est pas la seule espèce qui mente. La tromperie règne dans le monde anima

P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES

LES BULLES DE LA PENSÉE
Jean-Gaël Barbara

Les neurone du cerveau s'échangent des informations en s'envoyant des messagers chimiques dans de microscopiques bulles. C'est ce que découvrit il y a soixante ans le neuroscientifique allemand Bernard Katz.



P. 24
PHYSIQUE

LES CRISTAUX TEMPORELS
UN NOUVEL ÉTAT DE LA MATIÈRE
Frank Wilczek

En imaginant des cristaux présentant un motif répété dans le temps plutôt que dans l'espace, les physiciens créent de nouveaux états de la matière aux propriétés surprenantes. Une piste pour concevoir des horloges ultraprécises

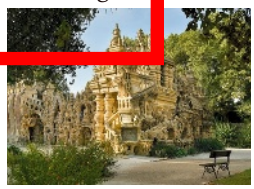
RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL

COMBINES POUR TETRADES
Jean-Paul Delahaye

La combinatoire géométrique exige une patience et une minutie dont souvent seul l'ordinateur est capable. Le cas des tétrades est exemplaire.

P. 86
ART & SCIENCE
La pierre idéale du facteur Cheval
Loïc Mangin



P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
Du granité pour bien patiner
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Les gènes perdus des baleines
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Des émulsions riches en curcuma
Hervé This

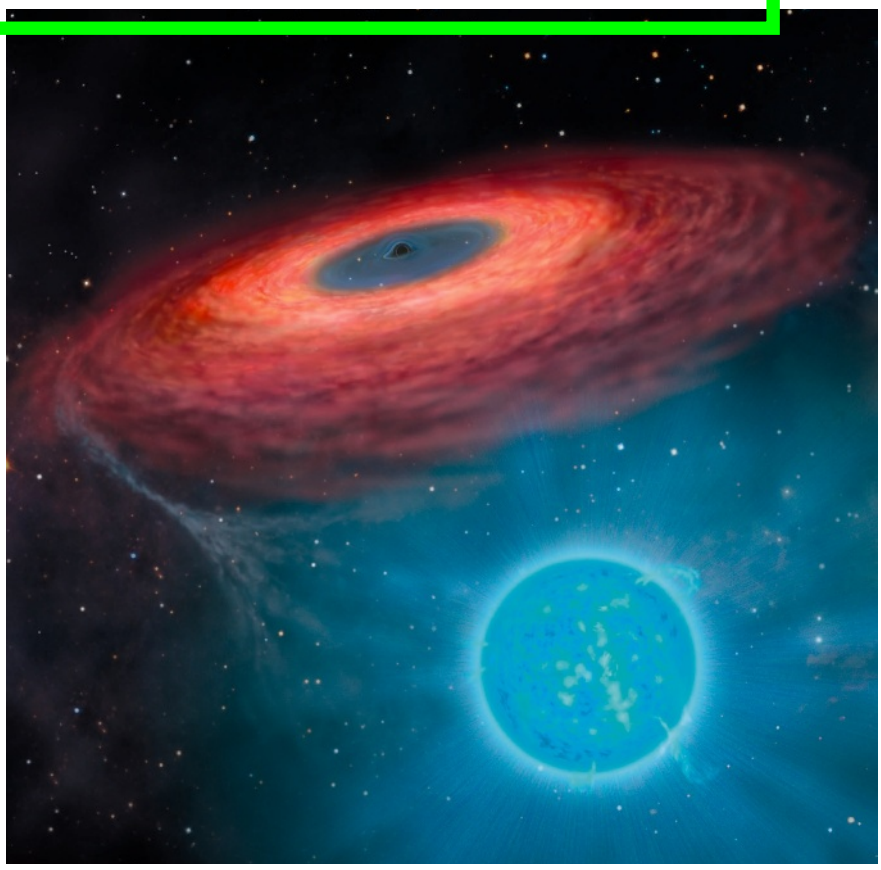
P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.16 *Livres du mois*
P.18 *Agenda*
P.20 *Homo sapiens informaticus*
P.22 *Questions de confiance*

ASTROPHYSIQUE

UN TROU NOIR SURPRENANT DANS LA VOIE LACTÉE



Dans le système binaire LB-1 *(ici une vue d'artiste)*, le disque d'accrétion *(en rouge)* du trou noir est trop petit pour émettre assez de lumière. C'est grâce au mouvement orbital de l'étoile de type B *(en bleu)* que le trou noir a été découvert.

Découvert récemment, le trou noir LB-1 a une masse estimée à 68 masses solaires. C'est bien plus que ne le prévoient les modèles...

Au centre du trou noir supermassif central, fort d'une masse de 4 millions de fois celle du Soleil, la Voie lactée compterait de l'ordre de 100 millions de trous noirs dits «stellaires», chacun d'eux étant né à la suite de la mort d'une étoile. D'après les modèles d'évolution stellaire, ces trous noirs atteindraient jusqu'à environ 25 masses solaires. Pourtant, Jifeng Liu, de l'Académie chinoise des sciences, à Beijing, et ses collègues viennent d'identifier un trou noir de 68 masses solaires. Comment résoudre l'énigme de sa formation?

En plus de sa masse hors normes, le trou noir LB-1, distant de 15 000 années-lumière, présente une autre originalité: il a été identifié d'une façon exceptionnelle. La plupart des trous noirs stellaires découverts dans la Galaxie l'ont été grâce aux rayons X émis par la matière brûlante de leur disque d'accrétion. Mais la majorité des trous noirs, dénués d'un disque important, sont invisibles.

Comment alors les détecter? En cherchant des étoiles lumineuses présentant un mouvement périodique (on parle de vitesse radiale), qui indique leur appartenance à un système binaire où leur compagnon est un trou noir. Grâce à cette méthode, l'équipe de Jifeng Liu a repéré le système LB-1, composé d'une étoile lumineuse de type B, ayant une période orbitale de 78,9 jours, et d'un trou noir de 68 masses solaires. Ces mesures restent à confirmer, mais si elles sont correctes, la masse du trou noir est bien trop élevée pour que cet astre soit né de l'effondrement d'une étoile en fin de vie.

Récemment, les dispositifs *Ligo* et *Virgo* de détection d'ondes gravitationnelles ont mis en évidence des fusions de paires de trous noirs, chacun faisant entre 20 et 50 masses solaires. Ces coalescences ont donné naissance à des trous noirs plus grands, ce qui pourrait être une piste pour expliquer LB-1.

Il faut cependant prendre en compte un autre paramètre: la «métallicité» de

© Jingchuan Yu, planétarium de Beijing, 2019

étoiles, c'est-à-dire leurs concentration en éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. À ses débuts, l'Univers ne contenait quasiment que de l'hydrogène et de l'hélium ; les premières étoiles avaient donc une faible métallicité. Puis l'activité stellaire a synthétisé des éléments lourds et la métallicité des générations successives d'étoiles a augmenté.

Or, d'après les modèles, si les étoiles de faible métallicité sont capables de produire des trous noirs assez massifs (comme ceux observés par *Ligo* et *Virgo*), celles de métallicité élevée ne donnent que des trous noirs de moins de 25 masses solaires. En effet, elles perdent beaucoup de matière sous la forme de vent stellaire avant de mourir. Le trou noir LB-1 pourrait donc être le résultat de la coalescence de deux trous noirs issus d'étoiles de faible métallicité.

Il y aurait donc eu initialement un système de trois étoiles dont deux très massives, auraient donné des trous noirs qui ont ensuite fusionné. Et le troisième larron serait l'étoile de type B. Cependant, les caractéristiques de ce dernier astre ne sont pas compatibles avec ce scénario. En général, un système binaire ou triple se forme dans une pouponnière d'étoiles (un vaste nuage de gaz où un grand nombre d'étoiles naissent en même temps). Par conséquent, les membres du système partagent certaines caractéristiques, dont la métallicité. Pour avoir un trou noir de 68 masses solaires, il faudrait donc que l'étoile de type B ait une faible métallicité, ce qui n'est pas le cas.

Une autre explication est que l'étoile de type B aurait été capturée sous l'effet de l'attraction gravitationnelle du trou noir. Dans ce cas, les astres ne seraient pas nés au même endroit et les progéniteurs du trou noir avaient peut-être une métallicité faible. Mais dans le cas d'une étoile capturée, la trajectoire est souvent très excentrique, c'est-à-dire très allongée. Or, justement, l'orbite de l'étoile est plutôt circulaire. Certains processus tendent à rendre circulaire une orbite, mais ils sont très lents, et bien trop lents par rapport à l'âge de notre étoile pour avoir été à l'œuvre ici. Bref, un trou noir de cette masse dans la Voie lactée est un vrai casse-tête. ■

SEAN BAILLY

Lifang Liu *et al.*, *Nature*, vol. 575, pp. 618-621, 2019

PALÉONTOLOGIE

Le gigantopithèque enfin mis à sa place

Un énigmatique singe géant a vécu en Asie. Mais ses fossiles étant très peu nombreux et ses caractères morphologiques très particuliers, on ne parvenait pas à le placer dans l'arbre de parenté des grands singes. Une équipe menée par Frido Welker et Enrico Cappellini, de l'université de Copenhague, vient de régler ce problème à l'aide d'une nouvelle technique, la paléoprotéomique. Les explications d'Anne-Marie Bacon, qui a participé à ces travaux.

Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

Ainsi, il a existé en Asie un King Kong ?

En quelque sorte, même si faire de cet animal un King Kong ou un Yéti est peu scientifique. En fait, il s'agit du gigantopithèque, un grand singe qui devait mesurer 2,5 mètres de haut pour 300 kilogrammes. Étant spécialiste des faunes anciennes d'Asie du Sud-Est, j'ai fait partie de l'équipe constituée par Frido Welker et Enrico Cappellini pour le décrire. Nous en savons très peu, puisque nous ne disposons que de rares fossiles.

Pourquoi cette rareté ?

Parce que dans les milieux karstiques, très fréquents dans les régions tropicales de Chine du Sud et d'Indochine, pratiquement rien ne se conserve longtemps, à part quelques dents. Et ces fossiles ne subsistent le plus souvent que dans les grottes calcaires. Pour le gigantopithèque, nous n'avons ainsi que quatre mandibules chinoises et des dents isolées, dont certaines trouvées au Vietnam et en Thaïlande. Ces fossiles sont en outre dispersés dans le temps entre environ 2 millions d'années et 450 000 ans.

Est-ce pour cela que l'on n'arrivait pas à établir la parenté de ce grand singe ?

On se doutait qu'il était proche des orangs-outans, mais sans en avoir la certitude. Ces singes des forêts tropicales de Sumatra et de Bornéo appartiennent au genre *Pongo*, qui compte par ailleurs une dizaine d'espèces éteintes pour lesquelles on a un peu de matériel fossile, mais pas assez pour que la comparaison permette de situer le gigantopithèque sur le plan phylogénétique à partir de sa seule morphologie dentaire.

Dès lors, comment avez-vous établi sa parenté ?

Comme il n'était pas possible d'utiliser la comparaison morphologique des dents, Frido Welker et Enrico Cappellini ont eu recours à la paléoprotéomique – l'analyse des protéomes, ces jeux de protéines caractéristiques d'un tissu biologique. Les chercheurs ont extrait le protéome de l'émail dentaire d'un gigantopithèque et l'ont comparé à ceux de l'émail dentaire des autres grands singes et même de l'homme, ce qui a permis d'établir ses relations de parenté avec toutes ces espèces. Plus précisément, pour construire l'arbre phylogénétique le plus probable et estimer les dates de divergence entre les lignées, ils ont appliqué, aux différents protéomes comparés, une méthode statistique élaborée – la méthode bayésienne.

Et qu'en ressort-il ?

D'abord, la certitude que le gigantopithèque est un ponginé, c'est-à-dire un animal plus proche de l'orang-outan que des autres grands singes actuels, les gibbons en Asie et les chimpanzés et gorilles en Afrique ; ensuite, que la divergence en Asie entre la lignée des orangs-outans et celle du gigantopithèque s'est produite il y a entre 10 et 12 millions d'années. Nous apprenons ainsi que l'histoire évolutive de ce singe a duré dix millions d'années, alors que nos plus anciens restes datent d'à peine 2 millions d'années…

Jusqu'où remontera-t-on dans le temps avec la paléoprotéomique ?

Je ne suis pas spécialiste de cette technique, mais il y a beaucoup d'efforts réalisés pour améliorer l'extraction des protéines anciennes, qui se conservent bien mieux que l'ADN. Ainsi, en milieu tropical, le plus ancien ADN jamais extrait a tout juste quelques millions d'années, alors que les protéines les plus anciennes que l'on ait extraites – celles du gigantopithèque – ont 1,9 million d'années. C'est le record en Asie. En Europe, l'équipe d'Enrico Cappellini a pu extraire les protéines d'un rhinocéros de 1,77 million d'années, découvert à Dmanissi, en Géorgie. Mais il n'y a aucun doute : ces records seront battus.

F. Welker *et al.*, *Nature*, en ligne le 13 novembre 2019

ÉVOLUTION

SORTIE DES EAUX DES VÉGÉTAUX : UN SCÉNARIO REVISITÉ

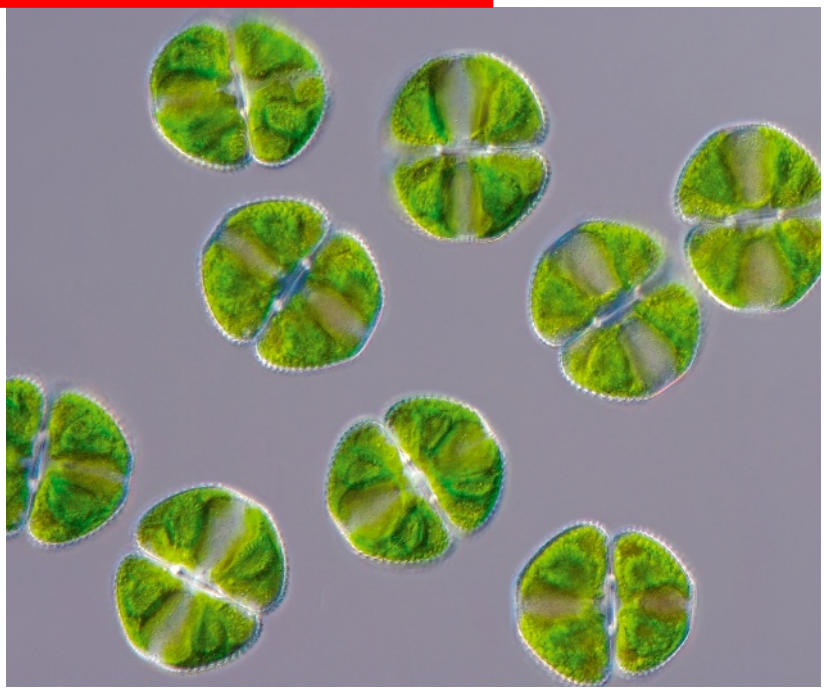
Une nouvelle étude montre comment un transfert de gènes de bactéries vers des plantes a permis à ces dernières de coloniser la terre ferme.

Il y a entre 480 et 450 millions d'années, les premiers végétaux sont partis à la conquête du milieu terrestre. Ce dernier leur était très hostile car il fallait pouvoir résister à la dessiccation, aux ultraviolets, à la gravité, etc. Aujourd'hui, les continents sont le terrain privilégié des embryophytes (mousses, fougères, conifères et plantes à fleur), qui présentent tous les caractères nécessaires pour y prospérer. Plusieurs observations récentes ont cependant mis en défaut l'hypothèse simple où l'ancêtre commun des embryophytes aurait lancé la conquête des continents. Shifeng Cheng, de l'Académie des sciences agricoles, à Shenzhen, en Chine, et ses collègues ont réexaminé ce scénario.

Il y a une vingtaine d'années, on pensait que les embryophytes étaient des cousins proches du groupe des coléochaetes, des algues exemptes des adaptations nécessaires pour la vie hors des océans. Dès lors, on pensait que la conquête du milieu terrestre n'avait été réalisée que par le seul groupe des embryophytes. Mais entre 2012 et 2018, la découverte d'une proximité plus grande des embryophytes avec les zygnématophycées, un groupe d'algues peu étudié, a conduit à reposer la question. La conquête s'est-elle faite avant ou après la divergence entre les embryophytes et les zygnématophycées ?

Pour y répondre, Shifeng Cheng et ses collègues ont séquencé le génome de différentes espèces d'embryophytes, de zygnématophycées et d'autres végétaux. Ils ont trouvé des gènes communs aux embryophytes et aux zygnématophycées, notamment les gènes *PYL* et *GRAS*, qui interviennent dans la résistance à la dessiccation. L'ancêtre commun des embryophytes et des zygnématophycées était donc probablement adapté à un mode de vie terrestre et aurait peut-être conquis ce milieu il y a 580 millions d'années.

Plus surprenant encore, en étendant leur analyse à des espèces non végétales, les biologistes ont constaté que les gènes *PYL* et *GRAS* sont très fréquents chez les bactéries du sol. Il est donc très probable qu'il y ait eu des transferts de gènes de bactéries terrestres vers l'ancêtre commun des embryophytes et des zygnématophycées. Ainsi, les bactéries, qui ont



Ces algues vertes du genre *Cosmarium* appartiennent au groupe des zygnématophycées. Elles vivent dans l'eau douce, mais leurs ancêtres vivaient peut-être sur la terre ferme.

colonisé le milieu terrestre il y a 3,2 milliards d'années, auraient joué un rôle non négligeable dans l'arrivée ultérieure des premiers végétaux terrestres.

Dans cette conquête végétale, cependant, comment expliquer le succès des embryophytes et le retour au milieu aquatique de la plupart des zygnématophycées ? L'étude génétique révèle que les zygnématophycées, à la différence des embryophytes, ne possèdent pas certains gènes qui sont nécessaires à l'établissement de symbioses (associations) avec certains champignons du sol. Or ces symbioses confèrent aux végétaux terrestres la capacité de capter plus facilement de l'eau et des nutriments du sol, moins accessibles qu'en milieu aquatique. Une hypothèse séduisante pour expliquer l'omniprésence actuelle des embryophytes sur la terre ferme ! ■

CORALINE MADEC

S. Cheng *et al.*, *Cell*, vol. 179(5), pp. 1057-1067, 2019

© Shutterstock.com/F.Neidl

EN BREF

LA BONNE ALLURE DES QUADRUPÈDES

Beaucoup de quadrupèdes ont une démarche adaptée à chaque vitesse. Et souvent, ils marchent, trottent ou galopent, à peu près tous de la même façon. Rares sont les démarches spécifiques à une espèce. Pour l'expliquer, Delyle Polet et John Bertram, de l'université de Calgary, au Canada, ont conçu un modèle physique simple pour le déplacement d'un quadrupède et montré avec des simulations que les démarches énergétiquement optimales sont celles observées dans la nature.

PLoS Comput. Biol., vol. 15(11), e1007444, 2019

LA MUSIQUE, UN ART PARTAGÉ

Universelle, la musique ? Il était difficile de répondre, notamment en raison de la diversité entre les cultures. L'équipe de Samuel Mehr, de l'université Harvard, a analysé des textes ethnographiques liés à la musique et des enregistrements sonores. Ils ont constaté que toutes les sociétés développent une culture musicale et associent des sentiments ou comportements humains précis (amour, danse, etc.) à certains aspects de la musique (tempo, rythme, hauteur, etc.).

Science, vol. 366, eaax0868, 2019

'OUMUAMUA, UN RECORD DE POROSITÉ

Vu en 2017, 'Oumuamua, le premier objet interstellaire connu à visiter le Système solaire, est peut-être un mouton de poussière. Il s'éloigne en effet anormalement vite du Soleil. Un mouvement dû à la pression de radiation, d'après Eirik Flekkøy, de l'université d'Oslo, et ses collègues. Pour que cette force, due aux impacts cumulés d'une myriade de photons solaires, suffise à accélérer 'Oumuamua aussi efficacement, sa densité doit avoisiner les 10 grammes par mètre cube.

ApJ. Lett., vol. 885(2), L41, 2019

© Wikimedia Commons/Emw (en haut) ; © Shutterstock.com/Steve Allen (en haut)

GÉOSCIENCES

UN FACTEUR AGGRAVANT POUR L'ANTARCTIQUE

Depuis vingt-cinq ans, l'Antarctique aurait perdu près de 2 700 milliards de tonnes de glace du fait du réchauffement climatique ; et l'occurrence d'événements extrêmement chauds sera d'autant plus précoce que le réchauffement dépasse les 1,5 °C à la fin du siècle. Jonathan Wille, de l'Institut des géosciences de l'environnement, à Saint-Martin-d'Hères, et ses collègues ont montré que la fonte en surface de l'Antarctique occidental est en partie aggravée par la formation de « rivières atmosphériques ».

Ce phénomène, bien étudié par les météorologues, se produit lorsque deux masses d'air proches forment entre elles un corridor où l'air humide s'accumule. C'est par exemple le cas lorsqu'une dépression et un anticyclone (des zones de basse et de haute pression) entrent en contact. En raison des sens de rotation opposés de ces deux systèmes, l'humidité est alors poussée dans une seule direction, ce qui la concentre et entraîne des précipitations intenses sur des zones restreintes.

En analysant des données sur l'Antarctique collectées entre 1979 à 2017, l'équipe de Jonathan Wille a observé que des rivières atmosphériques se sont formées régulièrement

Des épisodes de chaleur humide, dus à des rivières atmosphériques, accentuent la fonte de l'Antarctique.

fonte affectant des barrières de glace, ces épaisses plateformes de glace qui s'avancent sur la mer. Les rivières atmosphériques chargées d'air chaud du Nord donnent en effet lieu à des précipitations très intenses qui diminuent le pouvoir réfléchissant de la glace et à la formation de nuages émettant vers le bas dans l'infrarouge. Des événements qui seront rendus plus extrêmes par le réchauffement climatique... ■

LUCAS GIERCZAK

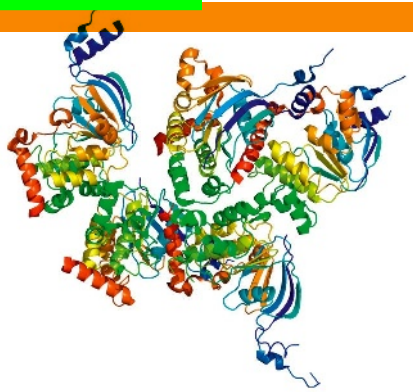
J. Wille *et al.*, *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 911-916, 2019

MÉDECINE

MUCOVISCIDOSE : UNE TRITHÉRAPIE

La mucoviscidose, maladie génétique héréditaire causant des problèmes respiratoires et digestifs, touche environ 7000 personnes en France. Malgré des avancées médicales depuis les années 1960, l'espérance de vie des malades reste faible – une quarantaine d'années – et leurs conditions de vie difficiles. Mais les équipes de Peter Middleton, de l'université de Sydney, en Australie, et de Harry Heijerman, de l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, viennent d'effectuer deux nouveaux essais cliniques prometteurs.

Un traitement alliant deux molécules, ivacaftor et tezacaftor – améliorait déjà la vie de nombreux patients atteints de la forme la plus courante de la maladie, mais restait sans effet chez certains d'entre eux. La première équipe a administré à de tels patients une trithérapie associant à ces substances une nouvelle



La mucoviscidose est causée par les mutations d'un gène, entraînant le dysfonctionnement de la protéine CFTR.

molécule, l'elexacaftor. La capacité respiratoire des malades s'est grandement améliorée. La seconde équipe a montré que cette trithérapie soigne aussi mieux les patients « classiques ». ■

L. G.

P. G. Middleton *et al.*, *New England Journal of Medicine*, vol. 381, pp. 1809-1819, 2019 ; [illegible] pp. 1940-1948, 2019

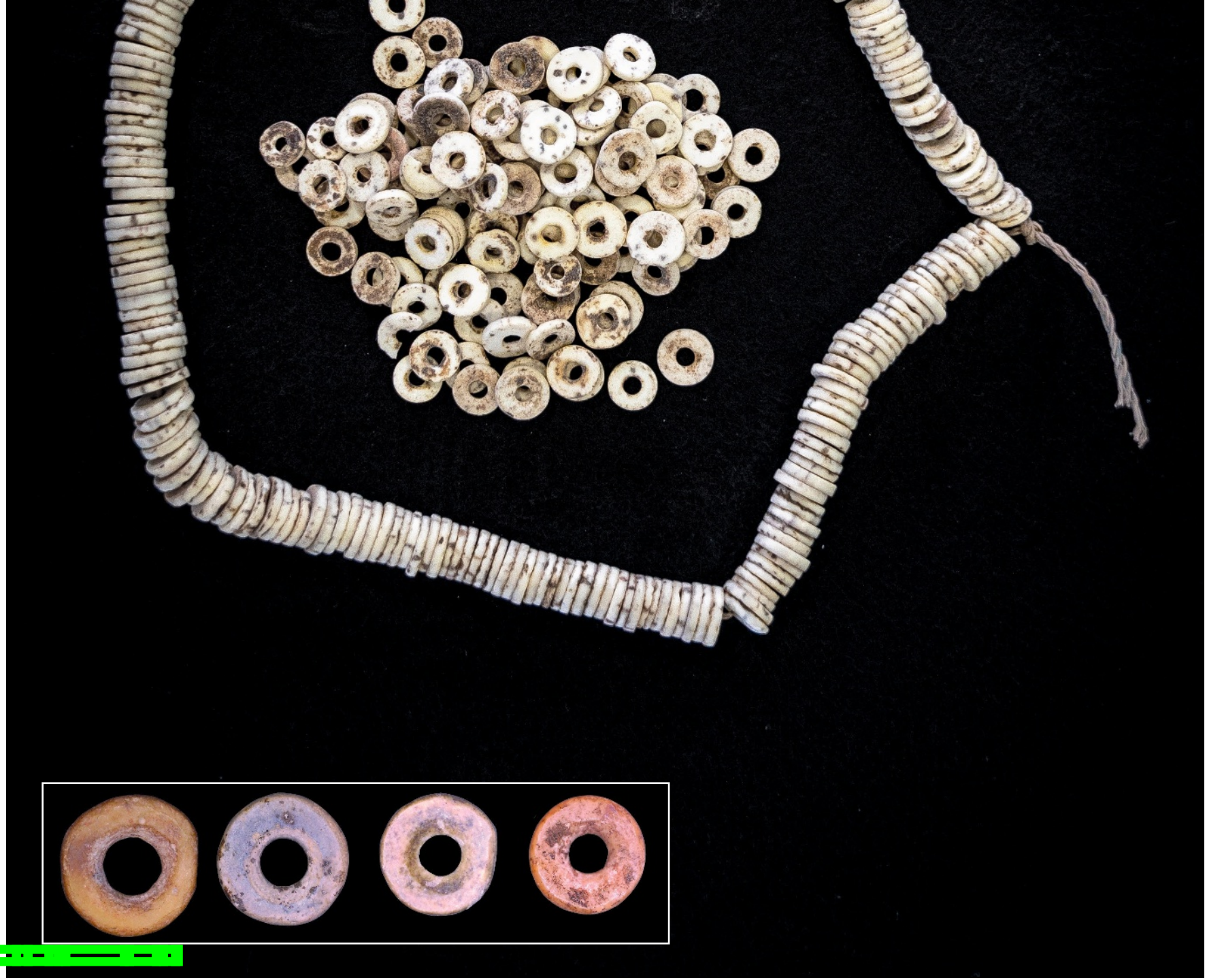
ARCHÉOLOGIE

DES AUTRUCHES, DES MOUTONS ET DES CHÈVRES

On retrouve souvent des perles en coquille d'œuf d'autruche, utilisées pour des parures (*comme sur ce collier moderne ci-contre*), dans des sites archéologiques africains. En 1987, Leon Jacobson, de l'université de l'État-Libre, en Afrique du Sud, avait montré qu'en Namibie les perles mises au jour dans des sites occupés par des chasseurs-cueilleurs étaient plus petites, de quelques millimètres, que celles retrouvées dans des sites d'éleveurs de chèvres et de moutons – des populations arrivées de l'est il y a 2 000 ans environ. Depuis, les perles ont été utilisées comme un indicateur, parmi d'autres, pour distinguer les occupants d'un site archéologique. Toutefois, une étude systématique réalisée par Jennifer Miller et Elizabeth Sawchuk, de l'institut Max-Planck pour les sciences de l'histoire humaine, à Iéna, en Allemagne, montre que la situation est à nuancer.

En étudiant les perles dans l'est de l'Afrique, les chercheuses ont constaté que depuis plus de 5 000 ans, les populations locales y fabriquaient des perles de grande taille. Dans le sud, les perles de petite taille sont restées prédominantes (*dans le médaillon, deux petites perles retrouvées en Afrique du Sud, et deux grandes mises au jour en Tanzanie*). Mais il y a 2 000 ans, en accord avec les observations de Leon Jacobson, des perles de plus grande taille sont apparues. En d'autres termes, l'arrivée des grandes perles a coïncidé avec celle des éleveurs de l'est dans la région. Si les perles ne sont peut-être pas un indicateur suffisant sur les occupants, elles constituent un bon marqueur temporel des mouvements de populations et témoignent d'interactions culturelles. « Elles indiquent qu'il y a très certainement eu un transfert de savoir-faire entre les éleveurs venant de l'est et les populations locales », explique Solange Rigaud, paléoanthropologue à l'université de Bordeaux. ■

J. M. Miller et E. A. Sawchuk, *Plos One*, vol. 14 (11), article e0225143, 2019



© Hans Sell ; © J. Miller et al, 2019 (médaillon)

VIROLOGIE

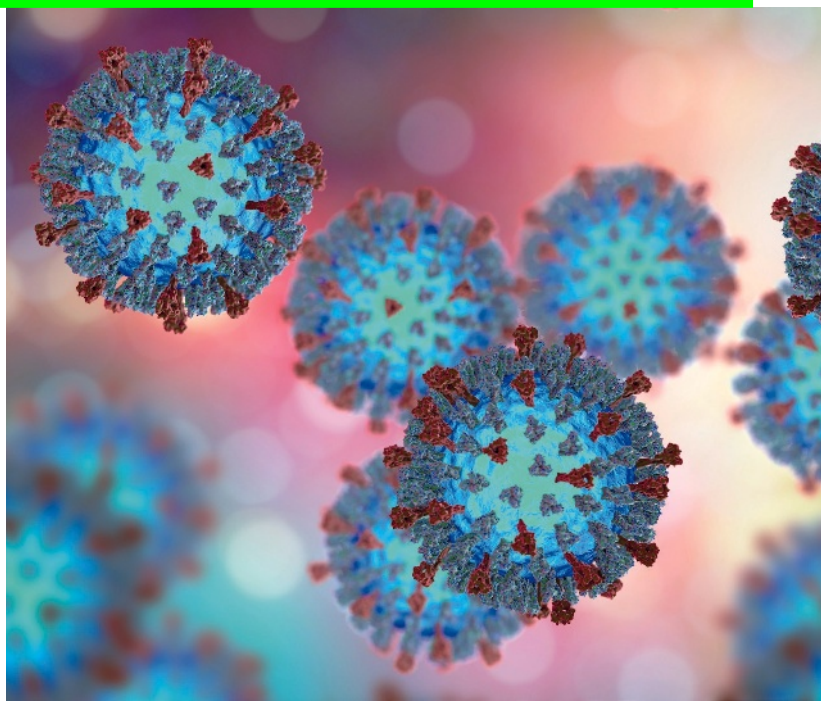
LA ROUGEOLE PROVOQUE UNE « AMNÉSIE IMMUNITAIRE »

Ce virus perturbe le système immunitaire et y induit une amnésie qui expose les individus infectés à un risque accru face à d'autres pathogènes.

Le virus de la rougeole, maladie très contagieuse, tue encore près de 100 000 personnes par an dans le monde. Les décès sont le plus souvent dus à des complications telles que des pneumonies. Selon l'OMS (l'Organisation mondiale de la santé), depuis janvier 2019, le nombre de cas dans le monde a triplé par rapport à la même période en 2018. Une augmentation qui s'explique en Europe par une défiance vis-à-vis des vaccins. Or un nouvel argument vient renforcer la nécessité de cette vaccination. En 2015, lors d'études épidémiologiques, Michael Mina, de l'institut médical Howard-Hugues, à Boston, et ses collègues avaient identifié un lien entre la rougeole et une mortalité accrue pendant les années suivantes chez les personnes ayant contracté la maladie, mais les raisons en étaient encore inconnues. Maintenant, le chercheur et une équipe internationale ont montré que le virus de la rougeole efface la mémoire immunitaire des personnes infectées.

Cette mémoire immunitaire est présente notamment sous la forme d'anticorps que l'organisme conserve après une première rencontre avec un pathogène. Michael Mina et ses collègues ont comparé le stock d'anticorps mémoire dans le sang de 77 enfants non vaccinés, avant et environ deux mois après une infection par la rougeole. Ils ont montré que la rougeole élimine entre 11 et 73 % du répertoire d'anticorps présent avant l'infection. Non seulement certains ne sont plus représentés, mais la quantité d'anticorps contre de nombreux pathogènes est aussi considérablement réduite. Les individus qui ont la rougeole redeviennent ainsi vulnérables à de nombreux pathogènes, comme le sont les nouveau-nés. « Il est déjà bien connu que la rougeole est une maladie qui induit un déficit immunitaire, avec des complications fréquentes, surtout respiratoires, dans les deux mois après l'infection. Ce travail documente de façon précise l'amnésie immunitaire sévère qui résulte d'une infection par ce virus », explique Paul-Henri Consigny, directeur du centre médical de l'institut Pasteur, à Paris.

Si l'équipe n'a pas encore déterminé les mécanismes précis qui sous-tendent cette profonde restructuration de la mémoire immunitaire, elle a confirmé ce phénomène chez des macaques. Elle a aussi observé que cette amnésie, contrairement à celle induite par le virus du sida, n'est pas permanente : les enfants reconstituent progressivement leur mémoire immunitaire au fil de réinfections lors de nouvelles épidémies d'autres virus.



Comme le virus du sida, celui de la rougeole *(ici sur une vue d'artiste)* s'attaque aux cellules immunitaires.

Par ailleurs, l'équipe a confirmé que cette amnésie ne se produit pas avec la vaccination. Chez des enfants vaccinés contre la rougeole, elle n'a détecté aucune diminution d'anticorps, ni en diversité ni en quantité. « Cela est tout à fait cohérent avec ce qui était attendu. Le virus utilisé pour la vaccination est atténué : il comporte une cinquantaine de mutations qui lui ont fait perdre la capacité à infecter et à détruire les cellules du système immunitaire », observe Frédéric Tangy, chercheur à l'institut Pasteur. ■

NOËLLE GUILLON

M. Mina *et al.*, *Science*, vol. 366, pp. 599-606, 2019

© Shutterstock.com/Kateryna Kon

ASTRONOMIE

UNE ÉTOILE EN EXCÈS DE VITESSE

Dans la Voie lactée, les mouvements des astres sont très rapides; par exemple, le Soleil (accompagné de ses planètes) s'y déplace à 230 kilomètres par seconde. Mais les astronomes ont remarqué des étoiles isolées ayant une vitesse anormalement élevée. Sergey Koposov, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, et ses collègues ont observé une telle étoile, S5-HVS1, située à 29 000 années-lumière de la Terre. Elle s'éloigne du centre de la Voie lactée à une vitesse radiale de 1020 kilomètres par seconde, ce qui en fait une «étoile hyperrapide». Les chercheurs pensent qu'elle a été propulsée par le trou noir central avec un effet de fronde et quittera irrémédiablement la galaxie pour ne jamais y revenir. ■

L. G.

S. E. Koposov *et al.*, *MNRAS*, en ligne le 4 novembre 2019

CHIMIE

DES MICROROBOTS DÉPOLLUEURS D'URANIUM

Pour dépolluer des milieux aqueux contaminés par des dérivés de l'uranium, Yulong Ying, de l'université de Pékin, et ses collègues ont eu l'idée d'utiliser le ZIF-8, un réseau métallorganique (matériau poreux constitué d'ions métalliques reliés par des molécules organiques), capable d'adsorber en grande quantité des ions uranyles UO_2^{2+}.

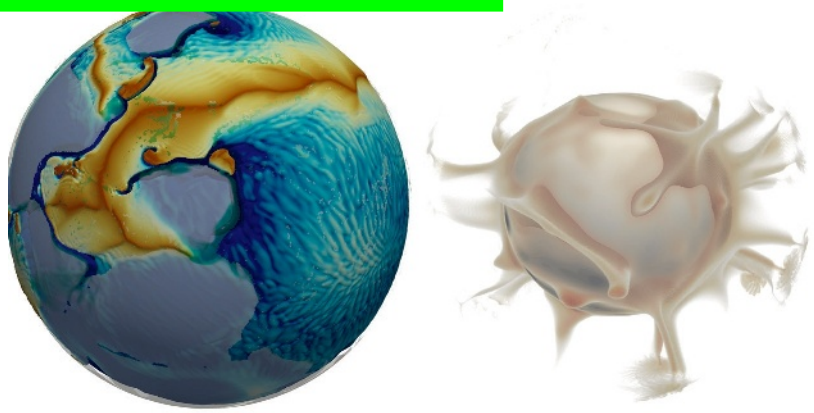
En modifiant des microparticules de ZIF-8, les chercheurs ont fabriqué des «microrobots» autopropulsés. Dotés d'un revêtement de platine sur une face, les microrobots produisent des bulles de dioxygène en présence d'eau oxygénée (ajoutée au milieu), ce qui les met en mouvement. Grâce à cette capacité motrice, les microrobots gagnent en efficacité pour chercher l'uranium dans l'eau. Avec l'addition d'une couche de magnétite sur l'autre face, les microrobots sont collectés facilement avec un aimant une fois l'uranium capté. ■

MARTIN TIANO

Y. Ying *et al.*, *ACS Nano*, vol. 13(10), pp. 11477-11487, 2019

GÉOSCIENCES

LES PLAQUES ENTRAÎNENT PARFOIS LE MANTEAU



La simulation montre, à gauche, la topographie d'un continent en train de se disloquer. À droite, les panaches de magma.

La théorie de la tectonique des plaques décrit les mouvements de la surface terrestre en considérant que sa couche externe rigide (la lithosphère) est découpée en plaques qui se meuvent sur la couche inférieure ductile, l'asthénosphère. Comme le modèle n'explique pas ces mouvements, les géophysiciens ont proposé l'idée que les plaques sont entraînées par les phénomènes de convection animant l'asthénosphère. Une hypothèse aujourd'hui remise en question. Grâce à une nouvelle simulation, l'équipe de Nicolas Coltice, du laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, à Paris, a mis en lumière des rôles plus symétriques pour les plaques et la convection dans l'origine de la dérive des continents.

D'après les chercheurs, il faut voir la Terre comme un système unique où les grandeurs physiques (densité, pression, température, viscosité, etc.) varient continûment, notamment avec la profondeur. Cela permet de prendre en compte les interactions complexes entre les plaques tectoniques et l'asthénosphère. Nicolas Coltice et ses collègues ont alors modélisé la dynamique d'une planète fictive semblable à la Terre. En résolvant un système d'équations différentielles, ils ont reproduit 1,5 milliard d'années d'évolution de la planète. Les chercheurs ont alors noté qu'entre 60 et 80% du temps (notamment à proximité d'une zone de subduction), l'asthénosphère se déplace plus lentement que la plaque qui la surplombe; cela indique que, dans ce cas, ce sont en fait les plaques qui entraînent l'asthénosphère. Le reste du temps, les rôles sont inversés et correspondent à ce qui était supposé jusque-là: des mouvements de convection dans l'asthénosphère entraînent lentement les plaques tectoniques. ■

L. G.

N. Coltice *et al.*, *Science Advances*, vol. 5(10), article eaax4295, 2019

© Nicolas Coltice et al.

ASTROPHYSIQUE

DES SURSAUTS GAMMA RECORD

Lorsqu'une étoile massive arrive en fin de vie, une formidable explosion se produit, visible même aux confins du cosmos. L'astre expulse de grandes quantités de gaz de ses couches externes et son cœur s'effondre sur lui-même, ce qui donne naissance à un trou noir. Le système émet alors deux jets de particules à des vitesses proches de celle de la lumière. Ce phénomène émet de la lumière pendant environ une minute. Il est suivi de la phase dite « rémanente », qui dure des mois, voire des années. Durant cette seconde phase, les jets provoquent des ondes de choc dans le gaz et la poussière environnant l'astre. Ces chocs accélèrent notamment des électrons, qui de ce fait émettent un rayonnement dit « synchrotron ». Les astrophysiciens suspectaient qu'un autre processus, la diffusion Compton inverse, soit aussi à l'œuvre dans les sursauts gamma et produise des photons plus énergétiques : des électrons, également accélérés par les ondes de choc, interagissent et transfèrent leur énergie à des photons des émissions synchrotron. Mais ce mécanisme n'avait pas encore été confirmé par l'observation, après une traque de plus de dix ans.

Le 20 juillet 2018 et le 14 janvier 2019, respectivement, les télescopes *HESS* et *MAGIC*

Vue d'artiste d'un sursaut gamma avec en premier plan l'un des jets produits lors de l'effondrement de l'étoile.

ont capté les photons les plus énergétiques jamais enregistrés et émis par deux sursauts gamma, notés GRB180720 et GRB190114, distants de 7 et 5,5 milliards d'années-lumière. Ces photons ont des énergies allant de 100 à près de 1 000 gigaélectronvolts. En outre, en analysant le spectre du rayonnement de ces sursauts gamma, les astrophysiciens confirment que la diffusion Compton inverse est bien à l'œuvre lors de ces explosions cosmiques. ■

S. B.

Collaboration *MAGIC*, *Nature*, vol. 575, pp. 455-458 et pp. 459-463, 2019 ; Collaboration *HESS*, *ibid.*, pp. 464-467

PLANÉTOLOGIE

EUROPE : UNE BANQUISE RÉVÉLATRICE

Dans la décennie à venir, les sondes spatiales *Juice* et *Europa Clipper* rendront visite à Europe, une lune de Jupiter. Ce satellite cache sous son épaisse surface de glace un océan d'eau liquide difficile à atteindre, mais qui abrite peut-être de la vie. Les sondes étudieront indirectement la composition de l'océan en analysant les éléments (provenant en particulier de l'activité hydrothermale du fond de l'océan) issus de celui-ci mais ayant migré à la surface en traversant la croûte glacée sur des temps géologiques. Alexis Bouquet, du laboratoire d'astrophysique de Marseille, et ses collègues viennent d'estimer les quantités de ces molécules, sous la forme de clathrates – des molécules « piégées » dans des cages formées de molécules

Europe dissimulerait, sous son épaisse croûte de glace, un océan liquide susceptible d'héberger la vie.

d'eau – qui remonteraient à la surface, en prenant en compte différents scénarios liés à l'activité hydrothermale interne. Ces données permettront d'éliminer les scénarios incompatibles avec les mesures des sondes. ■

L. G.

A. Bouquet *et al.*, *The Astrophysical Journal*, vol. 885(1), article 14, 2019

EN BREF

DES PIGEONS MUTILÉS PAR NOS DÉCHETS

En ville, nombreux sont les pigeons infirmes, aux pattes amputées ou avec des doigts manquants. Réfutant une légende urbaine selon laquelle ces oiseaux seraient malades, Frédéric Jiguet, du Centre d'écologie et des sciences de la conservation, à Paris, et ses collègues ont montré que cela serait plutôt dû à la pollution, notamment à des fils ou cheveux s'enroulant autour de leurs doigts jusqu'à former un garrot qui entraînerait leur nécrose. La faute, donc, aux humains.

Biol. Conserv., vol. 240, 108241, 2019

UN ENFER HOSTILE À TOUTE VIE

La vie est coriace et l'on pensait que, sur Terre, la présence d'eau liquide suffisait à son développement, même dans les conditions les plus extrêmes. Une croyance remise en cause par Judie Belilla, de l'université Paris-Sud, à Orsay, et ses collègues : certaines mares du site volcanique de Dallol, en Éthiopie, ne contiennent pas de vie. D'après les chercheurs, cela s'expliquerait par leur forte salinité, leur température (45 °C à l'ombre) et leur acidité (pH négatif).

Nat. Ecol. Evol., vol. 3, pp. 1552-1561, 2019

DES RHUMATISMES TRAHIS PAR LA CHALEUR

Détecter la polyarthrite rhumatoïde par simple imagerie thermique ? C'est ce que proposent Alfred Gatt, de l'université de Malte, et son équipe. Grâce à des clichés infrarouges des mains d'individus sains ou atteints de cette maladie inflammatoire chronique de façon asymptomatique, les chercheurs ont en effet montré que la peau des malades était plus chaude de deux ou trois degrés que celle des personnes saines, au niveau de la paume comme des doigts.

Sci. Rep., vol. 9, 17204, 2019

© Nasa/JPL-Caltech/SETI Institute ; © ESO/A. Roquette

BIOLOGIE ANIMALE

LA CHALEUR RAPETISSE LES OISEAUX

De nombreux effets du réchauffement climatique sur des plantes ou des animaux sont déjà connus, comme la modification de leur répartition géographique ou une floraison précoce. Mais l'étude conduite par l'équipe de Benjamin Winger, de l'université du Michigan, aux États-Unis, montre que la morphologie de certains oiseaux migrateurs est également influencée par la température. En mesurant les os de plus de 70 000 corps d'oiseaux de 52 espèces différentes, collectés durant quarante ans au pied d'immeubles de Chicago que ces derniers avaient heurtés, les chercheurs ont établi que leur taille était corrélée aux fluctuations de la température estivale moyenne : plus l'été était chaud, plus les oiseaux étaient petits. ■

L. G.

B. Weeks *et al.*, *Ecology Letters*, en ligne le 4 décembre 2019

NEUROSCIENCES

MARCHER RENFORCE LA VISION PÉRIPHÉRIQUE

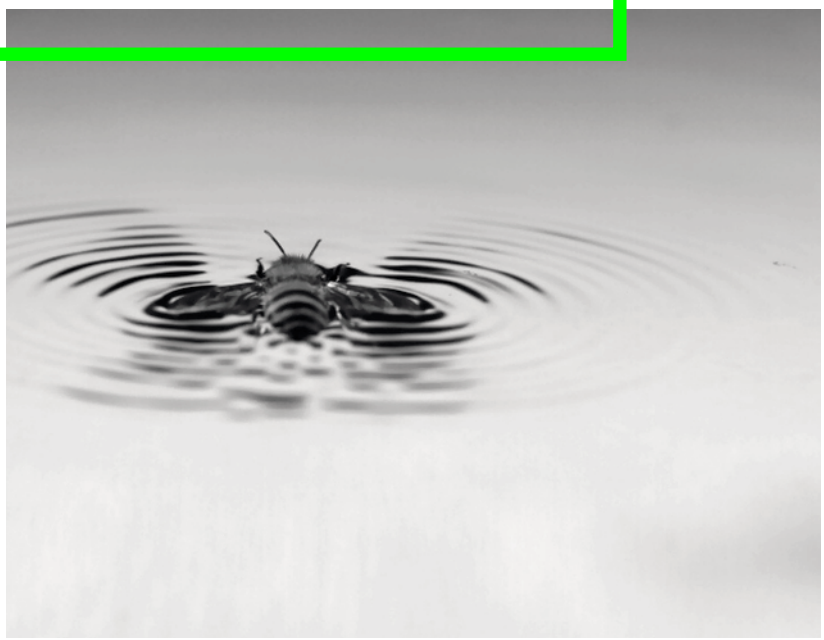
Voit-on mieux quand on est en mouvement ? Pour le savoir, Liyu Cao et Barbara Händel, de l'université de Würzburg, en Allemagne, ont étudié les effets de la marche sur la vision. Ils ont équipé 30 participants d'un casque mesurant les ondes cérébrales, d'un capteur enregistrant les mouvements oculaires et de lunettes vidéo projetant au centre de leur champ de vision une zone striée clignotante plus ou moins contrastée. Les participants devaient repérer l'apparition aléatoire d'une cible dans cette zone soit en restant immobiles soit en marchant dans une grande salle. Des données recueillies, les chercheurs ont déduit que marcher augmente le traitement des signaux provenant de la périphérie. ■

F. S.

L. Cao et B. Händel, *Plos Biol.*, vol. 17(10), article e3000511, 2019

BIOPHYSIQUE

LES ABEILLES, CHAMPIONNES DE LA GLISSE



© Chris Roh et Morv Gharib/Caltech

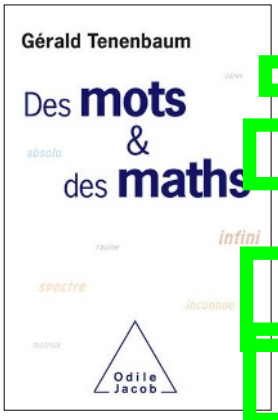
En battant des ailes, les abeilles créent à la surface de l'eau un motif de vagues présentant une symétrie latérale, mais avec une amplitude bien plus grande à l'arrière qu'à l'avant.

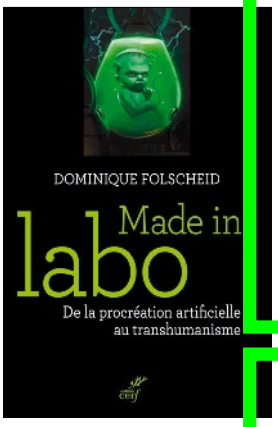
Peut-être avez-vous déjà, à la surface d'un lac, sauvé une abeille de la noyade en la transportant au sec à l'aide d'une brindille. En fait, elle s'en serait sûrement sortie toute seule ! Ces insectes savent en effet « surfer » sur l'eau en battant des ailes, pour rejoindre un rivage proche. Afin de comprendre ce mécanisme unique dans le règne animal, Chris Roh et Morteza Gharib, de Caltech (l'institut de technologie de Californie), aux États-Unis, ont analysé en détail, à l'aide d'une caméra ultrarapide, les mouvements d'ailes des abeilles et les perturbations engendrées à la surface de l'eau.

Les chercheurs ont constaté que les insectes, sur l'eau, avancent en ligne droite à quelques centimètres par seconde. Pour atteindre cette vitesse, l'abeille agite ses ailes et donne naissance, à la surface de l'eau, à des motifs de vagues, dont Chris Roh et Morteza Gharib ont étudié l'amplitude et la forme. Les vagues sont bien plus grandes derrière l'abeille que devant elle, ce qui suggère que l'insecte, en transférant de la quantité de mouvement vers l'arrière sous forme de vagues, crée une force de poussée qui lui permet d'avancer, tel un nageur ramenant l'eau vers l'arrière pour progresser. Pour s'en assurer, les chercheurs ont calculé d'une part la poussée nécessaire à l'abeille pour avancer et, d'autre part, l'intensité de la force appliquée par l'abeille sur le fluide – et donc par le fluide sur l'abeille, par principe d'action-réaction. Les deux valeurs étaient du même ordre de grandeur : quelques dizaines de micronewtons, ce qui confirme que c'est bien en créant des vagues que les abeilles avancent. ■

L. G.

C. Roh et M. Gharib, *PNAS*, article 1908857116, 2019





MATHÉMATIQUES

DES MOTS ET DES MATHS
Gérald Tenenbaum
Odile Jacob, 2019
216 pages, 21,90 euros

Ce livre est un voyage initiatique à travers trente mots des mathématiques, tout comme la Carte du Tendre est un itinéraire langagier de la progression amoureuse.

L'auteur, mathématicien, retrace la dynamique du praticien qui découvre, explore et interprète les richesses de la pensée sous-tendues par les termes mathématiques. Il relie un mot à d'autres objets mathématiques par des analogies ou des dualités (comme le zéro et l'infini). L'ouvrage évoque les mots de la discipline et non leur étymologie, à travers une vision personnelle, donc originale et souvent philosophique (merci, entre autres, à Bergson et Descartes). Le ressenti du mathématicien devant un obstacle symbolisé par la nouvelle définition d'une structure est assimilé au sentiment du poète confronté à une difficulté, souligné par le romancier suisse Ferdinand Ramuz: «On va, on va longtemps avec les yeux contre cette côte; elle est si élevée que, pour arriver jusqu'en haut, il faut renverser fortement la tête en arrière.» Le mathématicien est aussi un prince des nuées.

Les choses n'existent dans notre pensée que lorsqu'elles sont nommées, mais ici, les mots se détachent de leur primalité pour mener une existence scientifique propre: Gérald Tenenbaum dévoile les visions qu'un praticien des mathématiques et de leur vocabulaire a, à travers certaines subtilités des théories que les définitions sous-tendent. Ce n'est pas une lecture, c'est un ravissement.

PHILIPPE BOULANGER
FONDATEUR DE *POUR LA SCIENCE*

BIOLOGIE

LES GOÛTS ET LES COULEURS DU MONDE
Marc-André Selosse
Actes Sud, 2019
352 pages, 24 euros

Disons-le d'emblée: j'aime ce livre parce qu'il participe du naturalisme moderne, qui ne s'arrête pas à l'observation de phénomènes biologiques passionnants, mais évoque aussi la chimie qui les sous-tend. Les composés que discute l'auteur – les composés phénoliques – sont fascinants, et nous sommes conviés à explorer, à leur propos, les relations complexes entre biologie et chimie.

Dans la classe de composés considérés, il y a notamment les «tanins», ces produits utilisés traditionnellement pour tanner les peaux. Voulez-vous les connaître mieux? Faites bouillir de l'eau et déposez-y des morceaux d'écorce (de chêne, par exemple). Vous obtiendrez une solution terriblement astringente, qui formera de l'encre si vous y ajoutez un clou rouillé. Ou bien infusez trop longtemps du thé. Ou encore, prenez simplement en bouche une gorgée de vin réputé tanique. Mâchez-la, puis recrachez. Vous observerez alors les protéines salivaires précipitées par les tanins.

Souvent, on parle de tanins par abus: on devrait plutôt parler de phénols, c'est-à-dire de composés comportant au moins un groupe aromatique (un cycle de six atomes de carbone) et un groupe hydroxyle (OH). À la mode dans l'alimentation, les «polyphénols» en sont une sous-classe, dont les tanins sont à leur tour une sous-classe: ceux qui tannent, pour dire les choses simplement.

Les composés phénoliques sont partout dans les tissus vivants: ils sont les pigments de fleurs ou des fruits, ils sont responsables du brunissement des fruits et légumes que l'on coupe, mais, comme le montre avec brio le biologiste et botaniste Marc-André Selosse, leur observation, voire leur dégustation, ne doit pas faire oublier leurs fonctions biologiques et, notamment, un rôle de protection des plantes contre les agresseurs, entre autres!

HERVÉ THIS
INRA

BIOÉTHIQUE

MADE IN LABO
Dominique Folscheid
Le Cerf, 2019
512 pages, 24 euros

Alliés aux bébés-éprouvette, les récents progrès de la génétique amènent à poser de graves questions pour le devenir de l'humanité. L'auteur, codirecteur du département d'éthique biomédicale du collège des Bernardins à Paris, consacre la plus grande partie de ce livre à les discuter dans le détail.

L'humanité peut-elle s'abstraire des contraintes issues de l'évolution pour produire un être nouveau? Un être capable de se fabriquer lui-même et de se doter de potentialités nouvelles de santé et de longévité? Clairement, cette démarche impliquerait des risques graves d'erreurs et de bévues, comme on l'a vu pour d'autres technologies. L'idée biologiquement délirante d'«homme éternel» mise à part, peut-on passer de l'humanité à une «transhumanité», comme le formulent certains excités du tout-technologique?

Bien sûr, dans ces domaines, on ne peut que conseiller une extrême prudence, mais cela ne suffit pas, car l'essentiel est ailleurs. L'auteur démontre, avec justesse, que ces questions sont mal posées. Les problèmes essentiels ne sont pas fondamentalement techniques: ils sont éthiques, comme en témoigne, entre autres, la difficulté à supprimer la violence, les guerres, les meurtres et les atrocités. Modifier la «machinerie» de l'organisme, améliorer les performances humaines n'auront «qu'un rôle marginal et périphérique» et n'amèneront pas un homme meilleur. La question essentielle n'est donc pas «comment doivent être les hommes du futur?», mais «que doivent-ils faire?» Face aux fréquents délires des chantres du transhumanisme, il faut absolument lire Dominique Folscheid et, avec lui, retrouver simplement... le bon sens.

GEORGES CHAPOUTHIER
NEUROBIOLOGISTE ÉMÉRITE AU CNRS

NUTRITION

MUTATIONS ALIMENTAIRES AU LAOS
Florence Strigler
Karthala-CCL, 2019
230 pages, 25 euros

Salade de papaye ou pizza? L'autrice a enquêté plus de vingt ans sur le terrain au Laos afin de présenter, à travers le cas de ce pays d'Asie du Sud-Est, un aperçu de la transition alimentaire mondiale actuelle. Petit pays peu peuplé au regard de ses puissants voisins, le Laos se développe depuis peu sous l'impulsion de la mondialisation des échanges et avec l'arrivée de nouveaux modèles culturels, qui ont en particulier produit une classe moyenne urbanisée, solvable et connectée. En quelques années, l'évolution de la production agricole, l'apparition de nouveaux aliments et la transformation des circuits de distribution favorisés par l'État ont changé le comportement alimentaire des Laotiens et ébranlé la société rurale traditionnelle.

Familière de ce pays dont elle a pu suivre l'évolution de l'intérieur, l'autrice allie ses compétences d'ingénieure en nutrition, d'anthropologue et de narratrice talentueuse pour nous faire partager la transformation des représentations sociales qui déroule des mutations touchant tous les maillons de la chaîne alimentaire. Elle montre les interactions du comportement alimentaire avec les rapports familiaux, l'éducation, la santé et le développement économique.

En mettant le doigt sur l'ambivalence des Laotiens, partagés entre aspiration à la modernité dans l'espoir légitime d'un progrès social et perte d'identité, ce livre est précieux pour comprendre les mutations en cours dans les pays émergents face à la mondialisation.

BERNARD SCHMITT
CERNH, ORIENT

ET AUSSI

LES DEUX SAISONS DE L'ISLANDE
Arnaud Guérin
Glénat, 2019
160 pages, 39,50 euros

Un pays, deux saisons. Un auteur photographe et géologue. Chacune de ses somptueuses images de l'Islande est l'occasion d'un conte [illegible], sortant manifestement du vécu. La moitié des histoires contées portent sur l'été, saison de la liberté, et l'autre moitié sur l'hiver, saison de la nuit. Un livre aussi instructif que beau, qui est à lui seul un voyage en Islande ou le moyen idéal d'en préparer un.

SCIENCES. BÂTIR DE NOUVEAUX MONDES
Denis Guthleben (dir.)
Éditions du CNRS, 2019
224 pages, 24 euros

Le CNRS a 80 ans, et en voici le livre anniversaire. Avec aujourd'hui plus de 11 000 chercheurs, plus de 15 000 ingénieurs et techniciens, plus de 7 000 contractuels, le CNRS est un des fleurons de la recherche française, présent dans tous les domaines de la science. Mathématiques, transition énergétique, chimie verte, tectonique, théorie de l'évolution, particules, cosmos, matériaux, neurosciences, informatique, changement climatique, océan, économie... En plus de 20 thèmes et 100 splendides images, ce beau livre, coécrit par plus de 80 experts, nous décrit l'incroyable richesse du CNRS. À ne pas manquer.

QUAND LA MACHINE APPREND
Yann Le Cun
Odile Jacob, 2019
400 pages, 22,90 euros

Ingénieur français, directeur de la recherche fondamentale de Facebook, professeur à l'université de New York et lauréat du prix Turing [illegible], l'auteur est le co-inventeur de l'apprentissage profond, un ensemble de méthodes mises en œuvre en intelligence artificielle (IA) pour donner aux ordinateurs la capacité d'apprendre à partir de données. De telles méthodes sont de plus en plus ubiquitaires au sein des machines qui modulent notre vie quotidienne. Son texte mêle vie personnelle et discussions sur, entre autres, la révolution de l'IA, les machines apprenantes et les diverses formes d'apprentissage profond. Un passionnant livre de convaincu.

NÎMES

DU 20 DÉCEMBRE 2019 AU 8 MARS 2020
Musée de la Romanité
www.[illegible]

Bâtir un empire

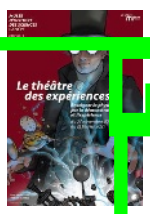
© Fonds Iconem – DOA – MAFL

L'Empire romain, qui s'est étendu sur tout le [illegible] populations qui différaient par leurs langues, leurs coutumes, leurs divinités, leurs systèmes juridiques… En dépit de cette diversité, l'architecture des cités romaines présente-t-elle un modèle unifié? Cette exposition veut montrer que oui, malgré les adaptations des civilisations locales. Pour ce faire, elle fait voyager virtuellement le visiteur dans des sites archéologiques tels que Palmyre, en Syrie, Aphrodisias, en Turquie, Leptis Magna, en Libye, Pompéi, en Italie… Monuments méconnus et célébrités du patrimoine mondial s'offrent au public par le biais de projections spectaculaires, grâce aux relevés numériques en 3D réalisés par la société Iconem. Une exploration entièrement numérique et immersive, avec découvertes récentes et témoignages d'auteurs de l'Antiquité. ■

GENÈVE (SUISSE)

JUSQU'AU 21 FÉVRIER 2020
Musée d'histoire des sciences
www.[illegible]

Le théâtre des expériences



Le Genevois Marc-Auguste [illegible] s'évertuait à enseigner la physique par la démonstration et l'expérience. Les instruments qu'il a acquis à cette fin sont au cœur de l'exposition, qui présente aussi des répliques et dispositifs interactifs inspirés des démonstrations classiques de physique. ■

FRANCE ET AILLEURS

JEUDI 30 JANVIER 2020
Lieux divers
www.[illegible].com

La Nuit des idées

Cette cinquième édition [illegible], pilotée par l'Institut français, a pour thème « Être vivant ». En France et dans plus de 80 pays, chercheurs, lanceurs d'alerte, artistes et autres personnalités débattront avec le public de la question des équilibres écologiques et de la relation de l'homme au monde. ■

ET AUSSI

Jeudi 9 janvier, 18 h
Campus Joseph Aiguier, Marseille
provence-corse.cnrs.fr

LE DÉFI DES « FAKE NEWS »
Dans le cadre des « Jeudis du CNRS », Marc Bassoni, maître de conférences à Aix-Marseille Université, propose un état des lieux et un diagnostic de ce que recouvre l'expression *fake news*.

Jeudi 16 janvier, 19 h
[illegible] et de l'Industrie, Paris
www.cite-sciences.fr
Tél. 01 40 05 70 22

QUE DISENT LES OISEAUX ?
Sébastien Derégnaucourt, éthologue à l'université Paris-Nanterre, explique jusqu'à quel point les sifflements, chants et gazouillis nous renseignent sur ce que les oiseaux pensent et ressentent.

Jeudi 23 janvier, 12 h 30
[illegible], Toulouse
www.univ-tlse3.fr
Tél. 05 61 55 62 63

L'INTELLIGENCE DES PLANTES
Frédérik Garcia, chercheur à l'Inra, décrit les adaptations des végétaux qui s'apparentent à des capacités cognitives, apanage du monde animal, et interroge la notion d'intelligence.

Lundi 27 janvier, 18 h 30
[illegible], Neuchâtel (Suisse)
museum-neuchatel.ch
Tél. +41 (0)32 718 3[illegible]00

HISTOIRE DES REQUINS
Une conférence sur ces animaux qui constituent un groupe frère de celui des raies et dont les premiers sont apparus il y a quelque 400 millions d'années.

Mercredi 29 janvier, 14 h
[illegible]
https://[illegible]

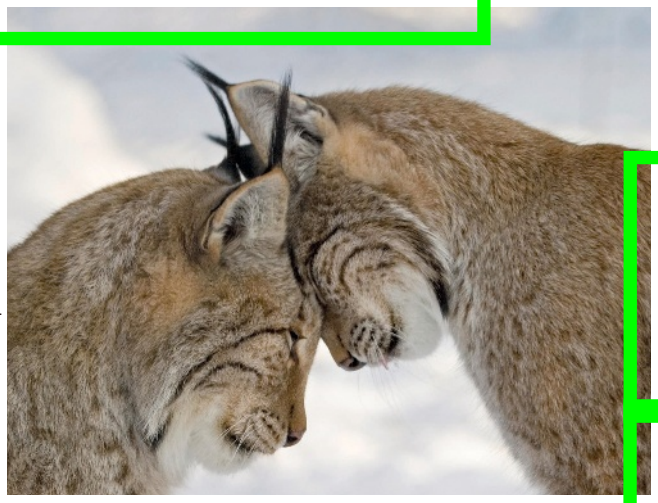
LES MÉTÉORITES
Une conférence de Brigitte Zanda, spécialiste des corps célestes au Muséum national d'histoire naturelle.

En bas à gauche : © Cédric Marendaz / / Muséum Genève ; en bas à droite : © www.lanuitdesidees.com

GRENOBLE

DU 14 DÉCEMBRE 2019 AU 20 SEPTEMBRE 2020
Orangerie du Muséum de Grenoble
www.museum-grenoble.fr

Fascinants félins

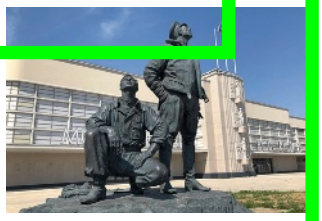


© Christian Heinrich / Biosphoto

Lion, tigre, panthère, jaguar, mais aussi caracal, ocelot, margay, [illegible] l'huit 28 espèces, dont beaucoup sont menacées. L'exposition présente ces animaux qui émerveillent nombre d'entre nous par leur beauté, leurs capacités et leur comportement. Le visiteur pourra admirer des spécimens de la riche collection du Muséum de Grenoble, complétés par des prêts d'autres musées, et apprendra par exemple les différences entre les félidés et les autres familles de carnivores, ou celles qui distinguent la sous-famille des panthères de la sous-famille des chats. ■

AÉROPORT LE BOURGET

EXPOSITION PERMANENTE
Musée de l'Air et de l'Espace
www.museeair-espace.fr



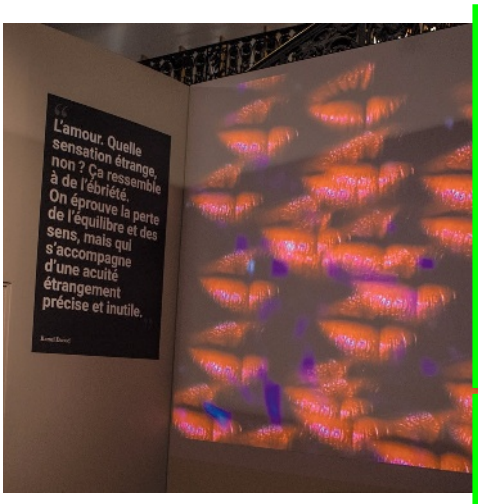
La Grande Galerie du MAE

Après cinq années de travaux de rénovation, le musée de l'Air et de l'Espace, situé sur un lieu historique de l'aviation, rouvre sa Grande Galerie, un bel édifice art déco de 4000 mètres carrés. Y sont exposées plus de 400 pièces dans une scénographie renouvelée, qui racontent les débuts de l'aviation ainsi que son rôle dans la Grande Guerre. À cette galerie s'ajoutent huit autres salles et des espaces extérieurs, dédiés à la conquête de l'air et de l'espace. ■

PARIS

JUSQU'AU 30 AOÛT 2020
Palais de la Découverte
www.palais-decouverte.fr

De l'amour



En haut : © Musée de l'Air et de l'Espace/Jean-Philippe Lemaire - en bas : © N. Breton

Sentiment complexe et multiforme, l'amour dévoile quelques-unes de ses facettes dans une exposition elle aussi multiforme. La « galerie des attachements » propose une vingtaine de saynètes qui illustrent les diverses formes d'attachement au travers de séries d'objets, de dioramas, d'images, de sons, de poèmes, de citations. Le visiteur y découvrira par exemple une collection de doudous, des contes de pays lointains, un diorama présentant le concept de cristallisation dû à Stendhal… Dans l'autre espace, la « galerie des sciences », on est davantage dans le registre de l'explication. La théorie de l'attachement, les amours en ligne, le rôle de l'ocytocine et d'autres molécules, la part culturelle de la sexualité et de l'érotisme ainsi que d'autres thèmes font l'objet de films, de documents multimédias, de jeux. De quoi mieux cerner ce qu'est l'amour, même si la science bute encore sur des mystères. ■

SORTIES DE TERRAIN

Dimanche 5 janvier, 9 h
Fontenay-le-Vicomte (Essonne)
montauger.essonne.fr
Tél. 01 60 91 97 34
MARAIS EN HIVER
Trois heures de promenade pour connaître le rôle de ces zones humides et identifier les oiseaux qui y séjournent durant l'hiver.

Mercredi 8 janvier, 14 h
Parc de la Tête d'Or, Lyon
Tél. 04 72 69 47 70
JARDIN BOTANIQUE DE LYON
Une visite guidée de ce jardin, pendant une heure et demie, pour découvrir des plantes du monde entier, poussant en forêt tropicale, en forêt sèche, dans des massifs montagneux…

Dimanche 12 janvier, 10 h
Saint-Hilaire (Aude)
Tél. 02 33 71 65 30
LA RÉSERVE DE BEAUGUILLOT
Dans le Contentin, au cœur de la baie des Veys, cette réserve accueille chaque hiver des milliers d'oiseaux d'eau. Découverte en compagnie d'un agent de la réserve.

Samedi 25 janvier, 14 h
Montpellier
www.euziere.org
Tél. 04 67 59 54 62
NATURE EN VILLE
Au carrefour de l'histoire, de la botanique et de l'écologie, une visite guidée du cœur historique du Jardin des Plantes de Montpellier, consacré depuis 400 ans aux plantes sauvages et méditerranéennes.

Samedi 25 janvier, 14 h
Gothar
www.observatoirenature.fr
Tél. 03 89 20 38 90
OISEAUX DU NEULAND
Une après-midi d'initiation à l'ornithologie et de participation à l'inventaire des oiseaux de la belle forêt du Neuland.

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

STOCKER SUR LA DURÉE, UN DÉFI !

Nous conservons beaucoup d'information. Mais comment s'assurer qu'elle sera exploitable dans 20, 50 ou 100 ans ?

La disparition des lecteurs de disquettes et des logiciels de l'époque rend difficile la récupération des informations stockées sur ces supports.

Les ordinateurs ont été inventés pour effectuer des calculs, c'est-à-dire pour transformer de l'information. Mais nous les utilisons aussi, et peut-être surtout, pour communiquer et conserver cette information, c'est-à-dire pour la faire voyager dans l'espace et dans le temps.

L'information est fragile. Elle peut être définitivement détruite lors d'un incendie, d'une inondation, etc., qui endommagent les ordinateurs et les disques sur lesquels elle est stockée. C'est pourquoi nous la dupliquons, parfois sur des ordinateurs situés à plusieurs centaines de kilomètres, afin qu'elle ne disparaisse pas, même si la ville entière est engloutie.

Conserver cette information sur une longue durée demande de plus une attention constante. Par exemple, les programmes développés par les informaticiens constituent une part de notre patrimoine culturel, mais ils disparaissent souvent dès qu'ils ne sont plus utilisés, car plus personne ne s'en préoccupe. C'est pourquoi des structures destinées à les conserver, tel *Software heritage* (un projet soutenu par l'Unesco), afin que nous puissions, dans le futur, y accéder.

Si nous voulons, en outre, les utiliser, c'est-à-dire les compiler et les exécuter, nous devons conserver non seulement le programme lui-même, mais aussi le compilateur du langage dans lequel il a été écrit et le système d'exploitation permettant de faire fonctionner ce compilateur. Ces programmes ont souvent existé dans plusieurs versions successives et nous devons les sauvegarder toutes, car ces différentes versions sont rarement compatibles. Enfin, nous devons aussi conserver le modèle d'ordinateur sur lequel le système d'exploitation fonctionne, de même que si nous décidons de préserver des bandes magnétiques, nous devons aussi conserver un magnétophone pour les écouter. Certains, telle l'Association pour un conservatoire de l'informatique et de la télématique, en France, et le National museum of computing, au Royaume-Uni, cherchent à conserver des ordinateurs anciens en état de marche, parce qu'ils font eux-mêmes partie de notre patrimoine et parce qu'ils permettent d'exécuter de vieux programmes. D'autres cherchent plutôt à construire des simulateurs logiciels de ces ordinateurs, ce qui permet d'utiliser des programmes anciens sans avoir besoin de réparer des machines, qui tombent souvent en panne et dont les composants ne sont plus disponibles.

> **Conserver de l'information sur une longue durée demande une attention constante**

Conserver de l'information sur une longue durée est donc possible, mais cela demande beaucoup de travail et d'argent : il ne suffit pas d'avoir gardé ses vieilles disquettes dans un grenier pour pouvoir réaccéder à ses fichiers *Lotus 1-2-3* trente ans plus tard. De même, les bibliothèques œuvrent passionnément et dépensent beaucoup d'argent pour que nous puissions lire, aujourd'hui, des manuscrits médiévaux et même les journaux du siècle dernier.

Comme dans le cas de la conservation des textes imprimés, nous devons, pour finir, nous demander si nous voulons tout garder ou alors uniquement ce que nous considérons aujourd'hui comme important. L'histoire nous montre que décider aujourd'hui ce qui sera important demain est parfois périlleux : à la fin du Moyen Âge, un moine copiste a gratté un parchemin afin de le réutiliser (le parchemin étant à cette époque rare et cher). Le texte partiellement effacé s'est révélé être l'unique copie d'un texte d'Archimède qui anticipait de deux millénaires les bases du calcul intégral. La restauration de ce texte, commencée en 1999, n'a été achevée qu'en 2008.

Il vaut parfois mieux s'abstenir de choisir et conserver tout ce qui peut l'être. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et enseignant à l'École polytechnique.

© Shutterstock.com/aaekung

espions

exposition
15 octobre 2019
— 9 août 2020

cité sciences et industrie

en coproduction avec
LE BUREAU DES LÉGENDES

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION

MINISTÈRE DE LA CULTURE

RÉSERVATION RECOMMANDÉE
cite-sciences.fr
#ExpoEspions
M> Porte de la Villette

En coproduction avec
TOE The Oligarchs Editions

En partenariat avec

Avec
CANAL+ CNEWS Le Point Le Parisien PHOSPHORE POUR LA SCIENCE Qwant Europe 1

Avec l'appui scientifique
cea

Tracfin

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

UNE ASSIETTE SANS FOIE NI LOI

Le contenu de notre assiette reflète nos croyances, [illegible] etc. Autant de fronts où la défiance sociale guette.

La cuisine est-elle une affaire d'État ? La municipalité de New York vient d'interdire la commercialisation et la dégustation du foie gras à compter de 2022, sous la pression de militants de la cause animale opposés au gavage des oies et des canards. Elle rejoint la décision de la Cour suprême des États-Unis validant l'interdiction du foie gras en Californie. L'intervention du régulateur public dans les préoccupations gastronomiques résulte donc d'un rapport de force. Elle peine à faire consensus dans la population, tant les pratiques alimentaires échappent au cartésianisme.

Enjeu de morale publique, le rapport entre État et nourriture interroge la place de l'espèce humaine dans le monde vivant. On le voit avec la montée en puissance de mouvements s'opposant à la consommation de produits animaux ou avec les revendications antispécistes radicales, qui vont jusqu'à exiger le respect de la vie des moustiques. La confiance collective est loin d'être acquise, puisque la façon dont nous nous nourrissons renvoie à notre rapport à la nature et à la façon dont nous envisageons la cohésion sociale.

Être végétarien devient un acte politique qui invite à relativiser la place de l'homme au sein des espèces animales. Quand elle est couplée à une vision idyllique de la nature sauvage, la consommation de pâtés végétaux, substituts du foie gras, fait de nous des écologistes. Mais la nourriture ne constitue pas seulement un marqueur identitaire, régional ou religieux. Elle [illegible] aussi, à travers la production des aliments, à la force des communautés nationales.

> **La cuisine et les manières de table ne relèvent pas que de la sphère privée**

Là encore, le foie gras, symbole [illegible] de la gastronomie française, l'illustre. Quand le salon Anuga, à Cologne, qui ferme sa porte en 2011, c'est Bruno Maire, alors ministre de l'Agriculture, qui menace de boycotter l'inauguration de cette foire alimentaire internationale. Sur un plan diplomatique, la mise à l'écart du foie gras constitue un désaveu de l'État français, premier producteur du monde de cette spécialité.

À la production alimentaire sont associées d'autres lignes de défiance, comme l'importance de la grande distribution dans la consommation de masse, régulièrement montrée du doigt, ou la montée en puissance des enjeux de santé – alors que, paradoxalement, la qualité sanitaire des aliments produits n'a jamais été aussi bonne.

Par ailleurs, comme l'a montré le sociologue allemand Norbert Elias, les procédés culinaires et les manières de table sont loin d'être du seul ressort de la sphère privée. Ainsi, la présentation occidentale des plats les uns après les autres, censée refléter la combinaison optimale des saveurs et souligner l'originalité de la préparation, contraste avec la cuisine orientale, où chacun mélange les plats à sa guise. Les mets orientaux, simultanément offerts au regard, s'appuient sur des recettes connues et laissent peu de place à l'imprévu.

De telles différences culturelles dans les repas partagés, qu'il s'agisse de cérémonies familiales ou d'agapes républicaines, éclairent la structure de l'économie d'un État et les manières dont il se constitue en communauté politique. Ainsi, les banquets publics sont l'expression la plus nette du rituel de représentation politique, où les disparités sociales sont symboliquement gommées.

Faut-il en déduire qu'un repas n'est consacré qu'une fois les passions collectives maîtrisées ? À moins qu'il n'en soit le déclencheur, comme le rappelle le film italien *Amore*, où la femme d'un riche industriel milanais, enfermée dans son sens du devoir, sort du sommeil des sens après avoir goûté les mets préparés par un jeune cuisinier surdoué… Joyeuses fêtes de fin d'année ! ■

VIRGINIE TOURNAY biologiste de formation,

© Matyo

LES MARDIS DE LA PHILO

LES ÉCRANS DE PARIS

LES MARDIS DE LA PHILO & LES ÉCRANS DE PARIS PRÉSENTENT

LES MATINÉES DE LA SCIENCE

RENDEZ-VOUS MENSUEL AVEC UN CHERCHEUR ET UN PHILOSOPHE, AUTOUR DES DERNIÈRES DÉCOUVERTES SCIENTIFIQUES ET DE LEUR IMPACT SOCIÉTAL

EN PRÉSENCE EXCEPTIONNELLE DE

CLAUDIE HAIGNERÉ
LUC JULIA
PASCALE COSSART
BERNARD BOULLIS
VINCENT COLOT
ETIENNE BRIÈRE
ETIENNE KLEIN
LAURENCE DEVILLAIRS
JEAN-MICHEL BESNIER
FRANÇOIS EUVÉ

20 NOVEMBRE À 10H
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET OBJETS CONNECTÉS
AVEC LUC JULIA & FRANÇOIS EUVÉ

11 DÉCEMBRE À 10H
ÉNERGIES RENOUVELABLES
AVEC ÉTIENNE BRIÈRE

15 JANVIER À 10H
LE TRAITEMENT DES DÉCHETS NUCLÉAIRES
AVEC BERNARD BOULLIS ET FRANÇOIS LEVÊQUE

27 FÉVRIER À 10H
RECHERCHE SPATIALE : PROJET EUROPÉEN POUR L'EXPLORATION LUNAIRE
AVEC CLAUDIE HAIGNERÉ & ETIENNE KLEIN

25 MARS À 10H
MICROBIOLOGIE ET SANTÉ : LE RÔLE DES MICROBES
AVEC PASCALE COSSART & LAURENCE DEVILLAIRS

23 AVRIL À 10H
ÉPIGÉNÉTIQUE
AVEC VINCENT COLOT & JEAN-MICHEL BESNIER

CINÉMA L'ARLEQUIN : 76 RUE DE RENNES, 75006 PARIS
LESMATINEESDELASCIENCE.COM | LESECRANSDEPARIS.FR

POUR LA SCIENCE

L'ESSENTIEL

> Les cristaux sont des états ordonnés de la matière, où les atomes se disposent selon des motifs qui se répètent dans l'espace. Dans le langage de la physique, ils se caractérisent par une brisure spontanée de symétrie spatiale.

> Des états de la matière dont les motifs se répètent dans le temps, plutôt que dans l'espace, ne semblent pas être une idée nouvelle. Cependant, s'ils mettent en jeu une brisure spontanée de la symétrie temporelle, ce sont des cristaux temporels, un concept nouveau.

> Imaginés en 2012, des cristaux temporels ont été réalisés en laboratoire en 2017. Ces matériaux sont une piste pour concevoir des horloges ultraprécises.

L'AUTEUR

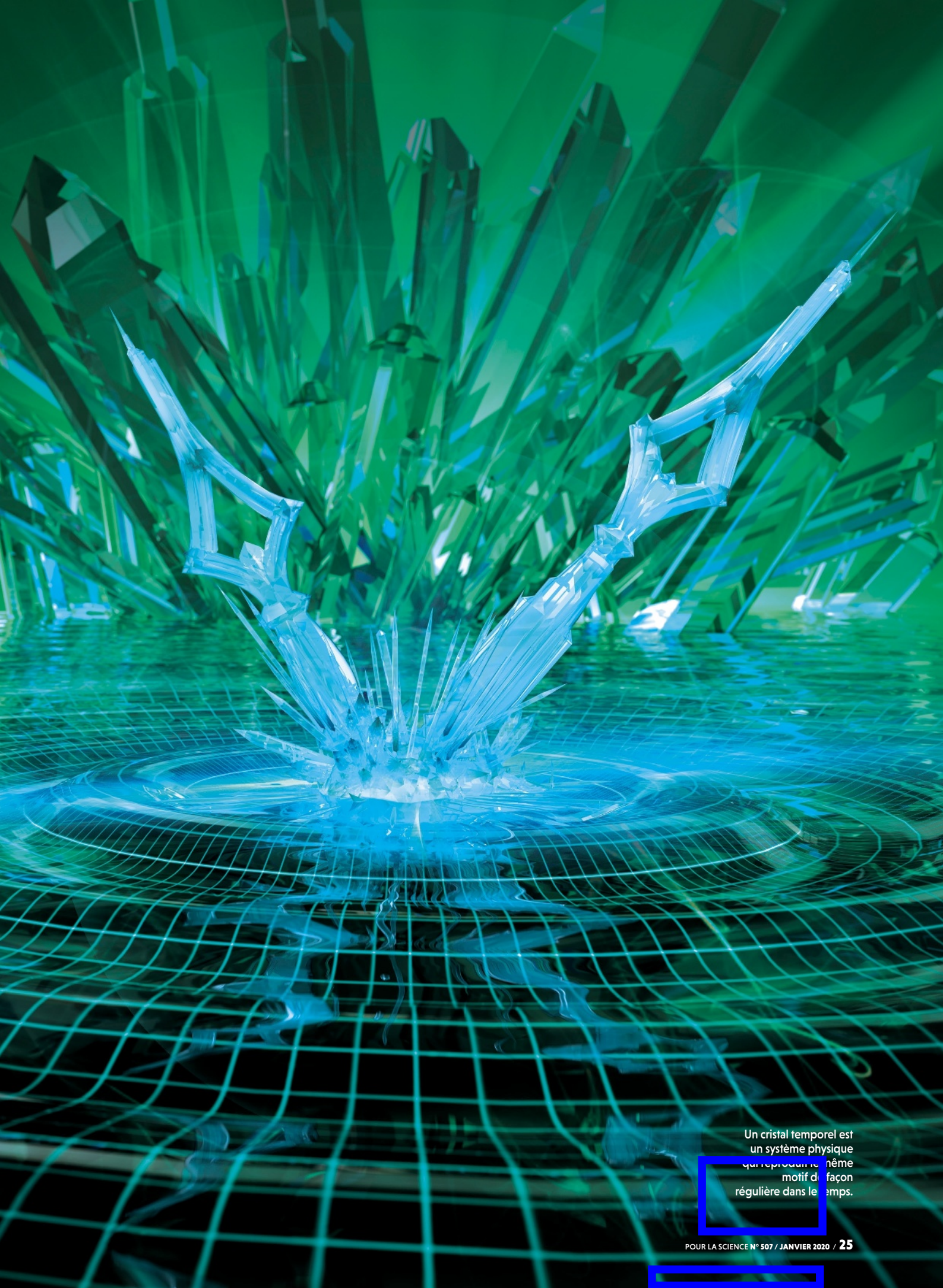
FRANK WILCZEK
physicien théoricien au MIT, aux États-Unis, et lauréat du prix Nobel de physique en 2004 pour ses travaux sur la théorie de l'interaction forte

À l'heure des cristaux temporels

En imaginant des cristaux présentant un motif répété dans le temps plutôt que dans l'espace, les physiciens créent de nouveaux états de la matière aux propriétés surprenantes. Une piste pour concevoir des horloges ultraprécises.

Depuis longtemps, l'homme est fasciné par l'aspect esthétique des cristaux, et notamment des pierres précieuses. À partir du XIXe siècle, les scientifiques ont commencé à classer les différentes formes de cristaux, qui sont les matériaux les plus ordonnés de la nature : en leur sein, atomes et molécules sont arrangés selon des structures qui se répètent dans l'espace de façon régulière. Il en résulte des solides stables, rigides, aux propriétés électriques, optiques, etc., souvent intéressantes. Ces travaux ont suscité des progrès importants en mathématiques et en physique. Par exemple, au XXe siècle, l'étude du comportement quantique des électrons dans les cristaux a directement conduit à la découverte des semi-conducteurs et au développement de l'électronique moderne, omniprésente dans nos smartphones et nos ordinateurs. >

© Mark Ross Studio



Un cristal temporel est un système physique qui reproduit le même motif de façon régulière dans le temps.

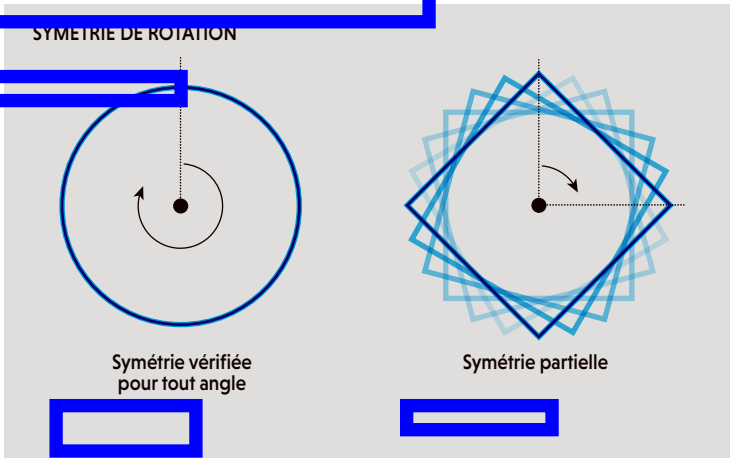
> Depuis quelques années, une nouvelle facette des cristaux se dessine. Elle prend sa source dans les principes de la théorie de la relativité d'Albert Einstein : l'espace et le temps sont intimement liés et, au bout du compte, sont à considérer sur un pied d'égalité. Il est donc naturel de se demander si certains objets présentent des propriétés temporelles qui seraient analogues à celles des cristaux ordinaires habituellement définis dans l'espace. En explorant cette question, les physiciens ont découvert les « cristaux temporels ». Ce concept inédit, qui a donné naissance à toute une classe de matériaux nouveaux, a livré des éclairages passionnants sur la physique. Il offre aussi des perspectives d'applications innovantes, en particulier des horloges plus précises que toutes celles qui existent actuellement.

UNE QUESTION DE SYMÉTRIE

Avant d'expliquer en détail cette idée récente, je dois clarifier ce qu'on entend exactement par le terme de cristal. La définition la plus utile à des fins scientifiques fait intervenir deux notions fondamentales : la symétrie et la brisure spontanée de symétrie.

Dans le langage courant, le terme de « symétrie » est utilisé dans de nombreuses situations et véhicule une idée d'équilibre, d'harmonie ou même de justice. En physique et en mathématiques, sa définition est plus précise. On dit qu'un objet est symétrique ou possède une symétrie s'il existe des transformations qui, quand on les applique à cet objet, conduisent à un résultat identique à la situation initiale.

Pour illustrer cette définition, prenons l'exemple du cercle. Quand on fait tourner un cercle autour de son centre, d'un angle quelconque, il reste visuellement identique, même si chaque point du cercle s'est déplacé : la figure géométrique possède une symétrie de rotation. Un carré présente aussi des symétries de rotation, mais pas autant qu'un cercle, car il faut faire tourner le carré de 90 degrés pour qu'il retrouve son apparence de départ.



Le concept de symétrie est généralisable. Il est possible d'adapter l'idée de telle sorte qu'elle s'applique aux lois de la physique. Nous disons qu'une loi est symétrique si nous pouvons changer le contexte dans lequel elle s'applique sans changer la loi elle-même. Par exemple, l'axiome fondamental de la relativité restreinte est que les mêmes lois physiques s'appliquent dans deux référentiels différents qui se déplacent à vitesse constante (en grandeur et en direction) l'un par rapport à l'autre. Ainsi, la relativité exige que les équations qui décrivent les lois de la physique doivent être inchangées quand on applique certaines transformations représentant un tel changement de référentiel.

Une classe différente de transformations est importante pour les cristaux, y compris les cristaux temporels. Ce sont des transformations très simples et néanmoins d'une importance capitale : les « translations ». La symétrie de translation garantit que les lois physiques s'appliquent de la même façon en deux endroits différents. Si vous déménagez (ou « translatez ») votre laboratoire d'une ville à une autre, vous constaterez que les mêmes lois sont encore valables au nouvel emplacement. En d'autres termes, la symétrie de translation spatiale affirme que les lois que nous découvrons quelque part s'appliquent partout à l'identique.

La symétrie de translation temporelle exprime une idée similaire, l'espace étant remplacé par le temps. Elle dit que les mêmes lois qui nous gouvernent maintenant s'appliquent aussi aux observateurs dans le passé et dans le futur. En d'autres termes, les lois que nous découvrons à un moment s'appliquent tout le temps. Étant donné son importance majeure dans ce récit, je noterai τ (la lettre grecque « tau ») la symétrie de translation temporelle.

Sans symétrie de translation spatiale et temporelle, les expériences réalisées en des lieux différents ou à des moments différents ne seraient pas reproductibles. La science telle que nous la connaissons serait alors impensable. Jusqu'à présent, toutes les observations indiquent que les règles de la physique valides ici et maintenant sont les mêmes que celles qui régissent des galaxies lointaines, situées aux confins de l'Univers et vues par nous telles qu'elles étaient dans un passé reculé. Il est donc raisonnable d'admettre la validité de ces symétries.

BRISURE DE SYMÉTRIE

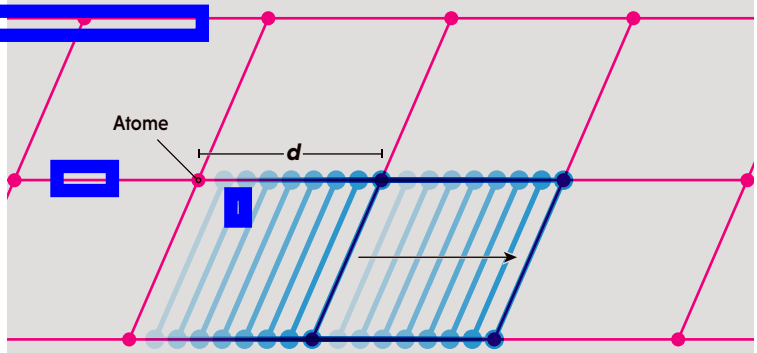
Paradoxalement, si les symétries sont à l'origine du caractère esthétique des cristaux, c'est le manque de symétrie au sens mathématique de ces objets qui les définissent aux yeux des physiciens.

Pour l'illustrer, considérons d'abord une droite. Toute translation laisse cet objet inchangé. Maintenant, imaginons un cristal

© Jen Christiansen

idéalisé et unidimensionnel : des atomes disposés à intervalles réguliers (séparés d'une distance d) sur une droite. Si nous translatons ce cristal un peu vers la droite, nous ne verrons plus la même chose. C'est seulement si nous translatons le cristal de la distance d exactement que nous verrons le même cristal. Ainsi, le cristal idéalisé a un degré réduit de symétrie de translation spatiale, de la même façon qu'un carré a un degré réduit de symétrie de rotation en comparaison avec le cercle.

SYMÉTRIE DE TRANSLATION



Les physiciens disent que dans un cristal, la symétrie de translation est « brisée ». Les symétries résiduelles (la translation de longueur d) définissent notre cristal. En effet, si nous savons que la symétrie d'un cristal fait intervenir des translations par multiples de la distance d, alors nous savons où se placent tous les atomes les uns par rapport aux autres.

En deux ou trois dimensions, les motifs cristallins sont beaucoup plus riches que dans le cas unidimensionnel. Il en existe une grande variété, et dans certains cas, ces motifs sont construits en associant des symétries de rotation et de translation. Au XIVe siècle, les artistes qui ont décoré le palais de l'Alhambra, à Grenade, en Espagne, ont représenté de nombreux motifs possibles de cristaux bidimensionnels. Il existe 17 types de symétries dans un plan bidimensionnel, et les mathématiciens du XIXe siècle ont établi une classification des formes possibles pour les cristaux tridimensionnels.

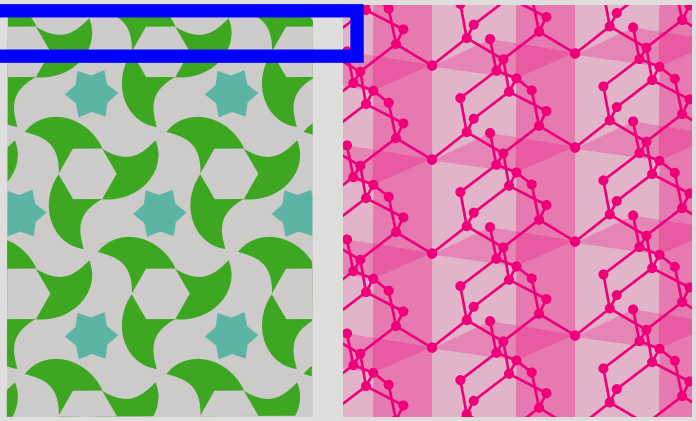
À l'été 2011, je me préparais à enseigner ce chapitre des mathématiques dans le cadre d'un cours sur l'utilisation des symétries en physique. J'essaie toujours de jeter un regard neuf sur les sujets que je vais présenter et, si possible, y apporter quelque chose de nouveau. Il m'est venu à l'esprit que l'on pourrait étendre la classification des motifs cristallins possibles dans l'espace tridimensionnel à des formes cristallines dans l'espace-temps quadridimensionnel en incluant donc le temps.

Quand j'ai fait part de cette idée à mon collègue Alfred Shapere, aujourd'hui à l'université du Kentucky, il m'a vivement conseillé de considérer deux questions : ces cristaux d'espace-temps décrivent-ils des systèmes concrets ? Conduisent-ils à des états particuliers de la matière ? Ces questions m'ont lancé dans une aventure scientifique étonnante.

La réponse à la première question vient assez simplement. Alors que les cristaux ordinaires sont des arrangements ordonnés d'objets dans l'espace, les cristaux spatiotemporels sont des arrangements ordonnés d'événements dans l'espace-temps. Reprenons le cas d'un cristal unidimensionnel, où sa seule dimension serait celle du temps. Cela revient donc à chercher des systèmes dont l'état global se répète dans le temps à intervalles réguliers. En fait, de telles configurations nous sont très familières. Par exemple, la Terre retrouve son orientation dans l'espace toutes les 24 heures environ. L'homme a aussi construit des systèmes qui reproduisent un arrangement donné à des intervalles réguliers pour indiquer le temps qui passe : des horloges à pendule, à ressort, à cristaux piézoélectriques ou atomiques.

Certains systèmes concrets familiers constituent également des cristaux spatiotemporels de plus grande dimension. Par exemple, une onde sonore plane (*voir la figure page 28*) présente un motif périodique, où la hauteur de la surface représente la surpression en fonction de la position et du temps. Des motifs de cristaux spatiotemporels plus complexes sont peut-être difficiles à trouver dans la nature, mais ces idées seraient intéressantes à explorer pour des artistes ou des ingénieurs – imaginez un palais de l'Alhambra dynamique et dopé aux amphétamines !

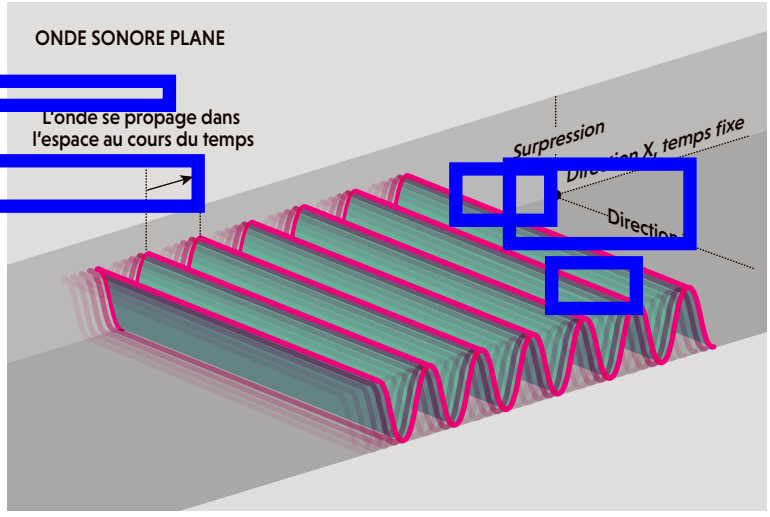
EXEMPLES DE MOTIFS CRISTALLINS COMPLEXES PRÉSENTANT PLUSIEURS SYMÉTRIES



À deux dimensions (comme on en voit au palais de l'Alhambra)

À trois dimensions (structure cristalline du diamant)

© Jen Christiansen



> Les cristaux spatiotemporels que nous venons d'évoquer ne font que rassembler sous une nouvelle étiquette des phénomènes déjà connus et n'ont donc rien d'étonnant. Mais si nous nous penchons sérieusement sur la seconde question d'Alfred Shapere, nous entrons dans un domaine physique vraiment nouveau. Pour ce faire, nous devons introduire la notion de brisure «spontanée» de symétrie.

BRISURE «SPONTANÉE» DE SYMÉTRIE

Quand un liquide ou un gaz se refroidit en formant un cristal, quelque chose de fondamentalement remarquable se produit: la solution, obtenue à partir des lois physiques, qui décrit le cristal affiche moins de symétrie que les lois elles-mêmes. Cette diminution de symétrie étant le résultat de la seule baisse de température, sans intervention extérieure particulière, on dit que le matériau brise «spontanément» la symétrie, en l'occurrence la symétrie de translation spatiale dans le cas du cristal.

Une caractéristique importante de la cristallisation est qu'elle s'accompagne d'un changement brutal du comportement du système. Au-dessus d'une certaine température critique (qui dépend de la composition chimique du système et de la pression ambiante), on a un liquide; au-dessous, on a un cristal, aux propriétés très différentes. C'est ce qui se passe quand l'eau gèle et forme de la glace. La transition se produit de façon prévisible, et elle s'accompagne d'une libération d'énergie (sous forme de chaleur). Lors de cette transition de phase, un changement minime de conditions suffit pour provoquer une réorganisation profonde du liquide en un matériau qualitativement distinct.

La rigidité est une autre de ces propriétés émergentes qui distinguent les cristaux des liquides et des gaz. D'un point de vue microscopique, la rigidité apparaît parce que le motif organisé des atomes dans un cristal s'étend sur de longues distances et que les atomes du cristal résistent aux tentatives de perturbation de ce motif.

Le principe sous-jacent à la cristallisation est celui de la minimisation de l'énergie du système. Pour certaines conditions de température et de pression, la configuration optimale est atteinte seulement si les atomes s'organisent de façon régulière (ce qui conduit à une réduction de la symétrie du système). La transition est brutale et s'étend au matériau en entier.

Comme la brisure spontanée de symétrie a un rôle très important dans le concept de cristal, j'ai pensé qu'il était important d'explorer la possibilité que la symétrie τ puisse être brisée spontanément. Tandis que je couchais cette idée sur le papier, je l'expliquais à ma femme, Betsy Devine, une journaliste scientifique: «C'est comme un cristal, mais dans le temps.» Son intérêt piqué par mon enthousiasme, elle m'a demandé quel nom je donnais au phénomène. «Brisure spontanée de la symétrie de translation temporelle», lui ai-je répondu. «C'est trop long et trop compliqué, ça ne va pas du tout,» a-t-elle répliqué, «tu devrais plutôt les nommer des "cristaux temporels".» Eh bien évidemment, c'est ce que j'ai fait. En 2012, j'ai publié deux articles, dont un coécrit avec Alfred Shapere, qui introduisent cette idée. Un cristal temporel est ainsi un système dans lequel τ est spontanément brisée.

UN PROBLÈME D'ÉNERGIE

Pourquoi a-t-il fallu autant de temps pour que les concepts de τ et de brisure spontanée de symétrie se rejoignent, étant donné que, séparément, ils sont compris depuis de nombreuses années? C'est parce que τ diffère des autres symétries par un aspect crucial qui rend beaucoup plus subtile la question de sa possible brisure spontanée. Cette différence résulte d'un théorème fondamental que la mathématicienne allemande Emmy Noether a prouvé en 1915. Le théorème de Noether établit un lien entre les principes de symétrie et les lois de conservation: il montre qu'à chaque type de symétrie correspond une quantité conservée. Dans l'application qui nous concerne ici, le théorème de Noether affirme que τ est essentiellement équivalent à la conservation de l'énergie. Inversement, quand un système brise τ, l'énergie n'est pas conservée et cesse d'être une caractéristique utile à la description de ce système.

Or l'argument habituellement avancé pour expliquer pourquoi un système subit une brisure spontanée de symétrie est que cela est favorable énergétiquement (le nouvel état est d'énergie inférieure). Si l'état de plus basse énergie brise la symétrie spatiale et que l'énergie du système est conservée, alors l'état de >

© Jen Christiansen

BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE POUR LES CRISTAUX SPATIAUX ET TEMPORELS

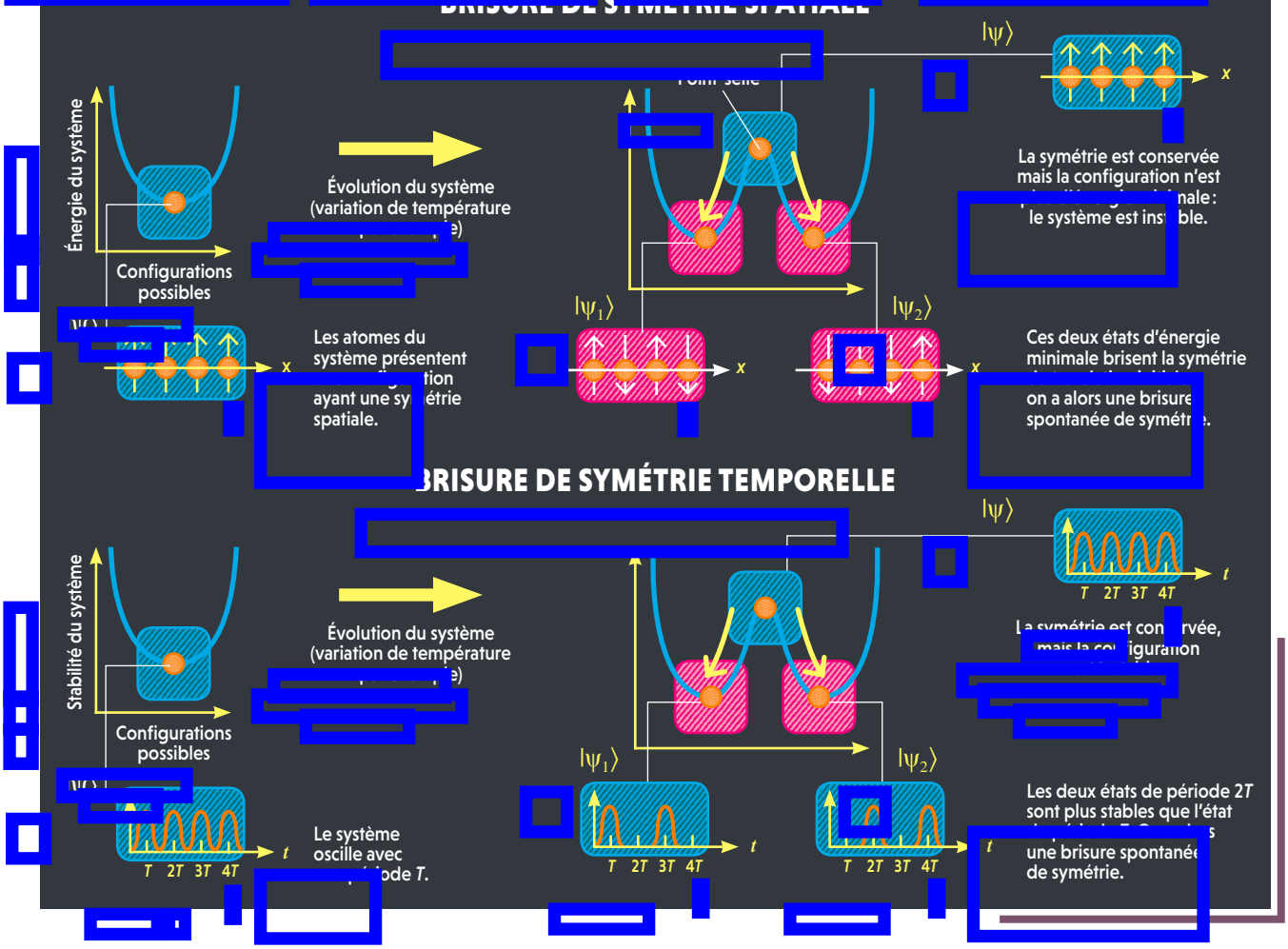
La brisure spontanée de symétrie est un concept essentiel dans la compréhension des transitions de phase et donc dans la formation des cristaux, spatiaux et temporels. En général, un système physique adopte une configuration stable, nommée état fondamental, où l'énergie du système est minimale. Mais quand un paramètre du système varie (par exemple l'interaction entre les particules, du fait d'une baisse de température ou autre), cette configuration devient parfois instable et il s'opère une transition de phase qui peut engendrer une brisure spontanée de symétrie, comme dans le cas de la brisure de symétrie par translation spatiale.

La configuration qui correspondait au minimum de la phase invariante par translation devient un point d'équilibre instable. On parle de point-selle : deux minima globaux brisant la symétrie par translation se forment autour de ce point-selle.

Pour un système classique, une infime perturbation des paramètres du système fera choisir l'un des deux minima globaux, un peu comme lorsqu'on pousse légèrement une bille du haut d'une colline, qui roulera vers la vallée à gauche ou celle à droite. La situation est un peu différente dans le cas d'un système quantique. En effet, dans ce cas, l'état fondamental $|\Psi\rangle$ qui décrit le système est une superposition des deux états correspondant aux deux minima de l'énergie : $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2}\,(|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle)$, de la même façon que le chat de Schrödinger dans la boîte est une superposition des états « vivant » et « mort ». Bien que les états $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ brisent chacun la symétrie initiale, l'état $|\Psi\rangle$ préserve cette symétrie. Cependant, cette situation est très sensible aux paramètres du système et une petite perturbation de ceux-ci favorise $|\Psi_1\rangle$ ou $|\Psi_2\rangle$. Lors d'une expérience, seul l'état $|\Psi_1\rangle$ ou $|\Psi_2\rangle$ est observé, mettant ainsi en évidence la brisure spontanée de symétrie.

Dans le cas des cristaux temporels, les interactions au sein du système brisent l'invariance temporelle. La façon typique d'obtenir ce genre de phénomène est de construire un système présentant une évolution périodique dans le temps, de période T, et tel que les interactions au sein du système induisent une brisure spontanée de symétrie vers, par exemple, une période $2T$. Dans ce cas de figure, les deux états $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ ont chacun une période $2T$, mais leurs évolutions sont décalées de telle sorte que l'état fondamental $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2}\,(|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle)$ a bien une période T. Dans un système idéal, nous n'observerions pas la période $2T$, mais comme dans le cas du système spatial, ce système est très sensible aux perturbations et la brisure spontanée de symétrie peut être mise en évidence par un petit changement des paramètres du modèle, ce qui est le cas dans les expériences. C'est ainsi que les cristaux temporels peuvent être observés.

ALEXANDRE DAUPHIN
Institut des sciences photoniques (ICFO), Barcelone



© Charlotte Calament/Pour la Science

> symétrie brisée, une fois acquis, persistera. C'est ainsi que les scientifiques expliquent, par exemple, la cristallisation ordinaire.

Mais cette explication fondée sur l'énergie n'est pas applicable dans le cas de la brisure de τ, parce qu'il n'est alors pas possible de définir une énergie pour le système. Dans ces conditions, le concept de cristal temporel semble dépourvu de sens. Il existe cependant une voie plus générale conduisant à une brisure spontanée de symétrie, qui s'applique aussi à la brisure de τ.

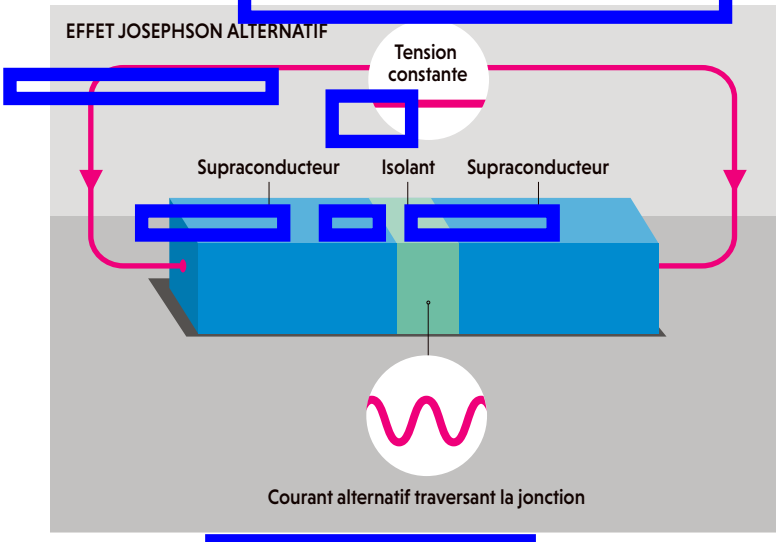
Plutôt que de se réorganiser spontanément en un état de plus basse énergie, un matériau peut se réorganiser en un état qui est plus stable pour d'autres raisons. Par exemple, des motifs ordonnés qui s'étendent sur de longues portions d'espace ou de temps et qui impliquent de nombreuses particules sont plus difficiles à défaire parce que la plupart des forces de perturbation agissent localement, à petite échelle. Ainsi, un matériau gagnera une plus grande stabilité en adoptant un nouveau motif qui se réalise sur une échelle plus vaste que dans son état précédent.

Au bout du compte, évidemment, aucun état ordinaire de la matière ne peut se maintenir en résistant à toutes les perturbations. Par exemple, les diamants ne sont pas un état stable du carbone aux températures et pression atmosphérique ordinaires : ils ne sont pas « éternels » ! Ils sont créés à des température et pression très élevées et, une fois formés, se maintiennent longtemps même à pression ordinaire. Mais si vous attendez assez, votre diamant finira par se transformer en graphite. En pratique, ce que nous entendons par « état de la matière » (comme le diamant) est une organisation d'une substance qui possède un degré utile de stabilité le protégeant d'un éventail non négligeable de changements extérieurs.

CRISTAUX TEMPORELS ANCIENS ET NOUVEAUX

Forts de ces ingrédients théoriques, les physiciens ont commencé à concevoir de vrais cristaux temporels. Pour y parvenir, ils se sont d'abord intéressés à l'effet Josephson alternatif qui a servi de base pour une grande famille de cristaux temporels. Cet effet se produit quand on applique une tension électrique constante V à une jonction où deux matériaux supraconducteurs sont séparés par une couche mince d'isolant (on parle de jonction Josephson, du nom du physicien britannique Brian Josephson). Dans cette situation, un courant alternatif traverse la jonction par effet tunnel (un phénomène quantique) et sa fréquence vaut $2eV/\hbar$, où e est la charge d'un électron et $\hbar$ la constante de Planck réduite, une grandeur caractéristique des phénomènes quantiques.

Ici, bien que le dispositif physique ne varie pas dans le temps (en d'autres termes, il respecte τ), le comportement résultant varie dans le temps. La symétrie de translation temporelle globale du système a été réduite aux seules symétries de translation temporelle multiples de la période $\hbar/(2eV)$. Ainsi, l'effet Josephson alternatif incarne le concept le plus basique de cristal temporel. Mais à certains égards, il n'est pas idéal. Les jonctions Josephson ne sont pas aussi stables que l'on voudrait : les circuits où passe un courant alternatif dissipent de la chaleur et émettent des ondes électromagnétiques.



Depuis, les cristaux temporels fondés sur les jonctions Josephson ont été améliorés pour réduire leurs défauts et d'autres approches ont été imaginées. Néanmoins, tous ces dispositifs partagent une idée physique qui était déjà implicite dans les travaux de Josephson, qui datent de 1962. Il semble donc approprié de parler, dans ce cas, de cristaux temporels « à l'ancienne ».

Les « nouveaux » cristaux temporels sont arrivés en 2017. Les premiers ont été conçus par deux équipes indépendantes. Dans la première expérience, le groupe de Christopher Monroe, de l'université du Maryland à College Park, a créé un cristal temporel dans un système artificiel constitué d'une chaîne de dix ions ytterbium. Dans l'autre expérience, Mikhail Lukin, de l'université Harvard, et ses collègues ont réalisé un cristal temporel dans un système constitué de milliers de défauts cristallins dans un diamant.

Dans les deux systèmes, la direction du spin (le moment cinétique quantique) des « atomes » (les ions ytterbium ou les défauts du diamant) change de façon régulière, et les atomes reviennent périodiquement à leur configuration de départ.

© Jen Christiansen

Dans l'expérience de Christopher Monroe, les physiciens ont utilisé deux lasers : le premier servait à inverser le spin des ions et le second à faire interagir les spins les uns avec les autres de façon aléatoire et pour produire un certain désordre. Avec la bonne configuration, le spin des ions oscillait à la moitié de la cadence des impulsions laser.

Dans le projet de Mikhail Lukin, les scientifiques ont utilisé des impulsions micro-ondes pour inverser le spin des défauts du diamant. Ils ont observé des cristaux temporels séparés de deux et trois fois l'intervalle entre impulsions successives. Dans ces deux expériences, les matériaux ont subi une excitation extérieure (des impulsions laser ou micro-ondes), mais ils ont affiché une période différente de celle de l'excitation : en d'autres termes, ils ont spontanément brisé la symétrie temporelle du système.

Ces expériences ont servi de déclencheurs pour de nombreux autres travaux. Ainsi, d'autres matériaux utilisant les mêmes principes généraux (qui ont acquis le nom de « cristaux temporels de Floquet ») sont entrés en scène depuis.

DES RÉPONSES SOUS-HARMONIQUES

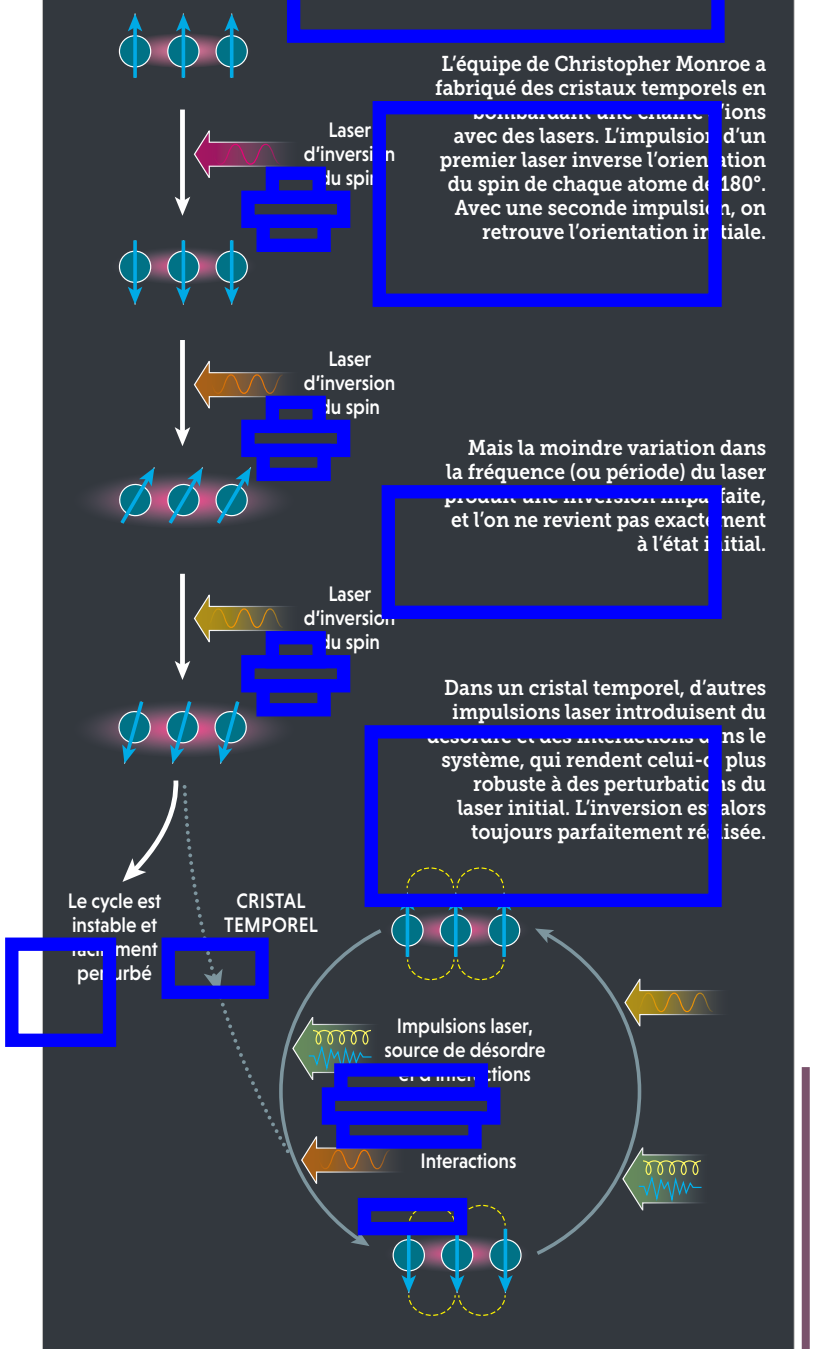
Certains physiciens ont souligné que des réponses dont la période est égale à un multiple des périodes d'excitation – des « réponses sous-harmoniques » ne sont pas des phénomènes nouveaux. Ainsi, dès 1831, Michael Faraday avait remarqué que lorsqu'il secouait verticalement du mercure liquide avec une période T, l'écoulement présentait souvent une période de $2T$.

Mais entre les cristaux temporels de Floquet et les réponses sous-harmoniques, il existe des différences importantes. D'abord, la brisure de symétrie dans le système de Faraday (et ceux du même genre) ne présente pas les caractéristiques d'une brisure spontanée de symétrie. Si le système entier constitué du matériau et du dispositif d'entraînement a simplement moins de symétries que le dispositif d'entraînement pris seul, cela ne suffit pas pour parler de cristal temporel.

D'un point de vue thermodynamique, dans l'expérience de Faraday, le dispositif d'entraînement (en l'occurrence les secousses appliquées) injecte en permanence de l'énergie (ou plutôt de l'entropie) dans le système, qui la dissipe sous forme de chaleur. Dans les systèmes de 2017, après une brève période de mise en place, le système s'établit dans un état où il n'échange plus d'énergie ou d'entropie avec le dispositif d'entraînement (s'il en absorbait, il chaufferait et perdrait ses propriétés de cristal temporel). Cette situation est possible grâce au désordre créé dans le système par les physiciens : en présence de désordre, les états du >

FABRIQUER UN CRISTAL TEMPOREL

Les cristaux ordinaires brisent la symétrie de translation spatiale car leurs atomes occupent des positions fixes, et semblent différents lorsque l'on les translate d'une distance quelconque. Ils brisent aussi une autre symétrie et résistent à toute perturbation de leur structure spatiale. Les cristaux temporels brisent la symétrie de translation temporelle : ils changent d'un moment à un autre, tout en répétant un motif qui est également robuste. En 2017, aux États-Unis, deux équipes, celle de Christopher Monroe, de l'université du Maryland, et celle de Mikhail Lukin, de l'université Harvard, ont produit les premiers cristaux temporels.



L'équipe de Christopher Monroe a fabriqué des cristaux temporels en bombardant une chaîne d'ions avec des lasers. L'impulsion d'un premier laser inverse l'orientation du spin de chaque atome de 180°. Avec une seconde impulsion, on retrouve l'orientation initiale.

Mais la moindre variation dans la fréquence (ou période) du laser produit une inversion imparfaite, et l'on ne revient pas exactement à l'état initial.

Dans un cristal temporel, d'autres impulsions laser introduisent du désordre et des interactions dans le système, qui rendent celui-ci plus robuste à des perturbations du laser initial. L'inversion est alors toujours parfaitement réalisée.

> système sont trop séparés les uns des autres pour permettre un échange d'énergie avec le dispositif d'entraînement. Le système est alors piégé dans un état hors équilibre qui oscille. C'est bien cet état nouveau de la matière qu'on nomme cristal temporel.

Comme pour les cristaux spatiaux, ces nouveaux cristaux temporels présentent une importante rigidité et une grande stabilité de leurs motifs. Cela signifie qu'une petite variation dans la période du dispositif d'entraînement ou la présence d'une autre perturbation n'altère pas la période des oscillations des cristaux temporels, qui reste parfaitement régulière.

Cette caractéristique offre un moyen de diviser le temps très précisément, et la perspective de fabriquer de futures horloges de grande précision. Les horloges atomiques modernes sont déjà des merveilles de précision, mais il leur manque la garantie de stabilité à long terme des cristaux temporels. Des horloges plus précises et moins encombrantes fondées sur ces états de la matière rendraient possibles d'excellentes mesures de distance et de temps, avec des applications pour de nouveaux systèmes de géolocalisation améliorés. Ces horloges seraient aussi très sensibles à de petites variations du champ gravitationnel (qui influe sur l'écoulement du temps, d'après les lois de la relativité générale) : elles pourraient donc détecter des anomalies gravitationnelles locales correspondant à des grottes souterraines ou à des gisements de minerais. Il est aussi possible d'imaginer des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

UN CRISTAL TEMPOREL COSMOLOGIQUE

Les cristaux temporels et la brisure spontanée de τ constituent un sujet encore jeune, qui soulève de nombreuses questions. Et à l'instar des cristaux ordinaires dont l'étude a permis la découverte des semi-conducteurs et l'avènement de l'électronique moderne, quelles surprises nous réservent les cristaux temporels? Ont-ils un effet particulier sur les photons ou les électrons qui les traversent? Il est encore trop tôt pour le dire.

Les cristaux ordinaires ont aussi conduit à l'idée de quasi-cristaux (des matériaux très ordonnés mais dont les motifs ne se répètent pas). Serait-il possible aussi de concevoir des quasi-cristaux temporels? De la même façon, on peut s'interroger sur la possibilité de concevoir des liquides temporels (matériaux dans lesquels la densité des événements dans le temps est constante, mais pas la période), des verres temporels (qui ont un motif apparemment parfaitement rigide, mais avec en réalité de petites déviations). Les chercheurs explorent activement ces possibilités et d'autres encore. Et, effectivement, des formes de quasi-cristaux temporels et une sorte de liquide temporel ont déjà été identifiés.

Jusqu'à présent, nous avons considéré la symétrie τ uniquement dans les phases de la matière. Il est possible de pousser cette idée dans des domaines plus spéculatifs, en réfléchissant au rôle de τ en cosmologie et dans les trous noirs. Actuellement, la théorie qui décrit le mieux l'histoire de l'Univers d'après les

Les cristaux temporels constituent un nouvel état de la matière

observations est celle du Big Bang. L'Univers serait né d'une singularité de densité infinie. Par conséquent, la symétrie τ ne s'appliquerait pas à l'Univers. Mais certains cosmologistes ont aussi suggéré que l'Univers serait cyclique, ou qu'il a peut-être connu une phase d'oscillation rapide. Ces hypothèses très spéculatives nous rapprocheraient du cercle d'idées entourant les cristaux temporels.

Enfin, les équations de la relativité générale incarnent notre meilleure compréhension actuelle de l'espace-temps. Mais on sait que cette théorie n'est plus valide dans les conditions extrêmes d'au moins deux situations : quand nous extrapolons la cosmologie du Big Bang à l'instant initial et à l'intérieur des trous noirs. Dans les autres champs de la physique, les limites de validité des équations qui décrivent un état donné de la matière sont souvent le signal annonciateur d'une transition de phase du système. Se pourrait-il que l'espace-temps lui-même, dans des conditions extrêmes de haute pression, de haute température ou de changement rapide, brise τ?

Si ces dernières idées sont très spéculatives, le concept de cristal temporel laisse entrevoir des possibilités de progrès à la fois théoriques (en termes de compréhension de la cosmologie et des trous noirs avec une perspective différente) et pratiques. Les formes nouvelles de cristaux temporels qui seront sans doute développées dans les années à venir devraient nous rapprocher d'horloges plus précises, et présenteront peut-être d'autres propriétés utiles. Et dans tous les cas, ils sauront nous surprendre en nous offrant l'occasion d'élargir nos idées sur les façons dont la matière peut s'organiser. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Y. Yao et C. Nayak, **Time crystals in periodically driven systems**, *Physics Today*, vol. 71(9), pp. 40-47, 2018.

J. Zhang *et al.*, **Observation of a discrete time crystal**, *Nature*, vol. 543, pp. 217-220, 2017.

Soonwon Choi *et al.*, **Observation of discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system**, *Nature*, vol. 543, pp. 221-225, 2017.

F. Wilczek, **Quantum time crystals**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109(16), art. 160401, 2012.

A. Shapere et F. Wilczek, **Classical time crystals**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109(16), art. 160402, 2012.

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET

15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE

Crédit photo : © Christophe Abramowitz

france inter

INTERVENEZ

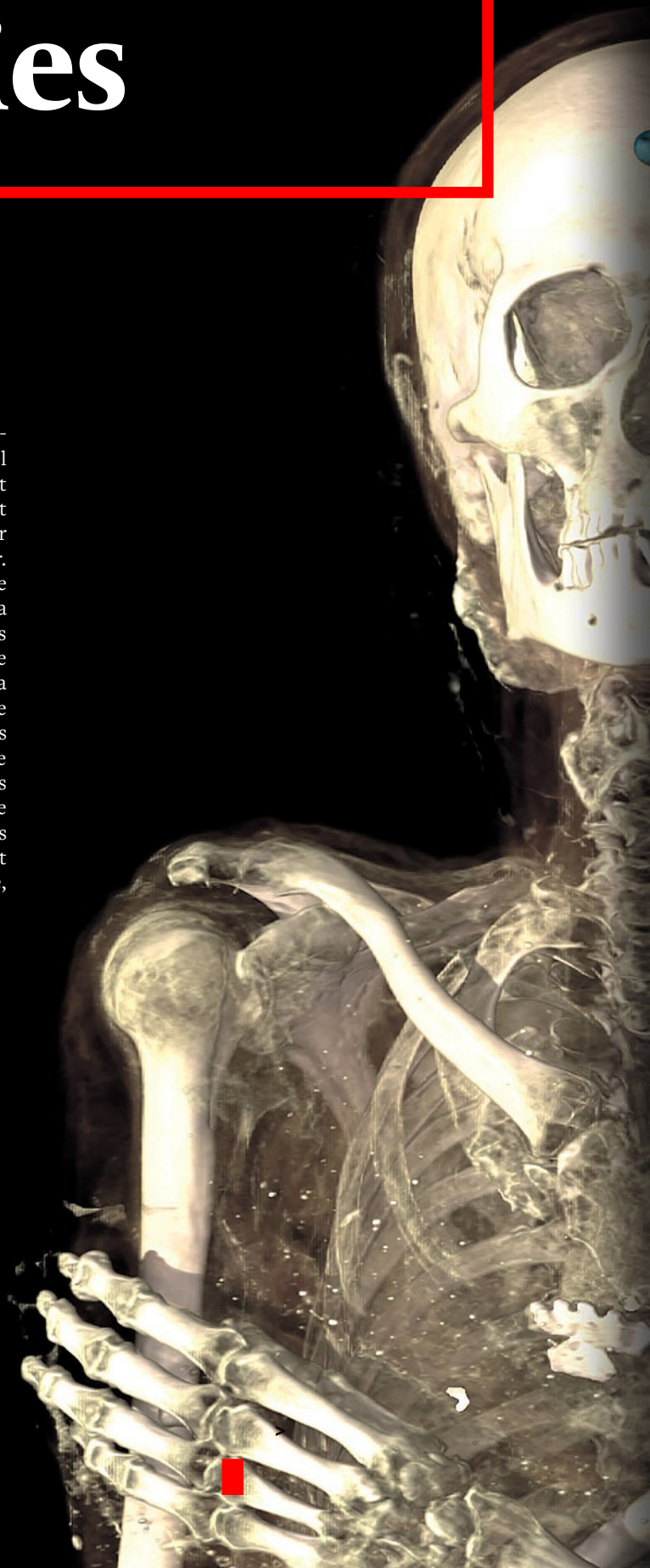
ABONNEZ-VOUS AU PODCAST DE L'ÉMISSION

Dans les entrailles des momies

Les Égyptiens anciens ont développé des techniques d'embaumement de pointe. Pour percer leurs secrets, les chercheurs s'appuient aujourd'hui sur la scanographie. Fascinant.

MARIE ZAWISZA, journaliste

Elles semblaient muettes. Pourtant, deux conservateurs du British Museum, l'anthropologue Daniel Antoine et l'égyptologue Marie Vandenbeusch, ont réussi à les faire parler. Leur arme ? Le scanner. Cet outil médical non invasif leur a permis d'observer virtuellement l'intérieur de momies, sans les abîmer. Ces recherches s'inscrivent dans un vaste programme mené par le British Museum, qui possède des antiquités égyptiennes, depuis sa fondation en 1753. À cette époque, on débandelettait les corps embaumés pour les étudier. Mais déjà l'institution londonienne se refusait à le faire. Au cours du XXe siècle, la maîtrise des rayons X a révélé, sans les détruire, quelques images – fort imprécises – de l'intérieur de ces vénérables dépouilles. Depuis quelques années, les progrès de l'imagerie ont permis aux chercheurs de visualiser même les couches les plus molles de ces corps et les plus infimes détails – comme des incisions sur des plaques de métal. Pour l'instant, le British Museum a ainsi étudié une vingtaine des quatre-vingts momies égyptiennes de sa collection. Six d'entre elles se dévoilent aux visiteurs de l'exposition « Momies égyptiennes : passé retrouvé, mystères dévoilés », au Musée des beaux-arts de Montréal. ■

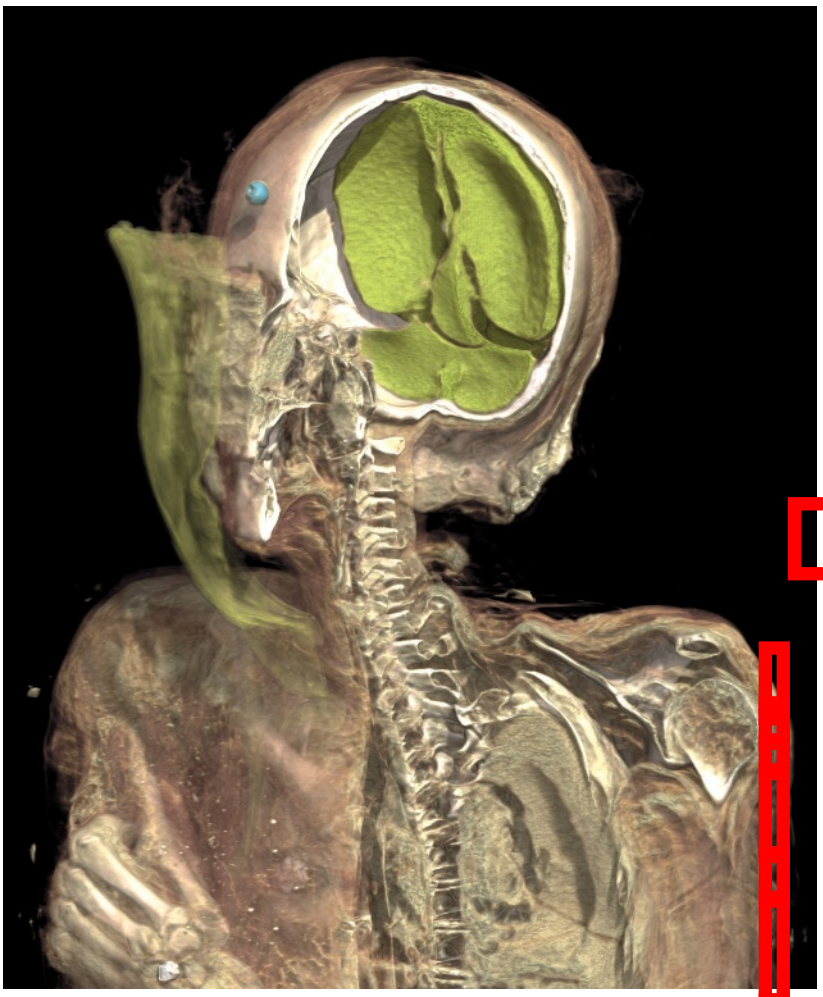


DERRIÈRE LE MASQUE D'IRTHORROU

Inhumé vers 600 avant notre ère dans un cercueil finement décoré, avec un masque doré placé sur la tête, Irthorrou, grand prêtre du temple d'Akhmîm, à 200 kilomètres de Louxor, appartenait à l'élite locale. Les inscriptions sur ce cercueil devaient assurer la conservation de son nom et de son identité, afin de rendre possible son voyage vers les portes du ciel. Le programme de recherche du British Museum révèle aujourd'hui, dissimulé sous son masque délicat et ses textiles de lin, le squelette d'un adulte décédé entre 35 et 49 ans. Derrière son masque souriant apparaissent d'importantes lésions dentaires : Irthorrou avait perdu non seulement deux incisives et une canine sur la mâchoire inférieure, mais aussi une partie de l'os de la mâchoire. Ces abcès ont-ils entraîné sa mort ? Ce n'est pas exclu.

Visualisation de la momie d'Irthorrou, Basse Époque, XXVIe dynastie, vers 600 avant notre ère. *British Museum EA 74615.*

© The Trustees of the British Museum/© Benjamin Moreno



Ci-contre : après avoir retiré le cerveau par la cavité nasale, le crâne d'Irthorrou a été rempli de résine *(en jaune)* pour aider la conservation.

© The Trustees of the British Museum/© Benjamin Moreno

IMAGERIE 3D

Le scanner passé par Irthorrou dans un hôpital de Chelsea spécialisé dans le cœur a duré à peine plus d'une minute. Mais il a fallu ensuite des centaines d'heures d'analyse pour exploiter les données numériques obtenues ! Et ainsi observer les textiles et les tissus mous, de même que le squelette et des amulettes. « Jusqu'à présent, notre compréhension de la momification était basée sur un ensemble limité de connaissances, car peu de momies ont été analysées scientifiquement. Notre objectif est de mieux comprendre la pratique de l'embaumement – son évolution dans le temps, comme ses variantes géographiques », explique l'anthropologue Daniel Antoine, commissaire de l'exposition. Ci-dessus, apparaît le crâne d'Irthorrou. Les os du nez ont été brisés avec précaution pour retirer le cerveau, à la place duquel a été insérée une substance qui semble être de la résine. Ci-contre, on discerne quatre baluchons, contenant probablement les viscères (poumons, foie, estomac et intestins) du grand prêtre, qui ont dû être séchés avant d'être replacés à l'intérieur du corps : il fallait les conserver pour assurer la vie éternelle au défunt.

Ci-contre : visualisation semi-transparente de la momie d'Irthorrou, avec les paquets contenant les viscères colorisés en jaune et des amulettes placées dans le corps.

© The Trustees of the British Museum/© Benjamin Moreno

VERS L'AU-DELÀ

Pour les Égyptiens anciens, la vie après la mort dépendait notamment de la bonne conservation du corps, et donc de sa bonne momification. Les instruments ornés chacun d'une tête de chacal *(ci-contre)* auraient servi pour mélanger des ingrédients pour l'embaumement, comme en témoigne la substance noire qui les recouvre, composée de cire d'abeille, d'huile ou de graisse. Un modèle de barque funéraire *(ci-dessous)* accompagnait par ailleurs le défunt dans son voyage vers l'au-delà – un usage d'abord réservé au seul pharaon, qui s'est ensuite étendu à tout le peuple : rejoignant la barque solaire du dieu Rê dans sa course céleste et son combat contre les forces du chaos, l'âme pouvait espérer partager sa vie éternelle.

Instruments d'embaumement en bois. Probablement Nouvel Empire, vers 1550-1069 avant notre ère, peut-être Thèbes, Égypte (L. 73,5 cm).
British Museum EA 5505 et 5506.

© The Trustees of the British Museum

Modèle de barque funéraire, XII[e] dynastie, vers 1985-1795 avant notre ère, provenance inconnue (bois de figuier sycomore). *British Museum EA 9525.*

© The Trustees of the British Museum

© The Trustees of the British Museum

Cartonnage : momie de Tamout, Troisième Période Intermédiaire, début de la XXII[e] dynastie, vers 900 avant notre ère. *British Museum EA 22939.*

OÙ SONT LES VISCÈRES DE TAMOUT ?

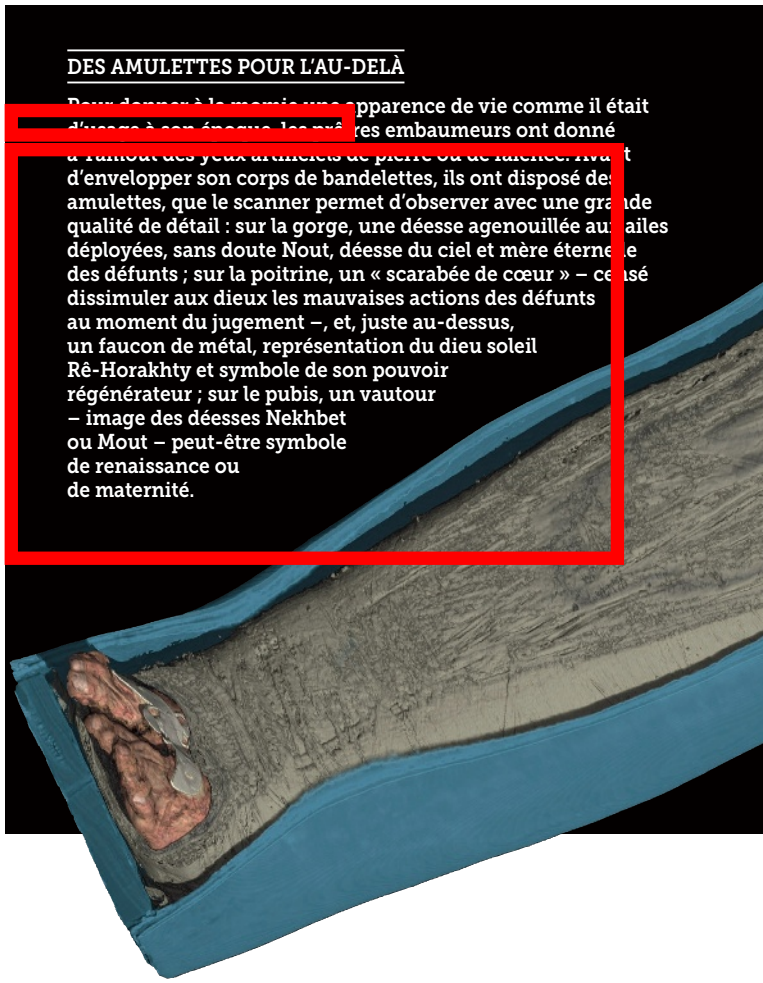
La délicatesse du cartonnage orné d'inscriptions et de scènes religieuses indique le rang élevé de Tamout, chanteuse d'Amon, sans doute dans le temple de Karnak, voué au culte d'Amon-Rê, roi des dieux. À l'époque où vécut la prêtresse, vers 900 avant notre ère, l'art de l'embaumement était bien établi, et, sa momie en témoigne, notamment par l'excellente conservation des tissus mous, qui indiquent que la défunte était… un peu enrobée. Comme pour Irthorrou, les viscères de Tamout ne furent pas placés dans des vases canopes (destinés traditionnellement à recevoir les organes abdominaux embaumés du défunt, *voir ci-dessous*), mais furent enveloppés dans de petits paquets, contenant une figurine de cire (*page ci-contre, en rouge*). Chacune représente un des quatre fils du dieu Horus (comme les couvercles des vases canopes), censés les protéger : Imsety (foie), Hâpi (poumons), Douamoutef (estomac) et Kébehsénouf (intestin). Deux plaques de métal recouvrent l'incision abdominale.

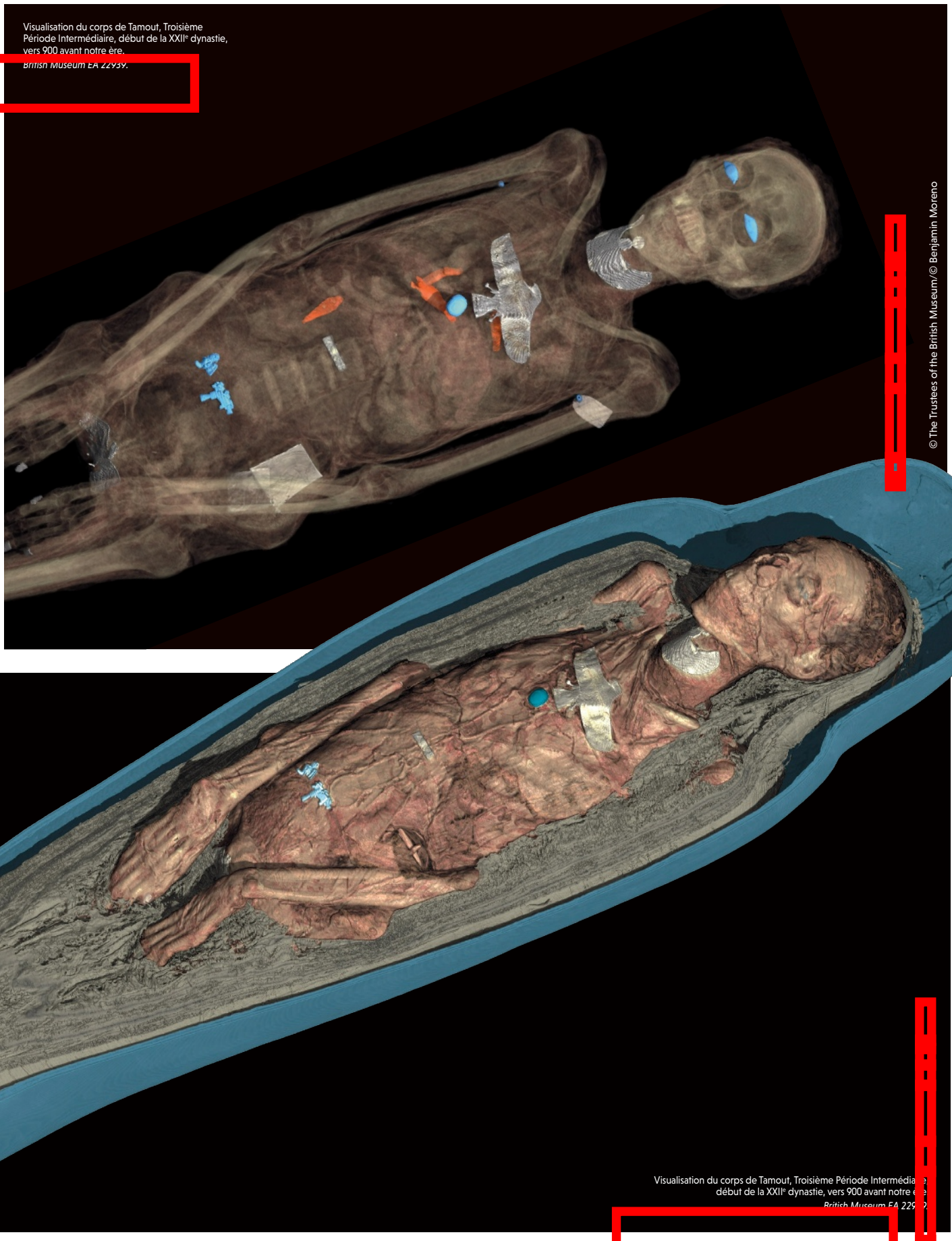
Vases canopes de Diedbastetiouefankh. XXX[e] dynastie, vers 360-343 avant notre ère, Hawara, Égypte (calcaire). *British Museum EA 22374, EA 22375, EA 22376 et EA 22377.*

© The Trustees of the British Museum

DES AMULETTES POUR L'AU-DELÀ

Pour donner à la momie une apparence de vie comme il était d'usage à son époque, les prêtres embaumeurs ont donné à Tamout des yeux artificiels de pierre ou de faïence. Avant d'envelopper son corps de bandelettes, ils ont disposé des amulettes, que le scanner permet d'observer avec une grande qualité de détail : sur la gorge, une déesse agenouillée aux ailes déployées, sans doute Nout, déesse du ciel et mère éternelle des défunts ; sur la poitrine, un « scarabée de cœur » – censé dissimuler aux dieux les mauvaises actions des défunts au moment du jugement –, et, juste au-dessus, un faucon de métal, représentation du dieu soleil Rê-Horakhty et symbole de son pouvoir régénérateur ; sur le pubis, un vautour – image des déesses Nekhbet ou Mout – peut-être symbole de renaissance ou de maternité.





Visualisation du corps de Tamout, Troisième Période Intermédiaire, début de la XXII[e] dynastie, vers 900 avant notre ère.
British Museum EA 22939.

© The Trustees of the British Museum/© Benjamin Moreno

Visualisation du corps de Tamout, Troisième Période Intermédia[ire], début de la XXII[e] dynastie, vers 900 avant notre è[re].
British Museum EA 229[39].

© The Trustees of the British Museum/© Benjamin Moreno

Les trois cercueils étaient à l'origine imbriqués les uns dans les autres. La momie de Nesiawebjaref était dans le cercueil le plus profond. Probablement Thèbes, Égypte (cercueil extérieur : L. 227 cm, cercueil intermédiaire : L. 201 cm, cercueil intérieur : L. 196,5 cm). *British Museum EA 22812 et EA 22813.*

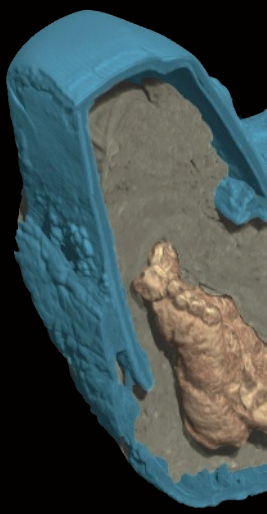
© The Trustees of the British Museum

L'INTELLIGENCE DU CŒUR

Ta-Nesta-ou-dja-t, entrée au British Museum avec ses trois superbes sarcophages en 1890, on savait peu de choses, sinon qu'elle était une opulente « femme mariée de Thèbes », morte entre 35 et 45 ans vers 700 avant notre ère. On sait aujourd'hui que pour préserver la structure de son corps après en avoir extrait les organes, les embaumeurs ont inséré un matériau d'embaumement dans sa cage thoracique et son abdomen, puis enduit son corps et son visage de liquides aromatiques pour assurer une conservation optimale. Seul son cœur, dont les Égyptiens croyaient qu'il était le siège de l'intelligence et de la mémoire, a été laissé en place. Son cerveau a lui été retiré avec grand soin. Le scanner révèle en outre que les joues, la bouche et la gorge ont été remplies d'un mélange de textile et de résine, afin de conserver la forme du visage confirmant ainsi que les techniques d'embaumement, éprouvées depuis 3 000 ans, connaissaient alors leur apogée. Que signifient les deux amulettes placées sur sa gorge ? Mystère.

Visualisation de la momie en réalité translucide révélant le cœur de Nestawedjat-en-Aset

© The Trustees of the British Museum/© Benjamin Moreno

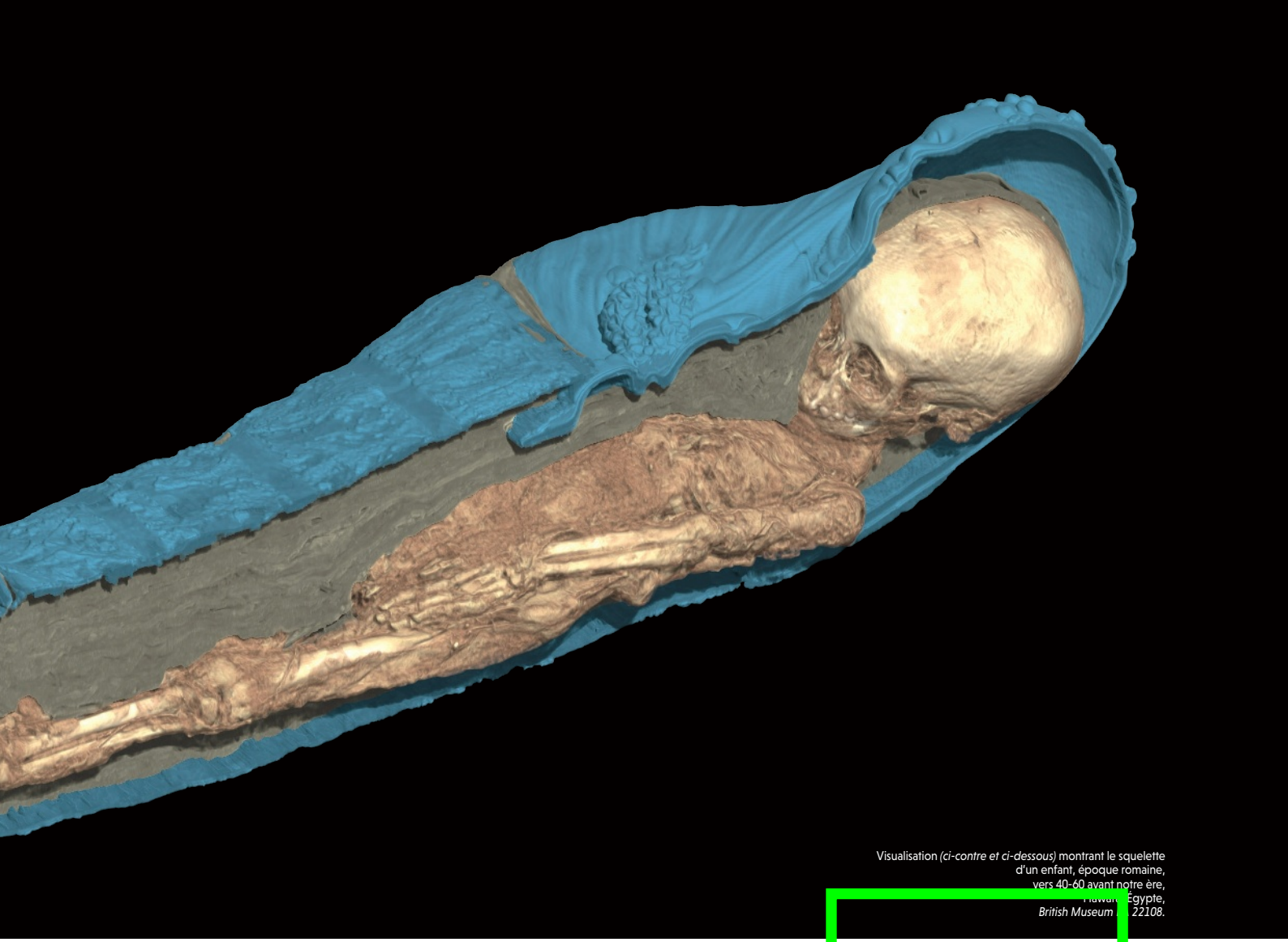


Sarcophage de la momie d'un enfant, époque romaine, vers 40-60 avant notre ère, Hawara, Égypte. *British Museum EA 22108.*

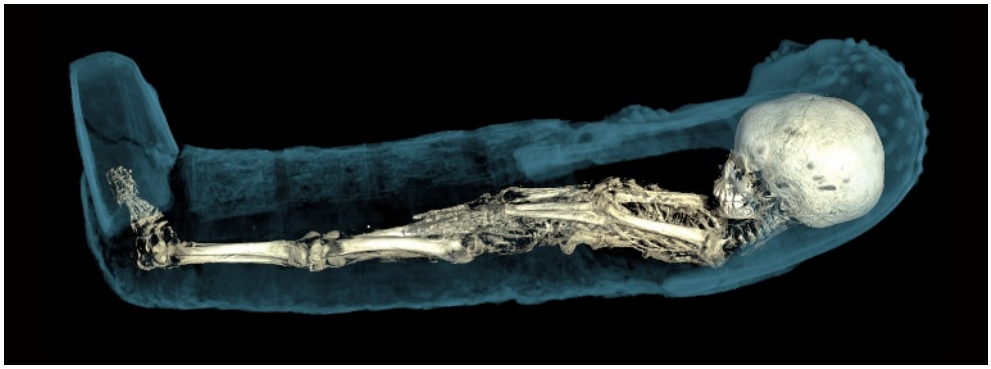
© The Trustees of the British Museum

BIBLIOGRAPHIE

D. Antoine et al., **Egyptian [illegible] ancient lives**, Museum of Applied Arts and Sciences, Sydney, Australie, 2016



Visualisation *(ci-contre et ci-dessous)* montrant le squelette d'un enfant, époque romaine, vers 40-60 avant notre ère, Hawara, Égypte, *British Museum* EA 22108.



DERNIERS SOINS MATERNELS

Des boucles, un masque doré, un bouquet de roses et de myrte à la main, des sandales aux pieds, des scènes religieuses au dos du cartonnage, parmi lesquelles la pesée du cœur, témoignant que même les enfants devaient rendre compte aux dieux de leurs actions bonnes ou mauvaises… Les embaumeurs n'ont pas retiré le cerveau de l'enfant d'Hawara, probablement en raison du jeune âge de l'individu et de la fragilité de ses os mais ils ont replié sa tête sur sa poitrine, selon une tradition de la période romaine. Sa dentition indique que cet enfant avait entre un an et demi et deux ans au moment de son décès. Et les tissus mous, bien conservés, prouvent qu'il s'agissait d'un petit garçon. Aucun élément ne permet de déterminer la cause de sa mort prématurée. Le très grand soin apporté à sa momification et l'excellente conservation de son fragile squelette indiquent qu'il appartenait à l'élite, et témoigne de l'amour des parents pour ce fils dont ils ont voulu assurer la meilleure conservation possible du corps pour une vie meilleure dans l'au-delà. La qualité de l'embaumement infirme aussi l'idée selon laquelle ce savoir-faire déclinait à l'époque romaine.

EXPOSITION

Exposition « Momies égyptiennes : passé retrouvé, mystères dévoilés », Musée des beaux-arts de Montréal. Prolongée jusqu'au 29 mars 2020.

© The Trustees of the British Museum/© Benjamin Moreno

Les maîtres du ciel mésozoïque

Comment les ptérosaures, créatures géantes à la tête démesurée pouvaient-ils voler ? De nouveaux fossiles et la modélisation mathématique donnent des réponses.

L'ESSENTIEL

> Les ptérosaures ont développé le vol actif 100 millions d'années avant les oiseaux.

> Leurs adaptations au vol sont les plus extrêmes de toutes celles qui existent parmi les animaux volants.

> De nouveaux fossiles et une meilleure modélisation physique éclairent de vieilles questions sur leur vol et sur leur envol, ainsi que sur leur disparition.

L'AUTEUR

MICHAEL HABIB
paléontologue et bioingénieur à l'université de Californie du Sud

© Chase Stone

Le Mésozoïque, l'ère géologique qui s'est terminée il y a 66 millions d'années après avoir duré 186 millions d'années, est considéré comme l'âge des dinosaures. Mais les « terribles lézards » ne dominaient que les milieux terrestres. D'autres créatures fort différentes régnaient dans les cieux : les ptérosaures.

Ces reptiles volants furent les premiers vertébrés à développer un vol actif au lieu de seulement planer, cela très longtemps avant les oiseaux. Prédominants dans les airs pendant plus de 160 millions d'années, ils disparurent en même temps que la quasi-totalité des dinosaures – à la fin du Crétacé il y a 66 millions d'années. Durant leur règne, ils avaient déployé certaines des adaptations anatomiques les plus spectaculaires de toutes celles qui sont connues. Le plus petit de ces animaux avait l'envergure d'un moineau ; le plus grand celle d'un chasseur F-16 (soit 10 mètres environ). Beaucoup possédaient des têtes plus longues que leur corps, ce qui les transformait en de mortelles paires de mâchoires volantes. Ils patrouillaient au-dessus de tous les océans de toutes les terres émergées du Mésozoïque, et il était difficile d'échapper à leur regard.

Contrairement aux dinosaures, qui survivent dans les oiseaux, les ptérosaures n'ont pas de descendants. Ce que les paléontologues savent sur eux provient exclusivement du registre fossile. Ce registre est malheureusement si fragmentaire, qu'il ne nous livre qu'une parcelle de la réalité passée. Nous en sommes donc réduits à nous poser une foule de questions sur leur anatomie bizarre et sur leur disparition. Heureusement, après des décennies de perplexité, l'arrivée de nouveaux vestiges relance les progrès des paléontologues. Et depuis l'amélioration de modèles biomécaniques du vol et de la marche des ptérosaures qui reconstituent de façon plus plausible leurs poids, les forces et les vitesses mises en jeu pendant ces mouvements. Les chercheurs se font désormais une idée plus réaliste de leur locomotion et comprennent qu'ils menaient une vie bien plus étonnante que ce que l'on avait imaginé.

L'une des énigmes les plus difficiles à résoudre est la question de l'envol des ptérosaures géant. *Quetzalcoatlus* (nom formé d'après Quetzalcoatl, le « serpent à plumes » des Mésoaméricains), retrouvé au Texas, ou encore *Hatzegopteryx*, découvert en Roumanie, avaient en effet la taille d'une girafe et de 9 à 12 mètres d'envergure. Les mâchoires de certains spécimens de ces ptérosaures étaient plus titanesques que celles d'un *Tyrannosaurus rex* ; leurs bras presque aussi larges que le torse d'un humain adulte. Il s'agissait de véritables monstres, dont le poids pouvait dépasser les 300 kilogrammes. À titre de comparaison, *Argentavis*, un oiseau fossile argentin de quelque 6 millions d'années – le plus gros à avoir jamais volé sans doute – ne pesait que 75 kilogrammes environ.

L'écart de taille entre les plus grands individus des deux groupes est d'ailleurs si important, que pour moult chercheurs les gigantesques ptérosaures étaient tout simplement incapables de voler (une opinion surprenante, si l'on considère le nombre de leurs traits adaptés au vol). D'autres les voient capables de traverser les airs, mais seulement dans des conditions particulières – avec une atmosphère plus dense que celle d'aujourd'hui, par exemple. D'ailleurs des oiseaux de 12 mètres d'envergure voleraient-ils ? Probablement pas. Plusieurs études récentes (dont une des miennes) démontrent en effet que de tels colosses ne disposeraient pas d'assez d'énergie pour quitter le sol.

Des mâchoires volantes de la taille d'une girafe pour 12 mètres d'envergure !

Mais les ptérosaures n'étaient pas des oiseaux ! Mon équipe accumule depuis dix ans les calculs sur la puissance nécessaire à l'envol de ces titans, et nous parvenons à la conclusion ferme qu'ils pouvaient s'envoler de n'importe où puis se maintenir en vol. Sans imaginer des conditions particulières qui n'existaient pas : l'analyse géochimique des roches sédimentaires du Crétacé (145 à 66 millions d'années) et l'étude de l'anatomie des plantes de cette ère géologique qui vit l'apogée des grands ptérosaures prouvent que son atmosphère n'était guère différente de la nôtre. Il est clair que l'originalité de ces énormes reptiles est avant tout leur anatomie.

Un animal même gigantesque peut voler à trois conditions. La première est que son squelette ait un rapport force/poids élevé (grand volume, faible densité). Les oiseaux ont de telles ossatures. Les ptérosaures aussi : la plupart de leurs os sont creux. L'humérus de *Quetzalcoatlus* illustre cette nécessité : de seulement 3 millimètres, son épaisseur était comparable à celle d'une coquille d'œuf d'autruche,

mais son diamètre au coude atteignait pratiquement 27 centimètres.

La deuxième condition est d'obtenir un coefficient de portance maximum élevé. Ce nombre quantifie la portance, c'est-à-dire la force perpendiculaire au vent relatif produite par le passage des ailes dans l'air pour une vitesse et une surface alaire données. Or plus le coefficient est élevé, plus le corps des animaux peut être lourd parce que leurs ailes en supporteront le poids à faible vitesse. Ce qui signifie également que ces créatures pourront quitter le sol sans avoir besoin de beaucoup d'élan, ce qui fait une énorme différence quant à la puissance musculaire nécessaire au «décollage». Comme celles de nos chauves-souris actuelles, les ailes des ptérosaures étaient formées par des membranes tendues sur les os des membres antérieurs. Et de telles ailes produisent plus de portance par unité de vitesse et de surface que celles emplumées des oiseaux. Cette portance surfacique supplémentaire améliore la manœuvrabilité à faible vitesse, ce qui facilite la maniabilité chez les petits animaux volants et les décollages et atterrissages chez les gros.

La troisième condition nécessaire – la plus exigeante – est de disposer d'une puissance de lancement suffisante. Pour prendre son envol, une grande créature, même dotée d'une belle envergure, doit pouvoir bondir assez haut. Les animaux volants, en effet, ne se hissent pas dans l'air à coups d'aile. Pas plus qu'ils ne se jettent dans le vide d'une falaise ou d'un autre perchoir: ils risqueraient de ne pas accélérer suffisamment de vitesse avant de s'écraser au sol. Un saut puissant permet en revanche d'atteindre la vitesse et la hauteur nécessaires pour commencer à voler. Les animaux volants grands doivent donc être de bons sauteurs.

De fait, beaucoup d'oiseaux bondissent de façon impressionnante. Toutefois, leur biomécanique, héritée des dinosaures théropodes, les limite aussi, puisqu'ils ne peuvent se servir que de leurs membres postérieurs pour sauter. Par contre, les ptérosaures étaient quadrupèdes à terre: leurs ailes se repliaient de façon à leur permettre de marcher – et donc de sauter – en s'aidant de leurs quatre membres. De nombreuses pistes d'envol de ces rois du ciel magnifiquement préservées confirment ce mode de locomotion étrange. Or la quadrupédie augmente radicalement la puissance de lancement, et donc la taille maximale possible de ces monstres aériens (*voir l'encadré page 50*).

Dans le passé certains chercheurs ont modélisé comment les ptérosaures auraient pu se lancer à l'aide de leurs deux pattes postérieures seulement. En 2004, Sankar Chatterjee, de l'université Texas Tech, et un collègue ont par exemple modélisé la façon avec laquelle *Quetzalcoatlus* se serait propulsé dans les airs, à l'aide de ses deux jambes, pour y déployer ses 9 mètres d'envergure. Ils sont parvenus à la conclusion que pour cela, son poids ne devait pas excéder 75 kilogrammes et qu'il devait décoller en dévalant une pente soumise à un vent contraire. Un scénario un peu tordu alors qu'un envol à l'aide de quatre pattes autorise un poids et des conditions d'envol plus réalistes.

DES GROSSES TÊTES

Il semble donc que l'énigme de la taille des ptérosaures géants puisse être résolue en partie. En revanche, leurs proportions anatomiques quasi aberrantes continuent à contrarier les paléontologues. Pour commencer, celles de leurs membres. Le très étonnant et immense quatrième doigt soutenant l'aile, par exemple, fait sans doute de la main ptérosaurienne la plus spécialisée parmi celles de tous les vertébrés. Pour autant, même si cette caractéristique surprend *a priori*, son développement n'est en fait pas inexplicable, tant donné le rôle central qu'elle joue dans le déploiement de l'aile de l'animal et dans sa capacité à voler. En revanche, la forme des têtes ptérosauriennes continue à totalement dérouter – et exciter – les chercheurs.

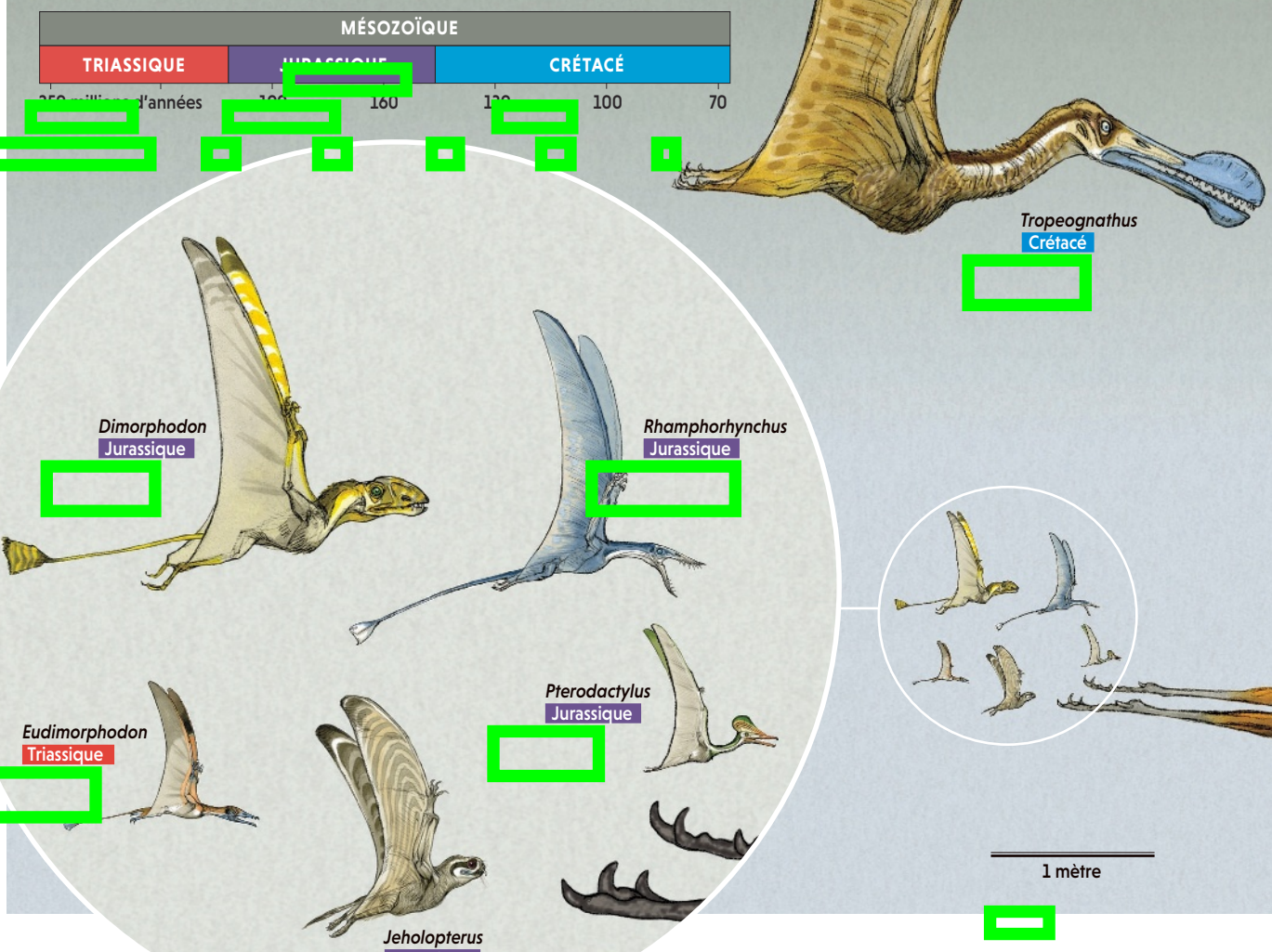
Même les premiers ptérosaures avaient de très grandes têtes. Celle de *Rhamphorhynchus*, une espèce représentative de la fin du Jurassique, il y a quelque 150 millions d'années, était presque aussi longue que son corps; et au Crétacé, elles sont devenues immenses. *Quetzalcoatlus* ou encore *Anhanguera* («vieux diable» en langue tupi), un ptérosaure piscivore brésilien de 4,6 mètres d'envergure, illustrent particulièrement bien le fait que si le corps de ces reptiles a grandi au Crétacé, en proportion, leur tête est devenue gigantesque: celle d'un ptérosaure crétacé typique peut en effet être 2 ou 3 fois plus longue que son corps (mesuré de l'épaule à la hanche); voire quatre fois plus longue chez certaines espèces. Les boîtes crâniennes de ces animaux n'en étaient pas pour autant plus grosses. Ce sont surtout les faces et les mâchoires qui ont grandi à un point démesuré. Des rebords osseux sous la mâchoire, des crêtes imposantes au sommet du crâne et diverses excroissances amplifient encore le côté étrange de leur anatomie crânienne et donnent en fait l'impression que leurs têtes et leurs corps ne proviennent pas du même animal...

Les bizarreries ne s'arrêtent pas là. Alors que chez la plupart des animaux, y compris les humains, les os du cou sont parmi les plus petits de la colonne vertébrale, les vertèbres cervicales ptérosauriennes sont souvent les plus larges. Il arrive qu'elles soient deux fois plus volumineuses que les autres vertèbres. L'un des ajouts les plus récents à l'arbre >

> phylogénétique des ptérosaures illustre parfaitement cette particularité. David Hone, de l'université Queen-Mary, à Londres, François Therrien, du Royal Tyrrell Museum, en Alberta, au Canada, et moi-même avons dévoilé dans le *Journal of Vertebrate Palaeontology*, les premiers fossiles d'une espèce découverte en Alberta. *Cryodrakon borealis* – c'est-à-dire le « dragon gelé du Nord » (en hommage à Viserion, un des dragons de la série *Game of Thrones*) possède des vertèbres cervicales presque aussi longues et deux fois plus solides que ne l'est son humérus, cet os du « bras-aile » des ptérosaures sur lequel s'accrochaient la plupart des muscles qui travaillaient pendant le vol. Chez certaines espèces, le cou est trois fois plus long que le torse et la taille de la tête triple, de sorte que l'ensemble tête-cou représente plus de 75 % de la longueur totale du ptérosaure ! Comment un animal

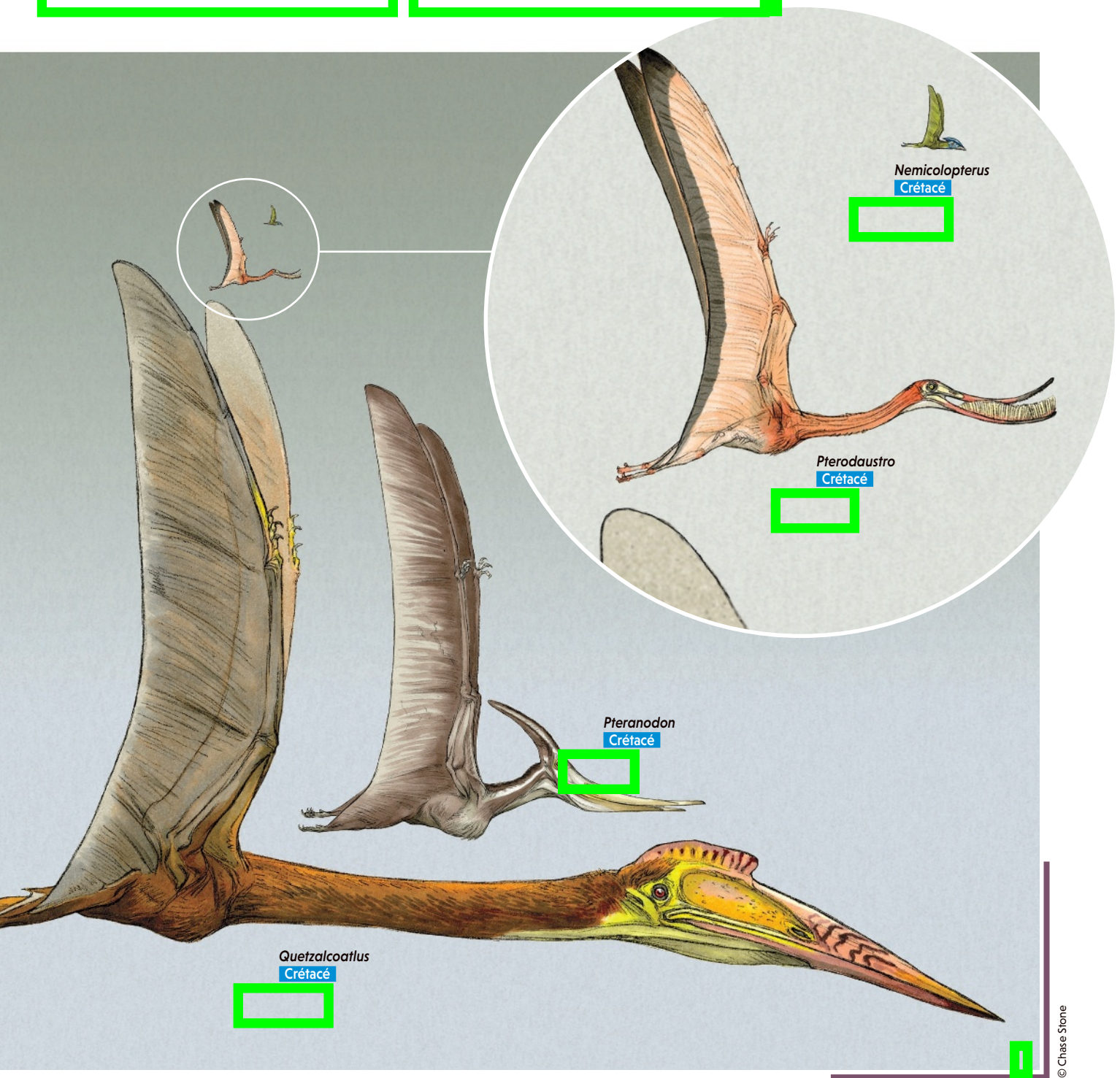
DES ANIMAUX GRANDS ET BIZARRES

Les ptérosaures avaient tous des proportions étranges. Leur quatrième doigt soutenait les ailes. Leurs têtes étaient très grandes par rapport à leur corps. Au cours de l'évolution, certains ont développé des plans d'organisation encore plus extrêmes, avec des têtes et des cous démesurés, représentant jusqu'à 75 % de la longueur du corps. Il est probable que la grande taille des ptérosaures a contribué à leur disparition à la fin du Crétacé.



peut-il avoir des proportions aussi extrêmes? Et comment un tel plan d'organisation peut-il être adéquat chez une créature volante?

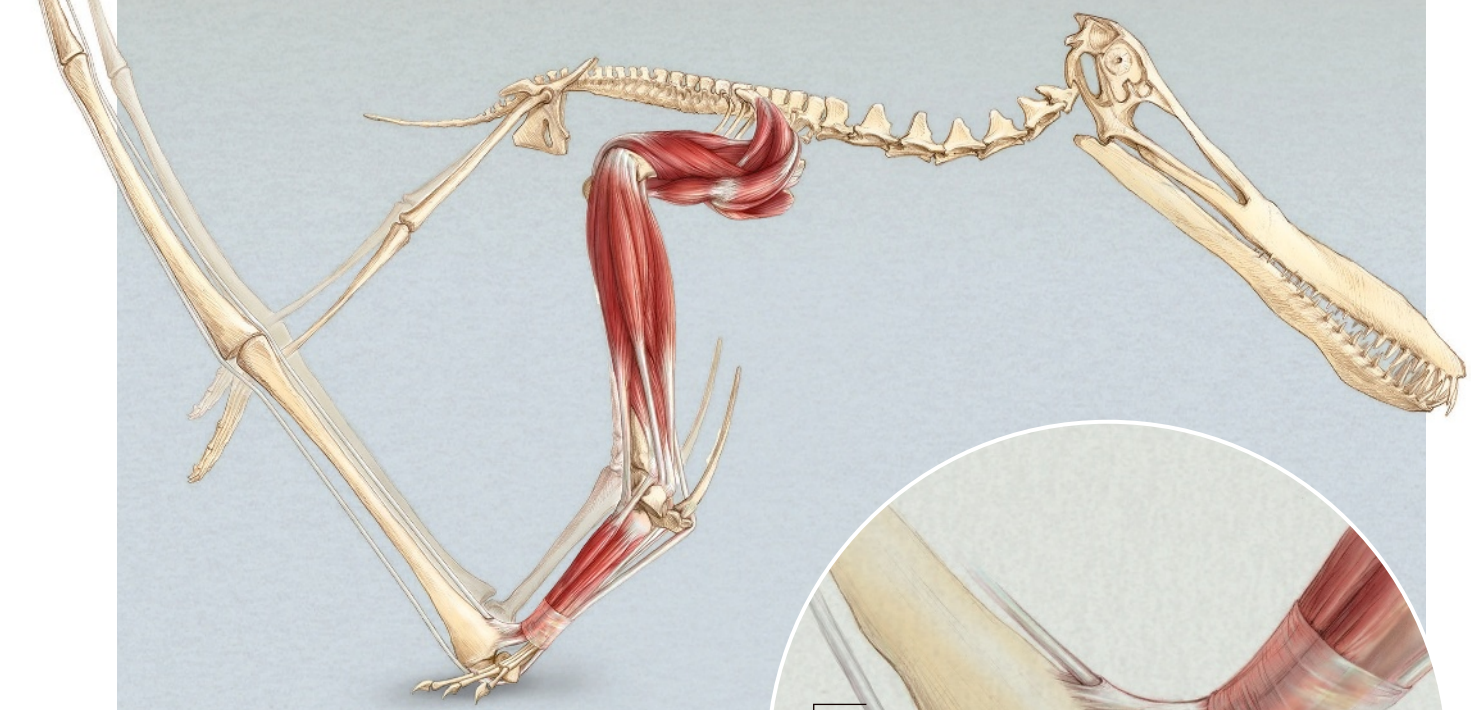
Une explication probable est ce que je nomme l'hypothèse « si c'était facile, tout le monde le ferait ». Bref, avoir une grande mâchoire pour se nourrir et une grande face pour communiquer avec ses partenaires sexuels et ses rivaux serait avantageux pour nombre d'animaux si les coûts associés à ces traits n'étaient pas en général prohibitifs. Les grosses boîtes crâniennes des mammifères, par exemple, impliquent qu'à mesure que les familles augmentent, les têtes s'alourdissent. Les ptérosaures ont peut-être suivi une trajectoire développementale rendant les proportions de la face moins dépendantes de celles de l'arrière du crâne. Cela aurait permis l'évolution de mâchoires géantes sans induire pour autant d'énormes boîtes crâniennes. >

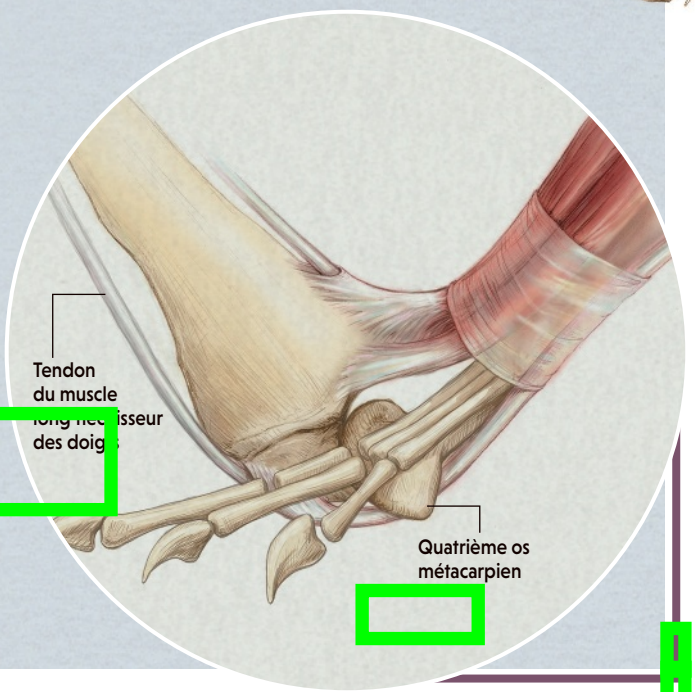


© Chasse Stone

MARCHER ET DÉCOLLER

Même les plus grands ptérosaures volaient. Leurs poids dépassaient probablement 300 kilogrammes, soit beaucoup plus que les plus gros des oiseaux connus ayant jamais volé. Comment de tels géants pouvaient-ils décoller ? Contrairement aux oiseaux, bipèdes, les ptérosaures se lançaient dans les airs à partir d'une position quadrupède, poussant d'abord sur les membres postérieurs, puis avec leurs bras-ailes. D'après la modélisation physique, cela leur aurait procuré assez de puissance au décollage pour s'envoler. Contrairement aux oiseaux, les ptérosaures pouvaient décoller en profitant des puissants muscles de leurs bras-ailes.





Les « bras-ailes » des ptérosaures semblent avoir été dotés d'un mécanisme de catapulte. Le tendon du muscle long fléchisseur des doigts (*Musculus flexor digitorum longus*) aurait été coincé pendant la phase d'appui préalable au décollage, puis aurait brusquement glissé dans une rainure du quatrième os métacarpien, ce qui aurait libéré de l'énergie élastique et propulsé le ptérosaure dans les airs.

© Chase Stone

> Les ptérosaures avaient également des «trous dans la tête»: des ouvertures supplémentaires, dont la plus importante – la fenêtre antéorbitaire – se trouvait devant les yeux. Les dinosaures aussi avaient de telles ouvertures, mais les ptérosaures les ont davantage développées, aboutissant dans certains cas à une fenêtre si énorme que le squelette entier du torse aurait pu y tenir! Du vivant de ces monstres, cette ouverture était sans doute couverte de peau et d'autres tissus de sorte qu'elle n'était probablement pas apparente. Elle rendait en tout cas le crâne léger par rapport à la taille. Les os crâniens contenaient aussi peut-être de grands volumes d'air, comme ceux de certains oiseaux d'aujourd'hui.

Cependant, même relativement légères, les têtes des ptérosaures étaient souvent si colossales qu'elles devaient quand même peser leur poids! Mais à cet égard, être ces créatures volantes a peut-être joué en leur faveur, ce qui est sans doute contre-intuitif. Le principal problème que pose une tête lourde n'est pas l'augmentation globale du poids corporel, mais plutôt le fait qu'un crâne massif – surtout s'il se trouve au bout d'un long cou – déporte le centre de gravité vers l'avant. Chez un animal marcheur, cela crée d'importants problèmes de posture pendant la marche: pour équilibrer le corps en mouvement, les membres antérieurs doivent être placés très en avant dans une position gênante. Les ptérosaures, pour leur part, avaient d'énormes avant-bras spécialement structurés, non pas pour la marche, mais pour le vol.

Les reconstitutions de la marche ptérosaurienne réalisées par Kevin Padian, de l'université de Californie à Berkeley, ont montré que lorsqu'un ptérosaure se déplaçait à terre, ses membres antérieurs étaient positionnés peu près comme il fallait pour supporter le poids de la tête, du cou et du torse. La plus grande partie de la propulsion pendant la marche venait des jambes, de sorte que les ptérosaures pouvaient soutenir le poids de leur grosse tête sur leurs bras-ailes très épais et se déplacer à l'aide de leurs membres postérieurs de taille beaucoup plus normale. Afin de mieux comprendre, rappelez-vous comment on emploie des béquilles: afin de se mouvoir tout en minimisant le poids portant sur les jambes, on procède en plaçant d'abord les béquilles en avant, puis en faisant porter la plus grande partie du poids sur elles, avant de basculer les jambes vers l'avant, de les poser puis de recommencer... C'est sans doute à cela que ressemblait la marche chez les ptérosaures (*voir l'encadré ci-contre*). Au décollage, les jambes poussaient probablement en premier, puis les bras-ailes, afin de réaliser un lancement parfait en deux étapes.

Cette façon de marcher n'était sans doute pas la plus efficace, mais elle était pratique avec des corps aussi curieux. Et ces animaux se déplaçaient de toute façon surtout en volant. En fait, on estime que les ptérosaures aux ailes particulièrement longues et étroites étaient sans doute comparables à certains oiseaux de mer modernes: ils auraient volé sans interruption pendant des mois, voire des années, ne se posant que pour s'accoupler et pondre. Ce fut le cas sans doute de *Nyctosaurus* («lézard de nuit»), reconnaissable à l'étonnante crête qu'il portait sur la tête (elle ressemble à des bois de cerf). Peut-être a-t-il eu les ailes les plus efficaces ayant jamais existé – et donc le plus long vol continu – de tous les vertébrés volants que la planète ait connus.

Certains ptérosaures auraient volé sans interruption pendant des années

Une fois en l'air, le problème du centre de gravité devient beaucoup plus facile à résoudre. Pour qu'un animal soit stable en l'air, son centre de poussée (le point où s'applique la résultante des forces de portance des ailes) et son centre de gravité doivent être alignés. Cela peut sembler difficile à réaliser chez une créature ayant une tête surdimensionnée et donc un centre de gravité proche de cette dernière. Toutefois, le centre de poussée d'un ptérosaure était situé juste devant ses ailes, ce qui signifie, comme Colin Palmer, de l'université de Bristol, en Angleterre, et ses collègues l'ont souligné en premier, que, pour aligner le centre de poussée avec le centre de gravité, le reptile n'avait qu'à pointer modérément ses ailes vers l'avant. Ainsi positionnées, les ailes (dites «en flèche inversée» en aéronautique) peuvent entraîner des instabilités de vol, mais la souplesse de celles des ptérosaures et la finesse du contrôle moteur par le cerveau que possèdent tous les vertébrés, devaient leur permettre de compenser.

Une fois les problèmes de stabilité maîtrisés, ce positionnement des ailes a de sérieux avantages. L'un d'entre eux est que ce sont les extrémités de l'aile qui décrochent en dernier. Pendant un décrochage, phénomène qui survient le plus souvent à faible vitesse, la >

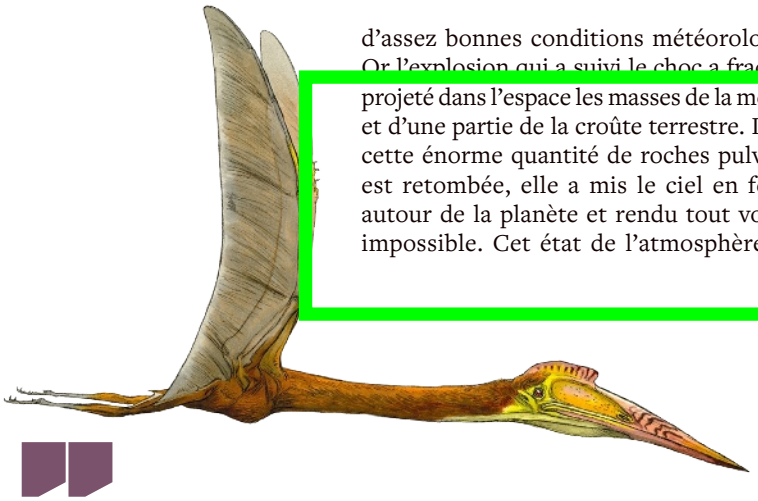
> portance s'évanouit. Or le fait que les pointes des ailes décrochent est particulièrement catastrophique : cela perturbe immédiatement le sillage de l'aile, ce qui, en augmentant beaucoup la traînée (la résistance de l'air), compromet gravement la propulsion et le contrôle. La capacité de retarder l'effondrement de la portance rendait sans doute les atterrissages et décollages bien plus doux. Nous voyons donc que, chez un gros animal volant à ailes flexibles, posséder une énorme tête pouvait avoir des avantages : cela décalait le centre de gravité vers l'avant, ce qui amenait l'animal à avancer ses ailes, ce qui à son tour entravait les décrochages. Au final, cela signifiait qu'un ptérosaure pouvait voler plus lentement et se permettre d'être plus grand.

LA MORT D'UNE DYNASTIE

Pendant environ 80 millions d'années, les ptérosaures furent les seuls vertébrés pratiquant le vol actif. Puis, il y a environ 150 millions d'années, au Jurassique, des dinosaures à plumes capables de voler apparurent. Ce groupe comprenait des espèces à quatre ailes tels *Microraptor* et *Anchiornis*, ainsi que de vrais animaux volants accomplis : les oiseaux. Au Crétacé inférieur, une bonne variété d'entre eux partageait le ciel avec les ptérosaures. Malgré ce bouleversement dans la niche aérienne, les moyennes et grandes « mâchoires volantes » sont restées les animaux volants dominants, en particulier dans les habitats ouverts. Les oiseaux restant confinés aux zones de végétation, où leur petite taille et leur agilité étaient avantageuses, les ptérosaures maintenaient leur suprématie dans le ciel.

Mais quand un astéroïde a percuté la Terre il y a 66 millions d'années, tuant pratiquement tous les dinosaures, le règne des ptérosaures a également pris fin. Jusqu'à présent, les découvertes paléontologiques suggèrent qu'aucune espèce de ces étranges reptiles n'a franchi la limite du Crétacé ; toutes ont péri, comme la majorité de celles des oiseaux. Une seule lignée de dinosaures aviens – les néornithes, ou « nouveaux oiseaux » – s'est perpétuée mais elle a suffi, puisqu'elle a produit ensuite des milliers et des milliers de nouvelles espèces. De fait, aujourd'hui, avec ses quelque 9900 espèces connues, les néornithes représentent le deuxième plus grand groupe de vertébrés, après les poissons osseux et leurs 12000 espèces.

Pourquoi les ptérosaures ont-ils disparu alors que les néornithes ont survécu ? Pour les plus costauds ce n'est pas étonnant puisqu'aucun animal terrestre de masse corporelle supérieure à 20 kilogrammes n'a survécu à l'apocalypse météoritique. Leur dépendance au vol pour se nourrir explique peut-être le reste, car les animaux volants – surtout les grands – utilisent beaucoup le vol plané, ce qui exige d'assez bonnes conditions météorologiques. Or l'explosion qui a suivi le choc a fracassé et projeté dans l'espace les masses de la météorite et d'une partie de la croûte terrestre. Lorsque cette énorme quantité de roches pulvérisées est retombée, elle a mis le ciel en feu tout autour de la planète et rendu tout vol plané impossible. Cet état de l'atmosphère aurait



Faute de pouvoir continuer à planer, les ptérosaures seraient morts de faim

durer tout un mois, bien assez longtemps pour affamer tous les ptérosaures, puisqu'ils devaient voler pour manger.

À l'évidence, le fait d'être un petit animal volant n'assurait pas la survie, et la plupart des oiseaux ont succombé. Ceux qui ont résisté auront mangé des aliments pouvant résister à l'équivalent d'un hiver nucléaire, comme les graines par exemple. Ils savaient peut-être aussi creuser des terriers, comme le font beaucoup d'oiseaux aujourd'hui. Les ptérosaures n'étaient pas granivores et ne semblent pas non plus avoir été capables d'excaver. Et pourquoi l'auraient-ils été ? Un monstre volant de plus de 4 mètres d'envergure n'avait pas besoin de s'enterrer pour se mettre hors de danger : le danger, c'était lui.

Même si elle se termine par une extinction rapide, la saga des ptérosaures est celle d'un grand succès évolutif. Leurs caractéristiques anatomiques stupéfiantes leur conservent le statut de géants du ciel. Leur étude nous a beaucoup appris sur les limites des formes animales et de leur fonction. Les leçons que nous en tirons nous aident à comprendre l'histoire de la Terre et la complexité écologique. Elles inspirent aussi des technologies aujourd'hui, notamment de nouveaux aéronefs. Leur registre fossile ouvre une fenêtre sur un monde disparu plein de monstres volants, pas seulement phénoménaux mais exceptionnels. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Ksepka et M. Habib, **Géants du ciel, Pour la Science**, n° 471, janvier 2016.

D. Hone *et al.*, **The wingtips of the pterosaurs: Anatomy, aeronautical function and ecological implications**, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 490, pp. 431-439, 2018.

M. Witton et M. Habib, **On the size and flight diversity of giant pterosaurs, the use of birds as pterosaur analogues and comments on pterosaur flightlessness**, *Plos One*, vol. 5(11), article e13982, 2010.

CNRS FORMATION ENTREPRISES

Le CNRS propose un catalogue de plus de 260 formations technologiques à destination des entreprises pour l'année 2020

L'organisme de formation continue du CNRS présente un large panel de stages courts (3 jours en moyenne) dans tous les domaines : des biotechnologies à la synthèse chimique en passant par l'intelligence artificielle, le big data et les enjeux sociétaux.

Cet outil de transfert des savoirs et savoir-faire du CNRS permet de former plus de 1600 professionnels chaque année issus des secteurs privé (PME et grands groupes) et public.

QUELQUES NOUVEAUTÉS PROPOSÉES PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES EN 2020

APPRENTISSAGE

- Apprentissage automatique pour la vision par ordinateur
  du 15 au 17/06/2020
  LYON - 3 jours

BIOINFORMATIQUE

- Bioinformatique pour la métagénomique
  du 03 au 05/06/2020
  MONTPELLIER - 2,5 jours

TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

- Initiation aux SIG en écologie : de la collecte au traitement de données géographiques
  du 18 au 20/03/2020
  POITIERS - 2,5 jours

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

- Applications du calcul scientifique dans l'industrie
  du 17 au 19/03/2020
  PARIS - 3 jours

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

- Interactions plasma / surfaces : utilisation des plasmas froids pour le traitement de surfaces
  du 24 au 27/03/2020
  GRENOBLE - 3,5 jours

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

- Rhéologie
  du 01 au 03/04/2020
  PARIS - 3 jours
- Fluorescence X de type EDX
  du 28 au 29/05/2020
  LE MANS - 2 jours

CHIMIE DURABLE, PROCÉDÉS

- Mécanochimie pour une chimie de synthèse écocompatible
  du 01 au 02/04/2020
  MONTPELLIER - 2 jours
- Transformation de la biomasse en produits chimiques de spécialité
  du 11 au 12/06/2020
  POITIERS - 2 jours

CHIMIE ANALYTIQUE

- Préparation d'échantillons par fusion alcaline pour analyses ICP
  du 11 au 12/06/2020
  VANDŒUVRE-LÈS-NANCY - 1,5 jour

MICROSCOPIE ET IMAGERIE

- Cytométrie en image
  du 18 au 20/11/2020
  LYON - 3 jours

BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

- La cytométrie en flux appliquée à la microbiologie
  du 01 au 03/04/2020
  VALBONNE - 2,5 jours

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

- Préparer des banques NGS à partir d'ADN et d'ARN : les étapes pratiques et méthodologiques appliquées à la technologie Illumina
  LYON - 3 jours

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

- Tests sur animaux vivants, points limites
  le 03/03/2020
  SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES - 0,5 jour

QUALITÉ ET SÉCURITÉ

- Maîtrise des risques potentiels liés aux nanomatériaux en laboratoire de recherche
  le 06/10/2020
  NANCY - 1 jour

SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE

- Jeunesses en exil : quel accueil des mineurs non accompagnés ?
  du 23 au 25/11/2020
  PARIS - 3 jours

COGNITION ET COMPORTEMENT

- Les mouvements oculaires : techniques d'oculométrie, recueil et analyse de mouvements oculaires, interprétation, applications
  PARIS - 2 jours

Découvrez l'ensemble des stages de formation sur cnrsformation.cnrs.fr

Ou contactez-nous à cfe.contact@cnrs.fr ou 01 69 82 44 55

L'ESSENTIEL

> Il y a cent ans, l'écrivain Pierre Louÿs a lancé une polémique en affirmant que Molière n'était pas l'auteur des pièces qui lui sont attribuées.

> Au début des années 2000, des travaux de linguistique quantitative sont venus appuyer cette thèse, qui a reçu beaucoup de publicité.

> De nouvelles analyses linguistiques, utilisant six méthodes différentes, l'invalident et confirment la paternité de Molière sur ses œuvres.

LES AUTEURS

FLORIAN CAFIERO
ingénieur de recherche au CNRS et chargé de cours à l'École nationale des Chartes – université Paris Sciences & Lettres

JEAN-BAPTISTE CAMPS
maître de conférences à l'École nationale des Chartes – université Paris-Sciences & Lettres

Molière est bien l'auteur de ses œuvres

On a longtemps soupçonné Jean-Baptiste Poquelin de ne pas avoir écrit ses pièces, dont le véritable auteur serait Corneille. Mais l'étude de la langue de Molière et de ses contemporains rend à l'homme de théâtre ce qui lui est dû.

Il y a maintenant cent ans, le poète et romancier Pierre Louÿs lançait une polémique : plusieurs articles de lui, notamment le 16 octobre 1919 dans le quotidien français *Le Temps*, soutenaient que l'auteur d'*Amphitryon* n'était pas Molière, mais son illustre contemporain Pierre Corneille. Depuis, le soupçon n'a cessé de peser sur la paternité des pièces signées de Molière. Comment un comédien présumé sans grande éducation littéraire, qui plus est fort occupé entre ses charges de valet de chambre du roi et de directeur de troupe de théâtre, aurait-il pu écrire tant de chefs-d'œuvre ?

Au cours des décennies qui ont suivi, plusieurs ouvrages sont parus sur ce problème, défendant l'idée que Molière n'était en fait que l'acteur principal des comédies qu'on lui attribue. Le vrai génie littéraire, Pierre Corneille, serait resté dans l'ombre, profitant des revenus de la pièce sans ternir sa réputation d'auteur sérieux, et sans s'exposer aux controverses que ces comédies souvent polémiques ont pu susciter.

Très discutée, cette thèse a pris une nouvelle dimension lorsque, au début des années 2000, des travaux en linguistique quantitative de Dominique Labbé, de l'IEP de Grenoble, et Cyril Labbé, de l'université Grenoble 1, ont soutenu que les vocabulaires des pièces de Corneille et Molière sont trop proches pour que ces œuvres aient été écrites par deux auteurs différents, et, par conséquent, que Corneille aurait bien écrit les pièces de Molière. La nouvelle a été reprise par la presse mondiale, évoquée ou défendue dans différents reportages et documentaires, et a même donné son sujet à un téléfilm.

Mais la popularité de cette thèse ne doit pas masquer les nombreuses réactions défavorables qu'elle a suscitées dans le monde de la recherche littéraire et linguistique. Pour tenter de trancher la question, nous avons récemment réalisé de nouvelles analyses des textes de Molière, de Corneille et de leurs contemporains. D'après leurs résultats, qui viennent d'être publiés, la théorie niant à Molière la paternité de ses pièces est erronée. >

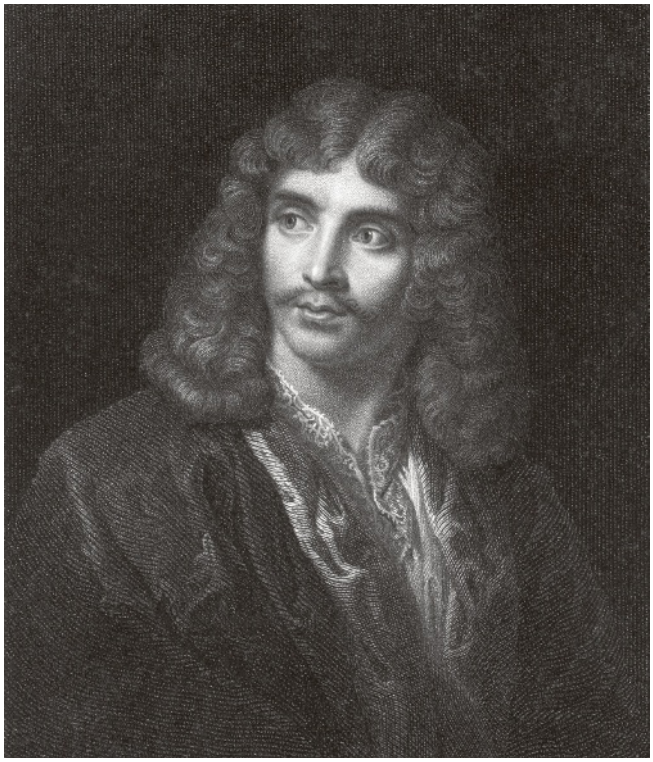
Une scène de la pièce *Le Malade imaginaire*, de Molière, peinte par Abraham Solomon (18[illegible]1).

© Wellcome Collection - CC BY

> Les arguments laissant à penser que Molière n'aurait pas écrit ses pièces sont d'abord historiques. Il ne nous est ainsi parvenu aucun manuscrit, pas même une lettre, une note ou un brouillon, qu'on puisse lui attribuer. Il s'agit là d'un cas unique pour un auteur aussi prolifique et célèbre. Le moliériste Georges Forestier, de l'université Paris-Sorbonne, note toutefois que les manuscrits d'auteurs du XVII^e^ siècle, alors jugés de peu d'importance, étaient très rarement archivés, mais bien plus souvent détruits. Aucun brouillon ou manuscrit de pièces de Corneille n'a ainsi été conservé. De Racine, il ne nous est parvenu qu'un acte d'un projet de pièce finalement abandonné. Et si ses descendants l'ont précieusement gardé, c'est probablement parce que cette pièce n'a jamais été imprimée, et que ce brouillon en était la seule trace restante. Rien de si alarmant, donc, à ne rien retrouver de la main de Molière.

Autre élément ayant prêté au soupçon: Molière aurait commencé à jouer les pièces de Corneille après un voyage à Rouen en 1643, et se serait mis à écrire ses chefs-d'œuvre après un séjour en 1658 dans la même ville. Or Rouen était le fief de Corneille. Ces voyages en province normande auraient-ils été l'occasion d'entrevues secrètes entre les deux hommes? Les spécialistes de Molière en doutent, et ne sont guère impressionnés par la coïncidence. Il est possible, mais nulle part attesté, que Molière et Corneille se soient rencontrés sur place. Et l'on ne trouve aucune trace d'un quelconque accord conclu entre les deux hommes. Dans sa correspondance, Corneille semble d'ailleurs indifférent au passage de la troupe en 1658. Troisième ville du pays, Rouen était régulièrement visitée par les troupes de théâtre, qui n'y allaient pas nécessairement voir Corneille.

Dernier argument majeur: l'éclosion tardive du talent de Molière. Celui-ci écrivit tous ses chefs-d'œuvre passé l'âge de 37 ans, ce qui n'a



Molière, de son vrai nom Jean-Baptiste Poquelin (1622-1673), gravure de James Posselwhite publiée dans *The Gallery of Portraits: with Memoirs*, d'Arthur Thomas Malkin (Londres, 1999).

pas manqué d'étonner. Selon Hippolyte Wouters, avocat belge et auteur de théâtre, ce serait le seul cas «où un auteur médiocre jusqu'à 40 ans devient non seulement profond, mais surtout une des plus belles plumes de son temps». Si cette situation est en effet assez rare dans l'histoire littéraire, elle n'est cependant pas inédite – Marcel Proust, James Conrad ou Umberto Eco ont débuté des carrières littéraires tout aussi tard, et ont été couronnés d'un succès certain.

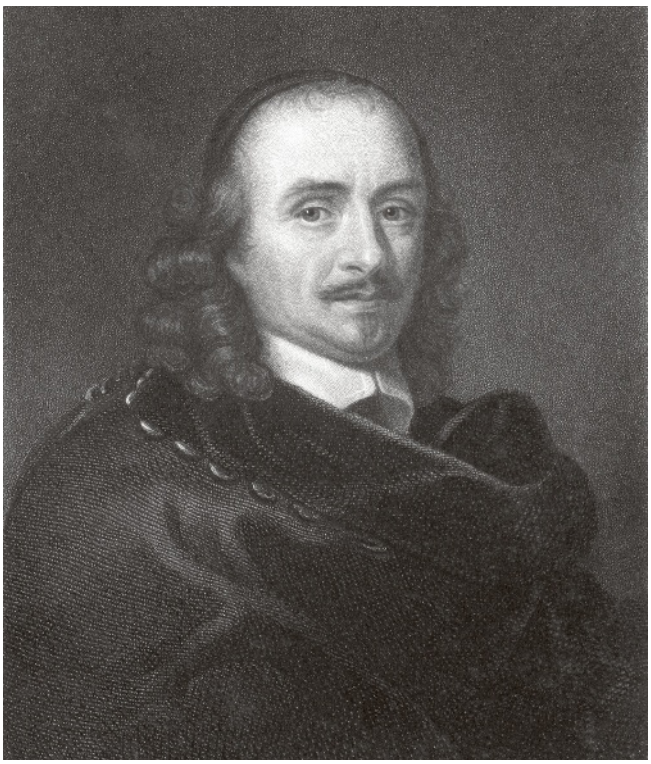
RETOUR AUX TEXTES

Faute d'archives pouvant prouver l'imposture supposée, la controverse historique semblait mener à une impasse. Pour apporter de nouveaux éléments aux débats, des chercheurs ont décidé de s'intéresser aux textes eux-mêmes. Si les textes signés de la main de Molière étaient stylistiquement proches de ceux de Pierre Corneille, ce pourrait être le signe que ce dernier en est l'auteur.

Le constat de départ de Dominique et Cyril Labbé est simple: deux textes écrits par un même auteur ont plus de vocabulaire en commun que deux textes écrits par des auteurs différents. En prenant comme base la fréquence d'apparition de chaque mot dans un texte, ils ont calculé une «distance intertextuelle», qui mesure la différence entre deux textes dans le choix du vocabulaire. Si la distance intertextuelle séparant deux pièces est

L'éclosion tardive du talent d'un auteur est une situation rare, mais pas inédite

© Shutterstock.com/Georgios Kollidas



Pierre Corneille (1606-1684), gravure de Thomas Woolnoth publiée dans *The Gallery of Portraits : with Memoirs*, d'Arthur Thomas Malkin (Londres, 1833).

© Shutterstock.com/Georgios Kollidas

D'après les calculs de Dominique et Cyril Labbé, les œuvres attribuées à Corneille et de nombreuses pièces de Molière sont trop proches pour avoir été écrites par deux personnes différentes. Cela porterait à croire que Corneille a écrit la plupart des chefs-d'œuvre signés de Molière (l'hypothèse selon laquelle Molière aurait écrit les pièces de Corneille étant invraisemblable et impossible pour des raisons chronologiques).

Depuis ces travaux fondateurs, les techniques permettant de découvrir l'auteur d'un texte ont évolué. Leur usage, tant par des philologues cherchant à identifier la plume derrière un poème jamais signé que par les services de renseignement pour démasquer l'auteur d'une lettre anonyme, s'est également étendu.

ANALYSER LES HABITUDES D'ÉCRITURE ET LES TICS DE LANGAGE

Ces méthodes reposent sur l'analyse statistique des habitudes d'écriture et des tics de langage. En écrivant un texte, nous laissons involontairement des empreintes qui trahissent notre identité : chaque individu utilise avec une fréquence particulière des mots, des expressions ou des structures grammaticales. En les relevant systématiquement, on peut se faire une excellente idée de qui a écrit un texte.

Depuis quelques années, la démarche la plus couramment adoptée pour révéler l'auteur d'un texte repose sur l'intelligence artificielle. On réunit d'abord une sélection de textes dont on connaît les auteurs avec certitude. On entraîne alors l'ordinateur à reconnaître les auteurs de chacun de ces textes avec la meilleure précision possible. Puis on lui fournit des textes anonymes, pour lesquels la machine prédit l'auteur le plus vraisemblable.

Mais pour construire le profil type des textes d'un auteur, encore faut-il être d'accord sur les pièces que cet auteur a réellement rédigées. Or, dans notre débat, tout le monde n'est pas d'accord sur qui a écrit quoi. La théorie des « comédiens poètes », défendue notamment par Dominique Labbé, voudrait que, comme dans les spectacles d'humour d'aujourd'hui, dont on connaît l'interprète mais rarement le ou les auteurs, on aurait au XVII^e^ siècle mis en avant le comédien principal et entièrement omis de citer le dramaturge. Quelque 90 % des comédies de l'époque auraient alors été signées par un prête-nom. Si l'on veut prendre au sérieux cette possibilité, il faut donc adopter une autre approche.

Faute d'accorder une totale confiance à l'apprentissage automatique d'une machine, tout en nous assurant au maximum de la solidité de nos conclusions, nous avons utilisé, parallèlement, six méthodes différentes considérées comme fiables pour distinguer l'auteur d'un texte. Testées sur un corpus de trente grandes comédies en vers écrites après la mort de Corneille et Molière par six auteurs, trois de ces méthodes prédisent le bon auteur dans 100 % des cas, deux dans 93 % et une dans 87 % des cas.

FRÉQUENCES DES MOTS

La première méthode consiste simplement à compter le nombre d'occurrences de chaque mot qui apparaît dans les textes étudiés. On considère le texte comme un « sac de mots ». Les fréquences d'apparition de chaque mot dans ce sac varient d'un texte à l'autre. La distribution de ces fréquences constitue une signature : à chaque auteur ses préférences quant au vocabulaire qu'il utilise.

On peut parfois considérer que certaines variations autour d'un même mot ne sont pas significatives. Utiliser « galère » ou « galères », « vois » ou « voit » peut paraître indifférent, ce qui compterait étant de dire « galère » plutôt que « navire », d'utiliser le verbe « voir » plutôt que « regarder ». La conjugaison, le pluriel, etc. ne seraient qu'accidentels par rapport au terme choisi. Dans ce cas, on travaille non pas sur le mot, mais sur le *lemme* : un usage de « vois », « voit » ou « voyons » est alors considéré dans le calcul comme un usage de « voir », un usage de « galères » comme un usage de « galère », et ainsi de suite. Mais cette >

> deuxième méthode consistant à étudier les lemmes, intéressante en soi, s'est révélée un peu moins fiable (93%) lors de notre phase de calibration que l'étude des mots.

Étudier le vocabulaire dans son intégralité peut toutefois générer certains biais. Notre emploi de certains mots dépend bien sûr de qui nous sommes, mais aussi de ce dont nous parlons. Si l'on étudie des textes d'auteurs au style proche, les thèmes abordés peuvent engendrer plus de variations dans le vocabulaire que les différences de style des écrivains. Or la langue du théâtre classique est extrêmement codifiée, en particulier pour les pièces écrites en vers. Dans notre cas, la crainte de variations liées aux sujets n'est donc pas infondée.

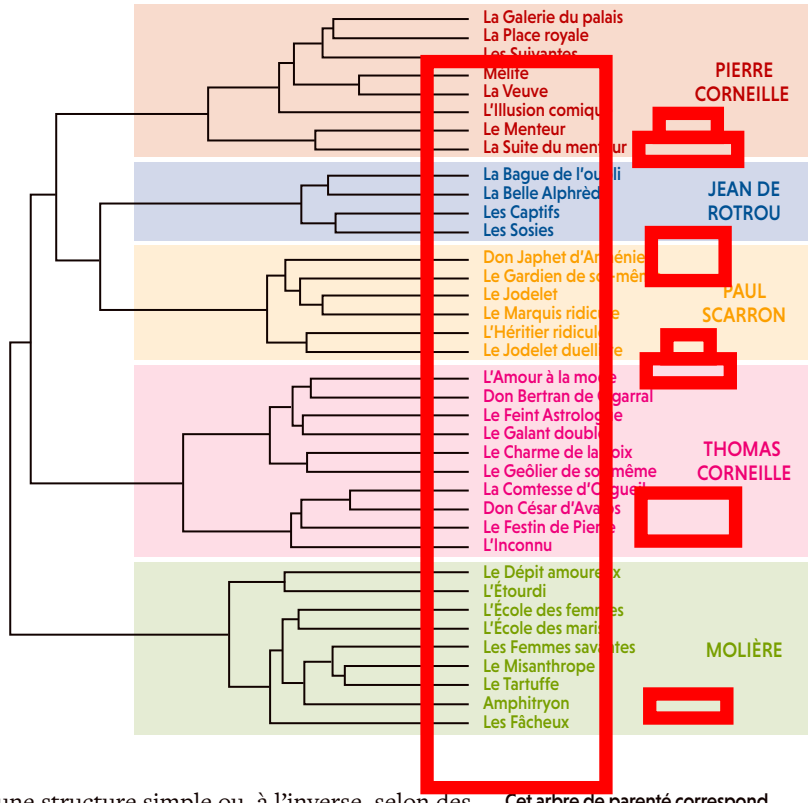
Deux solutions contraires sont alors envisageables. On peut choisir de ne s'intéresser qu'aux mots choisis avec le plus grand soin, ceux qui sont placés à la rime. Ils demandent une réflexion particulière et sont souvent très révélateurs de l'auteur d'un texte. Cette méthode axée sur les rimes a donné sur notre corpus test des résultats corrects à 87%. À l'inverse, on peut se focaliser sur les mots choisis le plus inconsciemment. Les *mots outils* («et», «de», «or», «mais»...) sont peu susceptibles de varier en fonction du sujet traité et ils sont particulièrement fréquents, ce qui permet d'obtenir des statistiques fiables. Ils ont longtemps été considérés comme l'indice le plus pertinent pour déterminer l'auteur d'un texte et, pour notre corpus test, les résultats étaient corrects à 93%.

ORDRE DES ÉLÉMENTS DANS LES PHRASES: SYNTAXE

Une cinquième méthode s'intéresse à l'ordre des éléments d'une phrase. Les phrases «Belle marquise, vos beaux yeux me font mourir d'amour» et «D'amour mourir me font, belle Marquise, vos beaux yeux» comportent exactement les mêmes mots, les mêmes lemmes, les mêmes mots outils. Les méthodes précédentes les considèrent donc comme parfaitement identiques. Pourtant, il est indéniable que le style diffère notablement entre ces deux tournures.

Pour conserver de l'information sur l'enchaînement des mots, on peut considérer le texte non comme un «sac de mots», mais comme un sac de «*n*-grammes de caractères». Cette dernière expression désigne simplement un enchaînement d'un nombre *n* de caractères. Supposons que l'on décompose les phrases précédentes en 5-grammes de caractères. En notant _ chaque espace, nous obtiendrions pour la première: Belle, elle_, lle_m, le_ma, e_mar, _marq, etc. Et pour la seconde, nous aurions: D'amo, 'amou, mour_, etc. On répliquerait alors nos calculs en travaillant non sur des mots, mais sur ce type de séquences.

Dernière option explorée: la syntaxe des auteurs. Écrire des phrases uniquement selon une structure simple ou, à l'inverse, selon des tournures particulièrement alambiquées, constitue un trait distinctif du style d'une personne – l'un des plus fiables avec les mots outils. Pour mesurer ces variations, on annote la nature grammaticale de chaque mot du texte, grâce à une intelligence artificielle spécialement entraînée sur des pièces de l'époque. Puis on étudie à quelle fréquence des successions de trois natures grammaticales (du type pronom personnel / verbe conjugué / nom commun») apparaissent.



Cet arbre de parenté correspond aux résultats de la classification des textes en fonction de l'usage de mots outils *(en vert les pièces de Molière, en rouge celles de Pierre Corneille, en rose Thomas Corneille, en jaune Paul Scarron, en bleu Jean de Rotrou).* On constate que l'algorithme a parfaitement regroupé les pièces selon leur auteur putatif.

SI QUATRE ET QUATRE SONT HUIT, CORNEILLE N'A PAS ÉCRIT MOLIÈRE

Nous avons appliqué ces six méthodes à un ensemble de comédies en vers écrites par Molière, Corneille et leurs contemporains. L'analyse principale a porté sur 37 pièces de Pierre Corneille, son frère Thomas Corneille, Molière, Jean de Rotrou et Paul Scarron. En suivant chacune d'entre elles, toutes les pièces de Molière ont été considérées par nos algorithmes comme celles d'un même auteur, et clairement distinguées des pièces de Corneille – alors que d'autres auteurs, comme Scarron, semblent même plus proches stylistiquement de Molière.

Il paraît donc plus qu'improbable que Molière ait servi de prête-nom à Corneille ou à d'autres dramaturges célèbres de son temps. Faute de génie pouvant le détrôner dans les cœurs et les esprits, le français devrait donc rester encore pour quelque temps «la langue de Molière». ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Cafiero et J.-B. Camps, **likely did write his plays**, *Science Advances*, vol. 5, article eaax548, 2019.

C. Labbé et D. Labbé, **Inter-textual distance and authorship attribution. Corneille and Molière**, *Journal of Quantitative Linguistics*, vol. 8(3), pp. 213-231, 2010.

D. Labbé, **Si deux et deux sont quatre, Molière n'a pas écrit Dom Juan**, Max Milo, 2009.

H. Wouters et C. de Ville de Goyet, **Molière ou l'auteur imaginaire ?**, Complexe, 1990.

© F. Cafiero et J.-B. Camps

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de ~~82,80 €~~	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	29 % de réduction *	31 % de réduction *	43 % de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG20STD

☑ **Oui, je m'abonne pour 1 an à POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER**
- 12 n° du magazine papier

59 € Au lieu de ~~82,80 €~~

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

79 € Au lieu de ~~114,40 €~~

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus

99 € Au lieu de ~~174,40 €~~

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque. Offre réservée aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

2 / J'indique mes coordonnées

☐ Mme ☐ Mr

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ..... Ville : .....

Téléphone .....

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @ .....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque** à l'ordre de Pour la Science

☐ **Carte bancaire**

N° ....

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

Signature obligatoire :

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.

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

© Hanna Barczyk

L'ESSENTIEL

> L'inégalité en matière de richesse s'accroît à un rythme alarmant dans de nombreux pays, en particulier aux États-Unis.

> Un modèle simple de répartition de la richesse conçu par des physiciens et des mathématiciens rend compte des inégalités de richesse dans un grand nombre de pays avec une précision sans précédent.

> Plusieurs modèles mathématiques du libre marché présentent des comportements analogues à ceux de systèmes physiques complexes tels que les matériaux ferromagnétiques.

L'AUTEUR

BRUCE M. BOGHOSIAN
est professeur de mathématiques à l'université Tufts, aux États-Unis. Il étudie les systèmes dynamiques appliqués et les applications de la théorie des probabilités.

Aux sources mathématiques des inégalités de richesse

Un modèle mathématique simple décrit la répartition de la richesse dans les économies modernes avec une précision sans précédent. De quoi remettre en question quelques idées reçues sur le libre marché.

L'inégalité en matière de richesse s'accroît à un rythme alarmant non seulement aux États-Unis et en Europe, mais aussi dans des pays aussi divers que la Russie, l'Inde et le Brésil. Selon la banque d'investissement Crédit Suisse, la part du patrimoine global des ménages détenue par le 1% le plus riche de la population mondiale est passée de 42,5 à 47,2% entre la crise financière de 2008 et 2018. Pour le dire autrement, en 2010, 388 individus détenaient autant de richesses que la moitié la plus pauvre de la population mondiale, soit environ 3,5 milliards de personnes; aujourd'hui, l'organisation non gouvernementale Oxfam estime ce nombre à 26. Et les statistiques de presque tous les pays qui mesurent la richesse dans leurs enquêtes sur les ménages indiquent qu'elle est de plus en plus concentrée.

Bien que les origines des inégalités de richesse fassent l'objet de vifs débats, une approche élaborée par des physiciens et des mathématiciens, dont mon groupe à l'université Tufts, aux États-Unis, suggère qu'elles se trouvent depuis longtemps sous nos yeux – dans une bizarrerie arithmétique bien connue.

Cette méthode utilise des modèles de répartition de richesse à base d'agents, fondés sur des transactions deux à deux entre agents ou acteurs économiques, dont chacun cherche à optimiser ses propres résultats financiers. Dans le monde moderne, rien ne peut sembler plus juste ou plus naturel que deux personnes >

> qui décident d'échanger des biens, de s'entendre sur un prix et de se serrer la main. En effet, la stabilité apparente d'un système économique résultant de cet équilibre de l'offre et de la demande entre les différents acteurs est considérée comme un sommet de la pensée des Lumières, à tel point que de nombreuses personnes en sont venues à associer le libre marché à la notion même de liberté.

Nos modèles, qui sont déroutants de simplicité et qui reposent sur des transactions volontaires, suggèrent cependant qu'il est temps de réexaminer sérieusement cette idée.

Dans le modèle du vide-grenier, la richesse se concentre inexorablement

En particulier, le « modèle affine de richesse » (nommé ainsi en raison de ses propriétés mathématiques) décrit avec une grande précision la répartition de la richesse entre les ménages dans divers pays développés, tout en révélant une asymétrie subtile qui tend à concentrer la richesse. À notre avis, cette approche purement analytique, qui ressemble à une radiographie en ce sens qu'elle n'est pas tant utilisée pour représenter le désordre du monde réel que pour le dépouiller et en révéler le squelette sous-jacent, permet de mieux comprendre les facteurs qui accroissent aujourd'hui la pauvreté et les inégalités.

INÉLUCTABLE OLIGARCHIE

En 1986, le sociologue et statisticien américain John Angle décrivait pour la première fois les flux de richesses et leur répartition comme le résultat de transactions effectuées par des paires d'agents économiques qui peuvent être des individus, des ménages, des entreprises, des fonds ou d'autres entités.

Au tournant du siècle, les physiciens Slava Ispolatov, Pavel Krapivsky et Sidney Redner, à l'université de Boston, ainsi qu'Adrian Dragulescu, maintenant au Constellation Energy Group, et Victor Yakovenko, de l'université du Maryland, ont montré que l'on pouvait analyser les modèles de ce type avec des outils de la physique statistique. Il s'avère que dans beaucoup de ces modèles, la richesse se déplace inexorablement d'un agent à l'autre même s'ils sont fondés sur des échanges équitables entre acteurs égaux.

En 2002, Anirban Chakraborti, à l'institut Saha de physique nucléaire de Calcutta, en Inde, a introduit ce qui est devenu le « modèle du vide-grenier », ainsi nommé parce qu'il présente certaines caractéristiques de transactions économiques réelles entre deux individus. Il a également utilisé des simulations numériques pour montrer que dans ce modèle, la richesse se concentre inexorablement dans les mains de quelques-uns et fait émerger une oligarchie (*voir l'encadré page ci-contre*).

Pour comprendre comment cela se produit, supposons que vous soyez invité à jouer à un jeu au casino. Vous devez miser sur la table une certaine somme, disons 100 euros, puis on tire une pièce à pile ou face. Si le résultat est *face*, le casino vous paie 20% de ce que vous avez misé, et vous disposerez alors de 120 euros sur la table. Si le résultat est *pile*, le casino prend 17% de votre mise et il vous restera donc 83 euros. Vous pouvez jouer autant de fois que vous le souhaitez. À chaque fois, vous gagnez 20% de ce qui est sur la table si le tirage donne *face*, et vous en perdez 17% si le tirage donne *pile*. Devriez-vous accepter de jouer à ce jeu?

Vous pourriez faire deux raisonnements, tous deux plutôt convaincants, pour vous aider à prendre la bonne décision. Vous pouvez penser: « La probabilité de gagner 20 euros est de ½, et la probabilité de perdre 17 euros est de ½. Mon espérance de gain au premier tirage est donc: ½×(+20 €)+½×(−17 €)=1,50 €.

Cette espérance est positive. En d'autres termes, mes chances de gagner et de perdre sont égales, mais la somme récoltée si je gagne sera supérieure à celle perdue dans le cas contraire. » De ce point de vue, il semble avantageux de jouer à ce jeu.

Ou bien, comme un joueur d'échecs, vous pourriez anticiper plusieurs coups: « Et si je jouais à ce jeu 10 parties successives de pile ou face? Un résultat vraisemblable est qu'il y aura 5 *pile* et 5 *face*. Or chaque fois qu'un *face* apparaît, ma mise est multipliée par 1,2, tandis que chaque fois que c'est *pile*, ma mise est multipliée par 0,83. Après 5 victoires et 5 défaites, dans n'importe quel ordre, le montant dont je disposerai sur la table sera donc:
1,2×1,2×1,2×1,2×1,2× 0,83×0,83×0,83×0,83×0,83×100 € = 98,02 €.

Autrement dit, je perdrai environ 2 € de ma mise initiale de 100 €. » Avec un peu plus de calculs, on pourrait voir qu'il faut environ 9 victoires pour compenser 91 pertes. De ce point de vue, il semble désavantageux de jouer à ce jeu.

La contradiction entre les deux arguments présentés ici peut paraître surprenante à première vue, mais elle est bien connue en théorie des probabilités et en finance. Son lien avec les inégalités de richesse l'est toutefois moins.

Pour étendre la métaphore du casino aux mouvements des richesses dans une économie (excessivement simplifiée), imaginons un système de 1000 individus qui s'engagent dans des échanges deux à deux. Supposons que chacun détienne une certaine somme initiale (qui pourrait être exactement la même pour tous). Choisissons deux agents au hasard et demandons-leur d'effectuer des transactions, puis faisons de même avec deux autres agents, et ainsi de suite. En d'autres termes, ce modèle suppose des transactions séquentielles entre des paires d'agents choisies au hasard. Notre plan est d'effectuer des millions ou des milliards de transactions de ce genre dans notre groupe de 1 000 personnes et de voir comment la richesse sera finalement distribuée.

À quoi ressemble une transaction entre deux agents? Comme les gens évitent naturellement d'être ruinés, nous supposons que le montant en jeu, que nous noterons Δw (se prononce «delta w»), ne représente qu'une fraction fixe de la richesse de la personne la plus pauvre, Shauna. De cette façon, même si Shauna perd dans une transaction avec la personne la plus riche, appelons-la Éric, la somme perdue restera toujours inférieure à sa propre fortune totale. Cette hypothèse n'est pas déraisonnable et, en fait, elle tient compte d'une limite que la plupart des gens s'imposent instinctivement dans leur vie économique.

Pour commencer – juste parce que ces chiffres nous sont familiers –, supposons que Δw représente 20% de la richesse w de Shauna si elle gagne, et – 17% de w si elle perd. En fait, notre modèle suppose que les pourcentages de gain et de perte sont égaux, mais cela ne modifie pas le résultat général (cela découle du fait que $(1+a)(1-a) = 1-a^2$, qui est strictement inférieur à 1 pour tout nombre réel a non nul censé représenter la fraction de gain, par exemple 0,2 pour $\Delta w = 20\%$). De plus, une valeur de Δw supérieure ou inférieure ne fera que déformer l'échelle de temps, de sorte qu'il faudra plus ou moins de transactions avant d'être en mesure de voir le résultat final, lequel restera inchangé.

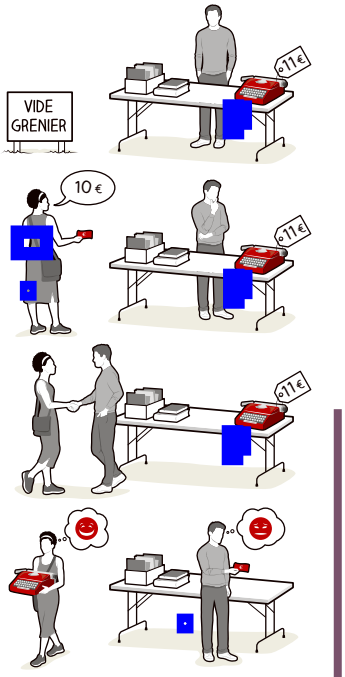
Puisque notre objectif est de modéliser une économie de marché équitable et stable, commençons par supposer que personne n'a d'avantage d'aucune sorte. Pour déterminer la direction dans laquelle Δw est déplacé, tirons donc simplement à pile ou face. Si c'est *face*, Shauna récolte d'Éric 20% du montant qu'elle détenait; si c'est *pile*, elle doit en donner 17% à Éric. Ensuite, on choisit au hasard une autre paire d'agents parmi les 1 000 et l'on recommence. Faisons-le 1 million ou 1 milliard de fois. Que se passe-t-il?

Si l'on simule cette économie, qui est une variante du modèle de vide-grenier, on obtient un résultat remarquable: après un grand nombre de transactions, l'un des agents finit par devenir un «oligarque» qui détient pratiquement toute la richesse, et les 999 autres se retrouvent avec quasiment rien. Peu importe quelle était la richesse initiale de chacun. Peu importe que tous les tirages à pile ou face aient été ou non absolument équitables. Il importe peu que l'espérance de gain de l'agent le plus pauvre soit positive dans chaque transaction, alors que celle de l'agent le plus riche est négative. N'importe quel agent de cette économie peut devenir l'oligarque – en fait, tous ont la même chance de le devenir si leur richesse initiale est la même. En ce sens, il y a égalité des chances. Mais un seul d'entre eux devient l'oligarque, et tous les autres voient leur richesse moyenne décroître vers zéro à mesure que les transactions se multiplient. Et pour couronner le tout, plus le rang de richesse d'une personne est bas, plus la diminution est rapide.

Ce résultat est d'autant plus surprenant qu'il est valable même si tous les agents ont une richesse initiale identique et sont traités de façon symétrique. Les physiciens décrivent les phénomènes de ce type comme des «brisures de symétrie» (*voir l'encadré page 60*). Le tout premier tirage à pile ou face transfère de l'argent d'un agent à l'autre, ce qui crée un déséquilibre entre les deux. Et une fois que l'on a des disparités de richesse, aussi petites soient-elles, les transactions successives enrichiront peu à peu les agents les plus riches au détriment des plus pauvres, amplifiant ainsi les inégalités jusqu'à ce que le système devienne oligarchique. >

GAGNANTS, PERDANTS

Le modèle du vide-grenier, un modèle [illegible] par le physicien Anirban Chakraborti, suppose que la richesse se déplace d'une personne à l'autre lorsque la première commet une « erreur » dans une transaction. Le montant payé pour un bien est exactement égal à ce que celui-ci vaut, aucune richesse ne change de mains. Mais si une personne paie trop cher ou si l'autre accepte moins que la valeur de l'article, une part de richesse est transférée. Comme personne ne veut risquer d'être ruiné, Anirban Chakraborti a supposé que le montant qui peut potentiellement être perdu est une fraction de la richesse de la personne la plus pauvre. Il a constaté que même si l'on choisit au hasard, par un tirage à pile ou face, le résultat de chaque transaction, la multiplication de ces ventes et achats entraîne inévitablement la concentration de toute la richesse dans les mains d'une seule personne, une situation d'inégalité extrême.
B. B.



© Pour la Science

> Si des inégalités sont présentes dès le départ, la richesse de l'agent le plus pauvre diminuera probablement le plus rapidement. Au profit de qui? Elle doit aller à des agents plus riches, puisqu'il n'y a pas d'agents plus pauvres. La situation n'est pas bien meilleure pour le deuxième agent le plus pauvre. À long terme, tous les participants à cette économie, sauf les plus riches, verront leur richesse décroître exponentiellement.

Dans des articles indépendants parus en 2015, mes collègues et moi, à l'université Tufts, et Christophe Chorro, de l'université Panthéon-Sorbonne, à Paris, ont prouvé mathématiquement ce que les simulations d'Anirban Chakraborti avaient découvert, à savoir que le modèle de vide-grenier déplace la richesse inexorablement d'un côté à l'autre.

Cela signifie-t-il que les agents les plus pauvres ne gagnent jamais ou que les agents les

MESURER L'INÉGALITÉ

Au début du XXe siècle, l'économiste américain Max Lorenz a conçu une méthode utile pour quantifier l'inégalité de richesse au sein d'une population. Il a proposé de tracer la part de richesse détenue par les individus dont la richesse est inférieure à w en fonction de la proportion des individus dont la richesse est inférieure à w. Comme les deux quantités sont des fractions comprises entre 0 et 1, le graphique s'intègre dans un carré de côté 1. Le double de l'aire comprise entre la courbe de Lorenz et la diagonale est ce qu'on nomme le coefficient de Gini, la mesure couramment utilisée pour mesurer l'inégalité (le coefficient de Gini pour la richesse est à distinguer du coefficient de Gini pour les revenus, que l'on rencontre plus fréquemment dans les données statistiques).

Examinons d'abord le cas égalitaire. Si chaque individu détient exactement la même richesse, toute fraction donnée de la population détient précisément la même fraction de la richesse totale. Par conséquent, la courbe de Lorenz est la diagonale *(en vert dans A)*, et le coefficient de Gini est égal à 0.

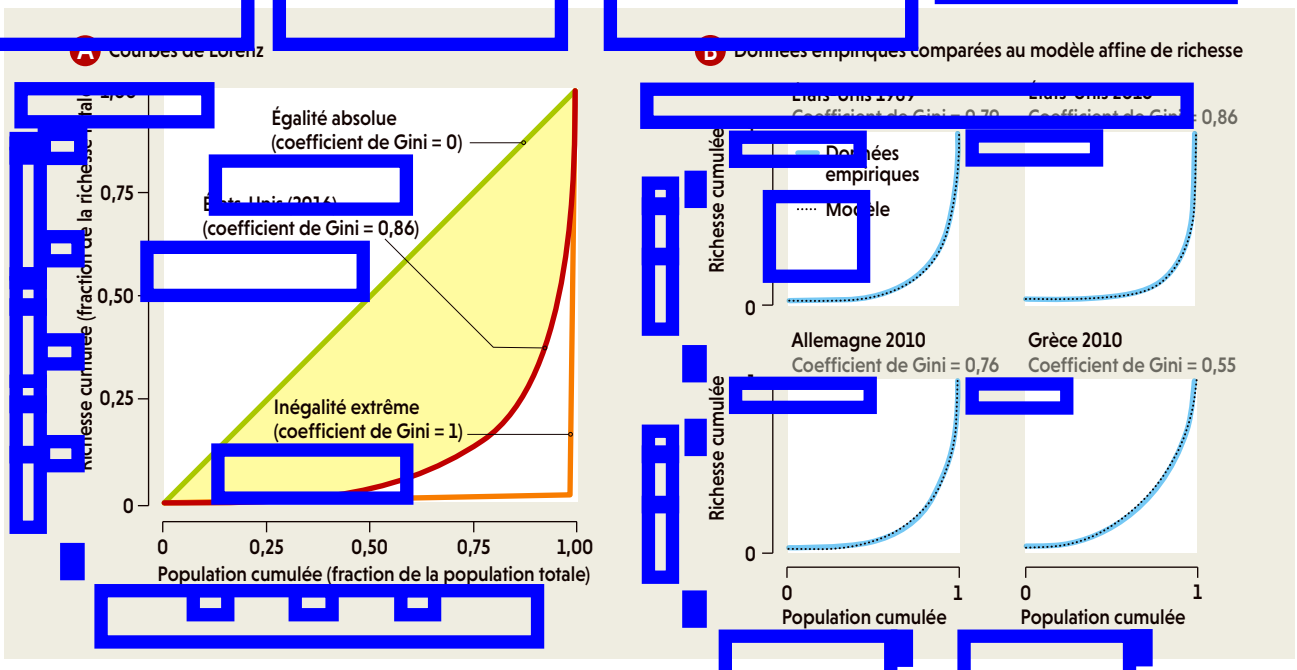
En revanche, si un oligarque détient toute la richesse et que tout le reste de la population n'a rien, la fraction f la plus pauvre de la population n'a aucune richesse pour tout f inférieur à 1 ; il s'ensuit que pour tout $f < 1$, la courbe de Lorenz est la droite horizontale d'ordonnée nulle. Mais quand $f = 1$, l'oligarque est inclus, et l'ordonnée de la courbe de Lorenz prend brutalement la valeur 1. L'aire comprise entre cette courbe de Lorenz *(en orange)* et la diagonale est la moitié de l'aire du carré, c'est-à-dire 1/2 ; le coefficient de Gini est donc égal à 1.

En somme, le coefficient de Gini pour la richesse peut varier de 0 (égalité absolue) à 1 (concentration extrême de la richesse). Sans surprise, la réalité correspond à une valeur intermédiaire. La ligne rouge montre la courbe de Lorenz de la richesse aux États-Unis en 2016, d'après des données de la Réserve fédérale. Le double de l'aire *(en jaune)* comprise entre cette courbe et la diagonale est égal à environ 0,86 ; c'est l'un des coefficients de Gini les plus élevés des pays développés pour la richesse. En France, le coefficient de Gini pour la richesse est égal à environ 0,70, d'après le rapport 2019 du Crédit Suisse.

Les quatre petits graphiques de *B* montrent la correspondance entre le modèle affine de richesse et les courbes de Lorenz réelles pour les États-Unis en 1989 et 2016, ainsi que pour l'Allemagne et la Grèce en 2010. Les données proviennent de la Réserve fédérale des États-Unis et de la Banque centrale européenne.

L'écart entre la courbe de Lorenz du modèle et celle correspondant aux données réelles est inférieur à 0,01 % pour les États-Unis et à 0,33 % pour les pays européens. On voit aussi que le coefficient de Gini pour les États-Unis a augmenté entre 1989 et 2016, ce qui reflète l'augmentation des inégalités.

B. B.



© Graphiques de Jen Christiansen, d'après Federal reserve bank's survey of consumer finances (données empiriques étatsuniennes) ; Banque centrale européenne (données empiriques allemandes et grecques)

plus riches ne perdent jamais? Pas du tout. Encore une fois, la configuration ressemble à celle d'un casino: tantôt on perd, tantôt on gagne, mais plus on reste longtemps dans le casino, plus on risque de perdre. Le libre marché est, pour l'essentiel, un casino que l'on ne peut jamais quitter. Lorsque le petit flux de richesse décrit plus haut, qui passe du pauvre au riche dans chaque transaction, est multiplié par les 7,7 milliards d'individus de la population mondiale et par le très grand nombre de transactions qu'ils font, le petit flux devient un torrent, et l'inégalité de richesse s'accentue inévitablement.

QUAND LA RICHESSE SE CONDENSE

On pourrait bien sûr se demander si ce modèle, même s'il est mathématiquement exact, a quelque chose à voir avec la réalité. Après tout, il décrit une économie totalement instable qui dégénère inévitablement en une oligarchie extrême, et une telle oligarchie n'existe pas dans le monde réel. Effectivement, le modèle de vide-grenier ne permet pas à lui seul d'expliquer la répartition empirique de la richesse. Pour pallier ce défaut, plusieurs collègues, à l'université Tufts, et moi l'avons affiné de trois façons pour le rendre plus réaliste.

Dans un article publié en 2017, nous avons incorporé au modèle une redistribution de la richesse. Pour qu'il reste suffisamment simple, nous avons imposé que chaque agent taxe, après chaque transaction, un pas vers la richesse individuelle moyenne. La taille de ce pas était une fraction, notée χ (la lettre grecque *chi*), de la différence entre la richesse de l'agent et la richesse moyenne. Cela équivaut à un impôt sur la fortune pour les riches (le taux d'imposition par unité de temps est χ) et à une subvention complémentaire pour les pauvres. L'effet est de transférer de la richesse de ceux qui sont au-dessus de la moyenne à ceux qui sont au-dessous.

Nous avons constaté que cette simple modification stabilise la répartition des richesses et empêche l'apparition d'une oligarchie. Étonnamment, cela a permis à notre modèle d'être en accord à mieux que 2% près avec les données empiriques sur la répartition de la richesse aux États-Unis et en Europe entre 1989 et 2016. Le paramètre unique χ semble résumer l'effet d'une multitude d'impôts ou taxes et de subventions qu'il serait beaucoup trop difficile de prendre en compte séparément dans un modèle aussi schématique que celui-ci.

En outre, il est bien documenté que les riches bénéficient d'avantages économiques systémiques, tels que des taux d'intérêt plus bas sur les prêts et de meilleurs conseils financiers, alors que les pauvres souffrent de désavantages économiques systémiques tels que les prêts sur salaire et le manque de temps pour faire des achats aux meilleurs prix. Comme l'écrivain James Baldwin l'a dit un jour: «Quiconque a déjà lutté contre la pauvreté sait à quel point il est coûteux d'être pauvre.»

Par conséquent, dans le même article de 2017 mentionné ci-dessus, nous avons aussi tenu compte de ce que nous appelons l'avantage lié à la richesse. Nous avons biaisé le tirage à pile ou face en faveur de l'individu le plus riche d'une quantité proportionnelle à un nouveau paramètre ζ (la lettre grecque *zêta*), multiplié par le rapport entre la différence de richesse des deux agents et la richesse moyenne. Ce raffinement assez simple, qui représente et résume une multitude de biais en faveur des riches, améliore l'accord entre le modèle et la partie supérieure des distributions de richesse constatées.

L'inclusion du biais lié à la richesse reproduit le phénomène d'oligarchie partielle et en donne aussi une définition mathématique précise. Chaque fois que l'effet de l'avantage lié à la richesse obtenue dépasse celui de la redistribution (plus précisément, chaque fois que ζ est supérieur à χ), une fraction infinitésimale de la population détient une proportion non nulle, égale à $1-\chi/\zeta$, de la richesse de la société.

L'apparition de l'oligarchie partielle est en fait une transition de phase pour un autre modèle de transactions économiques, comme l'ont décrit pour la première fois en 2000 les physiciens Jean-Philippe Bouchaud, président de la société Capital Fund Management et professeur à l'École polytechnique, à Palaiseau, et Marc Mézard, de l'École normale supérieure, à Paris. Dans notre modèle, quand ζ est inférieur à χ, le système n'a qu'un seul état stable, dépourvu d'oligarchie; lorsque ζ est supérieur à χ, un nouvel état, oligarchique, apparaît et devient l'état stable (*voir l'encadré page 60*). Le modèle du vide-grenier à deux paramètres (χ et ζ) ainsi obtenu est capable de reproduire >

© Hanna Barczyk

> à 1 ou 2% près les données empiriques sur la répartition de la richesse aux États-Unis et en Europe entre 1989 et 2016.

Une telle transition de phase a peut-être joué un rôle crucial dans la concentration de la richesse qui a suivi l'éclatement de l'Union soviétique en 1991. L'imposition aux anciens États de l'URSS d'une « thérapie de choc », comme on a surnommé cette stratégie économique, a entraîné une forte diminution de la redistribution de la richesse (c'est-à-dire une diminution de χ) par leurs gouvernements et un bond concomitant de l'avantage lié à la richesse (augmentation de ζ) sous l'effet combiné des soudaines privatisations et déréglementations. La baisse de la « température » χ/ζ qui en a résulté a provoqué, dans les anciens pays communistes, une concentration de la richesse, et ces pays sont devenus oligarchiques presque du jour au lendemain. À ce jour, on peut qualifier d'oligarchies au moins 10 des 15 anciennes républiques soviétiques.

LA PHYSIQUE DE L'INÉGALITÉ

Lorsque l'eau bout à 100 °C et se transforme en vapeur d'eau, elle subit une transition de phase – un changement soudain et discontinu, lié à l'énergie, la densité, le volume qu'elle occupe (à pression donnée) augmente de façon discontinue. De façon similaire, l'aimantation d'un matériau ferromagnétique devient nulle *(courbe orange du graphique A)* lorsque sa température dépasse un seuil T_c, la « température de Curie ». Autrement dit, au-delà de T_c, le matériau n'est pas aimanté. La courbe de l'aimantation en fonction de la température est continue au point de transition, mais elle y présente un coude prononcé (sa dérivée est discontinue).

Inversement, lorsque la température d'un ferromagnétique s'approche de T_c par les valeurs supérieures, une aimantation apparaît spontanément alors qu'elle était nulle auparavant. Cette aimantation a une orientation spatiale inhérente (du pôle sud de l'aimant au pôle nord) et l'on peut se demander dans quelle direction elle se développe. En l'absence de champ magnétique externe qui pourrait privilégier une direction, la brisure de la symétrie de rotation est « spontanée » (la symétrie de rotation signifie que le système a des propriétés identiques quelle que soit la direction considérée, ce qui est le cas d'un matériau ferromagnétique aux températures supérieures à T_c). Autrement dit, une aimantation non nulle apparaît soudainement et sa direction est aléatoire (plus précisément, cette direction dépend de fluctuations microscopiques incontrôlables, que la modélisation macroscopique du ferromagnétisme ignore).

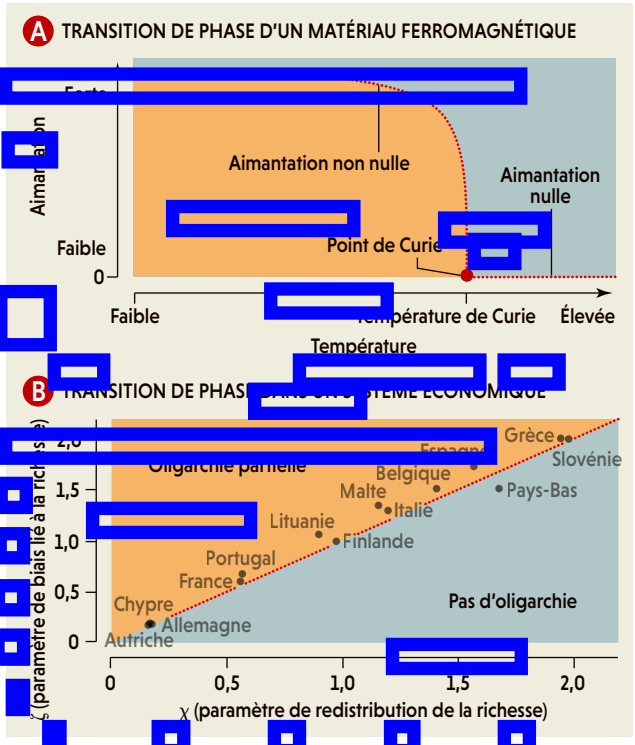
Les systèmes économiques peuvent également présenter des transitions de phase. Lorsque le paramètre de richesse ζ du modèle affine de richesse est inférieur au paramètre de redistribution χ *(voir le texte principal)*, la répartition de la richesse n'est même pas partiellement oligarchique *(région en bleu du graphique B)*. Cependant, lorsque ζ dépasse χ, une fraction finie de la richesse de l'ensemble de la population « se condense » dans les mains d'une fraction infinitésimale des agents les plus riches. Ainsi, le rapport χ/ζ joue un rôle analogue à celui de la température : la richesse « se condense » lorsqu'il devient inférieur à 1.

Une autre symétrie spécifique des systèmes macroscopiques complexes est la « dualité », qui décrit une correspondance biunivoque entre les états du système au-dessus et au-dessous de la température critique à laquelle la transition de phase se produit. Dans le cas du ferromagnétisme, elle fait correspondre un système aimanté et ordonné, de température T inférieure à T_c, à son système « dual », désordonné et non aimanté à la température dite « inverse », $(T_c)^2/T$, qui est supérieure à T_c. La température critique est celle où la température du système et sa température inverse sont égales (c'est-à-dire où $T = (T_c)^2/T$). La théorie de la dualité joue un rôle de plus en plus important en physique théorique, notamment en théorie quantique de la gravitation.

Comme le ferromagnétisme, le modèle affine de richesse présente une dualité, ce qu'un de mes doctorants, Jie Li, et moi avons prouvé en 2018. Un état où l'on a $\zeta < \chi$ n'est pas une oligarchie partielle, alors que l'état correspondant à un rapport inverse des paramètres (c'est-à-dire dont la « température » χ'/ζ' est égale à ζ/χ, l'inverse de χ/ζ) l'est. Il est intéressant de noter que ces deux états reliés par dualité ont exactement la même répartition de richesse si l'on supprime l'oligarchie du système à richesse concentrée (la richesse totale étant recalculée pour tenir compte de cette perte).

Fait significatif, la plupart des pays sont très proches de l'état critique. Un graphique dans le plan ζ-χ de 14 des pays qui dépendent de la Banque centrale européenne *(B)* montre que la plupart se trouvent près de la diagonale. Tous sauf un (les Pays-Bas) se situent juste au-dessus de la diagonale, ce qui indique qu'ils sont légèrement oligarchiques. Il est possible que l'inégalité augmente naturellement jusqu'à l'apparition d'une oligarchie et que, à partir de là, des pressions politiques s'installent et empêchent l'inégalité d'empirer.

B. B.



© D'après Bruce Broghosian ; Banque centrale européenne (données par pays)

Une troisième amélioration de notre modèle, en 2019, a consisté à y inclure la richesse négative – l'un des aspects les plus inquiétants des économies modernes. En 2016, par exemple, environ 10,5% de la population étatsunienne était endettée en raison de prêts hypothécaires, de prêts étudiants et autres.

Nous avons donc introduit un troisième paramètre, noté κ (la lettre grecque *kappa*), qui décale la distribution de richesse vers le bas et qui prend donc en compte la richesse négative. Nous avons supposé que la richesse la plus faible que l'agent le plus pauvre pouvait détenir à tout moment était $-S$, où S est égal à κ fois la richesse moyenne par individu. Avant chaque transaction, nous avons prêté à la richesse S aux deux agents afin que chacun ait une richesse positive. Ils ont ensuite effectué leurs transactions selon le modèle de l'échange-grenier étendu, décrit plus haut, après quoi ils ont tous les deux remboursé leur dette S.

Le modèle à trois paramètres (χ, ζ, κ) ainsi obtenu, nommé «modèle affine de richesse», est en mesure de s'accorder avec les données empiriques sur la répartition de la richesse aux États-Unis à moins de 0,15% près sur une période de trois décennies. Avec les données européennes pour 2010, l'accord est généralement meilleur qu'à 0,35-0,5% près (*voir l'encadré page 64*).

Pour effectuer ces comparaisons avec les données réelles, nous avons dû résoudre le «problème inverse». En d'autres termes, la répartition empirique de la richesse étant donnée, il nous a fallu déterminer les valeurs de χ, ζ et κ pour lesquelles les résultats du modèle sont les plus proches des données. À titre d'exemple, pour décrire la distribution de richesse des ménages américains en 2019, les paramètres optimaux sont χ=0,036, ζ=1,010 et κ=0,058. Nous avons confronté le modèle affine de richesse à des données empiriques provenant de nombreux pays et époques. À notre connaissance, il décrit les données sur la répartition de la richesse avec plus de précision que tout autre modèle existant.

RUISSELLEMENT VERS LE HAUT

Il est remarquable que le modèle de répartition de la richesse qui s'ajuste le mieux aux données empiriques soit un modèle qui apparaît complètement instable sans redistribution, plutôt qu'un modèle fondé sur un supposé équilibre des forces du marché. En fait, ces modèles mathématiques démontrent que l'idée de «ruisseler» vers les pauvres, la tendance naturelle de la richesse est de s'écouler vers le haut, de sorte que la répartition «naturelle» de la richesse dans une économie de marché correspond à une oligarchie totale. Seule la redistribution fixe des limites à l'inégalité.

Les modèles mathématiques attirent également l'attention sur l'influence énorme qu'ont la rupture de symétrie, le hasard et les avantages préalables (dus par exemple aux héritages) sur la distribution de la richesse. Et la présence d'une rupture de symétrie va à l'encontre des arguments qui justifient les inégalités de richesse par l'idée que les individus portent l'entière responsabilité de leurs résultats économiques simplement parce qu'ils effectuent des transactions volontairement ou par l'idée que l'accumulation de richesses résulte de l'intelligence et des efforts investis.

Il est vrai que la position d'un individu sur le spectre de la richesse est corrélée dans une certaine mesure à ces attributs, mais la forme globale de ce spectre peut s'expliquer à mieux que 0,33% près par un modèle statistique qui les ignore complètement. Le hasard joue un rôle beaucoup plus important que celui qu'on lui attribue d'habitude; aussi, la glorification dont bénéficient généralement les riches dans les sociétés modernes et, inversement, la stigmatisation des pauvres sont totalement injustifiées.

Qui plus est, seul un mécanisme de redistribution soigneusement conçu est en mesure de compenser, dans une économie de marché, la tendance naturelle des richesses à passer des pauvres aux riches. On confond souvent redistribution et impôts, mais les deux notions doivent rester bien distinctes. Les citoyens versent des impôts à leur gouvernement pour financer les activités de ce dernier. Quant à la redistribution, les gouvernements peuvent la mettre en œuvre, mais il est préférable de la considérer comme un flux de richesses entre personnes destiné à compenser les injustices inhérentes à l'économie de marché. Dans un système de redistribution uniforme, tous ceux dont la richesse est inférieure à la moyenne recevraient des fonds nets, tandis que tous ceux plus riches que la moyenne paieraient. Et c'est précisément parce que les niveaux actuels d'inégalité sont si extrêmes que les bénéficiaires seraient beaucoup plus nombreux que les payeurs.

Étant donné la complexité des économies réelles, nous trouvons gratifiant qu'une approche analytique simple développée par des physiciens et des mathématiciens décrive les distributions réelles de richesse de plusieurs pays avec une aussi grande précision. Il est également assez curieux de constater que ces distributions présentent des caractéristiques subtiles mais essentielles de systèmes physiques complexes. Et surtout, le fait qu'une esquisse aussi simple et plausible du libre marché fasse apparaître qu'il est tout sauf libre et équitable devrait être à la fois un motif d'inquiétude et un appel à l'action. ■

BIBLIOGRAPHIE

Jie Li *et al.*, The affine wealth model: An agent-based model of asset exchange that allows for negative-wealth agents and its empirical validation, *Physica A*, vol. 516, pp. 423-442, 2019.

A. Devitt-Lee *et al.*, Parsimonious harmonic representation of wealth concentration in large-scale economies, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, vol. 78(2), pp. 996-1008, 2018.

J.-P. Bouchaud et M. Mézard, Wealth condensation in a simple model of economy, *Physica A*, vol. 282, pp. 536-545, 2000.

L'ESSENTIEL

> Les humains ne sont pas les seuls dans le monde animal à savoir tromper.

> De nombreuses espèces imitent leurs semblables ou des membres d'autres espèces grâce au camouflage ou au mimétisme.

> Lorsque les faux signaux sont émis intentionnellement, on parle de tromperie tactique – une stratégie déployée entre autres par les seiches et les chiens.

L'AUTRICE

BARBARA KING
professeuse émérite d'anthropologie au collège de William-et-Mary, en Virginie, aux États-Unis

Filou comme une seiche

Homo sapiens n'est pas la seule espèce qui mente. La tromperie règne dans le monde animal.

Le monde animal regorge de bons sentiments ces temps-ci. Les preuves de coopération et de compassion chez les animaux s'affichent dans quantité de spectaculaires documentaires télévisés. Dans les océans, mérous, labres et anguilles s'entraident entre espèces pour chasser leurs proies. Dans le ciel australien, le mérion de Lambert (une espèce de passereau) et le mérion splendide se reconnaissent mutuellement, forment des partenariats stables et défendent ensemble leur habitat dans les broussailles du maquis. Sur terre, les poules manifestent une détresse empathique lorsqu'elles voient leurs poussins souffrir d'un léger inconfort. Les chimpanzés s'empressent de consoler le perdant d'un combat, même s'ils n'ont eux-mêmes joué aucun rôle dans l'altercation. Et dans un acte sacrificiel ultime, des rats sont prêts à renoncer à une récompense en chocolat pour aller sauver un semblable sur le point de se noyer dans une petite piscine.

Pendant des siècles, les spécialistes du comportement animal ont exagéré le rôle de la rivalité et de la violence chez les animaux. L'attention que l'on porte aujourd'hui à l'altruisme dans le règne animal contrebalance cette vision dépassée de la nature. Mais à force de s'ébahir devant la gentillesse des animaux, on risque de pousser trop loin ce mouvement et d'éclipser une partie de l'histoire. De nombreux animaux effectuent des campagnes de désinformation envers leurs congénères, de la même espèce ou d'autres. Ils induisent en erreur, trichent et mentent en usant de multiples stratégies de tromperie.

UNE TROMPERIE TACTIQUE OU NON ?

La tromperie chez les animaux non humains est définie comme l'émission de faux signaux qui modifient le comportement d'autrui en faveur de l'émetteur. Les seiches excellent dans cet art. Parentes de la pieuvre, elles ont la capacité de changer rapidement de couleur grâce aux cellules pigmentaires de leur peau appelées «chromatophores». Des mâles utilisent même cette faculté de camouflage pour s'accoupler avec des femelles récalcitrantes, comme l'a rapporté en 2017 une équipe de biologistes marins dirigée par Justine Allen, de l'université Brown, aux États-Unis. Alors que les chercheurs plongeaient dans la mer Égée au large de la Turquie, >

© Lisk Feng

> ils ont observé un mâle de l'espèce commune européenne s'approcher d'une femelle. La femelle, qui semblait indifférente aux charmes du mâle, s'est alors éloignée, mais cela n'a pas dissuadé ce dernier. Il s'est camouflé dans le décor pendant six minutes, se faisant apparemment oublier de la femelle, avant de sauter sur elle et de l'attraper. Les deux seiches se sont ensuite accouplées face à face.

Sur son côté gauche, le mâle seiche séduit une femelle, sur le droit, il se camoufle en femelle

Chez l'espèce australienne *Sepia plangon*, la tromperie va plus loin que le camouflage. Lorsqu'un mâle nage entre sa concubine à sa gauche et un concurrent mâle à droite, il produit deux jeux de signaux contenant des informations contradictoires. Sur son côté gauche, il affiche des signaux classiques de séduction. Mais, sur sa droite, il émet des signaux typiques d'une femelle. Résultat : pour son rival, il ressemble à une femelle et non plus à un prétendant !

Le biologiste Culum Brown, de l'université Macquarie, à Sydney, et son équipe qualifient ce double signal de « tromperie tactique », parce qu'il correspond à un acte délibéré. Ce comportement se déroule dans un contexte spécifique (lorsqu'un mâle courtise une femelle en présence d'un seul rival). Le camouflage, le mimétisme et la tromperie tactique sont trois types clés de tromperie animale, les frontières entre ces catégories étant floues comme l'illustrent les exemples avec les seiches. Quand les tentatives d'induire en erreur sont intentionnelles, que ce soit par camouflage, mimétisme ou un autre comportement, il s'agit de tromperie tactique.

LE DRONGO BRILLANT QUI CRIAIT AU LOUP

Parce que la vision est notre principal sens, nous avons peut-être plus tendance à repérer les cas de tromperie fondés sur des signaux visuels. Mais d'autres sens peuvent aussi être mystifiés. Le drongo brillant, un oiseau chanteur du désert du Kalahari, en Afrique, émet des cris d'alarme à la vue de prédateurs. Ces sons alertent non seulement les drongos proches, mais aussi d'autres animaux, comme les cratéropes bicolores (des passereaux) et les suricates, qui partent aussitôt se réfugier lorsqu'ils les entendent. Souvent, ces cris correspondent réellement à un danger, mais il arrive que les drongos les utilisent à leur avantage. Si un drongo remarque un suricate en possession d'un aliment particulièrement appétissant, comme un gecko charnu, il émet parfois son cri d'alarme – en l'absence de tout

© Getty Images / S. Rohrlach

© Getty Images / Trevor Platt

prédateur. En percevant le signal, le suricate laisse tomber sa proie et court s'abriter. Le drongo ramasse ensuite le gecko et le m[illegible]e. En 2014, le zoologiste Tom Flower, ma[illegible]n-nant à l'université Capilano, en Color[illegible]b-Britannique, et ses collègues ont déco[illegible]v-rt que ce type de vol de nourriture représen[illegible]e, en masse, près du quart de l'alimentatio[illegible]n des drongos. En matière d'évolution, toute s[illegible]ra-tégie augmentant la ration alimentaire est b[illegible]n-ne pour ces oiseaux.

Le penchant du drongo pour la simul[illegible]ti-on ne s'arrête pas là. Les signaux d'alarme en [illegible]s-le réel danger sont la norme dans le monde an[illegible]m-al. À trop utiliser le même leurre auprès des m[illegible]-mes partenaires sociaux, celui-ci risque de p[illegible]r-dre son efficacité. L'évolution a façonné le répe[illegible]-toire vocal des drongos en conséquence: les oi[illegible]ea-ux possèdent au moins 51 fausses alarmes [illegible]if-férentes qu'ils font tourner, selon Tom Flow[illegible]er et ses collègues. Lorsqu'ils volent plus d'un f[illegible]is les mêmes victimes, dans 75% des cas, les [illegible]ro-gos changent leur cri. Il leur arrive même [illegible]so-vent d'émettre les cris d'alarme spécifiqu[illegible]s-le leurs victimes, signaux qu'ils savent imit[illegible]r. La combinaison stratégique de mimétisme vo[illegible]a-et de tromperie tactique sème la confusion [illegible]ch-ez elles, au bénéfice des drongos. Comm[illegible]e-s seiches, les drongos cherchent délibérém[illegible]en-à tromper. C'est l'hypothèse invoquée, du m[illegible]oi-s. Une hypothèse raisonnable, car dans les [illegible]de-ux cas (fausses alertes et mimétisme), les [illegible]fa-ux signaux ne sont pas diffusés au hasard, mai[illegible]s fon-dés sur la dynamique sociale des espèces lo[illegible]a-les.

Les singes figurent parmi les plus g[illegible]ands escrocs du monde animal, ce qui n'est pa[illegible]s-tes surprenant vu notre propension au mensonge, nous, leurs plus proches cousins. Le primatologue Frans de Waal, de l'université Em[illegible]ry, à Atlanta, a raconté qu'à une époque, Ye[illegible]oen, chimpanzé du zoo d'Arnhem, aux Pays-B[illegible]s, ne boitait qu'en présence de son grand [illegible]ival Nikkie; il simulait une blessure, apparem[illegible]ment pour remporter sa sympathie. Des reche[illegible]ches systématiques menées sur les chimpanz[illegible]és et de nombreux types de singes montren[illegible] que lorsqu'un accouplement ou de la nour[illegible]ture sont en jeu, ces primates débordent d'ima[illegible]gina-tion pour distraire et induire en erreur [illegible]eurs partenaires sociaux.

LA BOLA PIÉGÉE DE L'ARAIGNÉE MAGNIFIQUE

Mais ce n'est pas parce qu'une tromperie est complexe, voire élégante, qu'elle est intentionnelle. L'araignée magnifique d'Australie (*Ordgarius magnificus*), au teint laiteux constellé de taches colorées, chasse les papillons de nuit à l'aide d'une boule de soie gluante nommée «bola» (comme les armes de jet utilisées par les Gaúchos d'Amérique du Sud pour capturer le bétail). Au lieu de tisser une toile pour attraper ses proies, l'arachnide produit un seul brin de soie avec une bola à l'extrémité, puis jette sa ligne à proximité des papillons de nuit. Le piège réside dans l'odeur de la bola: celle-ci dégage une phéromone qui imite le parfum d'un papillon femelle. Leurrés, les papillons mâles se rapprochent et sont piégés dans la soie collante. Les araignées les engloutissent alors sur le champ ou les conservent pour plus tard. Rien ne suggère qu'il s'agit là d'une >

La seiche *Sepia plangon (page ci-contre)*, le drongo brillant (*ci-dessous à gauche*) et la drosophile *(à droite)* sont quelques-unes des nombreuses espèces qui se sont révélées tromper leur entourage.

© Getty Images / Alongkot Sumritjearapol

Le «faux orgasme» des truites communes femelles incite les mâles à libérer leur sperme

> stratégie intentionnelle. L'évolution a juste favorisé ce comportement qui, *in fine*, améliore le succès reproductif des araignées.

Un mécanisme similaire de tromperie olfactive existe chez les drosophiles. Ces mouches ont une tendance cannibale : les jeunes larves consomment facilement des individus plus âgés ou blessés. Pourtant, curieusement, elles consomment rarement les œufs de leur espèce. En 2019, l'écologue Sumitra Narasimha, de l'université de Lausanne, et son équipe ont découvert pourquoi : les œufs sont scellés à l'aide d'une phéromone exsudée par la mère, ce qui empêche leur odeur de se répandre et les larves cannibales de les détecter. Un moyen astucieux de camoufler des œufs chez une espèce qui n'est pas réputée pour le soin qu'elle apporte à sa progéniture.

Le sexe et la reproduction offrent en général un contexte propice à l'échange de faux signaux. Chez les oiseaux, les femelles coucou sont célèbres pour pondre leurs œufs dans le nid d'autres espèces avant de s'enfuir. Quand elle rentre, la mère logeant dans le nid est trompée et dépense ensuite beaucoup d'énergie à élever la progéniture d'autrui. Ce comportement est répandu bien au-delà des coucous. On connaît une centaine d'espèces d'oiseaux pratiquant un tel « parasitisme de couvée interspécifique obligatoire » (c'est-à-dire nécessaire, l'espèce n'ayant pas d'autre solution), et plus de 200 parasitant leur propre espèce.

Chez certains animaux, la tromperie débute bien avant la naissance des petits. Les femelles de la truite commune tremblent parfois violemment, comme si elles étaient prêtes à pondre, même si ce n'est pas le cas. Dans une étude réalisée en 2001, Erik Petersson et Torbjörn Järvi, tous deux alors au Comité national des pêches de Suède, ont appelé « faux orgasme » ce surprenant comportement. En réponse, les mâles dupés libèrent leur sperme sans qu'il n'y ait rien à féconder. Pourquoi les femelles dépensent-elles cette énergie supplémentaire ? Il se pourrait qu'elles cherchent simplement à décourager les mâles indésirables. Toutefois, Erik Petersson et Torbjörn Järvi ont découvert que la fréquence des faux orgasmes augmente à mesure que les femelles approchent de la période de frai, durant laquelle les œufs sont fécondés. En déclenchant la libération du sperme de multiples mâles, cette stratégie augmenterait donc peut-être aussi les chances de produire une progéniture vigoureuse.

LE CHIEN COMÉDIEN

Même dans nos propres foyers, il arrive que les animaux se jouent de nous. Les chiens sont loués pour leur loyauté légendaire, mais la réalité est plus compliquée. En 2017, Marianne Heberlein, une éthologue de l'université de Zurich, a mené une expérience où des chiens avaient appris à interagir avec deux femmes, l'une qui partageait sa nourriture avec eux (appelons-la Mme Coopératrice) et l'autre qui gardait tout pour elle (Mme Concurrente). Ensuite, elle a donné aux chiens le choix de conduire ces partenaires à trois endroits différents : un premier lieu où elle avait déposé un aliment apprécié, un deuxième contenant un aliment qu'ils n'aimaient pas et un troisième où une gamelle vide les attendait. Le premier jour, les chiens ont amené Mme Coopératrice plus souvent vers l'aliment préféré. Le deuxième jour, ils avaient une meilleure connaissance de la situation : ils ont conduit Mme Concurrente moins souvent à l'aliment préféré et ont inhibé leur comportement de recherche de cet aliment en sa présence.

Comme tous ceux qui ont vécu avec un chien le savant, ces animaux ont du mal à oublier où se cache leur friandise favorite. Apparemment, les chiens de cette expérience voulaient augmenter leurs chances d'obtenir la nourriture convoitée plus tard – et savaient que tromper l'égoïste Mme Concurrente les augmenterait. Ou peut-être, comme le dit Marianne Heberlein, n'avaient-ils pas envie qu'un humain qu'ils n'aimaient pas reçoive une récompense. Quelle que soit leur motivation, ils ont fait preuve d'une tromperie tactique.

Quelle leçon retenir ? Soyez gentil avec les chiens, ils le seront avec vous. De façon plus générale, des animaux sont capables de manier la duplicité de façon consciente, voire avec un certain plaisir. Dans ce sens, on peut voir une part d'humanité dans un chien, une seiche qui émet des faux signaux pour s'accoupler ou des oiseaux qui induisent en erreur pour voler de la nourriture. Et pourtant, chez toutes les espèces – y compris les animaux qui trompent sans intention –, les mêmes individus sont capables de tromper dans certaines circonstances, et de ne pas le faire dans d'autres. Ce comportement à la Janus, le dieu romain aux deux visages, ne nous est-il pas lui aussi familier ? ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Narasimha *et al.*, ***Drosophila melanogaster* avoid their eggs with pheromones, which prevents cannibalism**, *Plos Biology*, vol. 17(1), article e2006012, 2019.

M. T. E. Heberlein *et al.*, **Deceptive like behaviour in dogs (*Canis familiaris*)**, *Animal Cognition*, vol. 20(3), pp. 511-520, 2017.

K. Karg *et al.*, **Chimpanzees strategically manipulate what others can see**, *Animal Cognition*, vol. 18(5), pp. 1069-1076, 2015.

T. P. Flower *et al.*, **Deception by flexible alarm mimicry in an African bird**, *Science*, vol. 344, pp. 513-516, 2014.

C. Brown *et al.*, **It pays to cheat : tactical deception in a cephalopod social signalling system**, *Biology Letters*, vol. 8(5), pp. 729-732, 2012.

E. Petersson et T. Järvi, **« False orgasm » in female brown trout : trick or treat ?**, *Animal Behaviour*, vol. 61(2), pp. 497-501, 2001.

POUR LA SCIENCE

THEMA

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

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

3,99 €

Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi

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

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

L'ESSENTIEL

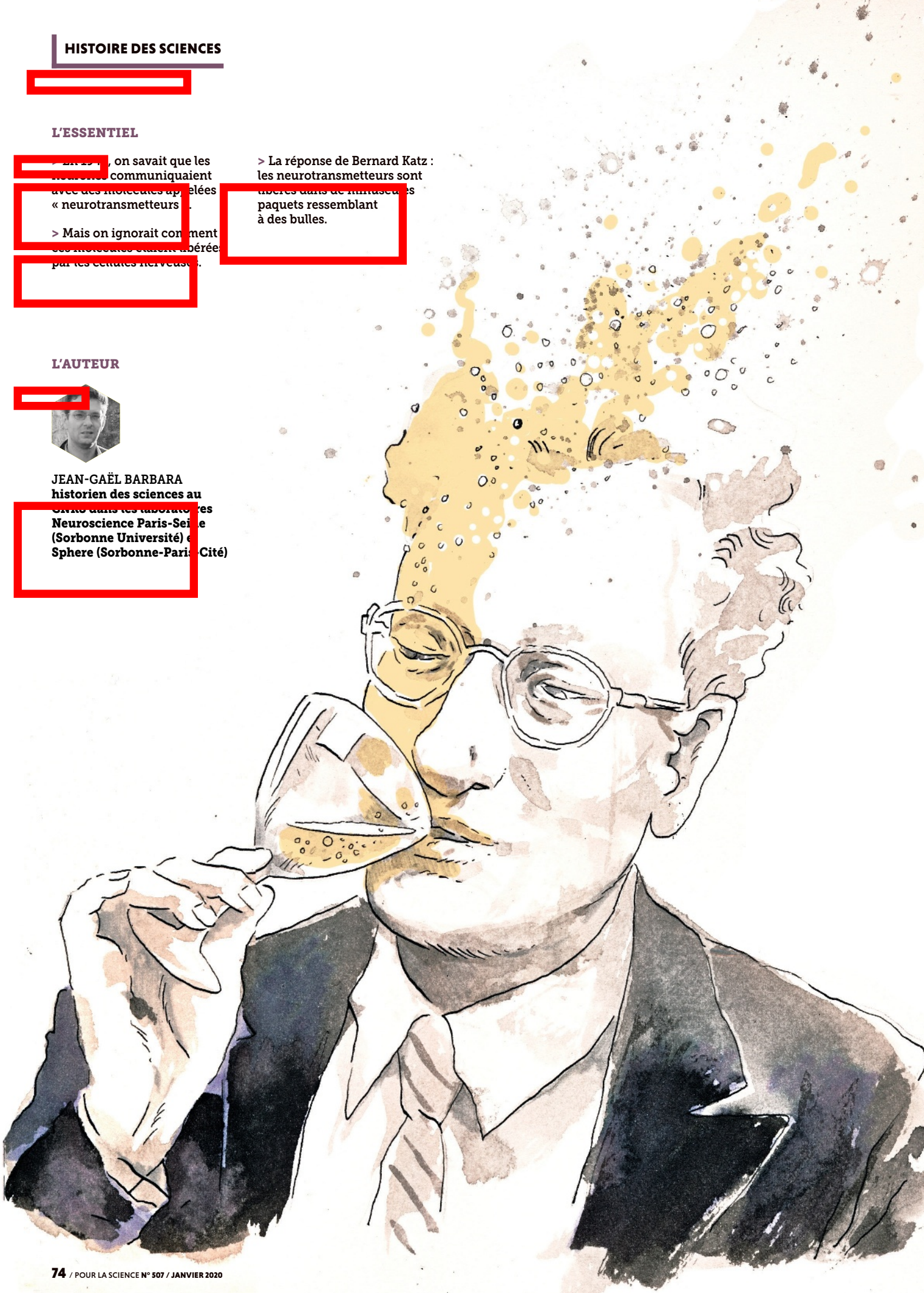
> En 1951, on savait que les neurones communiquaient avec des molécules appelées « neurotransmetteurs ».

> Mais on ignorait comment ces molécules étaient libérées par les cellules nerveuses.

> La réponse de Bernard Katz : les neurotransmetteurs sont libérés dans de minuscules paquets ressemblant à des bulles.

L'AUTEUR

JEAN-GAËL BARBARA
historien des sciences au CNRS dans les laboratoires Neuroscience Paris-Seine (Sorbonne Université) et Sphere (Sorbonne-Paris-Cité)



Les bulles de la pensée

Comment les neurones de notre cerveau s'échangent-ils des informations ? En s'envoyant des messagers chimiques dans de microscopiques bulles. C'est ce que découvrit le neuroscientifique allemand Bernard Katz, voici soixante ans.

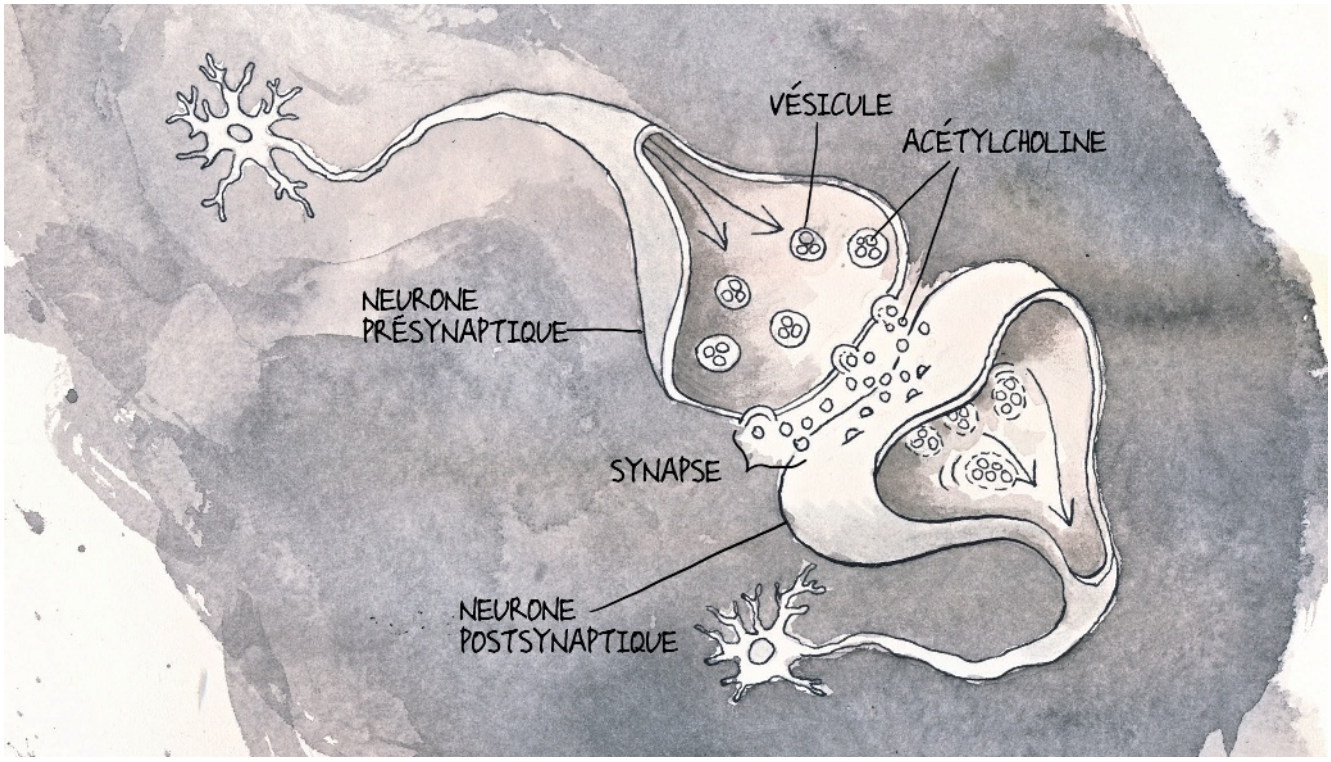
Si vous ouvrez un livre de neurosciences, vous trouverez obligatoirement le schéma d'une synapse. Autrement dit, un point de raccordement entre deux neurones. C'est là que les neurones communiquent : celui par où arrive le signal nerveux (le neurone présynaptique) relâche des messagers chimiques appelés « neurotransmetteurs », qui traversent l'espace de la synapse et vont se fixer sur des récepteurs à la surface du neurone situé en aval de la synapse, le neurone postsynaptique. Ce qui suscite l'apparition d'un nouveau signal nerveux.

Si votre manuel de neuroscience est assez bien fait, il précisera davantage le mécanisme de libération des neurotransmetteurs. Un mécanisme qui ressemble à l'éclosion de bulles de champagnes à la surface d'une coupe. On trouve, dans le neurone présynaptique, les neurotransmetteurs empaquetés dans de petites bulles lipidiques appelées « vésicules ». Chaque bulle se dirige vers l'extrémité du neurone et « crève », libérant les molécules de neurotransmetteurs dans l'espace de la synapse. La quantité de neurotransmetteurs libérée dépend alors uniquement du nombre de bulles crevées. Une bulle, deux bulles, trois bulles… Plus le nombre de bulles qui éclatent est élevé, plus le signal nerveux transmis est intense. À propos de ces bulles on parle de « quanta » de neurotransmetteurs, un quantum étant la quantité minimale de messagers chimiques libérés au niveau de la synapse. Le quantum désigne une quantité minimale de neurotransmetteurs relâchée – et en dehors de cela, il n'a donc pas grand chose à voir avec la physique quantique des ondes et des particules élémentaires…

À LA JONCTION DU NERF ET DU MUSCLE

Cette précision établie, la nature quantique de la transmission nerveuse est une des plus élégantes découvertes des neurosciences au xx^{e} siècle. Mais pour la réaliser, il a fallu la conjonction de plusieurs innovations techniques et conceptuelles, et l'apport décisif d'un homme, Bernard Katz (que vous connaissez déjà si vous avez lu cette rubrique dans le n° 503 de *Pour la Science*, où il avait démontré la nature chimique de la neurotransmission). En 1930, Katz est un jeune médecin juif allemand, dont le père a fui l'antisémitisme en Russie et qui a décidé d'étudier la médecine, pressentant qu'il devrait un jour fuir l'Allemagne à son tour. Il commence par étudier la biophysique à Londres, auprès du Prix Nobel de médecine Archibald Hill, puis rejoint le laboratoire du neurobiologiste John Eccles, en Australie. Dans les années 1940, on découvre peu à peu les mécanismes par lesquels les neurones échangent des informations et les premières études portent sur une « synapse » un peu particulière, localisée non pas dans le cerveau, mais au niveau des muscles. C'est ce qu'on appelle la « jonction neuromusculaire », >

© Lison Bernet



> point de contact où les extrémités des nerfs moteurs, qui commandent nos mouvements, rejoignent les fibres musculaires et déclenchent leur contraction.

Les neurobiologistes cherchent alors à comprendre comment l'information est transmise entre le nerf moteur et le muscle. Dès 1939, Bernard Katz se lance donc dans l'étude de ces phénomènes. Dans le laboratoire de John Eccles, Katz découvre une invention étonnante: de très fines électrodes en verre que l'on implante à l'intérieur d'une seule fibre musculaire pour étudier les variations du potentiel électrique dans ces fibres, d'après l'idée que la contraction des fibres musculaires est provoquée par des changements de potentiel électrique, eux-mêmes induits par l'arrivée d'un signal nerveux à l'extrémité du neurone moteur.

Ses tribulations ne sont pas finies et, dès la fin de la Seconde Guerre mondiale, il retourne à Londres dans le laboratoire de Hill pour utiliser les nouvelles électrodes sur des lambeaux vivants de muscle de grenouilles. On lui a adjoint un jeune collègue américain, Paul Fatt.

Les yeux rivés aux enregistrements du potentiel électrique mesuré par leurs fines électrodes dans les fibres musculaires de grenouille, Katz et Fatt restent perplexes. Fatt vient d'augmenter fortement le gain de l'amplificateur. *A priori*, c'est un geste insensé, comme d'augmenter le son de votre chaîne audio lorsque vous êtes branché sur une station qui n'émet que des parasites. Mais à ce moment-là, sur la ligne fortement grossie représentant le potentiel électrique inerte de l'écran de l'oscilloscope, les deux comparses voient apparaître de petites sautes désordonnées.

Les « quanta » de la pensée sont de petites poches de lipides appelées « vésicules », contenues dans l'extrémité des neurones présynaptiques. Ces vésicules contiennent des neurotransmetteurs qui sont relâchés dans la synapse et transmettent l'influx nerveux au neurone postsynaptique.

Un comportement bien étrange... Comme un simple « bruit » électrique que l'on peut observer dans les microcomposants électriques. Rien qui laisse présager un signal. Au premier abord, Katz et Fatt assimilent ces sautes de potentiel à des parasites liés à la mesure, qu'on appelle « artefacts ». Elles se produisent de façon imprévisible et spontanée, et ne semblent pas représenter un quelconque signal biologique. À première vue, rien qui explique comment un neurone moteur communique avec une fibre nerveuse !

DES SIGNAUX NERVEUX MINIATURES

Mais Katz et Fatt augmentent encore le gain de l'amplificateur. Et là, leur perplexité franchit un nouveau cap. Ils raconteront qu'ils ont d'abord cru que les sautes d'intensité sur l'écran étaient dues à des tremblements du sol provoqués par le pas lourd de leur patron Archibald Hill, lequel avait pour habitude de s'enfuir dans les couloirs lorsqu'il ne souhaitait pas répondre à une personne lancée à sa recherche. Mais cette hypothèse est vite démentie.

Car une fois agrandis au maximum, les minuscules pics d'activité apparaissent comme une forme réduite d'une véritable onde électrique, telle celle provoquée par la transmission d'un influx nerveux à une synapse. Un profil de variation appelé « potentiel synaptique ».

Il s'agit donc de potentiels synaptiques miniatures, survenant spontanément et de

© Lison Bernet

manière aléatoire. Katz et Fatt remarquent que ces potentiels n'apparaissent que lorsque l'électrode est insérée dans une fibre musculaire située juste sous le point de jonction entre le neurone moteur et la fibre musculaire. Il s'agit donc bien d'un « bruit » synaptique, à savoir une activité spontanée et désordonnée, comparable au bruit électrique. Mais qu'est-ce qui provoque ce bruit ? Faut-il y voir, comme dans la plupart des phénomènes physiques, le résultat d'une agitation thermique ?

Katz aurait pu ranger cette observation parmi d'autres curiosités neurophysiologiques, mais en bon biophysicien, il interroge la nature de ce mystérieux bruit biologique en 1950 dans un article paru dans la revue *Nature*. Et il va même jusqu'à proposer que ce bruit a des effets physiologiques importants.

Premièrement, il pose la question de l'origine de ce bruit. Quelques années plus tôt, c'est lui qui a mis en évidence la nature chimique de la neurotransmission à la jonction neuromusculaire. Il imagine donc que le bruit synaptique pourrait être dû à de toutes petites fuites de neurotransmetteurs (en l'occurrence, l'acétylcholine) des extrémités nerveuses vers la surface du muscle, ce qui causerait de petites dépolarisations que l'on verrait sous la forme des infimes sauts de potentiels prises pour le pas lourd de Hill dans les couloirs. C'est ce que Katz appelle alors les « potentiels synaptiques miniatures ».

À un moment, le chercheur fait même l'hypothèse que chaque fluctuation électrique est due à la libération d'une seule molécule d'acétylcholine. En cela, il imagine une situation similaire à celle de la rétine, où les cellules photosensibles de l'œil réagissent à la réception d'un unique photon. Mais un calcul simple lui fait plutôt penser que l'acétylcholine doit être libérée par « paquets » estimés à environ 10000 molécules d'acétylcholine. Pour lui, ces paquets sont les briques élémentaires de la neurotransmission. Impossible d'imaginer une quantité moindre, car les potentiels synaptiques miniatures ont tous à peu près la même taille, de sorte que le « quantum » (l'unité minimale) de neurotransmission se situerait autour de ce seuil de 10000 molécules de neurotransmetteurs. Et, les potentiels miniatures survenant de manière aléatoire, Katz s'attend à ce que ces quanta soient libérés spontanément, selon une probabilité faible.

Deuxièmement se pose la question de la fonction de ces potentiels synaptiques miniatures. On pourrait penser qu'ils représentent une activité synaptique de base, et que la fibre musculaire serait équipée de détecteurs d'acétylcholine afin de réagir par un événement électrique à la moindre libération d'un quantum de neurotransmetteur. Il s'agirait alors d'un mécanisme assurant un couplage fonctionnel très sensible entre le nerf et le muscle, ce dernier frémissant à la moindre petite activité nerveuse, un peu comme lorsque les frissons nous gagnent progressivement au froid.

À partir de 1950, Katz passera des années à démontrer ce point de vue. Il démontrera en particulier qu'un potentiel d'action cheminant le long d'une fibre nerveuse jusqu'à la synapse déclenche la libération simultanée, au niveau de la synapse, de nombreux quanta d'acétylcholine, suscitant des potentiels synaptiques de grande taille qualifiés de « potentiels évoqués ». Ce dernier terme précise dès lors que le potentiel électrique n'est pas spontané, mais provoqué par l'arrivée de l'influx nerveux dans le neurone présynaptique.

LES QUANTA DE LA PENSÉE OBSERVÉS AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE

De fait, le potentiel évoqué peut être induit expérimentalement par une stimulation de la fibre nerveuse, et Katz démontrera également que la présence d'ions calcium augmente la probabilité d'émission des potentiels synaptiques miniatures. Ce qui sera interprété bien plus tard comme un effet activateur du calcium sur

L'idée de Fatt était aussi insensée que de monter le son d'une station de radio émettant des parasites !

les « paquets » de neurotransmetteur… En tout cas, l'essentiel est dans cette série d'études, Katz vient de démontrer que les potentiels du bruit synaptique sont en réalité des potentiels unitaires (des décharges uniques) obéissant à une loi du « tout ou rien », et représentant les blocs élémentaires des potentiels de plus grande taille de la neurotransmission musculaire. Une mécanique quantique de la neurotransmission est née.

Mais justement. De premiers doutes fusent. La vision de Katz n'est-elle pas trop inspirée de la physique quantique, très en vogue à l'époque, et éloignée du monde de la biologie ? Un neurone a-t-il quelque chose à voir avec un >

> mécanisme quantique? Mais autour de 1955, la microscopie électronique va répondre à cette question. Pour la première fois, elle permet d'observer les structures fines des neurones et l'on voit alors apparaître les synapses pour de vrai... C'est là que l'on découvre, dans les terminaisons nerveuses des neurones présynaptiques, de petites billes toutes de même taille.

Il se trouve que de semblables «bulles» ont déjà été observées dans des cellules de la glande médullosurrénale (qui synthétise de nombreuses hormones, dont l'adrénaline), où l'on a déterminé qu'elles contiennent un neurotransmetteur. Pendant ce temps, à l'université de Washington, deux autres chercheurs, Eduardo De Robertis et Stanley Bennett, émettent l'idée que certains neurotransmetteurs peuvent être associés dans certaines conditions à des granules ou des vésicules intracellulaires. Les indices convergent, mais le monde scientifique hésite encore: les anatomistes et spécialistes de la microscopie électronique ne veulent pas prendre le risque d'interpréter leurs clichés à la lumière des spéculations savantes de biophysiciens...

LA PISTE DES VÉSICULES SYNAPTIQUES

C'est Katz lui-même qui franchira le pas en formulant son hypothèse: s'il existe des courants synaptiques miniatures de nature quantique et des vésicules dans les synapses, alors ces vésicules synaptiques pourraient contenir de l'acétylcholine en quantités fixes. Ces vésicules seraient les quanta de la neurophysiologie.

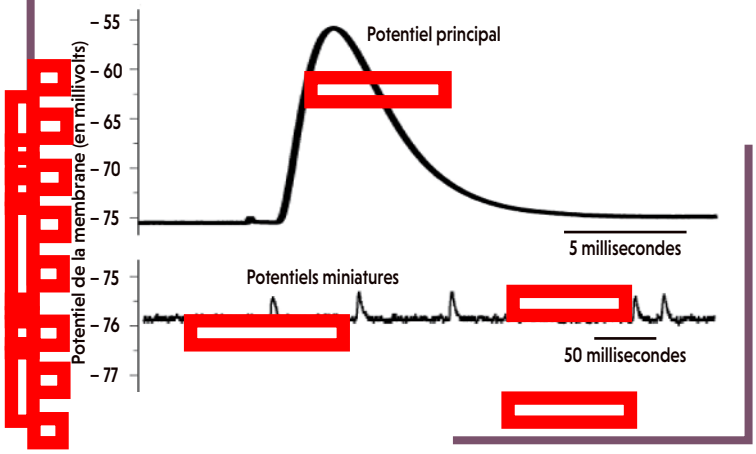
L'occasion se présente de s'exprimer publiquement sur ce sujet en 1955, en région parisienne, à Gif-sur-Yvette, lors du colloque international du CNRS «Microphysiologie comparée des éléments excitables». À l'ouverture du congrès, le chef de file des neuroscientifiques français, Alfred Fessard, qui a mis en évidence la neurotransmission chimique dans l'organe électrique du poisson-torpille en 1939, souligne l'importance des techniques microphysiologiques pour l'étude des «propriétés élémentaires» du système nerveux. Katz, au cœur du sujet, propose alors que les synapses fonctionnent en bombardant la membrane postsynaptique de quanta de neurotransmetteurs fixes, stockés dans des vésicules et libérés de façon spontanée et aléatoire, ou bien de manière synchronisée et provoquée par le mécanisme d'exocytose: il prédit que la libération du contenu des vésicules se produit par éclatement lors de leur fusion à la membrane extracellulaire, un principe de physique des membranes récemment décrit par le belge Christian de Duve. «Naturellement, il est tentant, écrit Katz dans son rapport, de considérer les "vésicules" terminales comme les contenants structuraux des quanta d'acétylcholine et aussi qu'au cours d'une collision critique avec la membrane présynaptique, le contenu d'une vésicule pourrait être déchargé suivant le mode du "tout ou rien" et produire les potentiels synaptiques miniatures.»

Tout semble ensuite s'organiser autour de cette vision novatrice. Le neuroanatomiste et

Pour la première fois, on observait les structures fines des neurones, en particulier les synapses

QUE SONT CES POTENTIELS MINIATURES ?

Quand un influx nerveux est transmis d'un neurone à son [illegible] le neurone postsynaptique, d'un potentiel d'action de large [illegible] (*trace du haut*). Ce que Bernard Katz et Paul Fatt ont découvert, c'est que même dans une synapse inactive, de [illegible] (*trace inférieur*). La faute à de microscopiques vésicules contenant des quantités minimales de neurotransmetteurs, qui traversent accidentellement la synapse. Quand la synapse est active, un grand nombre de vésicules sont émises et, cumulant leurs potentiels miniatures, créent le large potentiel d'action capable de se propager à longue distance.



© Pour la Science, d'après Meriney / Wikimedia commons

cytologiste René Couteaux (1909-1999), pionnier de la microscopie électronique en France, étudie les zones d'ancrage des vésicules, forgeant l'expression de «zone active» de la synapse, en étudiant le cycle d'exocytose et d'endocytose au niveau des synapses: les molécules de neurotransmetteur sont libérées par les vésicules (exocytose), avant d'être recyclées et stockées à nouveau dans des vésicules à l'intérieur des neurones (endocytose). Les travaux de Couteaux défendent clairement l'«hypothèse vésiculaire» de Katz, qui devient son ami, et chez lequel il effectuera un séjour. Finalement, un élève de Couteaux, le biochimiste Maurice Israël, isole des vésicules synaptiques contenant de l'acétylcholine à partir de l'organe électrique de la torpille... À propos de ce résultat, Katz adressa une lettre à René Couteaux en décembre 1968, écrivant qu'il s'agit là de son plus beau cadeau de Noël.

UNE PRÉDICTION TROUBLANTE

Et l'aventure continue... Toujours dans les années 1950, Katz met au point un nouveau type d'électrode qui permet de libérer à volonté, comme au compte-gouttes, des quanta d'acétylcholine: l'électrode est munie d'un circuit électrique qui permet de contrôler la sortie d'ions d'acétylcholine! Au cours des années 1970, grâce à cette technique, il étudie de plus près encore les fluctuations spontanées du potentiel de repos de la fibre musculaire en présence d'acétylcholine. Des analyses statistiques de ce «bruit» conduisent à émettre l'hypothèse que les molécules d'acétylcholine relâchées par micropaquets provoquent l'ouverture de pores moléculaires dans la membrane postsynaptique. Il s'agit ni plus ni moins des canaux ioniques, que l'on découvrira une décennie plus tard grâce aux travaux des Allemands Erwin Neher et Bert Sakmann.

Aujourd'hui encore, l'étude du «bruit des neurones» révèle bien d'autres mécanismes fondamentaux et surprenants comme des mécanismes moléculaires nouveaux et de nouvelles propriétés de réseaux de neurones. Bert Sakmann a certainement eu raison d'écrire dans son mémoire biographique, combien Katz fut heureux dans ses intuitions, notamment sur le bruit biologique, qui se sont aujourd'hui imposées comme des théories classiques des neurosciences. Le milieu du XXe siècle aura bien été l'heure de gloire des quanta, dans tous les sens du terme! ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Ashmore, **Paul Fatt,** *Mems Fell. R. Soc.*, vol. 62, pp. 167-186, 2016.

J.-G. Barbara, **La Naissance du neurone**, pp. 210-215, 2010.

B. Sakmann, **Sir Bernard Katz**, *Mems Fell. R. Soc.*, vol. 53, pp. 186-202, 2007.

J.-G. Barbara et T. Galli, **Vaincre l'hypothèse non vésiculaire de la neurotransmission**, Lettre des Neurosciences, vol. 30, pp. 3-6, 2006.

COMBINES POUR TÉTRADES

La combinatoire géométrique exige une patience et une intuition dont souvent seul l'ordinateur est capable. Le cas des tétrades est exemplaire.

RENDEZ-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*

L'AUTEUR

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

Thomas Cabaret, un lecteur de la rubrique, m'a signalé un article de Juris Čerņenoks et Andrejs Cibulis, du département de mathématiques de l'université de Lettonie, à Riga. Bien que publié dans une revue assez confidentielle, l'article est très amusant et associe raisonnements géométriques astucieux pour certaines questions et calculs informatiques pour d'autres. Quelques résultats de ce bel article seront présentés ici, accompagnés d'autres sur le thème des groupes de formes géométriques ayant de multiples contacts.

Le mot «tétrade» existe en français et signifie une suite de quatre notes musicales, un groupe de quatre bits d'information, un alignement de quatre objets astronomiques, etc. Si nous voulons suivre les progrès récents en géométrie combinatoire, il faut ajouter à cette liste la définition suivante: une tétrade est une association de quatre formes planes identiques et d'un seul tenant, chacune en contact avec toutes les autres par au moins un segment de droite ou de courbe. Le mot anglais *tetrad* a été introduit en anglais avec ce sens en 1975 par Michael Buckley.

Deux exemples de tétrade sont donnés dans l'encadré 1. Notons bien que chaque exemplaire de la forme touche les trois autres.

Que quatre formes planaires d'un seul tenant, identiques ou non, puissent se toucher deux à deux sur le plan est un maximum. Il est en effet impossible de trouver cinq formes du plan d'un seul tenant se touchant deux à deux. C'est une conséquence du théorème de théorie des graphes qui stipule que le graphe complet non orienté K_5 (cinq nœuds, chacun relié aux quatre autres) n'est pas planaire, c'est-à-dire ne peut pas être dessiné sur le plan sans que deux arcs se croisent (*voir l'encadré 1*). En effet, si cinq formes d'un seul tenant du plan se touchaient deux à deux, en les contractant chacune en un point et en représentant chaque contact entre deux formes par un arc joignant les points correspondants, on obtiendrait une représentation planaire de K_5 sans croisement des arcs… ce qui est impossible.

À TROIS DIMENSIONS

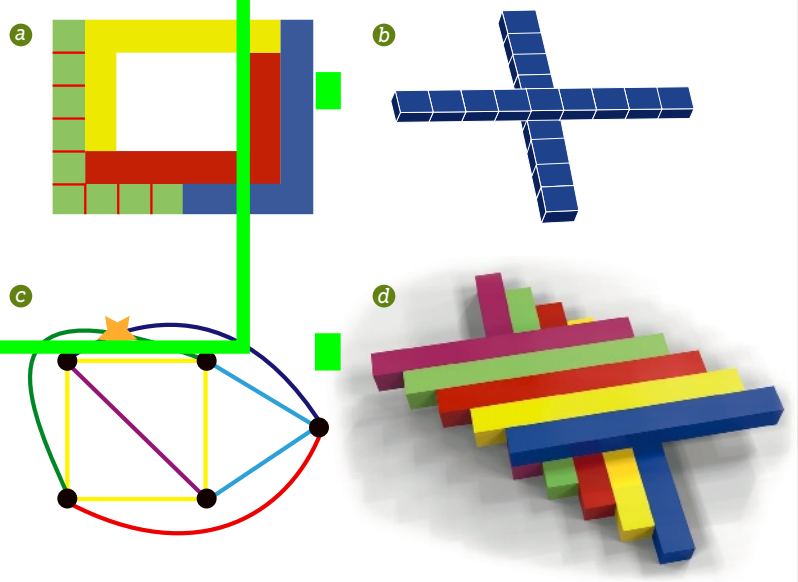
À trois dimensions, la situation est très différente, puisque pour tout entier n, il existe dans l'espace une forme F d'un seul tenant, et une disposition de n exemplaires de F telle >

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

1 TÉTRADES DANS LE PLAN ET DANS L'ESPACE

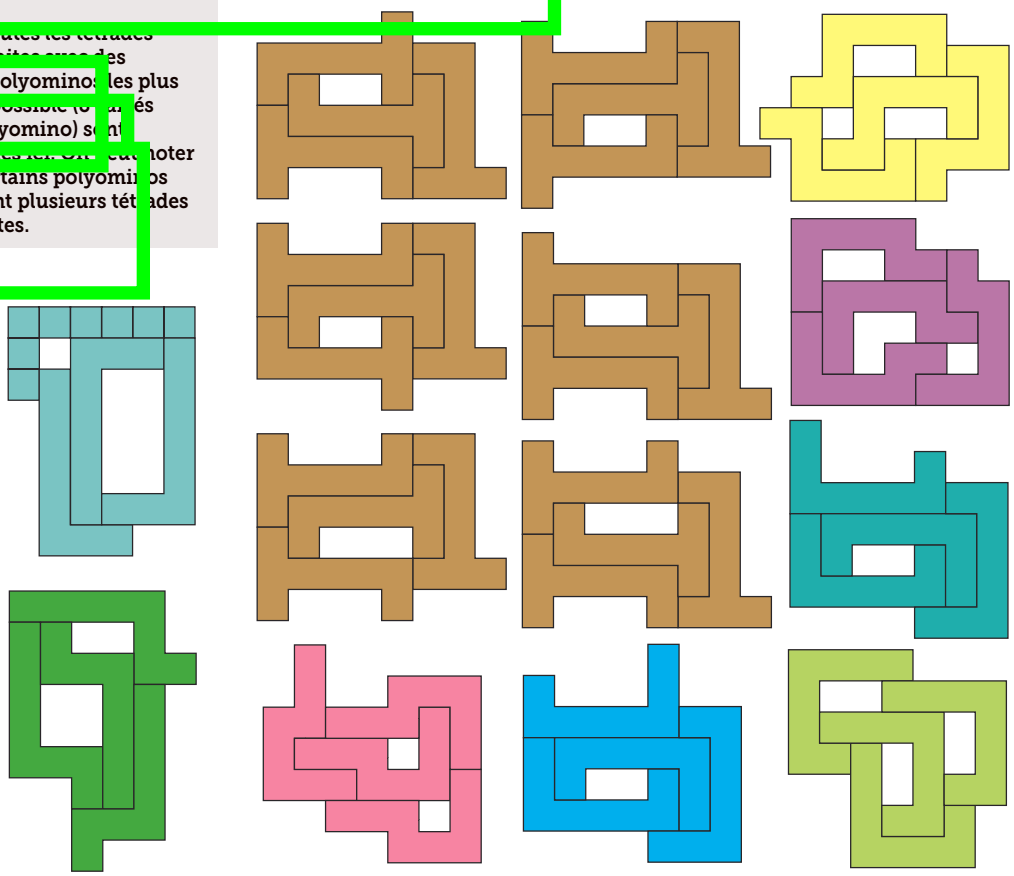
Un exemple de tétrade *(a)* : les quatre formes composant la figure sont identiques (on passe de l'une à l'autre par translation, rotation ou symétrie axiale) et chaque forme touche toutes les autres. Il est impossible de faire la même chose dans le plan avec 5 formes, car on en déduirait une représentation planaire sans croisement du graphe K_5 (chacun des cinq nœuds est lié à tous les autres), ce qui est impossible *(b)*.

Dans l'espace, il existe des configurations de *n* formes identiques se touchant deux à deux. L'image d, due à Francesco De Comité, montre la solution pour *n* = 5 : la configuration est constituée de 5 formes, chacune étant la réunion de deux barres de la même couleur *(c)*. Cela se généralise à *n* formes.



2 LES PLUS PETITES TÉTRADES EN POLYOMINOS

Toutes les tétrades faites avec des polyominos les plus petits possible (obtenus par polyomino) sont montrées ici. On peut noter que certains polyominos donnent plusieurs tétrades distinctes.



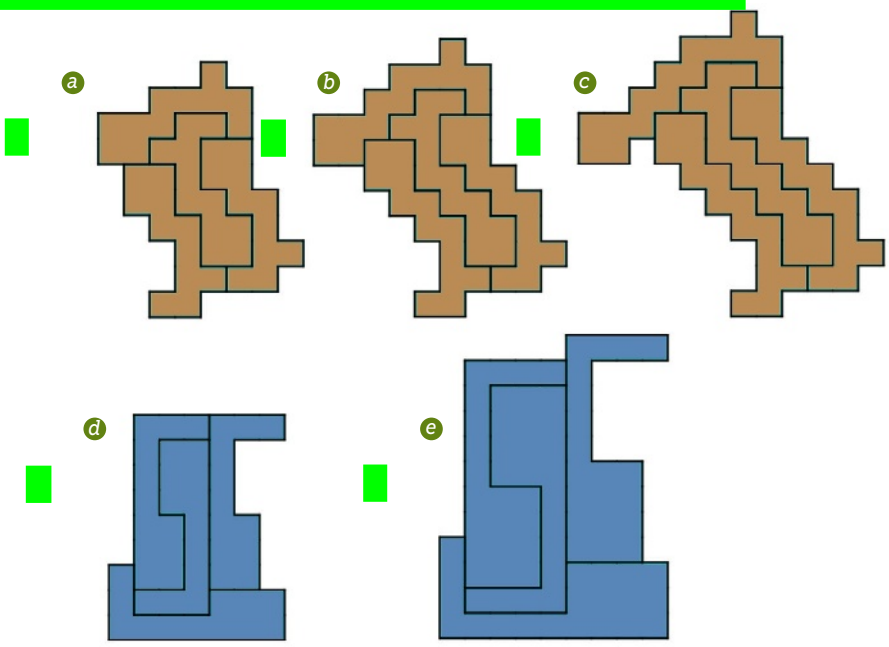
© Francesco De Comité (figure d de l'encadré 1)

3

TÉTRADES EN POLYOMINOS SANS TROU

Le plus petit polyomino donnant un tétrade sans trou est celui utilisé pour le dessin *a*. La série de dessins *a*, *b*, *c* se prolonge de manière évidente et montre donc qu'il existe une infinité de tétrades sans trou faites de polyominos.

La série *d*, *e* se prolonge aussi de manière évidente et montre qu'il existe une infinité de tétrades sans trou faites de polyominos dont aucun n'est nécessaire pour assembler la tétrade.



n	Nombre de polyominos à *n* carrés	Nombre de polyominos à *n* carrés donnant une tétrade	Nombre de tétrades trouvées pour *n*	Nombre de tétrades sans trou trouvées pour *n*
8	3[illegible]	[illegible]	14	0
9	1 285	42	83	0
10	4 655	187	341	0
11	17 073	739	1 388	1
12	63 600	2 871	5 648	10
13	238 591	11 300	22 688	1
14	901 971	44 440	90 243	11
15	3 426 576	172 984	352 243	36
16	13 079 255	670 107	1 373 595	66
17	50 107 909	2 599 478	5 364 209	70

> que chaque exemplaire de F touche le $n-1$ autres. Un exemple de telle forme F es constitué de deux barres en croix (*voir l'enca dré 1, c*) : on prend deux barres de $2n-1$ cubes collés en ligne ; on colle perpendiculairement les deux barres par leur cube central. On dispose alors sans mal n copies de F en s'arrangeant pour que chacune touche par un morceau de surface toutes les autres (*voir l'encadré 1, d*).

On remarquera que cet assemblage dans l'espace montre que si l'on voulait colorier des cellules d'un seul tenant d'une partie de l'espace sans que deux cellules en contact portent la même couleur, le nombre de couleurs nécessaires serait infini. Le théorème de quatre couleurs du plan (on peut colorier toute carte plane avec quatre couleurs sans que deux pays voisins portent la même couleur) n'est donc généralisable dans l'espace ni avec 5 couleurs, ni avec n couleurs quel que soit l'entier n.

TÉTRADES DE POLYOMINOS

Concentrons-nous maintenant sur le plan et plus particulièrement sur les polyominos, qui sont les formes d'un seul tenant obtenues en accolant côté contre côté des carrés de même taille.

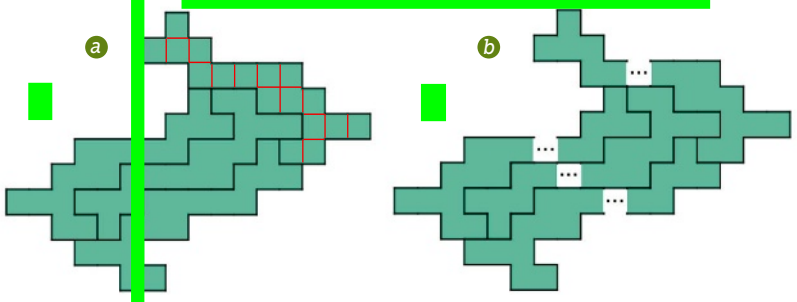
La figure *a* de l'encadré 1 montre un tétrade dont la forme de base est un polyomino de 9 carrés. Peut-on faire mieux, c'est-à-dire trouver une tétrade faite à partir de quatre polyominos utilisant chacun moins de 9 carrés ? La réponse est positive et une recherche par ordinateur donne la liste exhaustive de toutes les tétrades utilisant quatre polyominos identiques comportant 8 carrés chacun (*voir l'encadré 2*).

L'ordinateur indique aussi qu'il n'existe pas de polyominos plus petits permettant de composer une tétrade.

Le travail de l'ordinateur pour arriver à ces dessins et résultats est presque instantané, car il n'y a que 369 polyominos faits de 8 carrés et beaucoup moins pour les polyominos plus petits. Un humain voulant obtenir la liste complète de l'encadré 2 devrait sans doute travailler des jours entiers, et la démonstration complète qu'il n'y a pas d'autre solution que celles indiquées serait très longue. On ne peut cependant pas considérer que la réponse donnée par l'ordinateur sans justification constitue une démonstration, mais si plusieurs programmes indépendants arrivent au même résultat, personne ne doutera que nous disposons de la liste complète de tétrades faites de polyominos de 8 carrés ; l'utilisation d'ordinateurs en mathématiques conduit à un consensus sur les résultats, mais ils sont parfois d'une nature différente de celui que donnent les démonstrations.

4 POLYOMINOS DE *N* CARRÉS FORMANT UNE TÉTRADE SANS TROU

Ces dessins (de Juris Čerņenoks et Andrejs Cibulis) montrent que pour tout entier $n \geq 17$, il existe des tétrades sans trou formées de polyominos de n carrés exactement. Les points dans *b* représentent un nombre quelconque de carrés unités.



5 TOUTES LES FORMES DE TROUS SONT POSSIBLES

Il est évident qu'un trou dans une tétrade faite de polyominos sans trou est nécessairement la forme d'un polyomino sans trou. La réciproque (« Tout polyomino sans trou peut être un trou dans une forme constituant une tétrade ») est vraie, comme Juris Čerņenoks et Andrejs Cibulis l'ont démontré par un élégant raisonnement (*voir la bibliographie*) dont voici les détails.

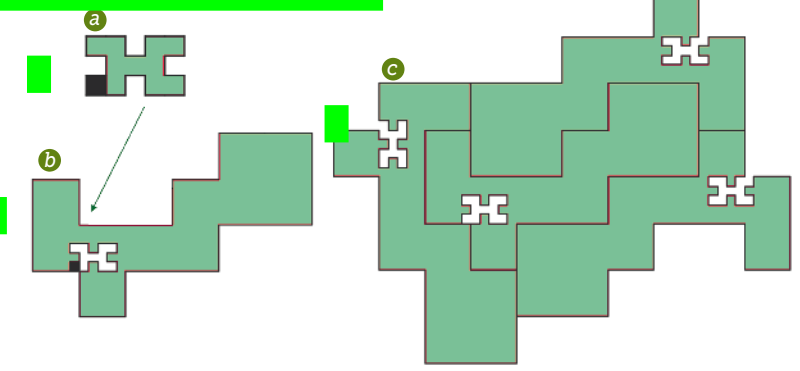
Considérons un polyomino sans trou quelconque, par exemple celui dessiné en *a*.

Repérons son carré le plus à gauche et le plus bas. Il est dessiné en noir.

Prenons maintenant un polyomino ayant la forme dessinée en *b*, et assez grand pour que, en plaçant le polyomino *a* avec le carré noir comme indiqué, tout le polyomino *a* soit dans le polyomino *b*.

Creusons le polyomino *b* en lui enlevant le polyomino *a* placé comme on vient de l'indiquer.

Le polyomino obtenu permet de construire une tétrade (*c*) avec un trou qui a exactement la forme du polyomino *a*.



> Précisons que l'on considère que deux polyominos sont identiques si l'un s'obtient à partir de l'autre par translation, rotation ou symétrie par rapport à une droite (retournement du polyomino). Le décompte des polyominos est un problème difficile et on ne connaît, grâce à des calculs par ordinateur, le nombre de polyominos de n carrés que pour n compris entre 1 et 28. Ces nombres sont donnés par la suite https://oeis.org/A00105 de l'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane. Le record de calcul, pour 28, a été établi par le chercheur portugais Tomás Oliveira e Silva : il y a 153 511 100 594 603 polyominos composés de 28 carrés. Pour créer et étudier les tétrades faites de polyominos à n carrés, Juris Čerņenoks et Andrejs Cibulis ont mis au point un algorithme qui fonctionne de la façon suivante.

– La liste complète des polyominos à n carrés est engendrée et on envisage chacun séparément.

– Une première copie du polyomino P étudié est déposée sur le plan à un endroit quelconque. Une seconde copie P' de P est ajoutée et placée de toutes les façons possibles où P' touche P au moins par un segment correspondant au côté d'un carré. De même une troisième copie P'', puis une quatrième copie P''' sont placées de toutes les façons possibles touchant P.

– On examine si les quatre copies constituent une tétrade : pas de chevauchement des copies de P, et chacune touche les trois autres par au moins un segment.

– Si la configuration P-P'-P''-P''' est une tétrade, on contrôle qu'elle n'est pas déjà présente dans la liste que le programme construit, ni une configuration s'en déduisant par translation, rotation ou symétrie axiale (retournement de la configuration). Si la configuration est vraiment nouvelle, le programme l'ajoute à la liste qu'il constitue.

Le tableau résultant du calcul est reproduit page 82. Comme on l'a vu pour le cas $n=8$, on observe que le nombre de tétrades obtenues est toujours plus grand que le nombre de polyominos donnant des tétrades. La raison est simple : certains polyominos se disposent de plusieurs façons en tétrades.

Le rapport entre le nombre de tétrades et le nombre de polyominos donnant au moins une tétrade augmente avec n. On pense que ce rapport tend vers l'infini, mais c'est une conjecture. Le calcul pour arriver à traiter complètement le cas $n=17$ a demandé 30 heures à la machine utilisée (un processeur Intel® CoreTM i7-3820 à 3,60 GHz).

TÉTRADES SANS TROU

La dernière colonne du tableau indique le nombre de tétrades sans trou et montre que la plus petite est composée de polyominos de 11 carrés. Elle est représentée sur la figure *a* de l'encadré 3.

La première série (*a*, *b*, *c*) de dessins de l'encadré 3 se poursuit à l'infini et montre donc qu'il existe une infinité de tétrades sans trou à base de polyominos.

La seconde série (*d*, *e*) montre de même qu'il existe une infinité de tétrades sans trou à base de polyominos ne nécessitant pas de retourner un polyomino pour composer les tétrades.

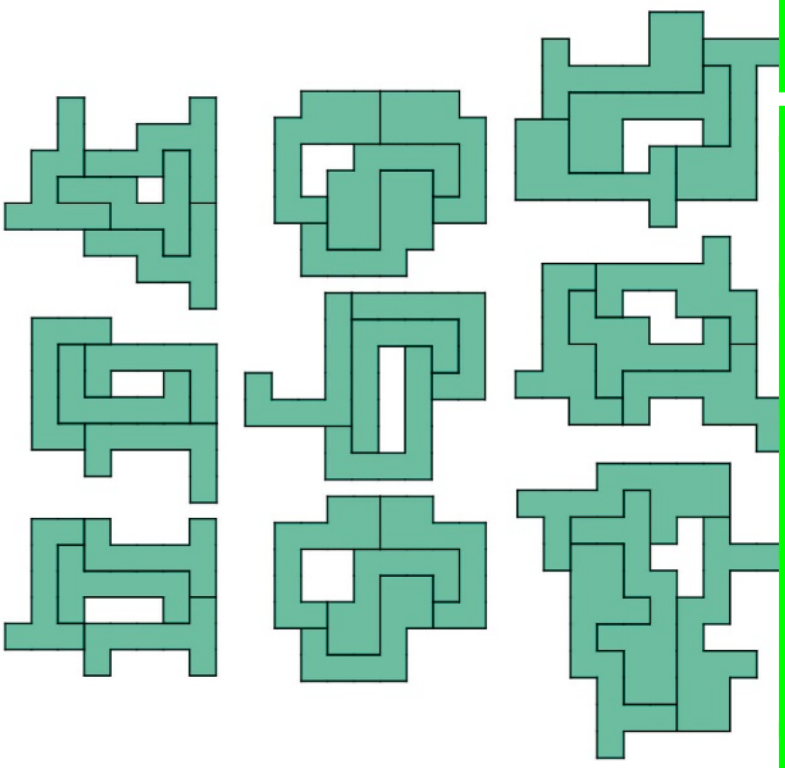
L'encadré 4 montre que pour tout entier n à partir de 17, il existe une tétrade sans trou à base de polyominos faits de n carrés. Pour les entiers compris entre 11 et 17, on prouve aussi, en traitant chaque cas, que de telles tétrades existent.

On remarquera que les trois derniers énoncés sont des affirmations que l'on a découvertes grâce à l'ordinateur, mais qu'une fois connues, on est en mesure, et c'est

6

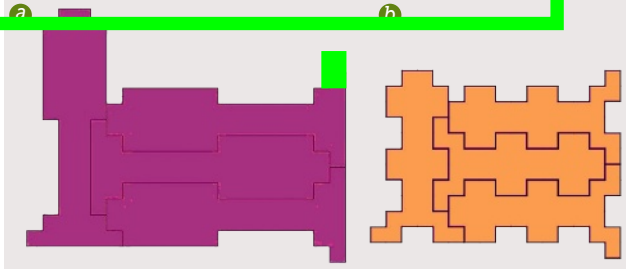
DES TROUS, DES PETITS TROUS...

Pour tous les trous possibles de 1 carré, 2 carrés, 3 carrés (2 cas), et 4 carrés (5 cas), voici le tétrade utilisant les polyominos les plus petits possible et dotés d'un tel trou. C'est un programme de Juris Čerņenoks et Andrejs Cibulis qui a donné ces résultats.



7 POLYOMINOS À AXE DE SYMÉTRIE

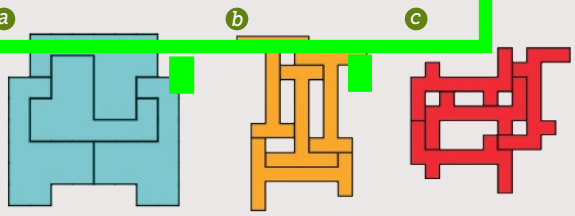
Ci-dessous, les polyominos les plus petits connus ayant un axe de symétrie et permettant de construire une tétrade sans trou. La configuration *a*, due à Juris Čerņenoks, utilise un polyomino de 48 carrés ; la seconde, *b*, trouvée à la fois par Frank Rubin et par Karl Scherer, utilise un polyomino de 34 carrés. On ignore si l'on peut faire mieux.



8 AXE ET CENTRE DE SYMÉTRIE

Le dessin *a* montre une tétrade ayant un axe de symétrie. Le dessin *b* est une tétrade formée avec le plus petit polyomino possible ayant un axe de symétrie. Le dessin *c* est construit à partir du plus petit polyomino donnant une tétrade et ayant un centre de symétrie.

D'autres tétrades intéressantes formées avec des polyominos sont proposées sur la page web de George Sicherman : https://userpages.monmouth.com/~colonel/tetrads/tetrads.html



immédiat en considérant les dessins, de les prouver sans son aide, contrairement aux énoncés sur les décomptes qui restent toujours liés à la confiance accordée aux programmes écrits et à leur fonctionnement.

L'énoncé suivant est très joli et, là encore, sa démonstration astucieuse se fait sans ordinateur. Il concerne les trous dans les tétrades à base de polyominos. On peut souhaiter qu'il n'y ait pas de trou comme précédemment, mais on peut aussi se demander s'il est possible de faire un trou d'une forme donnée à l'avance. Bien sûr, un trou dans une tétrade faite de polyominos a nécessairement la forme d'un polyomino lui-même sans trou. Le très beau résultat de Juris Čerņenoks et Andrejs Cibulis est : « Tout polyomino sans trou est la forme d'un trou pour une tétrade faite de polyominos » (*voir l'encadré 5 pour la démonstration*).

TROUS SIMPLES

Toujours à propos des trous d'une tétrade formée de polyominos, on peut considérer les trous les plus simples possible et rechercher pour chacun le polyomino le plus petit possible permettant la construction d'une tétrade ayant ce trou. Pour tous les trous de 1, 2, 3 et 4 carrés, l'encadré 6 donne la réponse, trouvée par ordinateur.

Comme tout bon sujet de mathématiques, celui des tétrades a ses énigmes non résolues. En voici trois d'une difficulté raisonnable que nous invitons les lecteurs à attaquer.

Énigme 1. Quel est le plus petit polyomino ayant un axe de symétrie et permettant la construction d'une tétrade sans trou ? Deux solutions sont connues, sans que l'on sache si on peut faire mieux. La première est due à Juris Čerņenoks et utilise un polyomino de 48 carrés. La seconde, trouvée indépendamment par Frank Rubin et Karl Scherer, utilise un polyomino de 34 carrés. Il faut soit prouver que ce record actuel est indépassable, soit l'améliorer (*voir l'encadré 7*).

Énigme 2. Existe-t-il des polyominos ayant un axe de symétrie et donnant une tétrade sans trou qui a elle-même un axe de symétrie ?

Énigme 3. Existe-t-il des polyominos ayant un centre de symétrie et donnant une tétrade sans trou ?

Avant d'attaquer les énigmes 2 et 3, notez bien les tétrades déjà connues et présentant des symétries. Le dessin *a* de l'encadré 8 montre une tétrade ayant un axe de symétrie, mais le polyomino qui l'engendre n'en a pas. Le dessin *b* montre le plus petit polyomino ayant un axe de symétrie et pouvant engendrer une tétrade, mais celle-ci a des trous. Le dessin *c* montre le plus petit polyomino doté d'un centre de symétrie, mais la tétrade a des trous.

L'objectif d'améliorer les résultats du tableau donné plus haut, pour aller au-delà de 17, semble accessible. Si vous y parvenez ou si vous résolvez l'une des trois énigmes, prévenez-moi, vos résultats seront publiés dans une prochaine rubrique. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Čerņenoks et A. Cibulis, **Tetrads and their counting**, *Baltic J. Modern Computing*, vol. 6(2), pp. 96-106, 2018 (https://doi.org/10.22364/bjmc.2018.6.2.01).

J. Čerņenoks et A. Cibulis, **Application of [illegible] mathematical proofs and in checking of results of pupils' research**, *Proc. of the 6th Intern. Conf. on Applied Inform. and Comm. Technologies*, Jelgava, Latvia, pp. 172-177, 2013 (http://alephfiles.rtu.lv/TUA01/000040029_e.pdf).

A. Cibulis et J. Čerņenoks, **Tetrads – it is not so easy**, MCG Newsletter, n° 3, pp. 23-28, 2012 (www.brgkepler.at/~geretschlaeg/MCG_Newsletter_3.pdf).

M. Gardner, **Penrose tiles to trapdoor ciphers**, chap. 9, The Mathematical Association of America, 1997.

Pages web de G. Sicherman : https://userpages.monmouth.com/~colonel/

L'AUTEUR

LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
[illegible]

LA PIERRE IDÉALE DU FACTEUR CHEVAL

Une pierre particulière fut le déclencheur de la construction du chef-d'œuvre de l'art naïf, le Palais idéal du facteur Cheval. Qu'a-t-elle de si étonnant?

Avril 1879, dans la Drôme, à deux pas du Vercors, un facteur effectue sa longue et harassante tournée à pied sur des chemins escarpés autour d'Hauterives. Près de Tersanne, petite commune de quelques centaines d'habitants, l'employé des Postes trébuche et tombe à terre.

Son pied vient de heurter une pierre. Il notera plus tard : « Elle représentait une sculpture aussi bizarre qu'il est impossible à l'homme de l'imiter. » La pierre scellera le destin de l'homme, car elle fera de lui, Ferdinand Cheval, un architecte et un maçon qui passera 33 ans de sa vie à bâtir à la chaux, au mortier et au ciment un monument hors normes, mélange détonnant d'inspirations biblique, hindoue, égyptienne… nourries par les premières cartes postales que le préposé distribuait. Chef-d'œuvre de l'art naïf, le « Palais idéal du facteur Cheval », de 12 mètres de hauteur et 26 de longueur, fut admiré par Pablo Picasso, mais aussi André Breton, Jean Tinguely, Max Ernst, Robert Doisneau…

Attardons-nous sur celle par qui tout a commencé, la pierre dite « d'achoppement » par Ferdinand Cheval. Elle ressemble à une série de piles d'assiettes, dont les couleurs s'étirent du gris à l'ocre. De quel minéral s'agit-il et quels processus géologiques ont pu présider à une telle formation?

Selon Didier Nectoux, directeur du musée de l'École des mines à Paris, ce serait un grès. Il témoigne de dépôts sableux successifs dans une dynamique régulière et assez tranquille. Cet empilement a ensuite été enfoui et a subi une diagenèse, c'est-à-dire un ensemble de processus physicochimiques par lesquels il se transforme en une roche. Plus

précisément, de l'eau circule dans le sédiment et apporte de la silice dissoute qui précipite, souvent à partir de « noyaux de cristallisation », et cimente l'ensemble.

La coloration ocre est due à la migration d'oxydes de fer dans la roche en formation. Par des mouvements d'ordre tectonique, le grès a ensuite rejoint la surface et a été exposé à l'érosion, essentiellement par l'eau. Peu à peu, les zones les plus dures, en l'occurrence les « bizes d'assiettes » de la Pierre d'achoppement, ont été mises en relief. Les parties cimentées sont souvent les plus éloignées des noyaux de cristallisation, plus récents et donc plus fragiles.

Plus largement, en quoi consiste le contexte géologique local ? Le territoire d'Hauterives, où cette pierre a été trouvée, et bien d'autres similaires recueillies par la suite par le facteur, se situe à la limite nord de la formation argilocaillouteuse de la Chambaran. Cette région appartient au sillon molassique périalpin, c'est-à-dire une accumulation de roches sédimentaires (les molasses), comme des grès, mais aussi des argiles et des conglomérats. La Pierre d'achoppement est une de ces molasses. Dans ce sillon, on trouve également des galets de quartzite (une roche siliceuse) d'origine alpine apportés à l'époque du Villefranchien, il y a environ 1,8 million d'années, à l'occasion d'une glaciation.

Autre particularité, à Tersanne, entre 1969 et 1984, le sous-sol a été creusé à de grandes profondeurs pour récupérer, par dissolution, 6 millions de tonnes de sel, sans doute daté du Trias, que Rhône-Poulenc a utilisé pour produire du chlore. Cela a laissé place à d'immenses vides représentant plusieurs millions de mètres cubes. Aujourd'hui, la société Engie stocke dans ces réservoirs naturels étanches du gaz naturel sous pression.

En fin de compte, c'est à un contexte géologique peu commun que l'on doit une construction qui l'est encore moins. André Malraux ne s'y était pas trompé. En 1969, il fut le seul à défendre l'inscription du Palais idéal aux Monuments historiques. Pour fêter le cinquantenaire de ce classement, une exposition d'art contemporain « Le vent et les oiseaux m'encouragent », ainsi qu'une création de l'artiste Fabrice Hyber et un *fac-similé* d'un carnet de dessins de Picasso entièrement consacré au facteur Cheval rendent hommage au Palais idéal jusqu'au 5 janvier 2020. ■

Pour plus d'informations :
www.facteurcheval.com

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

LES AUTEURS

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

DU GRANITÉ POUR BIEN PATINER

Un bon lubrifiant est un fluide de viscosité élevée. Ce n'est le cas ni de la glace ni de l'eau liquide. Et pourtant, on glisse sur la glace comme sur une couche d'huile ! Des expériences récentes ont résolu l'énigme.

Depuis le XIXe siècle, on avait l'intuition que lorsqu'on glisse sur de la glace, la surface de celle-ci se couvre d'un film très mince d'eau liquide qui évite le contact solide-solide et le lubrifie, même lorsque la température est inférieure à 0 °C. Pourtant, pour les physiciens, ce phénomène restait mal compris car l'eau, contrairement à l'huile, est en pratique un très mauvais lubrifiant.

Les expériences toutes récentes du groupe de Lydéric Bocquet, physicien du CNRS à l'École normale supérieure à Paris, résolvent le paradoxe. Elles montrent que le film n'est pas aussi liquide que l'on croyait, mais a une consistance proche du granité, mélange de glace pilée et d'eau. Cela en fait un meilleur lubrifiant, comme nous allons l'expliquer.

Pour bien saisir le paradoxe, examinons quelques situations où la surface d'un solide est mouillée soit par de l'eau, soit par de l'huile. Chacun aura constaté qu'il est bien plus facile de remuer de l'eau avec une cuillère que de l'huile. La raison en est que la viscosité, la grandeur physique qui exprime combien un fluide résiste à sa mise en mouvement quand on le « cisaille », est bien plus faible pour l'eau (1 millième de pascal·seconde) que pour l'huile (environ 0,08 pascal·seconde pour l'huile d'olive à 20 °C, par exemple, soit 80 fois plus !).

LUBRIFICATION À L'HUILE OU À L'EAU ?

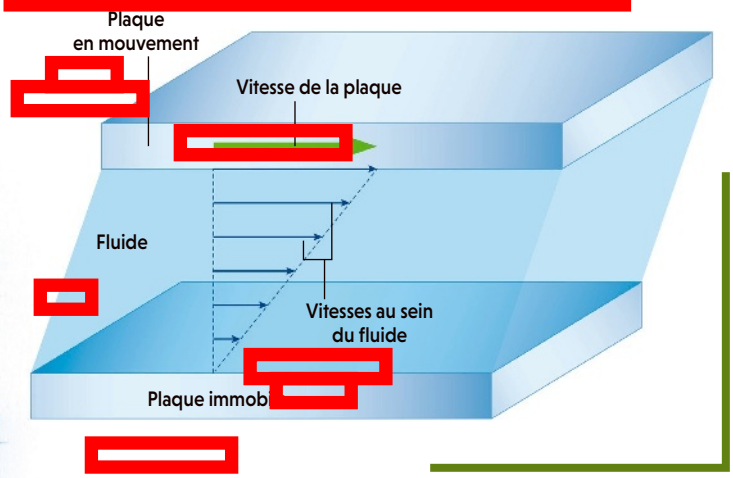
Pourtant, un piéton, par exemple, risque bien plus de glisser sur une flaque d'huile que sur une flaque d'eau. Autrement dit, l'huile frotte davantage sur un solide (la cuillère), mais réduit bien mieux le frottement entre deux solides (le sol et la chaussure), ce qui en fait un meilleur lubrifiant. Pour comprendre pourquoi et être plus quantitatif, il est nécessaire de s'intéresser à ce qui se passe à l'échelle microscopique.

Plutôt qu'une semelle de chaussure, trop souple et dont la déformation viendrait compliquer la situation, considérons un cube de métal posé sur un sol plat et horizontal, métallique lui aussi pour simplifier l'analyse.

Lorsque les surfaces en contact sont sèches, le frottement est un « frottement solide ». Cela signifie que si l'on pousse le cube avec une force trop faible, il ne glisse pas, mais reste bloqué sur le sol. Ce phénomène a pour origine la rugosité des surfaces à l'échelle microscopique. À l'échelle du millième de millimètre, même les surfaces qui nous apparaissent lisses présentent des aspérités. Aussi,

GLISSER SUR UNE COUCHE DE FLUIDE

Lorsqu'un fluide est confiné entre deux solides et que ceux-ci se déplacent parallèlement l'un par rapport à l'autre, il subit un cisaillement. Aux points de contact avec un solide, sa vitesse doit être égale à celle du solide, et donc la vitesse du fluide varie linéairement dans son épaisseur. Ce cisaillement engendre une résistance au glissement, qui dépend de la viscosité du fluide.



Le glissement d'un solide sur la glace se fait grâce à un film d'eau liquide, pense-t-on. Mais cette explication présentait des difficultés.

lorsqu'on pose un solide sur un autre, sommets et creux des deux surfaces s'imbriquent en partie, d'où une résistance au glissement. C'est lorsque la force exercée devient suffisante pour déformer ces aspérités que le glissement se produit.

Lorsque les surfaces ne sont pas sèches, tout dépend de la quantité de fluide présente (*voir l'encadré page suivante*). S'il y a trop peu de fluide, celui-ci se loge dans les cavités logées entre les deux surfaces. La situation n'est finalement guère changée et l'on reste dans une situation de frottement solide.

En revanche, lorsque l'épaisseur de la couche fluide entre les surfaces, quelque faible, est plus grande que la hauteur maximale des rugosités, il n'y a plus aucun contact entre les solides, donc plus de blocage. Dans ce cas, même la plus infime force mettra le bloc en mouvement.

Ce mouvement crée aussi un écoulement dans le fluide, puisqu'au niveau du sol, sa vitesse est nulle, tandis qu'au niveau de la face inférieure du bloc elle est égale à la vitesse du bloc. La résistance au mouvement est alors due uniquement à la viscosité du fluide. La force engendrée est proportionnelle à la surface de contact, à la viscosité et à la variation de vitesse du fluide (*voir l'encadré ci-dessus*).

Pour une surface de 250 centimètres carrés (celle d'un pied), une vitesse de déplacement de 1 mètre par seconde, typique de la marche, et une épaisseur de fluide de 2,5 millimètres, la force de frottement visqueux vaut 0,01 newton pour de l'eau et 0,8 newton pour de l'huile d'olive (soit le poids de 80 grammes).

Ainsi, pas de doute: l'huile frotte plus que l'eau. Mais attention, c'était sans se >

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

© Illustrations de Bruno Vacaro

> soucier d'un phénomène crucial dans la lubrification, à savoir la présence d'une force qui tend à rapprocher les surfaces – le poids du bloc de métal dans notre exemple.

Cette force crée dans le fluide une surpression par rapport à son environnement, surpression qui chasse le liquide de la région comprise entre les deux surfaces. En combien de temps? La question est difficile, car le temps calculé est très sensible au choix fait dans la modélisation.

LE FILM LUBRIFIANT EST CHASSÉ… PLUS OU MOINS VITE

Cependant, les estimations indiquent que lorsque le film d'eau est soumis à une force pressante de 300 newtons sur 250 centimètres carrés, il faut de l'ordre de 0,05 seconde pour qu'une épaisseur initiale de 2,5 millimètres soit divisée par 10 (0,25 millimètre), et de l'ordre de 5 secondes pour qu'elle soit divisée par 100 (0,025 millimètre).

Autrement dit, lorsque nous marchons dans une flaque d'eau, l'eau est chassée de sous notre pied. La semelle entre-t-elle alors en contact avec le sol? Tout dépend de la taille des aspérités de ce dernier.

Sur un trottoir ou sur un sol irrégulier, le contact solide-solide se fait très certainement: le temps pour que l'épaisseur du film soit de l'ordre de grandeur des aspérités est court (moins d'une seconde); dans ce cas, on retrouve vite du frottement solide, et nous ne glissons pas.

Au contraire, certains carrelages moulés sont traîtres, car leur surface est tellement lisse que, le temps de l'appui du pied au sol, le film d'eau s'amincit mais reste suffisamment épais pour qu'il n'y ait pas de contact solide-solide: nous glissons alors.

Dans le cas d'une flaque d'huile (d'olive), liquide près de 100 fois plus visqueux que l'eau, les temps de chasse sont à multiplier par un facteur de l'ordre de 100, à épaisseur identique. Il restera donc toujours un mince film de huile entre la chaussure et le sol, et nous glisserons presque toujours.

Nous sommes désormais parés pour revenir au problème soulevé par la glace et l'existence d'un mince film d'eau à sa surface. Compte tenu de ce qui précède, les physiciens ne comprenaient pas pourquoi ce film d'eau ne s'échappait pas rapidement sur les côtés de la zone de contact entre le patin ou le ski et la glace.

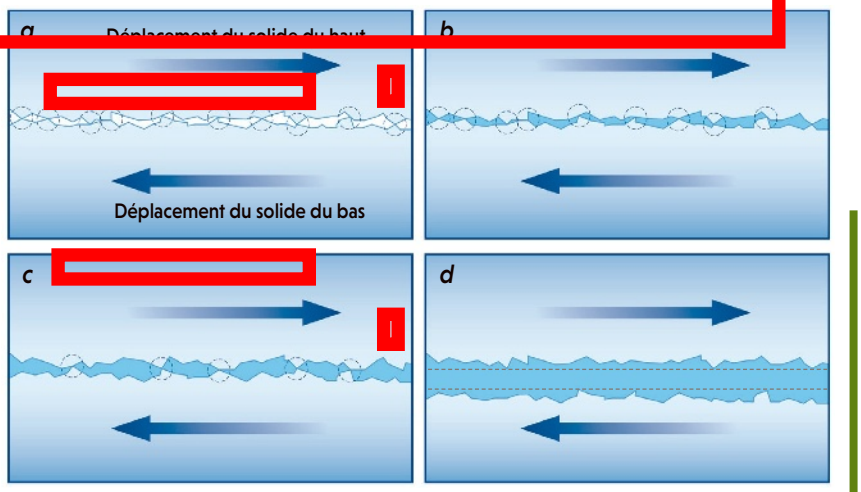
Pour élucider ce mystère, Lydéric Bocquet et ses collègues ont utilisé comme sonde une bille de verre fixée sur une branche de diapason afin de mesurer *in situ* les propriétés physiques de ce film d'eau. Ils ont ainsi estimé non seulement l'épaisseur de ce film, mais aussi la force de frottement (par l'analyse des vibrations de la bille parallèlement à la surface de contact) et la viscosité du fluide présent (par l'analyse des vibrations perpendiculaires à cette même surface).

Les résultats sont étonnants. D'abord, le film est bien plus mince qu'envisagé: son épaisseur est inférieure à 1 micromètre environ. Or plus on confine un fluide, plus les effets de la viscosité se font sentir et plus les temps caractéristiques pour l'amincir augmentent.

Par ailleurs, la viscosité du fluide présent au-dessus de la glace est, selon les conditions expérimentales, 10 à 100 fois supérieure à celle de l'eau liquide. Des analyses complémentaires suggèrent que cette viscosité plus élevée serait due à la présence de nanoparticules de glace dans le film d'eau: le frottement aurait pour effet non seulement de faire fondre la glace, mais aussi de l'abraser. Le fluide aurait ainsi une consistance plus proche d'un granité ou de la neige fondue. Très mince et plus visqueux que l'eau liquide, il serait donc un bien meilleur lubrifiant. ■

FROTTEMENT SANS FILM LIQUIDE OU AVEC

Lorsque deux solides glissent l'un sur l'autre, le poids du solide supérieur se répartit sur les points de contact *(cercles en pointillé)* entre les deux surfaces *(a)*; le frottement est dit « frottement solide ». Ce frottement n'est que très peu réduit en présence d'un liquide qui ne fait que remplir les interstices créés par les aspérités microscopiques *(b)*. Un régime mixte de lubrification s'installe lorsque le liquide est plus abondant *(c)*. Quand le liquide présent forme une couche assez épaisse pour que les aspérités des solides ne soient plus en contact *(d)*, la lubrification est complète. Encore faut-il que le liquide lubrifiant ne soit pas chassé trop rapidement sous la pression exercée par le solide supérieur.



BIBLIOGRAPHIE

L. Canale *et al.*, **Nanorheology of interfacial water during ice gliding**, *Physical Review X*, vol. 9, article 041025, 2019.

É. Guyon *et al.*, **Hydrodynamique physique**, 3e édition, CNRS Éditions, EDP Sciences, 2012.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 506 (déc. 19)
réf. PL506

N° 505 (nov. 19)
réf. PL505

N° 504 (oct. 19)
réf. PL504

N° 503 (sept. 19)
réf. PL503

N° 502 (août 19)
réf. PL502

N° 501 (juillet 19)
réf. PL501

N° 500 (juin 19)
réf. PL500

N° 499 (mai. 19)
réf. PL499

N° 498 (avr. 19)
réf. PL498

N° 497 (mar. 19)
réf. PL497

N° 496 (févr. 19)
réf. PL496

N° 495 (jan. 19)
réf. PL495

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 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1e réf. ____ x 9,90 € = ____ €
2e réf. ____ x 9,90 € = ____ €
3e réf. ____ x 9,90 € = ____ €
4e réf. ____ x 9,90 € = ____ €
5e réf. ____ x 9,90 € = ____ €
6e réf. ____ x 9,90 € = ____ €

TOTAL À RÉGLER ____ €

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 :

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

Offre valable jusqu'au 31/07/2020 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 commandés et choix en matière. Le responsable du traitement est la société *Pour La Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-... 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.

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 GÈNES PERDUS DES BALEINES

Comment les cétacés se sont-ils adaptés à une vie exclusivement marine ? En perdant certaines fonctions avantageuses pour les mammifères terrestres, grâce à une extinction très ciblée de certains gènes.

En 1943, André Lwoff, microbiologiste à l'institut Pasteur et futur Prix Nobel, publia un ouvrage qui lui attira de nombreuses critiques parmi les évolutionnistes français. Sous le titre *L'Évolution physiologique : étude des pertes de fonctions chez les microorganismes*, il y démontrait que, chez les microorganismes, l'évolution s'accompagne souvent d'une perte de capacités. Comment en était-il arrivé là ? Pour étudier les organismes unicellulaires – les « protistes » –, il faut les cultiver. Or, si certaines espèces se multipliaient sans difficulté dans le milieu de culture, d'autres ne prospéraient que si l'on ajoutait à ce milieu diverses molécules, nommées « facteurs de croissance ». En s'intéressant à ces facteurs, Lwoff avait montré tout d'abord que beaucoup étaient des vitamines. Puis il avait trouvé que l'un de ces facteurs n'était autre qu'une molécule produite par la plupart des cellules, le nicotinamide adénine dinucléotide (NAD), et intervenant dans le métabolisme cellulaire.

Lwoff avait alors compris que tous ces facteurs sont des molécules indispensables à n'importe quelle cellule, mais que seules certaines cellules les synthétisent. Les autres doivent les trouver dans leur milieu. Dans son livre, il postulait donc que ces dernières avaient perdu la capacité de synthétiser ces molécules. L'idée affronta une grande hostilité, car pour la majorité des biologistes, l'évolution ne devait être que progrès, c'est-à-dire ajout ou amélioration. Depuis, elle a été largement confirmée chez les protistes. Toutefois, son élargissement aux animaux et aux végétaux restait anecdotique… jusqu'à ce qu'une récente étude sur les cétacés la réanime.

La baleine à bosse est une espèce de cétacé à fanons

© Getty Images/Michael Nolan

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

EN CHIFFRES

90 %

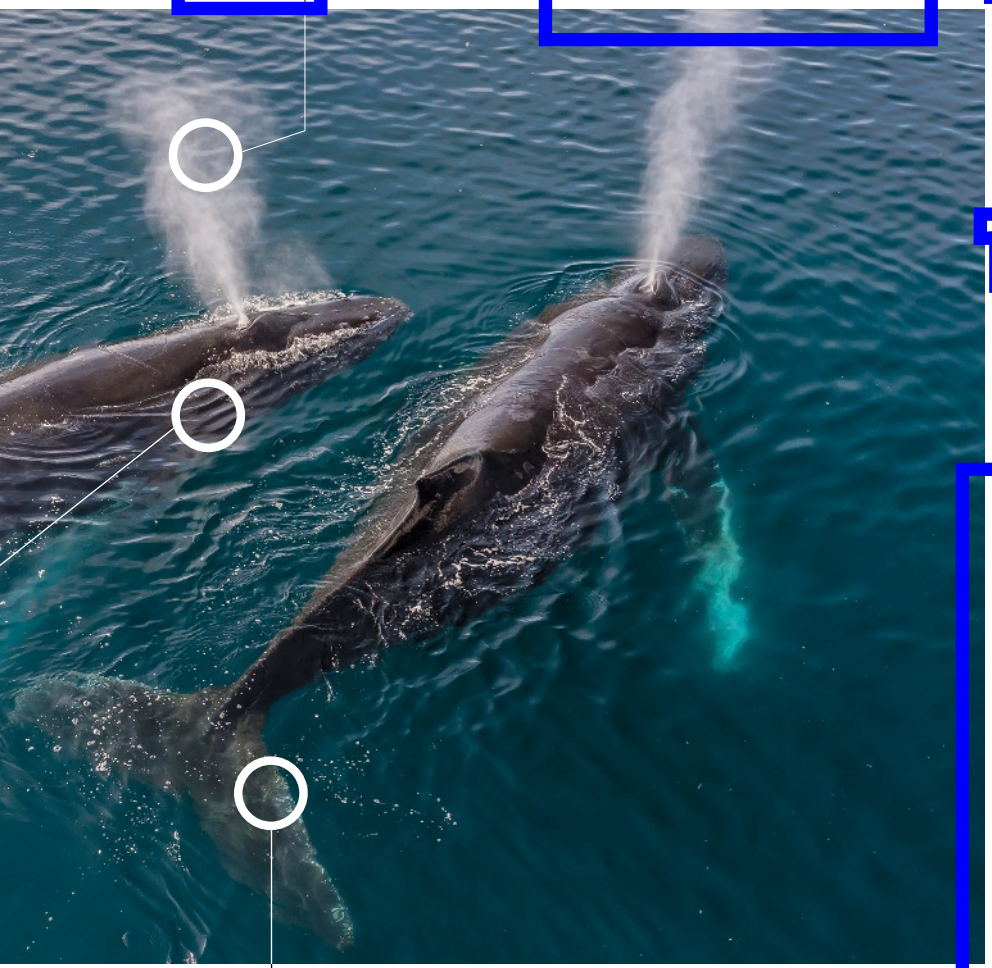
À leur remontée à la surface, les cétacés vident environ 90 % du volume de leurs poumons en un souffle – une « expiration explosive ».

62

Dans leur étude sur les pertes de fonctions chez les cétacés, Michael Hiller et ses collègues ont analysé 62 génomes d'espèces de mammifères : 4 cétacés, 2 pinnipèdes, 1 lamantin et 55 espèces terrestres.

2

En plongée, la fréquence cardiaque de la baleine bleue peut descendre jusqu'à 2 battements par minute, selon une récente étude menée par Jeremy Goldbogen, à l'université de Stanford, et ses collègues. On estime que le cœur d'une baleine de 70 tonnes pèse 319 kilogrammes et éjecte environ 60 litres de sang par battement.



Baleine à bosse
(Megaptera novaeangliae)
Longueur : 13-14 m (mâle) et 15-16 m (femelle)
Poids : 25 à 30 t en moyenne

© Dolly Holmes/the Noun Project

D'un point de vue anatomique, on sait depuis longtemps qu'en conquérant les mers, les cétacés (baleines, dauphins, cachalots…) ont perdu un caractère utile à leurs cousins terrestres : les pattes postérieures. Leur nageoire postérieure est en effet une néoformation musculeuse dépourvue de squelette. Les paléontologues ont d'ailleurs exhumé de nombreux fossiles qui ont permis de retracer la transition entre un quadrupède terrestre et un « bipède » aquatique, laquelle s'est produite au cours de l'Éocène, il y a environ 50 millions d'années. Toutefois, les fossiles n'ont évidemment rien révélé sur l'évolution physiologique de ces singuliers animaux.

C'est à l'étude de cette évolution que s'est récemment attelée une équipe germano-américaine autour de Michael Hiller, de l'institut Max-Planck à Dresde. Les chercheurs ont comparé les génomes de 62 espèces de mammifères, dont 4 cétacés, afin de trouver, parmi les presque 20 000 gènes codants communs, ceux portant des mutations qui empêchaient leur traduction en protéines. Leur attention s'est portée sur les 110 gènes inactivés chez les deux grands groupes de cétacés, les mysticètes, ou baleines à fanons (représentés dans l'étude par la baleine de Minke), et les odontocètes, ou baleines à dents (représentés par le grand dauphin, l'orque et le grand cachalot). L'inactivation de ces gènes concernant l'ensemble des cétacés, l'hypothèse la plus probable est qu'elle ait eu lieu antérieurement à l'ancêtre hypothétique commun des cétacés.

À LA RECHERCHE DE GÈNES PERDUS

Pour cibler spécifiquement les gènes devenus inactifs au moment de la transition terre-eau, l'équipe a utilisé le génome de l'hippopotame commun, le plus proche parent des cétacés (*voir l'encadré page 94*), afin de ne garder que les gènes restés intacts chez ce dernier : sur les 110 gènes, seuls 85 répondaient à ce critère. En guise de validation, les chercheurs ont ensuite vérifié que ces 85 gènes étaient bien inactivés chez deux autres odontocètes (le béluga et le dauphin de Chine) et un mysticète (la baleine boréale). Les fonctions de ces 85 gènes étant connues chez l'homme et la souris, >

> cela leur a permis de comprendre les conséquences de leur perte chez les cétacés. En voici quelques exemples.

Les gènes *F12* et *KLKB1* codent deux facteurs qui, lors de la coagulation sanguine, favorisent la formation du caillot. Or, au cours de la plongée, les cétacés présentent une baisse de leur rythme cardiaque, une réduction du débit sanguin et une vasoconstriction périphérique. La fréquence de ces phénomènes augmente le risque de thrombose, c'est-à-dire de formation d'un caillot dans les vaisseaux sanguins. Chez la souris, inactiver ces deux gènes diminue le risque de thrombose. La perte de fonction de ces deux gènes chez les cétacés leur est donc bénéfique, d'autant plus qu'elle n'empêche pas la formation de caillot lors d'une blessure.

DES POUMONS PLUS ÉLASTIQUES

Autre exemple: lors d'une plongée profonde, les poumons des cétacés collapsent. Ainsi, le volume des poumons d'un grand cachalot de 15 mètres n'est que de 7,5 litres à 1000 mètres de profondeur, alors qu'il est de 750 litres en surface. De plus, ces animaux réalisent, à leur remontée, une « expiration explosive »: ils vident 90% du volume de leurs poumons en un souffle. Or Michael Hiller et ses collègues ont remarqué qu'un gène jouant un rôle spécifique dans le système respiratoire, le gène *MAP3K19*, est devenu inactif chez les cétacés.

Chez l'humain, ce gène s'exprime dans diverses cellules des bronches et sa surexpression est impliquée dans le développement de la bronchopneumopathie chronique obstructive, une maladie due à la cigarette. Or l'inflammation induite entraîne la dégradation de l'élastine, une protéine qui confère son élasticité aux tissus pulmonaires. Le vidage des poumons est alors très incomplet, du à la perte d'élasticité des tissus. Chez les cétacés, en revanche, l'inactivation du gène *MAP3K19* préserve le réseau collagène-élastine et donc le souffle.

Ce gène est aussi surexprimé chez les patients atteints de fibrose pulmonaire, un excès de tissu conjonctif dans les poumons qui serait dû à une réparation anarchique. Or, si l'on inhibe le gène chez des souris, elles développent moins de fibroses. Son inactivation chez les cétacés les protégerait donc, eux dont les poumons sont particulièrement sujets aux microblessures du fait de l'amplitude de leurs mouvements respiratoires.

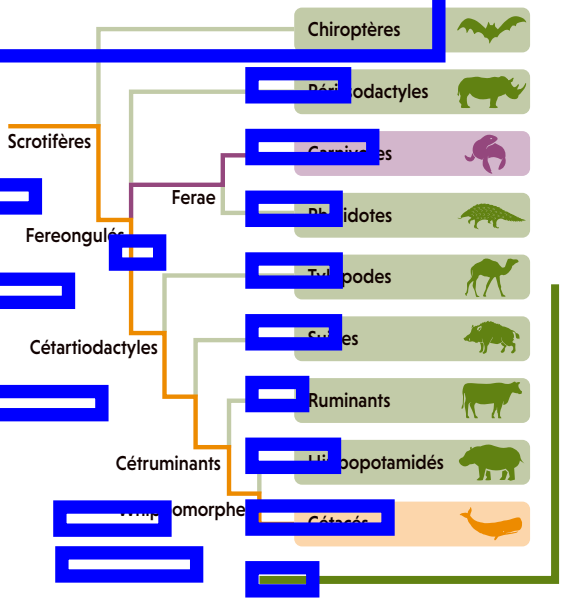
Le sommeil des cétacés est aussi le fruit de pertes de fonctions. Il est évident que les cétacés ne peuvent dormir comme les mammifères terrestres, puisqu'ils doivent venir régulièrement respirer à la surface. On sait comment le problème a été résolu: un seul hémisphère cérébral dort, tandis que l'autre assure les fonctions essentielles de survie (voir *Pour la Science* n° 506). Or les gènes *AANAT*, *ASMT*, *MTNR1A* et *MTNR1B*, indispensables pour la synthèse et l'action de la mélatonine, l'hormone du sommeil, ont carrément été perdus chez les cétacés. Ces pertes ont rendu possible ce mode de sommeil et ont entraîné un découplage entre le cycle jour-nuit et le cycle sommeil-veille qui, suivant des études sur les dauphins, est plutôt corrélé à celui de présence-absence des proies.

DES GÈNES PERDUS INDÉPENDAMMENT

D'autres fonctions sont touchées par le même processus évolutif: réparation de l'ADN, sécrétion de la salive... Impossible de tout décrire. Mais n'oublions pas un fait capital remarqué par Michael Hiller et son équipe: indépendamment, d'autres mammifères aquatiques (les lamantins) ou semi-aquatiques (les pinnipèdes, tels que les phoques) ont perdu certains de ces gènes (on parle de convergence). Assurément, on va maintenant rechercher un tel processus évolutif à chaque fois que le génome complet d'un animal assujetti à un environnement particulier sera séquencé. ■

LES CÉTACÉS, PLUS PROCHES COUSINS DES HIPPOPOTAMES

Les cétacés (baleines, dauphins...) sont des mammifères qui appartiennent à l'ordre des cétartiodactyles, où ils côtoient les tylopodes (chameaux, dromadaires...), les suines (porcs, pécaris...), les ruminants (bovins, caprins, girafes, cerfs...) et les hippopotames, dont ils sont les plus proches. Les cétacés sont ainsi plus proches des chameaux que d'autres mammifères aquatiques, comme les lamantins *(hors de l'arbre ci-contre)*, ou semi-aquatiques, comme les phoques.



BIBLIOGRAPHIE

M. Huelsmann et al., **Genes lost during the transition from land to water in cetaceans highlight genomic changes associated with aquatic adaptations**, *Science Advances*, vol. 5, article eaaw6671, 2019.

R. Albalat et C. Cañestro, **Evolution by gene loss**, *Nat. Rev. Genet.*, vol. 17, pp. 379-391, 2016.

M. R. McGowen et al., **Molecular evolutionary tracks macroevolutionary transitions in Cetacea**, *Trends Ecol. Evol.*, vol 29(6), pp. 336-346, 2014.

© The Noun Project/Tatyana, Matthew S Hall, Abby, Samsul Rizal, Ealancheliyan s, Pariphat Sinma, TRAVIS BIRD, parkjisun

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS
	29 % de réduction *	**31 %** de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique** PAG20STD

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

☐ **PAPIER** — 4,90€ PAR MOIS -29 %
- 12 n° du magazine papier

CODE : PV4E90

☐ **PAPIER + HORS-SÉRIE** — 6,50€ PAR MOIS -31 %
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

CODE : PV6E50

☐ **INTÉGRALE** — 8,20€ PAR MOIS -43 %
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

CODE : PV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

E-mail : ..... @ .....

(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour [illegible] réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

IBAN |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Ne rien inscrire

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et 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 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-données-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment le 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-données@pourlascience.fr.

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

L'AUTEUR

HERVÉ THIS
physicochimiste, directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra, à Paris

DES ÉMULSIONS RICHES EN CURCUMA

Pour incorporer de la curcumine aux gouttelettes d'huile d'une sauce émulsionnée, une technique efficace est celle du « déplacement d'acidité », où l'on part d'une solution basique que l'on acidifie ensuite.

Curcuma en poudre, extrait des rhizomes de *Curcuma longa*. Le pigment principal du curcuma est la curcumine, dont les deux formes moléculaires sont indiquées ici.

La chimie est une science qui élabore ses théories sur une technique faisant grand usage du feu… comme la cuisine. Il n'est donc pas étonnant que l'on trouve des mécanismes communs dans la technique de laboratoire et dans la technique culinaire.

Par exemple, on emploie le sel à la fois [illegible] par la chimie organique et pour donner du goût à des potages. Dans le premier cas, le renforcement de la force ionique assuré par l'ajout des ions chlorure et sodium permet d'éliminer l'eau restant parfois dans la phase organique, tandis que, pour les potages, le sel donne du goût en provoquant le relarguage de composés odorants peu solubles dans l'eau.

Cette fois, nous allons examiner un mécanisme qui fait intervenir l'acidité: Bingjing Zheng et ses collègues, de l'université d'Amherst, aux États-Unis, ont utilisé l'acidification d'un milieu basique pour faire passer de la curcumine dans des émulsions (*J. Agric. Food Chem.* vol. 67, pp. 12245-12254, 2019), procédé que l'on pourra exploiter en cuisine.

La curcumine est le pigment principal du curcuma, ou safran des Indes. Cet additif de code E100(i), d'un jaune merveilleux, a la particularité d'être peu soluble dans les solutions aqueuses, mais davantage dans les phases hydrophobes, telle l'huile. Le cuisinier Pierre Gagnaire propose ainsi une recette qui consiste à faire macérer des tronçons de lotte dans de l'huile d'olive additionnée de curcuma et d'ail, avant de cuire le tout et de le servir avec du riz et une confiture d'orange et de citron.

Mais une telle recette met en œuvre beaucoup de matière grasse. Pour diminuer celle-ci, une solution serait d'utiliser une sauce émulsionnée, où des gouttelettes d'huile sont dispersées dans une phase aqueuse.

Bingjing Zheng et ses collègues notent que la manière la plus simple d'obtenir une telle émulsion consiste à dissoudre la curcumine dans l'huile, avant de disperser l'huile dans la phase aqueuse. Cependant, ils montrent que l'élégante technique du « déplacement d'acidité » est beaucoup plus efficace et évite des dégradations de la curcumine. En quoi consiste cette méthode?

En milieu basique, la molécule de curcumine est peu soluble dans l'eau, propriété liée à la présence de doubles liaisons et de groupes cétone (un atome d'oxygène lié par une double liaison à un atome de carbone) sur la chaîne hydrocarbonée liant les deux groupes phénoliques de la molécule. Or, en milieu acide, l'un des atomes d'oxygène se charge négativement, ce qui change la couleur (vers le rouge) et rend la molécule soluble dans l'eau.

D'où l'idée de dissoudre une grande quantité de curcumine dans l'eau, puis de l'émulsion qui a été rendue basique, puis de diminuer le pH: la curcumine migre alors vers les gouttes d'huile émulsionnées.

Comment faire ces changements de pH en cuisine? Pour obtenir une solution basique, on pourrait utiliser une de ces «lessives de cendres» avec lesquelles on cuisait les légumes verts pour conserver leur couleur: on verse de l'eau sur des cendres de bois, dans un filtre analogue à celui du café, et l'on récupère une solution impure de potasse. Toutefois, le bicarbonate de sodium offre une solution plus simple. Et pour acidifier, le vinaigre blanc ou le jus de citron feront l'affaire.

On retrouvera ainsi la belle couleur jaune orangé de la curcumine dans une émulsion acidifiée. La technique, déjà utilisée pour la confection d'aliments fonctionnels et de compléments alimentaires, permettrait-elle de produire des sauces, briques d'un art culinaire grandi par la chimie? ■

LA RECETTE

1. Cuire une aubergine au four à 180 °C pendant une heure, puis broyer sa chair avec un peu d'eau et émulsionner avec de l'huile d'olive.
2. Ajouter du bicarbonate de sodium pour rendre basique la phase aqueuse de l'émulsion réalisée.
3. Y dissoudre du curcuma en abondance.
4. Acidifier avec du jus de citron.
5. Servir avec des tronçons de lotte rôtie au four.

© Tarapong Srichaiyos / shutterstock.com (photo) ; © Wikimedia Commons (formules moléculaires)

UN

NE MEURT JAMAIS.

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

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur www.pourlascience.fr

7,5 LITRES

p. 92

Le volume des poumons d'un grand cachalot de 15 mètres n'est que de 7,5 litres à 1 000 mètres de profondeur, alors qu'il est de 750 litres en surface.

TÉTRADE

p. 80

En mathématiques, cet objet est une association de quatre formes planaires identiques et d'un seul tenant, chacune en contact avec toutes les autres par au moins un segment de droite ou de courbe. La « pentade », en revanche, n'existe pas : il est impossible de trouver cinq formes du plan d'un seul tenant se touchant deux à deux.

p. 20 « *Les programmes développés par les informaticiens constituent une part de notre patrimoine culturel, mais ils disparaissent souvent dès qu'ils ne sont plus utilisés, car plus personne ne s'en préoccupe* »

GILLES DOWEK
chercheur à l'Inri

26

p. 8

En 2010, 388 individus détenaient autant de richesses que la moitié la plus pauvre de la population mondiale, soit environ 3,5 milliards de personnes ; aujourd'hui, ils ne sont plus que 26, selon l'organisation Oxfam.

QUETZALCOATLUS

p. 4

Ce ptérosaure n'a rien à voir avec le quetzal, l'oiseau emblématique du Guatemala. De la taille d'un chasseur F-16, *Quetzalcoatlus* vivait il y a plus de 66 millions d'années dans l'actuel Texas. Il pesait plus de 300 kilogrammes et arborait une mâchoire plus imposante que celle d'un *Tyrannosaurus rex*. Et il volait…

2700 MILLIARDS

p. 9

Depuis vingt-cinq ans, l'Antarctique aurait perdu près de 2700 milliards de tonnes de glace du fait du réchauffement climatique. Des « rivières atmosphériques » – des circulations d'air chaud et humide – y accentuent la fonte des glaces de surface.

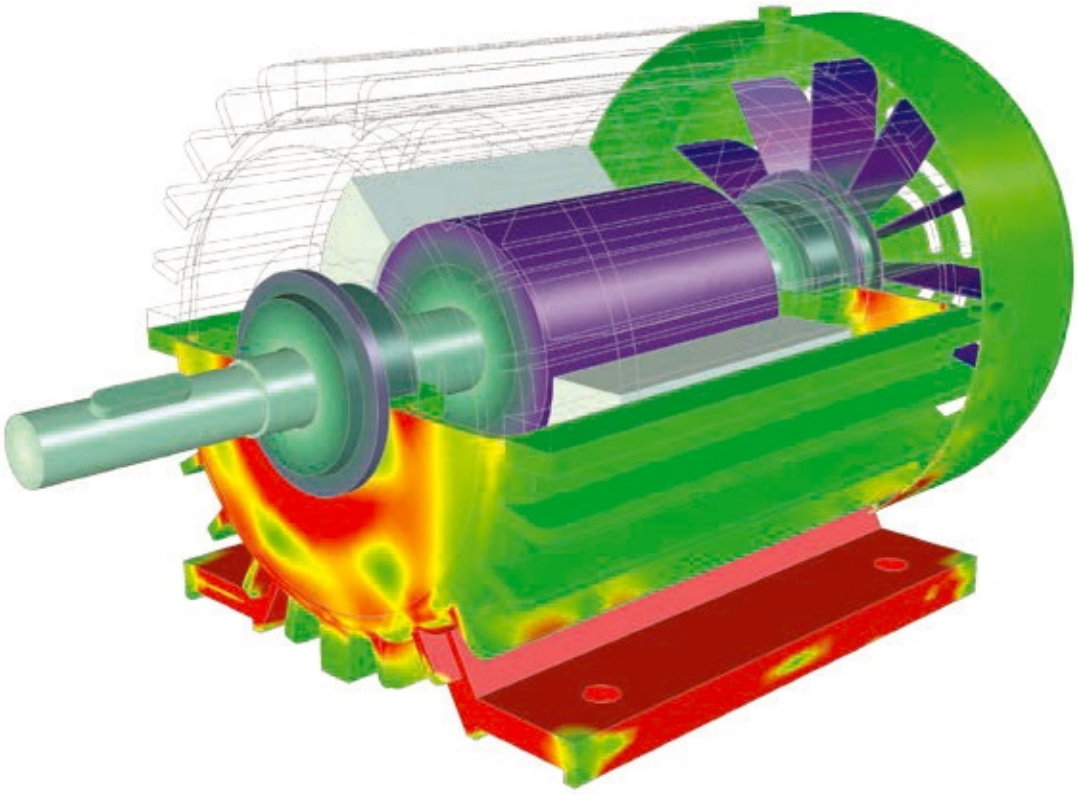
1 020 KM/S

p. 3

L'étoile S5-HVS1, située à 29 000 années-lumière de la Terre, s'éloigne du centre de la Voie lactée à une vitesse radiale de 1020 kilomètres par seconde, ce qui en fait une « étoile hyperrapide ».

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Janvier 2020 – N° d'édition : M0770507-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 24676 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

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

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

comsol.blog/induction-motor

COMSOL

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

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

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

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE
MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI