



Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Climatologie

**L'ÈRE DES
TEMPÊTES
DE VAPEUR**

■ Astrophysique

**L'AVENIR
CHAOTIQUE DE
LA VOIE LACTÉE**

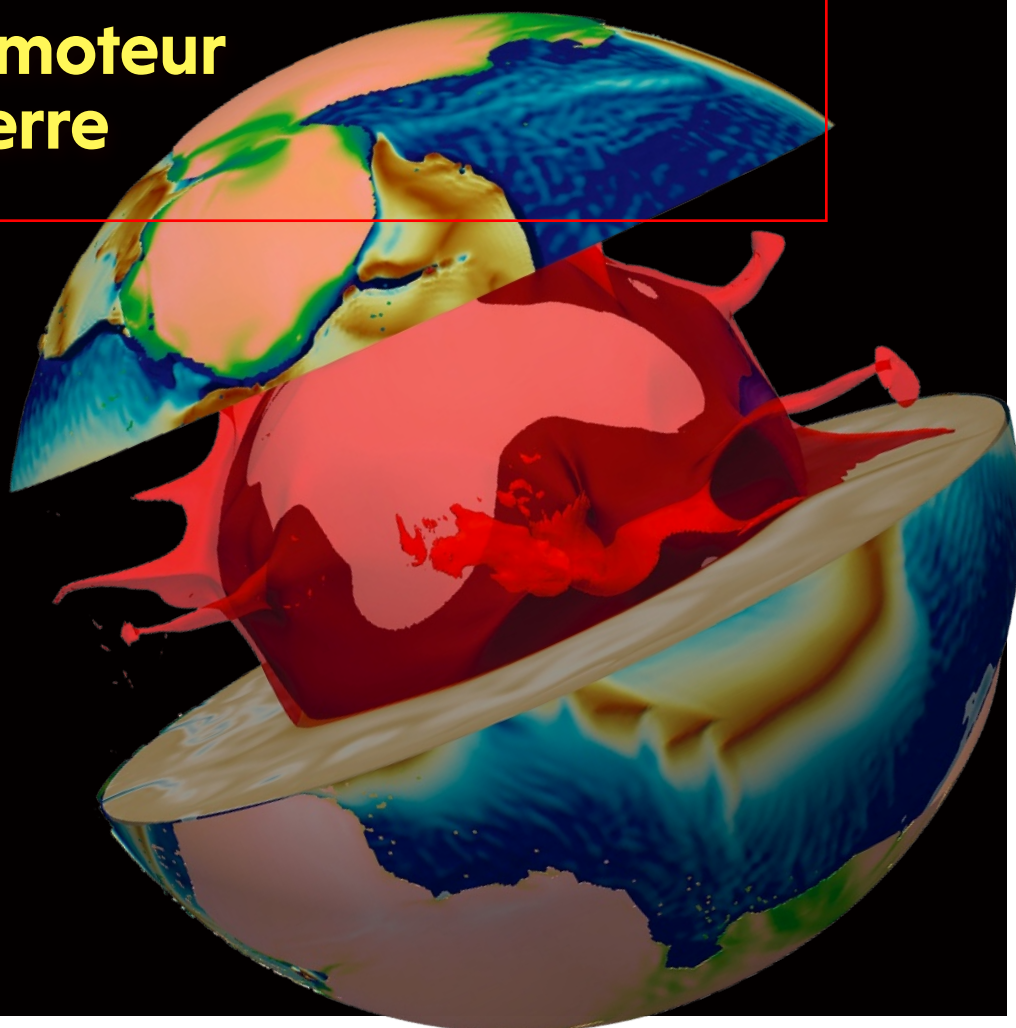
■ Neurosciences

**QUAND LE BOUCLIER
DU CERVEAU
SE FISSURE**

02/22

LES DESSOUS DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES

**Sur la piste du moteur
interne de la Terre**



INSOMNIE



L'insomnie est un trouble social. Elle touche les personnes en situation de mal logement, les familles que l'on expulse à répétition sans solutions alternatives, dont le sommeil est empreint de doutes, d'angoisses et dont la vie est faite d'errance.

**LE MONDE
EST MALADE,
A NOUS
DE LE SOIGNER.**

Faites un don sur medecinsdumonde.org

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédacteurs en chef adjoints: Loïc Mangin,
Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeiro-Gésippe
Community manager et partenariats: Aëla Keryhuel
aela.keryhuel@pourlascience.fr

Conception graphique: William Landiche
Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy, Ingrid Lhande

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Assistante administrative: Doaa Mohamed

Marketing & diffusion: Stéphane Chobert

Chef de produit: Eléna Delanne

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétaire général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta

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:

Maud Bruguère, Elsa Couderc, Xavier Müller,

Étienne Palteau et Caroline Vanhoove

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

www.boutique.groupepourlascience.fr

Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr

Tél.: 01 86 70 01 76

Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h

Adresse postale:

Service abonnement

Groupe Pour la Science

235 avenue Le Jour se Lève

92100 Boulogne-Billancourt

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; Alicia Abadie

Tél.: 04 88 15 12 47

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Laura Helmut

Président: Stephen Pincok

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.», 160 rue du Faubourg Saint-Denis, 75014 Paris.

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

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

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

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

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

intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation

de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie

(20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30%

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org

É
DITO



Marie-Neige Cordonnier
Rédactrice en chef adjointe

LOOK AROUND!

Depuis sa sortie en décembre dernier sur la plateforme Netflix, le film *Don't look up* ne cesse de faire parler de lui. Enorme succès dès les premiers jours, cette satire de notre inaction vis-à-vis du changement climatique et de la désinformation qui l'entoure transpose la situation dans une fiction où deux astronomes découvrent qu'une comète fonce sur la Terre. D'après leurs calculs, l'impact aura lieu six mois plus tard et détruira la planète.

Les deux chercheurs n'ont eu besoin que d'un télescope et de la mécanique newtonienne pour prédire avec une bonne précision la trajectoire du projectile. La modélisation du climat est d'un autre ordre et nécessite des moyens techniques et humains autrement plus élaborés, et sa complexité rend parfois le message moins percutant. Pourtant, les simulations sont un outil puissant pour sonder le monde qui nous entoure. On les utilise pour décrire des phénomènes aussi variés et délicats à appréhender que la météo, les collisions de galaxies (voir pages 56 à 64), la propagation d'épidémies (voir Pour la Science n° 529) ou même l'évolution géologique de la Terre sur 1 milliard d'années (voir pages 20 à 29).

Selon les échelles de temps et d'espace choisies, on se sent plus ou moins concerné par ces résultats. Imaginer comment la tectonique des plaques s'est enclenchée ou ce qui se produira quand, dans 5 milliards d'années, la Voie lactée heurtera Andromède donne le vertige et fascine, mais n'inquiète pas outre mesure. Celles mises en avant par le Giec, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, dans le premier volet de son sixième rapport, cependant, auraient dû frapper les esprits autant qu'une comète. Publié en août dernier, ce volet met notamment en avant l'irréversibilité de la fonte des calottes de glace et de la montée des mers déjà enclenchées.

Attendu le 28 février, le deuxième volet, dont l'objectif est d'évaluer les impacts concrets du changement climatique sur les populations (voir pages 36 à 43 pour découvrir l'un deux, les tempêtes de vapeur), les risques et les vulnérabilités, devrait encore aider à rendre ce dernier plus tangible. Cela suffira-t-il enfin pour que l'on agisse? ■

SOMMAIRE

N° 532 / Février 2022

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À IV (APRÈS LA P. 43)

La distribution électrique
face aux défis
de la prévision

Parrainé par

ENEDIS
L'ÉLECTRICITÉ EN RESEAU

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Covid long: un état des lieux
- Sur la piste d'un matériau conducteur et transparent
- Découverte d'un vrai « mille-pattes »
- Les nombres complexes sont incontournables...
- Des pointillés vieux de 41 500 ans

P. 14

LES LIVRES DU MOIS

P. 16

DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

Et surtout la santé!

Catherine Aubertin

P. 18

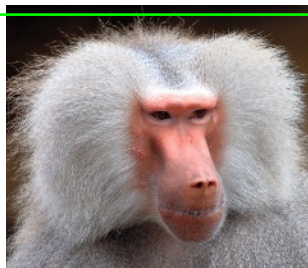
LES SCIENCES À LA LOUPE

Équité: gare au leurres

statistiques!

Yves Gingras

GRANDS FORMATS



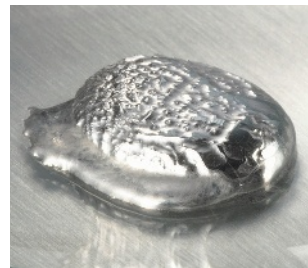
P. 30

PRIMATOLOGIE

SACRÉS BABOUINS!

Nathaniel Dominy

La primatologie actuelle explique pourquoi les Anciens Égyptiens vénéraient une espèce de babouin, et pas une autre.



P. 48

PHYSIQUE

LE GALLIUM, UN MÉTAL LIQUIDE D'AVENIR

Michael Dickey

Conducteur, étirable, autocicatrisant, façonnable à l'envi, sensible aux signaux tactiles... Le gallium se révèle un matériau très prometteur.



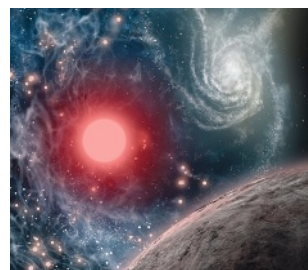
P. 36

CLIMATOLOGIE

L'ÈRE DES TEMPÊTES DE VAPEUR

Jennifer Francis

Pluies torrentielles, ouragans intenses, inondations éclair... Tous ces événements extrêmes de plus en plus fréquents ont une même source d'énergie: la vapeur d'eau de l'atmosphère.



P. 56

ASTROPHYSIQUE

AU CŒUR DES COLLISIONS GALACTIQUES

Aaron S. Evans et Lee Armus

Lorsque deux galaxies fusionnent, une myriade d'étoiles s'allument, les trous noirs supermassifs s'activent et des supervents sèment le chaos. Petit aperçu de ce qui attend la Voie lactée et la galaxie d'Andromède dans plusieurs milliards d'années...

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:
© Nicolas Coltice

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart d'abonnement Pour la Science, broché en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.



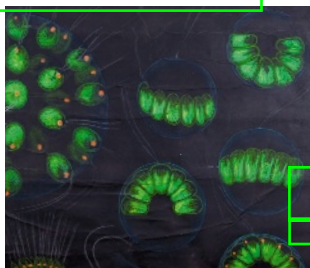
P. 66

NEUROSCIENCES

QUAND LE BOUCLIER DU CERVEAU SE FISSURE...

Daniela Kaufer
et Alon Friedman

Une fine paroi protège le cerveau des microbes et de substances toxiques. Avec l'âge, cette barrière laisse pénétrer des composants étrangers qui favoriseraient les maladies neurodégénératives.



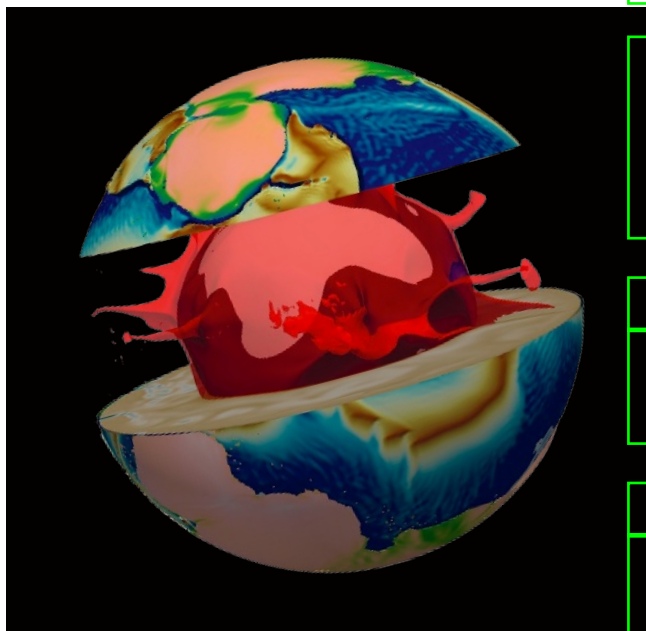
P. 74

HISTOIRE DES SCIENCES

ÉDOUARD CHATTON, ARPEUTEUR DES MONDES MINUSCULES

Catherine Jessus
et Vincent Laudet

Un pilulier, un microscope, des pastels et une passion à toute épreuve, tels sont les ingrédients qui, dans la première moitié du xx^e siècle, ont conduit un jeune étudiant sur les traces d'un peuple invisible d'une richesse insoupçonnée...



P. 20

GÉOPHYSIQUE

LES DESSOUS DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES

Nicolas Coltice

Les géophysiciens pensent depuis longtemps que les mouvements se produisant dans l'intérieur brûlant de la Terre sont à l'origine de ceux des continents et des fonds océaniques. Encore fallait-il le montrer. C'est ce que fait la première simulation numérique de la planète entière.

RENDEZ-VOUS

P. 82

LOGIQUE & CALCUL

L'ÉTRANGE THÉORÈME DE PICK

Jean-Paul Delahaye

Depuis plus d'un siècle, ce résultat élémentaire de géométrie du plan intrigue les mathématiciens, qui cherchent à le généraliser et à en simplifier la démonstration.

P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Pour un «strike» parfait

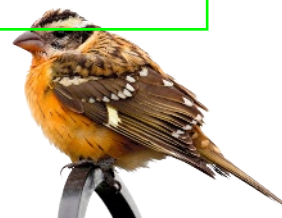
Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Le monarque, le cardinal et l'asclépiade

Hervé Le Guyader



P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

L'eusses-tu cru? Avec ou sans œufs, c'est pareil!

Hervé This

P. 98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.14 Livres du mois

P.16 Disputes environnementales

P.18 Les sciences à la loupe

COVID LONG : UN ÉTAT DES LIEUX

Chez de nombreux patients, des symptômes du Covid-19 persistent plusieurs semaines après l'infection.

Ce phénomène, dit « Covid long », intrigue et inquiète, mais la recherche et la prise en charge s'organisent.

Fatigue, difficulté à l'effort, troubles de la mémoire... La liste des symptômes attachés à ce que l'on connaît sous le nom de « Covid long » est sans fin. De fait, l'OMS en a référencé plusieurs dizaines dans une récente publication dédiée à ce qu'elle préfère nommer « état post-Covid ». Quels qu'ils soient, ils ont en commun, selon la définition retenue, en France, par la Haute autorité de santé, d'être compatibles avec la phase aiguë de l'infection par le SARS-CoV-2, documentée ou non par une PCR ou une sérologie, de persister au-delà de quatre semaines et de n'être explicables par aucun autre diagnostic. Ces définitions varient selon les instances et les pays, et aucune n'est figée. Face à une affection aussi difficile à cerner, on comprend que patients et cliniciens s'interrogent et même s'inquiètent. Une chose est sûre, les symptômes sont là. Il n'en demeure pas moins que de nombreuses questions restent en suspens.

D'abord, combien de personnes sont concernées? À en croire plusieurs études épidémiologiques, 10 à 30% des individus ayant développé un Covid-19, indépendamment du caractère sévère ou non de la maladie, sont susceptibles de présenter des signes de Covid long. En France, ce serait donc au moins 1 million de malades.

UN ENJEU MAJEUR

Le problème est donc majeur et risque de devenir un enjeu de santé publique, même si l'impact sur la vie sociale et professionnelle reste encore mal évalué. Néanmoins, une étude a montré que parmi les malades qui consultent en centre de prise en charge dédié, 30 à 50% se retrouvent au moins transitoirement en arrêt de travail ou en temps partiel thérapeutique. S'ajoute à ces difficultés celle de l'acceptation de la pathologie, non encore clairement reconnue, vis-à-vis de la CPAM, de l'employeur, de la famille, des amis. La première étape pour y remédier passe par un diagnostic reconnu.

Comment procède-t-on aujourd'hui? Faute de marqueurs biologiques fiables, mettre un nom sur la maladie reste compliqué. Mais le corps médical s'organise, comme l'explique Jérôme Larché, médecin et référent d'un centre Covid long à Montpellier. La première étape consiste en un interrogatoire ciblé et calibré, suivi d'une série de tests et d'examens : scanner pulmonaire, échographie cardiaque, IRM... L'objectif est à la fois de mettre en évidence des anomalies et d'éliminer d'autres pathologies qui n'auraient rien à voir avec le Covid-19. Au terme de ce processus, les patients se voient attribuer un Covid long lorsque quelques semaines après l'infection ils présentent toujours des symptômes anormaux. Ceux qui ont plus de cinq manifestations lors de la phase aiguë auraient une plus forte probabilité d'être atteints.

La deuxième étape de l'acceptation passe par la politique. Dès février 2021, une résolution parlementaire visant à reconnaître et prendre en charge les complications à long terme du Covid-19 a été



votée. Et, plus récemment, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a organisé une audition publique sur ce thème. Selon Olivier Robineau, infectiologue au centre hospitalier de Tourcoing et premier auditionné, l'objectif était de faire le point sur

La multiplicité des symptômes laisse supposer qu'il y a plusieurs causes au Covid long, probablement liées entre elles

les problématiques médicales et de recherche afin de statuer sur la prise en charge des patients. L'accent a été mis sur la recherche scientifique, notamment pour élucider les mécanismes du Covid long. Que sait-on à ce sujet ?

Parmi les mécanismes identifiés, et ne s'excluant pas entre eux, on trouve par

exemple la persistance virale. De fait, chez certains patients ayant une PCR et une sérologie négatives, mais des symptômes persistants, des SARS-CoV-2 ont été retrouvés par exemple dans le bulbe olfactif. Le Covid long serait alors une infection à bas bruit ponctuée de résurgences un peu à la façon d'un zona. Les cas seraient toutefois rares.

Une autre piste est celle des microthromboses, c'est-à-dire l'obstruction de petits vaisseaux sanguins, par exemple au niveau de la barrière hémato-encéphalique, la frontière entre circulation sanguine et système nerveux central, comme cela a été montré en octobre 2021. Les microhémorragies et les déficits en oxygénation qui en résultent expliqueraient, au moins en partie, certains troubles neurocognitifs observés. Cette idée est corroborée par des anomalies du cerveau observées lors de tomographie par émission de positrons chez une proportion non négligeable de patients, parfois jeunes, présentant des symptômes de Covid long.

D'autres mécanismes proposés mettent en jeu le système nerveux autonome dont le dysfonctionnement peut altérer l'état non seulement neurologique, mais également cardiovasculaire, respiratoire et digestif...

Une étude parue en novembre 2021, très contestée notamment par des associations de patients et certains chercheurs, a quant à elle mis en évidence que les symptômes persistants seraient plus associés au fait de croire d'avoir été malade du Covid que d'avoir réellement contracté le coronavirus. Cette étude ne nie pas la réalité des symptômes ni même leur éventuelle association au Covid-19, mais elle souligne le risque de surattribution des symptômes au SARS-CoV-2 et émet l'hypothèse d'un rôle possible dans la persistance des symptômes de causes non spécifiques au coronavirus, comme des troubles fonctionnels.

La multiplicité des symptômes laisse supposer qu'il y a plusieurs causes, probablement en interrelation. Le plus important, rappelle Cédric Lemogne, chef du service de psychiatrie de l'hôpital Hôtel-Dieu, à Paris, un des auteurs de l'étude, est que les patients et leurs associations se sentent reconnus, que l'on n'exclue aucune hypothèse et que toutes puissent être évaluées scientifiquement.

Alors seulement la définition du Covid long (un nom forgé par les patients), ou peut-être des « Covid longs », s'affinera et l'on pourra mieux aborder le versant thérapeutique de la maladie. De fait, aujourd'hui, l'arsenal consiste essentiellement en des traitements symptomatiques, par exemple de l'aspirine contre les péricardites. Parallèlement, le nombre de centres de diagnostic et de soins doit croître : on en compte actuellement une dizaine en France contre au moins quatre-vingts en Grande-Bretagne. Les progrès se feront de façon simultanée sur tous les fronts, ceux de la recherche, des traitements, de la prise en charge, de la reconnaissance par la société, du diagnostic... Et ce sera certainement long ! ■

Loïc Mangin

Audition publique de l'Opecst : « Covid long, quelle connaissance et quelle prise en charge ? » : <https://bit.ly/OPECST-CovidLong>

Retrouvez tous nos articles sur le Covid-19 en accès libre sur www.pourlascience.fr

PHYSIQUE DES MATÉRIAUX

SUR LA PISTE D'UN MATÉRIAU CONDUCTEUR ET TRANSPARENT

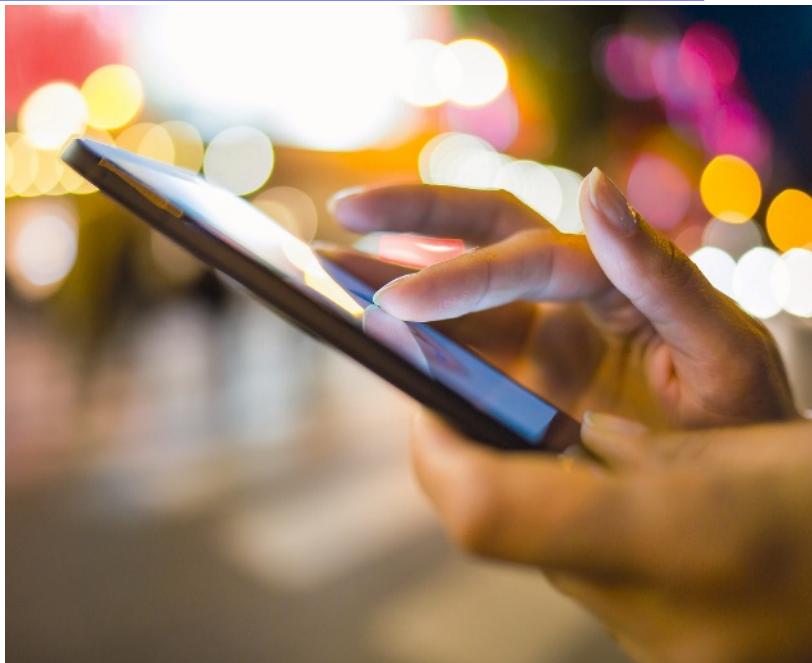
L'ITO est massivement utilisé dans l'industrie, mais l'indium qu'il contient est très cher.

Une autre solution, celle du vanadate de strontium, est prometteuse.

Les matériaux à la fois conducteurs et transparents sont rares. C'est le cas de l'oxyde d'indium-étain (ITO). Il est par exemple utilisé comme électrode dans les panneaux photovoltaïques pour récolter les charges électriques sans bloquer la lumière, qui doit pénétrer jusqu'aux matériaux photosensibles. De même, il entre dans la composition des écrans tactiles. Mais avec une demande industrielle importante et une abondance faible dans la croûte terrestre, l'indium a vu son prix s'envoler. Les spécialistes se penchent donc sur d'autres matériaux présentant des caractéristiques similaires. C'est le cas des oxydes pérovskites, comme le vanadate de strontium (SrVO_3). Récemment, l'équipe autour de Mathieu Mirjolet, à l'institut de science des matériaux de Barcelone, en Espagne, a progressé dans la compréhension de l'origine de la transparence de SrVO_3 , tandis qu'Arnaud Fouchet, chercheur CNRS au laboratoire Crismat de Caen, et ses collègues ont mis au point une technique efficace pour le faire croître sur du verre.

Dans les métaux, la présence d'électrons libres, interagissant avec les photons de la lumière incidente, est responsable de leur forte réflectivité (typiquement exploitée pour la confection de miroirs). Ils ne sont donc en général pas transparents. Or SrVO_3 est un métal qui laisse passer la lumière. Les physiciens pensaient que cette propriété était le résultat de forces coulombiennes entre les électrons du matériau. Ces interactions répulsives interfèrent avec la mobilité des électrons, qui se comportent comme s'ils avaient une masse plus élevée. Il en résulte que le seuil de réflexion se trouve dans l'infrarouge, hors des fréquences optiques du visible. Les photons du visible traversent alors le matériau sans être absorbés ou diffusés.

Cependant, les résultats de mesures réalisées sur du SrVO_3 par Mathieu Mirjolet et ses collègues n'étaient pas compatibles avec le scénario des interactions coulombiennes. Les physiciens suggèrent que les électrons interagiraient plutôt avec les phonons du milieu, c'est-à-dire les vibrations du réseau cristallin du SrVO_3 . Comme avec les forces coulombiennes, les électrons seraient ralentis et n'interagiraient pas avec les photons dans le visible.



Comment fonctionne un écran tactile ?

L'écran à proprement parler est recouvert d'un film conducteur, puis d'une couche isolante, d'un nouveau film conducteur et d'un revêtement protecteur. Quand on appuie sur l'écran tactile, les différentes couches se déforment, et les deux films conducteurs sont mis en contact, déclenchant le signal désiré. Pour que l'on puisse voir l'écran, les couches doivent toutes être transparentes. Les matériaux conducteurs et transparents sont rares. Le plus utilisé aujourd'hui est l'ITO, qui contient de l'indium, un élément cher.

Au-delà de cette avancée théorique qui sera peut-être extensible à d'autres matériaux pérovskites, le vanadate de strontium posait aussi un problème concret pour sa synthèse en couche mince. Pour présenter les bonnes propriétés de transparence et de conduction électrique, cet élément doit être cristallisé. Or cela était difficile à réaliser sur des plaques de verre, un préalable pour fabriquer des panneaux solaires. Arnaud Fouchet et ses collègues ont trouvé une solution qui consiste à couvrir le verre de nanofeuillets (à base de niobium) dont la structure est similaire à celle de la pérovskite SrVO_3 . La couche nanométrique est transparente du fait de sa faible épaisseur et se fixe simplement par trempage du verre dans une solution contenant ces nanofeuillets. Une fois ce verre préparé, les films de SrVO_3 sont obtenus de façon homogène et contrôlée par épitaxie (une méthode éprouvée de croissance des cristaux) à une température de l'ordre de 400 °C. Cette approche pourrait être facilement industrialisée. ■

Sean Bailly

A. Boileau et al., *Advanced Functional Materials*, en ligne le 9 septembre 2021 ; M. Mirjolet et al., *Advanced Science*, en ligne 19 juin 2021

Doper son système immunitaire

La méditation a un impact positif sur la santé mentale et physique, mais les mécanismes moléculaires restent à identifier. Vijayendran Chandran, de l'université de Floride, et ses collègues viennent de mettre en évidence chez les personnes qui méditent une forte surexpression de 220 gènes liés au système immunitaire. Ce résultat est d'autant plus intéressant que cette amélioration des fonctions immunitaires ne s'accompagne pas de l'activation de signaux associés à une inflammation.

PNAS, 21 décembre 2021

La domestication double du litchi

En séquencant le génome de différents cultivars de litchi, Victor Albert, de l'université de Buffalo, aux États-Unis, et ses collègues ont dévoilé l'histoire de la domestication de ce fruit. Dans le Yunnan, en Chine, les populations auraient cultivé des litchis à floraison précoce, alors que dans le Hainan, les plants à floraison tardive ont été privilégiés. Grâce à ces données, les chercheurs ont aussi identifié la mutation génétique qui contrôle la précocité de la floraison, un paramètre crucial pour l'agriculture.

Nature Genetics, 3 janvier 2022

Vieilles étoiles dans la Galaxie

L'Univers est surtout constitué d'hydrogène et d'hélium. Les éléments plus lourds ne représentent que 1,5 % de la composition du Soleil, par exemple. Cette métallicité augmente avec les générations successives d'étoiles. Or l'équipe autour de Nicolas Martin, de l'observatoire astronomique de Strasbourg, vient de découvrir un ensemble d'étoiles dans la Voie lactée à la métallicité 2 500 fois plus faible que celle du Soleil. Cette structure serait donc particulièrement ancienne.

Nature, 5 janvier 2022

COMMENT LA QUEUE REPOUSSE

Trois jours. Voilà tout le temps nécessaire à un poisson-zèbre (*Danio rerio*) au stade larvaire pour faire repousser dans son intégralité sa nageoire caudale qu'il aurait perdue à la suite d'une blessure. Les chercheurs en médecine régénérative, en particulier, s'appliquent à percer les secrets biologiques de ce « superpouvoir » qui pourraient bien inspirer des applications cliniques. Derrière cette impressionnante performance se cache un blastème, une structure composée de cellules non différenciées, donc au potentiel très large, et qui n'attendent que d'être guidées pour constituer un type particulier de tissu. Dans une étude précédente, Farida Djouad, directrice de recherche à l'Inserm et rattachée à l'université de Montpellier, et ses collègues avaient montré que les macrophages, des cellules du système immunitaire, stimulent la prolifération des cellules du blastème et la régénération de la queue.

Cette fois, les chercheurs révèlent l'identité d'un nouvel acteur cellulaire issu de la crête neurale. Cette dernière, présente uniquement au stade embryonnaire chez tous les vertébrés, est à l'origine de nombreuses parties du corps, dont la majeure partie du



La larve du poisson-zèbre (*Danio rerio*) est capable de faire repousser en trois jours sa nageoire caudale après une amputation.

squelette facial et du cou, ainsi que les neurones du système nerveux périphérique. L'équipe a découvert que le dialogue entre les différentes cellules impliquées se fait par le biais d'une protéine, la neuréguline 1 (NRG1). Mais, puisque des cellules dérivées de la crête neurale sont présentes chez tous les vertébrés, pourquoi les mammifères ne sont-ils pas eux aussi capables de régénérer certains tissus ? C'est à cette question que Farida Djouad et son équipe aspirent à répondre. ■

William Rowe-Pirra

B. Laplace-Builhé et al., Nature Communications, 2021

BIOPHYSIQUE

L'ENROULEMENT DES COQUILLES

La régularité et l'origine des motifs géométriques des coquilles de mollusques questionnent depuis longtemps les scientifiques. Par exemple, la coquille de l'immense majorité des gastéropodes, dont les escargots des jardins, s'enroule comme si elle suivait une hélice tracée sur un cône, on parle de « coquille hélicospirale ». Au contraire, celle de la plupart des ammonites – un groupe de céphalopodes éteint depuis 66 millions d'années – s'enroule dans le même plan, on dit qu'elles sont « planispirales ». « La génétique ne suffit pas à tout expliquer. La physique gouverne en partie le développement des formes biologiques et canalise leur évolution », précise Régis Chirat, du laboratoire de géologie de Lyon. Avec ses collègues, il vient de développer un modèle qui explique toutes les formes rencontrées. Si la vitesse de croissance



Ensemble d'ammonites fossilisées datant du Jurassique.

de la coquille et celle du corps sont différentes, cela induit une torsion sur le mollusque qui subit une rotation et forme une coquille hélicospirale. Dans le cas contraire, elle est planispirale. ■

Sylvain Guilbaud

R. Chirat et al., PNAS, 2021

BIOLOGIE ANIMALE

DÉCOUVERTE D'UN VRAI « MILLE-PATTES »

Jusqu'à présent, le nom « mille-pattes » était légèrement survendu. Aucun myriapode ne comptait plus de 750 pattes, un record détenu par *Illacme plenipes*, un arthropode découvert en Californie. Or Paul Marek, de Virginia Tech, aux États-Unis, et ses collègues viennent de mettre au jour un lointain cousin du myriapode californien, qui présente pas moins de 1306 pattes !

Les entomologistes ont baptisé ce « vrai mille-pattes » *Eumillipes persephone*, en référence à la déesse grecque du monde souterrain. En effet, ils ont trouvé cet animal à 60 mètres de profondeur dans un puits de forage en Australie. Comme de nombreuses espèces vivant dans l'obscurité, il est dépourvu d'yeux et de pigmentation. Il se caractérise par une tête en forme de cône et d'énormes antennes (*en médaillon, à gauche*). Doté de 330 segments (*en médaillon, à droite*), il mesure à peine 10 centimètres de long pour 1 millimètre de largeur.

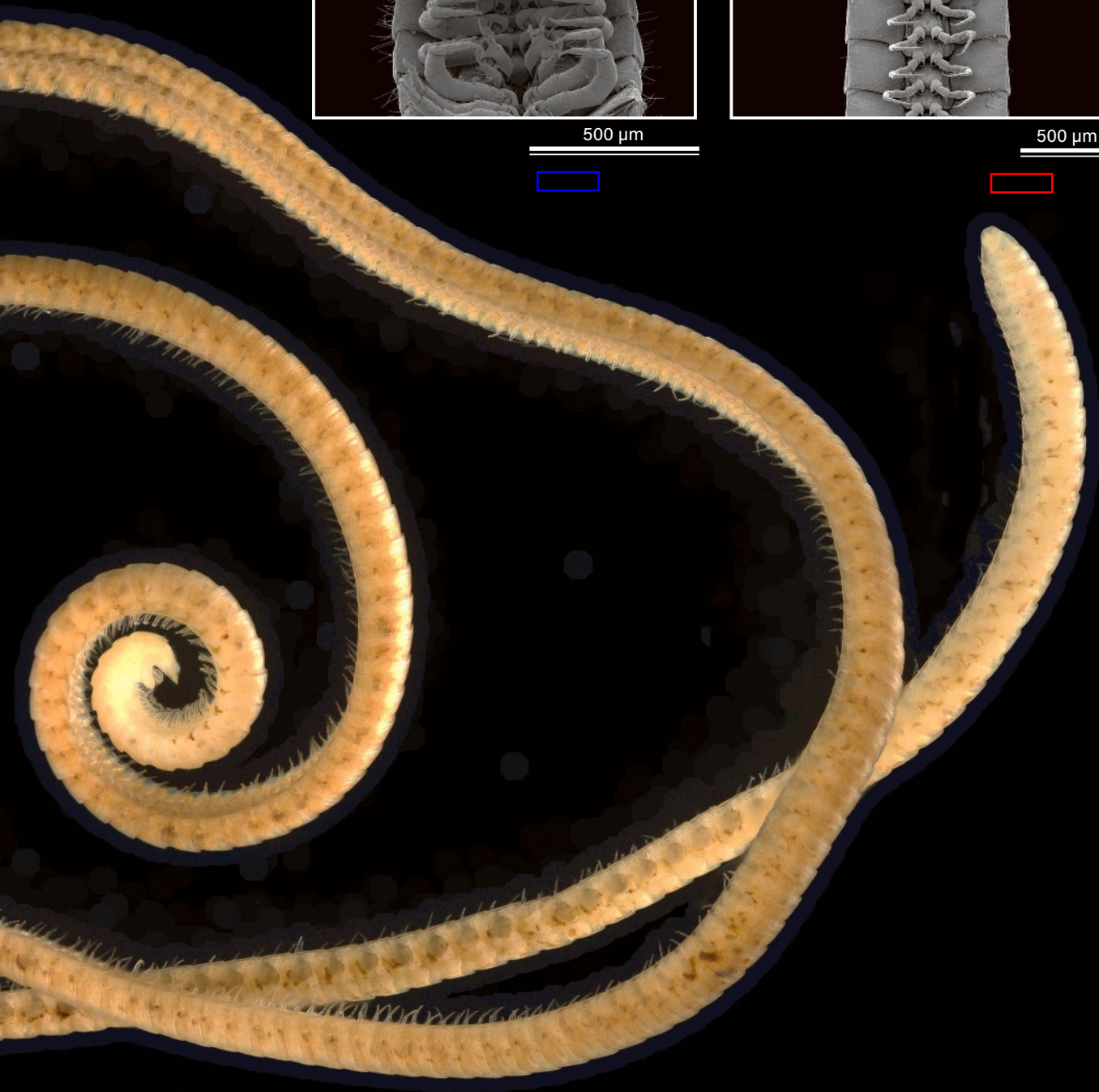
Les morphologies similaires d'*Eumillipes persephone* et d'*Illacme plenipes* seraient le résultat d'une convergence évolutive. La biomécanique de ces myriapodes a été peu étudiée, mais leur corps allongé et doté de nombreuses paires de pattes leur permettrait de se mouvoir plus aisément en trois dimensions dans les microcavités du sous-sol. Grâce à leurs segments flexibles, ils seraient capables d'étirer leur corps afin de passer dans des fissures étroites. ■

S. B.

P. E. Marek et al., *Scientific Reports*, 2021



© P. E. Marek et al., The first true millipede – 1,306 legs long, *Scientific Reports*, 2021



Spécimen femelle d'*Eumillipes persephone*,
un myriapode avec 1 306 pattes.
Il mesure près de 9,6 centimètres de longueur.

PHYSIQUE QUANTIQUE

LES NOMBRES COMPLEXES SONT INCONTOURNABLES...

... pour le formalisme standard de la physique quantique. Certaines expériences ~~ne peuvent être décrites avec les seuls nombres réels.~~

Si l'on multiplie un nombre par lui-même, qu'il soit positif ou négatif, le résultat est toujours positif. Mais en inventant de façon *ad hoc* le nombre imaginaire i , défini par $i^2 = -1$, les mathématiciens ont ouvert de vastes horizons en algèbre, en géométrie, etc. Ce nombre et sa généralisation, les nombres complexes, ont vite trouvé leur utilité en physique aussi. Ils servent surtout à simplifier certains calculs notamment pour décrire les systèmes oscillants, mais ils ne sont donc pas indispensables. Or, Marc-Olivier Rencu, de l'Institut des sciences photoniques, à Barcelone, et ses collègues ont montré que les nombres complexes sont nécessaires au formalisme standard de la physique quantique.

En physique quantique, les nombres complexes jouent déjà un rôle prépondérant. Dans la formulation standard de la théorie quantique, les objets (les photons, les électrons, etc.) sont décrits dans un espace abstrait, dit «de Hilbert», défini avec des nombres complexes. Cet espace (à ne pas confondre avec l'espace tridimensionnel dans lequel nous vivons) permet de décrire les solutions de l'équation de Schrödinger et l'évolution du système quantique. Mais pourrait-on décrire toutes les expériences quantiques avec un espace de Hilbert réel? Certains ont cherché à le montrer.

Ainsi, en 2008, Károly Pál et Tamás Vértesi, de l'Académie hongroise des sciences, ont étudié une expérience de Bell avec une source émettant deux particules vers deux observateurs situés dans deux laboratoires différents et éloignés. Ces particules ont une spécificité, elles sont dites «intriquées» car leurs propriétés (par exemple l'orientation de leur spin) sont corrélées d'une façon inexplicable pour la physique classique. Les chercheurs ont montré qu'ils pouvaient décrire ce système avec un espace de Hilbert réel en doublant le nombre de dimensions (il faut deux nombres réels pour décrire un nombre complexe). Est-il possible de s'affranchir des nombres complexes dans d'autres expériences?

Pour tester cette idée, Marc-Olivier Renou et ses collègues ont étudié un système comprenant deux sources indépendantes (S1 et S2) de paires de particules intriquées et trois observateurs

$$\frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$

L'équation de Schrödinger contient explicitement le nombre imaginaire i . Elle décrit l'évolution d'un système quantique au cours du temps. Les nombres complexes sont-ils indispensables en physique quantique? Dans le cas du formalisme standard de la théorie, la réponse est oui.

(Alice, Bob et Charlie). Alice reçoit une particule de S1, Charlie une particule de S2 et Bob reçoit une particule de chaque source. Lorsque Bob réalise une mesure de Bell sur les particules qu'il reçoit, l'intrication qui existait entre les particules d'Alice et Bob d'une part et entre celles de Bob et Charlie d'autre part se transpose à une intrication entre les particules d'Alice et de Charlie. Dans ce cas, les chercheurs ont montré que les corrélations observées entre Alice, Bob et Charlie ne peuvent pas être décrites avec la théorie standard de la physique quantique, lorsque celle-ci est restreinte aux nombres réels, et peu importe le nombre de dimensions de l'espace de Hilbert réel.

« Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'est pas possible de décrire la physique quantique sans les nombres complexes, insiste Marc-Olivier Renou. En effet, il existe d'autres formalismes qui reposent uniquement sur les nombres réels, mais ils ne s'appuient pas sur des espaces de Hilbert et le produit tensoriel. Le défi maintenant, c'est de comprendre ce qui fait l'importance de ce formalisme standard par rapport aux autres. » ■

S. B.

M. O. Renou *et al.*, *Nature*, 2021

MICROBIOTE, ENTRE STRESS ET MÉMOIRE

Le stress chronique est connu pour affaiblir la mémoire, mais par quels mécanismes ? Pour tester un éventuel rôle du microbiote, Christine Leterrier, de l'Inrae, et ses collègues ont prélevé celui de cailles du Japon (*Coturnix japonica*) soumises à des situations stressantes et l'ont transféré à des cailleteaux « apaisés ». Résultat ? Ces oiseaux ont montré tous les effets du stress : peur, taux d'hormone du stress modifié et mémoire perturbée. Le microbiote jouerait un rôle d'intermédiaire en ce qu'une perturbation de sa composition maintiendrait les symptômes associés à l'état de stress et, ce faisant, nuirait à la mémoire. ■

Gaïa Jouanna

N. Krami et al., *Psychoneuroendocrinology*, 2021

PHYSIQUE

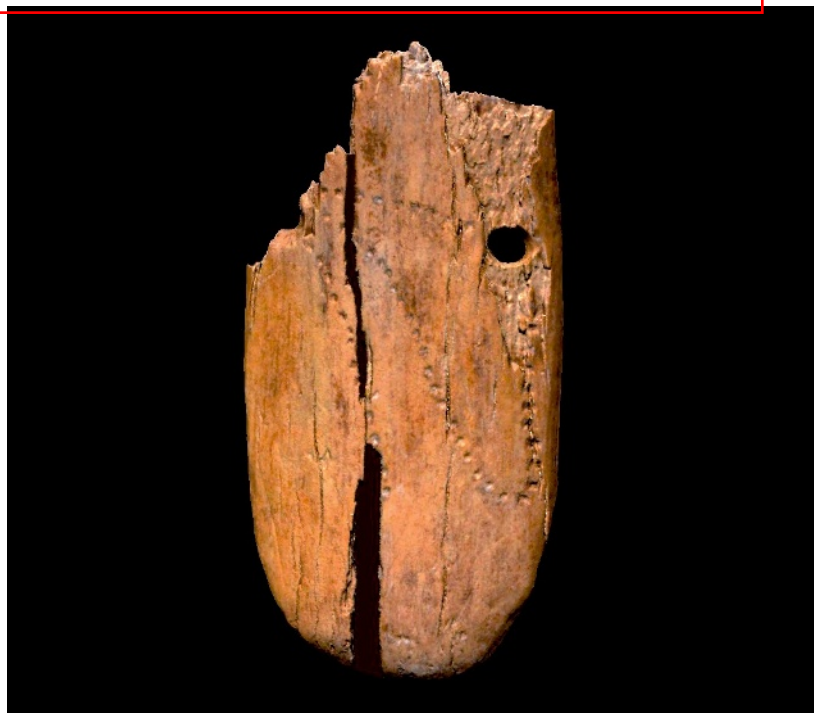
UNE ANALOGIE PAS SI MAUVAISE

D'après la relativité générale, la matière courbe l'espace-temps dans son voisinage. Pour illustrer cette idée, on utilise souvent l'image d'une toile bidimensionnelle tendue sur laquelle on pose une boule de pétanque. Celle-ci est parfois considérée comme problématique, car elle peut conduire à de mauvaises interprétations. Cependant, Stefan Catheline, de l'Inserm, et ses collègues ont montré que l'analogie fonctionne mieux que prévu. Lorsqu'une onde plane se propage sur une membrane tendue dont la région centrale est courbée, la partie de l'onde qui passe dans cette zone parcourt géométriquement un chemin plus long et accuse donc du retard sur le reste de l'onde. Cela s'interprète comme un changement d'angle de propagation. Les physiciens ont constaté que les équations de la relativité générale adaptées à leur système décrivaient très bien cette déviation. ■

S. B.

S. Catheline et al., *American Journal of Physics*, 2021

DES POINTILLÉS VIEUX DE 41 500 ANS



En ivoire de mammouth, le pendentif de la grotte de Stajnia, en Pologne, est incisé d'au moins 50 petites dépressions.

Ce pendentif préhistorique orné de pointillés était réputé néanderthalien, mais cette interprétation tombe. Sur les fragments de ce bijou en ivoire de mammouth à deux œilletons de suspension mis au jour entre 2006 et 2010 dans la grotte de Stajnia, en Pologne, 50 petites dépressions ponctuelles dessinent une ligne et un lobe. Comme le pendentif provenait d'une strate perturbée par le gel et les activités humaines, mais riches en outils du Micoquien – une culture matérielle d'*Homo neanderthalensis* –, ses découvreurs l'avaient attribué à notre espèce cousine... non sans jeter un trouble puisque tous les pointillés anciens connus étaient *sapiens*. C'est pourquoi, autour de Sahra Talamo, de l'université de Bologne, une grande équipe internationale s'est constituée pour dater par la spectroscopie de masse par accélérateur du carbone 14 le collagène encore contenu dans l'ivoire du bijou, et ont trouvé un âge de 41 500 ans avant le présent, soit après la disparition d'*H. neanderthalensis*. Le pendentif doit donc avoir été façonné par des chasseurs-cueilleurs *sapiens*.

Sa datation en fait le plus ancien de tous les objets ponctués du Paléolithique supérieur, tous âgés de moins de 41 000 ans et répartis de la France à la Sibérie. Certains préhistoriens ont proposé que ce type de pointillés traduit le comptage de proies, de lunaisons, ou autre, à moins qu'ils n'aient eu un rôle purement esthétique. Quoi qu'il en soit, la convention graphique consistant à représenter des formes à l'aide de points – sortes de pixels avant l'heure ! – est un trait culturel de notre espèce, arrivée en Eurasie à cette époque. ■

François Savatier

S. Talamo et al., *Scientific Reports*, 2021

ARCHÉOLOGIE

**ARCHÉOLOGIE
DU JUDAÏSME EN FRANCE**

Paul Salmona
La Découverte, 2021
176 pages, 23 euros



Quand nous parlons des archéologues, nous imaginons le plus souvent de jeunes personnes faisant des trous à la recherche d'objets remontant à l'Antiquité. Cet ouvrage rappelle que leur discipline est ouverte à la recherche de toutes les traces matérielles, indépendamment de leur datation et de leur nature.

De fait, les sources auxquelles a eu recours Paul Salmona sont très variées : textes, inventaires et manuscrits, épigraphie, topographie, toponymie (par exemple rue aux Juifs), bâtiments, etc. Et il déplore, dans un chapitre III curieusement placé, que l'histoire du judaïsme en France ait été négligée, jusque dans la célèbre collection de manuels historiques français de la première moitié du ^{xx}e siècle Malet et Isaac, dont l'un des directeurs – l'historien Jules Isaac – était de confession juive.

En France, les juifs laissent peu de traces pour l'Antiquité. Leur histoire commence vraiment à partir du bas Moyen Âge, époque pour laquelle on découvre des cimetières, des synagogues et de nombreux toponymes. Pour parcourir les ^{xvi}^e-^{xviii}^e siècles plusieurs villes (Avignon, Bayonne et Lyon) et diverses régions (Aquitaine, Alsace et Lorraine) sont étudiées. Opprimée dans les siècles précédents, la population juive connaît une vraie émancipation à partir de 1791. Si l'affaire Dreyfus n'a pas beaucoup retenu l'attention de l'auteur, ce dernier donne davantage de détails sur la période de la Shoah, où il peut opposer l'attitude des habitants du Chambon-sur-Lignon à celle d'autres personnes qui ont permis les internements de Drancy et du Struthof. Avant de décrire le nouveau bouleversement que connaissent les Français juifs à l'arrivée de coreligionnaires du Maghreb.

Ce livre, illustré de diverses cartes (de cimetières ou de synagogues, par exemple), apportera un jour nouveau pour qui s'intéresse à l'histoire du judaïsme en France.

YANN LE BOHEC
Professeur émérite à l'université Paris Sorbonne

HISTOIRE DES SCIENCES

L'ISLAM ET LA SCIENCE

Faouzia Charfi
Odile Jacob, 2021
240 pages, 22,90 euros

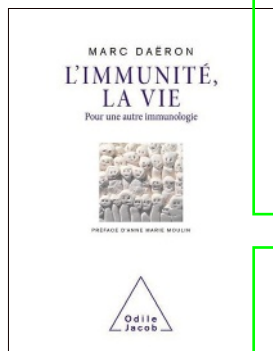
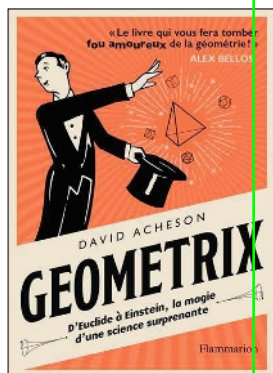
Signant ici son troisième ouvrage, la physicienne tunisienne Faouzia Charfi poursuit son examen critique des relations entre islam et science. Comme dans son premier livre (2013), elle conserve un caractère engagé voire militant, s'insurgeant contre une « islamisation de la connaissance » et déplorant une frontière peu étanche entre islamisme et « conception traditionaliste », qui prévaut dans les pays d'islam depuis la révolution iranienne de 1979 et la décennie qui a suivi – à rebours des « choix émancipateurs » impulsés en leur temps par Atatürk, puis Nasser ou Bourguiba.

Son discours s'enrichit ici d'une mise en perspective des débats entre science et islam dans l'histoire, sous forme d'une vulgarisation très érudite. Si la vision syncrétique entre science et religion semble hélas aujourd'hui l'emporter, il n'en a pas toujours été ainsi, et nombre d'intellectuels des pays d'islam ont remis en cause à travers les âges les « manipulations fantaisistes » de l'*ijaz* (le fait de voir la science moderne écrite dans le Coran) ou la « singulière existence faite à la femme musulmane ».

Par ailleurs, la renaissance musulmane, la *nahda*, s'est faite à partir de 1850 sur la base d'une « science utile, opérationnelle », sans grande considération pour la science moderne occidentale et ses théories structurantes. Faouzia Charfi décrit là une contradiction à laquelle serait confronté l'islam, « sœur de la science » et « attribut de Dieu » – d'où la difficulté intrinsèque à séparer les deux domaines, et la volonté de subordonner la science à la religion, largement développée de nos jours.

Face à ce qui paraît « une impossible sortie de crise », elle souhaite « convaincre les musulmans » de la nécessité de cette séparation en leur faisant redécouvrir l'histoire et la vigueur de « la pensée critique en terres d'islam » : son ouvrage y contribue efficacement, pour chacun de nous.

ALEXANDRE MOATTI
Laboratoire Sphere, université de Paris



MATHÉMATIQUES

GEOMETRIX

David Acheson

Flammarion, 2021
288 pages, 21 euros

Les mathématiciens nous ont fait don de la géométrie. Et comme «la façon de donner vaut mieux que ce qu'on donne», cette «façon» est la démonstration qui montre, en géométrie, un résultat souvent inattendu. Des droites qui sont concourantes comme par magie, une évaluation du meilleur endroit pour tirer un coup franc le long de la ligne de touche, une merveilleuse manière de découper une pizza... Cette exploration n'est pas finie: par exemple, le théorème des sept cercles – qui permet de définir trois droites concomitantes à partir d'un arrangement de six cercles tangents à un septième –, pourtant simple en apparence, n'a été découvert qu'en 1974!

Outre l'ébahissement incitatif induit par sa lecture, la présentation de la géométrie par David Acheson nous dévoile les bonnes manières de regarder une figure pour en démontrer les propriétés, en explorant celles-ci par des constructions auxiliaires fondées sur nos connaissances.

La démonstration géométrique est une pérégrination dans les propriétés des figures, une manière de penser pas toujours facile, mais le mathématicien Laurent Schwartz, première Médaille Fields française, ne proclamait-il pas que c'est «en séchant» que l'on progresse dans la compréhension? L'enseignement des mathématiques est une manière de discerner un aspect de la nature profonde des réalités physiques. Et cette nature est souvent belle.

Vive Euclide, et merci David Acheson de nous stimuler les neurones.

PHILIPPE BOULANGER

Fondateur et ancien directeur de *Pour La Science*

IMMUNOLOGIE

L'IMMUNITÉ, LA VIE

Marc Daëron

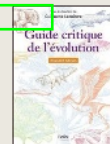
Odile Jacob, 2021
384 pages, 25,90 euros

Jusqu'en 2012 et après une carrière au sommet de la recherche en biologie médicale, l'auteur fut le directeur de l'unité de recherche Allergologie moléculaire et cellulaire de l'institut Pasteur de Paris. Alors que les inquiétudes de la vaccination restent nombreux malgré ses effets réducteurs sur les dernières vagues de la pandémie de Covid-19, ce livre arrive à point nommé pour nous faire comprendre que si nous sommes vivants, c'est parce que nous sommes des associations d'individus obligés de s'accommoder les uns avec les autres, ce que permet le système immunitaire.

Comment comprendre cela? Quel est le rôle du système immunitaire face à la complexité du vivant? Distinguer le soi du non-soi? Assurer notre défense contre de multiples agressions pathogènes? Un mécanisme sophistiqué d'adaptation aux nombreux microbiotes qui nous accompagnent? Tout organisme vivant – l'être humain en particulier – est un patchwork symbiotique d'une myriade de systèmes et d'individus, tous indispensables à la survie des autres. C'est cette cohabitation en pleine intelligence, dynamique, jamais définitivement acquise, qui est rendue possible par le système immunitaire. Celui-ci n'est donc pas, ou pas seulement, une muraille défensive derrière laquelle on s'abrite. C'est plutôt un système ouvert d'adaptation, de confrontation et de négociation permanentes, permettant de faire cohabiter en nous et autour de nous l'ensemble des mondes vivants exogènes et endogènes, pathogènes ou commensaux qui nous constituent. La cohabitation est la condition même de notre existence. Pour employer une métaphore guerrière qui résonne avec l'actualité sanitaire, l'auteur nous suggère qu'il ne s'agit pas de détruire l'ennemi, mais plutôt de chercher le compromis d'un équilibre métastable, fragile mais nécessaire à notre survie.

BERNARD SCHMITT
CERNh, Lorient

ET AUSSI



GUIDE CRITIQUE DE L'ÉVOLUTION

Guillaume Lecoindre (dir.)

Belin, 2021
704 pages, 39 euros

Maintes fois réédité, ce célèbre guide est devenu incontournable pour les enseignants des sciences de la vie. Il procède par notions clés aussitôt mises en œuvre dans des « morceaux choisis de l'évolution », avant de nous faire plonger dans le « dur » du sujet : les mécanismes de l'évolution et l'histoire de la vie que leur étude a permis de restituer. Mieux illustrée, cette nouvelle édition mise à jour intègre en outre les nombreuses avancées de ces dix dernières années.

DÉCRIRE LA TERRE, ÉCRIRE LE MONDE

Jacques Gonzales

Glénat/La Société de géographie, 2021
272 pages, 45 euros

La Société de géographie, sise à Paris depuis deux cents ans, est la plus ancienne société savante consacrée à la géographie du monde. Son secrétaire général en retrace ici l'histoire à partir de son extraordinaire fonds documentaire. Titres par des dates, les sept chapitres évoquent l'exploration de notre planète, mais aussi son passé récent tel qu'il est enregistré dans les cartes, les photographies et les tableaux choisis. Les récits d'exploration nous permettent de côtoyer d'illustres sociétaires, comme Pierre Simon Laplace, Alexander von Humboldt, Ferdinand de Lesseps, Jean-Baptiste Charcot, Jules Verne... et bien d'autres !

LYNX

Laurent Geslin

Salamandre, 2021
128 pages, 29 euros

L'auteur, photographe animalier des plus doués, nous conte en images la vie d'une famille de lynx. Les premières sorties, timides, des trois petits nés à la belle saison deviennent vite d'imprudentes explorations l'un d'eux se fait tuer par un chasseur, un autre se fait écraser, et la mère est envoyée par les biologistes repeupler les Vosges allemandes. Quant à la fille, médiocre chasseuse, elle survivra et rencontrera un jeune mâle. Le récit en photos de cette dure vie illustre pourquoi ces magnifiques et énigmatiques félins sont si rares.

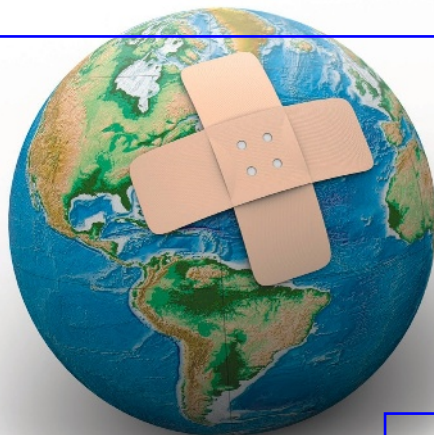


La chronique de
CATHERINE AUBERTIN

économiste de l'environnement, directrice de recherche
de l'IRD et membre de l'UMR Paloc
au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

ET SURTOUT LA SANTÉ!

Et si on intégrait l'idée de santé dans les diverses stratégies
visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre
et l'effondrement de la biodiversité ?



Pour réparer
la Terre, réparons
les humains.

corps humain. Oui, à 40 °C en permanence, on est fiévreux!

Mais le thème redéfinit également les relations des humains avec le milieu naturel dont ils dépendent. Les écologues et les médecins défendent l'initiative *One Health*, où la santé se situe à l'interface des systèmes humains, des autres vivants et des écosystèmes: la santé des uns dépend de celle des autres. L'attention portée aux microorganismes est ainsi éloquente. Car si les virus font peur, ces milliards de bactéries que nous hébergeons ont récemment été déclarées, sous le nom de microbiote, d'«acteur majeur de la santé du vivant». Plus riches et divers ils sont, plus nous résistons aux pathogènes. Cela vaut aussi en agriculture. L'alternative aux pratiques industrielles, principal facteur de perte de biodiversité microbienne, repose sur le respect de ces microorganismes garants de la bonne santé des sols nourriciers et rouages des grands cycles biogéophysiques.

UN PIB OBSOLETE

De leur côté, des économistes cherchent de nouveaux indicateurs afin de s'affranchir de la croissance mesurée par un PIB qui n'enregistre que les flux de valeurs marchandes. Ils imaginent des dispositifs multicritères fondés sur les dix-sept objectifs de développement durable de l'ONU pour éradiquer la pauvreté, protéger la planète et garantir la prospérité pour tous. L'économiste Éloi Laurent propose ainsi de substituer au PIB le calcul de «l'espérance de vie en bonne santé», indicateur simple qui placerait un projet humain sous contraintes environnementales et révélerait les inégalités sociales, géopolitiques et environnementales.

Cette effervescence autour de la santé, vue comme un bien commun réunissant les systèmes humains et le système planétaire, aurait dû permettre un changement transformateur des politiques publiques. La COP 26 n'a pas eu d'influence sur les plans de relance qui consacrent si peu à l'environnement et aux systèmes de soin, poursuivant la course à la croissance avec comme seule finalité d'augmenter le PIB. Le numéro des urgences ne répond plus! ■

L'occasion était belle, mais elle a été manquée: la COP 26 Climat de Glasgow a tiré peu de leçons de la pandémie de Covid-19. La santé de l'économie a pris le pas sur la santé de l'environnement et la planète poursuit allégrement son réchauffement. Pourtant, avec les mesures de confinement, les émissions de gaz à effet de serre ont diminué en 2020 de 7%, précisément le taux de réduction annuel nécessaire pour rester en dessous de la barre du 1,5 °C de réchauffement conformément à l'accord de Paris.

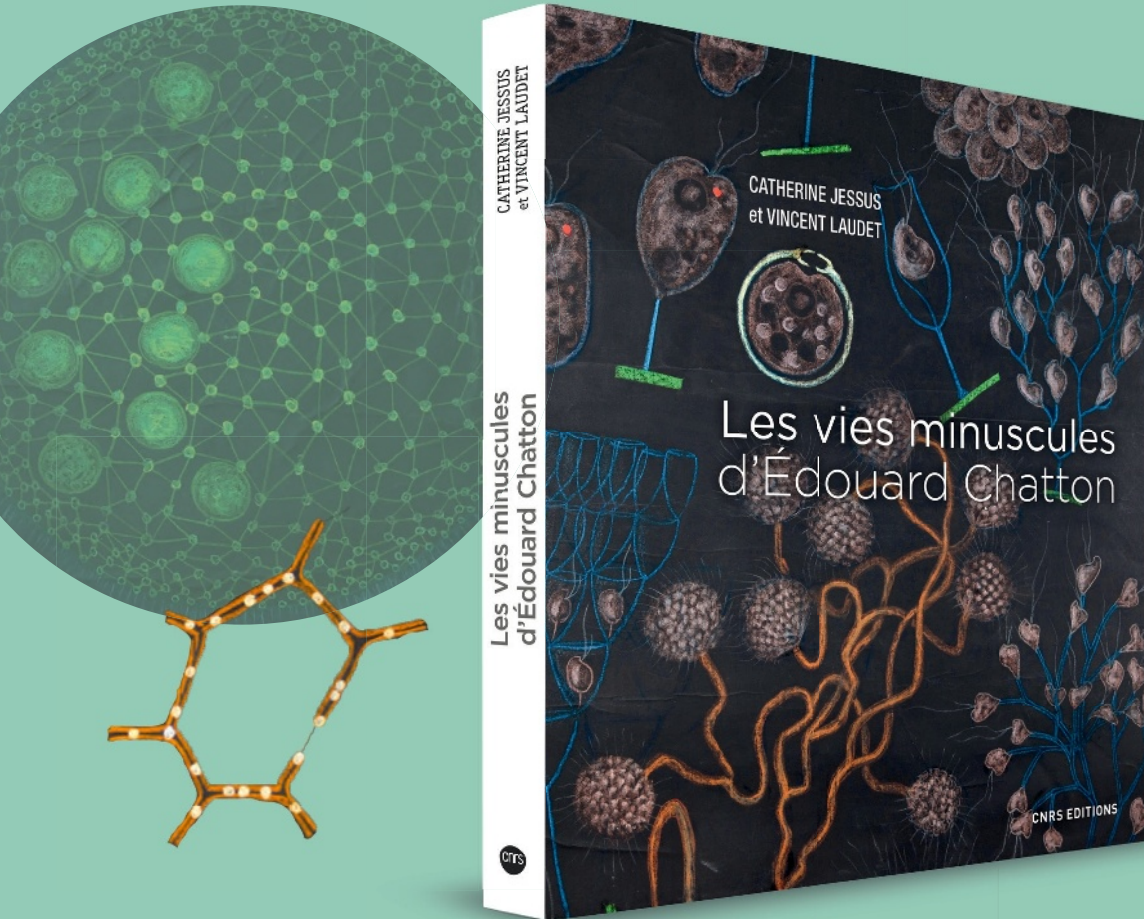
Qu'un virus parvienne à convaincre les gouvernements d'agir, là où de nombreux chercheurs des sciences du vivant et du climat ont échoué pendant plus de quarante ans à se faire entendre, ne cesse d'étonner. Aussi, peut-on se demander si, pour enfin transformer les systèmes économiques et renverser les priorités, plutôt que de présenter le réchauffement climatique et l'effondrement de la biodiversité comme des problèmes environnementaux, il ne serait pas plus efficace de les voir comme des problèmes de santé. Et c'est bien le cas!

Les rapports du Giec insistent sur la notion de cobénéfices, et notamment les conséquences positives que des mesures d'atténuation du changement climatique dans l'agriculture, les transports, la production d'électricité... auraient sur la qualité de l'air et plus généralement sur la qualité de vie. La pollution de l'air provoque 7 millions de morts chaque année dans le monde.

Des économistes cherchent à s'affranchir de la croissance mesurée par le PIB

Le thème de la santé est immédiatement compréhensible et parle à tous, plus peut-être que la disparition de tel ou tel insecte ou la hausse moyenne des températures de x degrés. Ainsi, certains n'hésitent pas, par une analogie hasardeuse, à appliquer les hausses prévisibles de température de l'écosystème planétaire au

Une plongée dans des mondes infinitésimaux, fascinants, magnifiques



Découvrez aussi



CNRS EDITIONS



www.cnrseditions.fr



La chronique de
YVES GINGRAS

professeur d'histoire et sociologie des sciences
à l'université du Québec à Montréal, directeur scientifique
de l'Observatoire des sciences et des technologies, au Canada

ÉQUITÉ: GARE AUX LEURRES STATISTIQUES!

Dénoncer une injustice avec des chiffres, oui,
~~mais à condition qu'ils soient bien comparables.~~



Le sociologue Raymond Boudon a publié en 1990 un ouvrage intitulé *L'Art de se persuader des idées douteuses, fragiles ou fausses*. L'intérêt de cet ouvrage est qu'il attire l'attention sur le fait que nombre d'énoncés présentés comme allant de soi ou prouvant quelque chose contiennent souvent des postulats implicites qui, lorsqu'ils sont explicités, peuvent être mis en doute, invalidant alors une démonstration qui semblait convaincante.

Or, depuis quelques années, il est fréquent de dénoncer des « iniquités » sur la simple base d'une donnée statistique. Soit le constat suivant: les femmes représentent à peu près 50% de la population alors qu'elles ne comptent actuellement que pour environ 30% des auteurs d'articles scientifiques selon les données bibliométriques. Par le simple fait de juxtaposer, sans plus d'explication, ces deux proportions, ce genre de formulation suggère implicitement qu'on aurait alors évidemment affaire à une iniquité, une injustice ou même une discrimination.

Le raisonnement est pourtant loin d'être immédiat, ne serait-ce que parce que cette proportion varie beaucoup selon les disciplines. Alors que les femmes ne comptent que pour environ 17% des auteurs d'articles en physique, elles sont 55% dans

**Il faut éviter le biais
de confirmation, qui nous
incite à accepter sans
critique tout chiffre qui
conforte nos convictions**

les publications relevant des sciences de la santé et dépassent ainsi la parité, considérée implicitement comme la norme.

À la lumière de ces chiffres, on pourrait aussi penser qu'environ 30% des prix Nobel de science devraient être décernés à des femmes. Cela pourrait en effet être

le cas si un algorithme était chargé de choisir de manière aléatoire les gagnants et les gagnantes. Mais une telle procédure postule que la probabilité de faire une découverte majeure qui mérite un tel prix est la même pour tous les scientifiques. Cela est malheureusement inexact: comme l'a montré la sociologue américaine Harriet Zuckerman dans son ouvrage *Scientific Elite. Nobel Laureates in the United States*, publié en 1979, les chances de décrocher un tel prix sont plus élevées si le scientifique a travaillé avec un nobélisé! On devine ici l'effet de réseaux sociaux, mais également de processus d'acculturation.

Aussi, les ressources permettant de faire de la recherche de pointe ne sont pas distribuées de manière égale entre les institutions et entre les individus, mais obéissent plutôt à une loi de puissance du type de la « loi de Lotka », énoncée en 1926 et selon laquelle, en gros, 20% des personnes produisent 80% des publications et ont 80% des citations. Une distribution qui invite aussi à ne pas tirer trop vite des conclusions de la seule juxtaposition des proportions de femmes et d'autrices scientifiques.

En somme, les écarts mesurés sont réels, mais ce que sous-entend l'énoncé qui compare directement deux pourcentages est que tout écart entre les deux serait automatiquement synonyme ou symptôme d'iniquité, ce qui pose problème. Promouvoir l'égalité des chances d'accès à un poste en mettant en place des procédures non discriminatoires d'embauche des chercheurs et de distribution des fonds de recherche est bien sûr un idéal que toute personne raisonnable ne peut qu'approuver. Mais comme le proposait Raymond Boudon, seule une analyse serrée des postulats implicites de raisonnements auxquels on tend à adhérer spontanément permet de s'assurer de la solidité des conclusions et des solutions qu'on en tire. Autant il faut tout faire pour éviter les biais sexistes ou racistes, autant il faut éviter ce fameux biais de confirmation, qui nous incite à accepter sans critique tout chiffre qui conforte nos convictions. ■

COLLECTION

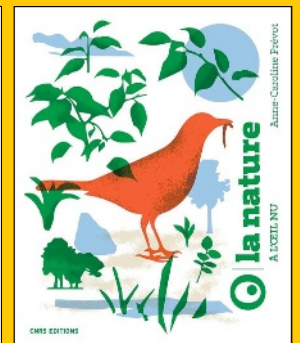
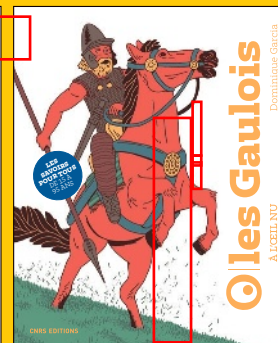


À L'ŒIL NU

Les savoirs pour toutes et tous !



PARUS DANS CETTE COLLECTION



CNRS EDITIONS



www.cnrseditions.fr

Les dessous de la tectonique des plaques

L'ESSENTIEL

> Depuis plus d'un demi-siècle, les géologues décrivent de façon simplifiée la surface terrestre comme un pavage de plaques rigides mouvantes : c'est la théorie de la tectonique des plaques.

> Fondée sur la modélisation empirique de la façon dont les roches mantelliques se déforment, la première simulation numérique de l'évolution géologique

d'une planète de type Terre reproduit à la fois la convection au sein du manteau et la tectonique des plaques.

> Ces résultats dévoilent quelles forces dominent les changements incessants de la surface terrestre, qui ont rendu la vie possible depuis 4,5 milliards d'années.

L'AUTEUR



NICOLAS COLTICE
géodynamicien, est directeur des études au département Géosciences de l'École normale supérieure à Paris

Les géophysiciens pensent depuis longtemps que les mouvements se produisant dans l'intérieur brûlant de la Terre sont à l'origine de ceux des continents et des fonds océaniques. Encore fallait-il le montrer. C'est ce que fait la première simulation numérique de la planète entière.

De puissantes forces tectoniques ont créé les Alpes. Il y a dix ans, alors que, me rendant de Lyon à Zurich, je les traversais en train, je percevais à peine leur majesté, car mes pensées portaient alors sur l'une des plus grandes énigmes scientifiques qui soient : quels liens existent entre les phénomènes internes à notre planète et les changements spectaculaires de sa surface au cours des âges ? Ces phénomènes ont créé les Alpes, déplacent les continents, mais, surtout, ils rendent notre planète habitable depuis des milliards d'années... Une fois dans la capitale de la Suisse allemande, les deux chercheurs que je venais rencontrer, Paul Tackley et Tobias Rolf, m'ont montré des résultats prometteurs : nous étions proches de la réponse à mes questions !

Depuis trois décennies, Paul Tackley, un géophysicien à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH Zurich), s'efforce de simuler sur des superordinateurs massivement parallèles la convection au sein du manteau terrestre. Nombre de phénomènes de transport de matière se produisent au sein de cette couche rocheuse de quelque 2900 kilomètres d'épaisseur située entre la croûte terrestre et le noyau métallique de notre planète. J'étais à Zurich dans l'espoir de pouvoir employer son code informatique afin de travailler sur l'énigme qui me fascinait : l'origine profonde des phénomènes géologiques qui façonnent notre globe. Je m'étais en effet rendu compte que la théorie de la tectonique des plaques (voir l'encadré page 22) ne les explique que de façon... superficielle. Comme Tobias Rolf, l'un des doctorants

de Paul Tackley, avait des intérêts similaires, nous avons alors décidé de collaborer.

Assis dans le bureau de Tobias Rolf, j'ai donc découvert des animations géologiques représentant des années de travail acharné, et j'ai cru halluciner quand, sur l'écran, se sont formées des dorsales océaniques, puis ont commencé des subductions qui se sont poursuivies avant de s'arrêter... Ce soir-là, à l'hôtel, mon esprit est entré en ébullition : je sentais que, même si les modèles que j'avais vus fonctionner étaient encore très approximatifs, nous allions bientôt pouvoir simuler en même temps la convection dans le manteau terrestre et la tectonique des plaques. Autrement dit, il serait possible de se lancer dans l'étude de la dynamique terrestre dans sa globalité ! De fait, quelques années plus tard, en 2018, nous avons lancé la première simulation géodynamique d'une planète tellurique virtuelle et cela nous a permis de mieux comprendre comment évoluent, à l'intérieur et en surface, les planètes rocheuses comme l'est la Terre.

DE LA DÉRIVE DES CONTINENTS À LA TECTONIQUE DES PLAQUES

L'évolution de la Terre pendant ses 4,5 milliards d'années d'existence est spectaculaire. Ce n'est qu'au cours du siècle dernier que nous avons commencé à percevoir les phénomènes physiques superficiels ou profonds qui l'ont constamment modifiée. Dans un ouvrage de 1915 – *La Genèse des continents et des océans* –, le climatologue allemand Alfred Wegener proposa l'idée de dérive des continents et celle de l'existence passée de supercontinents. Les mécanismes d'entraînement et la vitesse de

D'énormes forces tectoniques ont créé les Alpes – ici une crête dans les Dolomites – en comprimant les épaisses couches sédimentaires et le substrat sous-jacent d'un bassin sédimentaire de l'ancien océan disparu de la Théthys. Leur formation a commencé il y a environ 135 millions d'années, au tournant du Jurassique et du Crétacé, mais est passée par sa principale phase il y a 30 à 35 millions d'années.

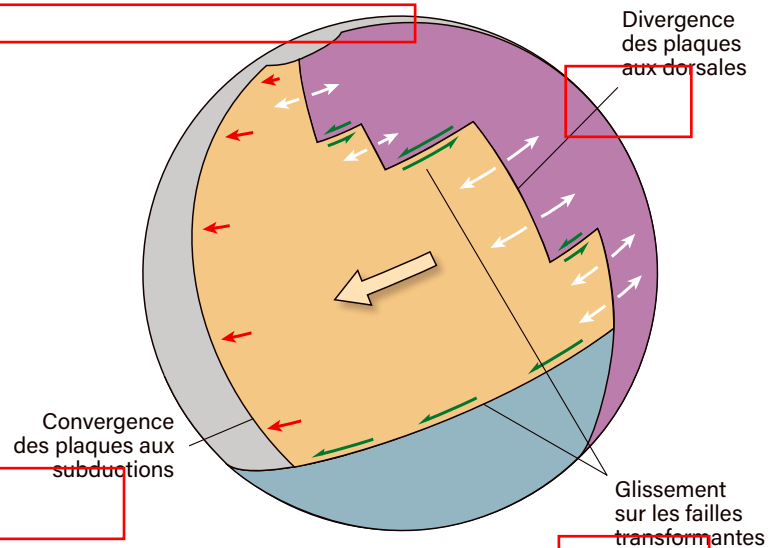
dérive qu'il proposait étant incorrects, des physiciens célèbres de son temps ridiculisèrent son idée. Toutefois, à partir des années 1930, elle commença à gagner du terrain.

Sa progression fut lente, car jusque dans les années 1950, la plus grande part de ce qui était connu sur la structure profonde de la Terre provenait de l'observation de roches continentales et de mesures sismologiques et gravimétriques. Puis, dans les années 1950 et 1960, la bathymétrie livra de premières cartographies du plancher océanique, de sorte que les géologues purent lancer l'étude de sa géologie. Ils découvrirent des escarpements, des volcans et des failles sous-marines de plus de 100 kilomètres de long – comme celle de Sumatra à l'origine du séisme et du tsunami de 2004. L'existence de profondes fosses sous-marines – la profondeur de l'une d'entre elles, celle des Mariannes dans le nord-ouest de l'océan Pacifique, excède les 10 kilomètres – poussa les géophysiciens à expliquer les paysages terrestres par un nouveau phénomène : l'expansion des fonds océaniques. Tout suggérait en effet que, tel un tapis roulant, le fond océanique s'éloigne d'une ligne médio-océanique, où se trouvent des chaînes de montagnes volcaniques. Le GPS (*global positioning system*) nous permet aujourd'hui de mesurer précisément la vitesse de ces plaques : de 1 à 10 centimètres par an (à peu près celle de la pousse de nos ongles!).

Ces observations sont à la base de la théorie de la tectonique des plaques, qui consiste à représenter de façon simplifiée la lithosphère terrestre – c'est-à-dire la croûte et le manteau le plus externe – par un pavage de plaques massives et rigides, susceptibles de se déplacer, d'entrer en collision et de se chevaucher, l'une plongeant sous l'autre, en d'autres termes de « subducter ».

La réalité, toutefois, est plus complexe, car les roches constituant les plaques peuvent se déformer de façon soit élastique – elles reprennent leur forme –, soit plastique – elles ne retournent pas à leur forme antérieure. Par ailleurs, toute la masse solide de la Terre connaît, comme les océans, des « marées terrestres », qui déplacent chaque jour la surface jusqu'à 20 centimètres vers le haut et vers le bas. Mises sous tension par les mouvements tectoniques, de longues failles déforment les plaques avec leur lot de tremblements de terre propageant des ondes sismiques. Et puis, même si les roches nous apparaissent comme solides à notre échelle de temps, à celle des temps géologiques, elles s'écoulent ! Les magnifiques structures rocheuses de l'Himalaya, par exemple, résultent de ce processus. Soumis à d'intenses efforts, les grains minéraux s'y disloquent et leurs atomes et molécules se déplacent pour accommoder les énormes forces mises en jeu.

LA TECTONIQUE DES PLAQUES



La théorie de la tectonique des plaques décrit la façon dont la surface terrestre s'organise et change dans le temps. Même s'il s'agit d'une version simplifiée de la géodynamique, c'est un outil utile pour décrire de façon générale comment la couche la plus froide de la planète – la lithosphère – se déplace en réponse aux phénomènes se produisant dans l'intérieur chaud de la Terre. Elle rend possible aux étudiants et aux scientifiques de se représenter intuitivement le pavage planétaire à partir de la carte mondiale de l'élévation des sols et des fonds marins.

Ainsi, la lithosphère comprend plusieurs grandes plaques et des dizaines de plaques plus petites. Aux limites où les plaques divergent, du magma s'infiltre depuis les profondeurs et s'accumule en longues chaînes volcaniques, tandis que les plaques s'éloignent

les unes des autres (flèches blanches) ; à celles où les plaques convergent, elles entrent en collision, de sorte que l'une d'elles s'écrase, plie et plonge sous l'autre dans le manteau (flèches rouges) ; le long des autres limites interplaques – des failles transformantes –, les plaques glissent transversalement l'une contre l'autre (flèches vertes).

Plusieurs forces concourent pour entraîner ces mouvements : aux frontières convergentes, la « traction de subduction » tire la plaque entière dans le manteau ; ce mouvement induit une divergence à l'autre extrémité de la même plaque, où du magma s'infiltre, se répand et forme une longue chaîne de montagnes volcaniques au fond de la mer : une dorsale. Là s'exerce la « poussée aux dorsales ».

Présent depuis au moins 150 millions d'années, le pavage actuel de la Terre par les plaques tectoniques est singulier : une cinquantaine de plaques de tailles diverses, réparties sur toute la surface de la Terre, un peu comme des débris d'une vitre brisée, jouxtent sept grandes plaques. La superficie de la plus grande, la plaque pacifique, vaut près de 190 fois la surface de la France métropolitaine. Cette immense plaque jouxte à la fois la côte ouest des États-Unis, le Japon et la Nouvelle-Zélande et la plaque Philippine (10 fois l'Hexagone) que bordent la Chine et l'Australie.

Pour évaluer les forces à l'origine de ce pavage tectonique, les scientifiques ont construit des modèles physiques. Les différences

d'élévation permettent à la gravité de façonner de grandes formations rocheuses: de hautes et massives chaînes de montagnes appuient de leur poids sur les régions profondes qui s'étalent d'autant plus que leur résistance est faible. Si à la surface de la Terre les roches se brisent, dans la chaleur des profondeurs, elles s'écoulent. Ainsi, sur les lignes médio-océaniques où se dressent les dorsales océaniques, du magma chaud s'infiltre, se répand et se solidifie au contact de l'eau de mer. Ses accumulations et son refroidissement poussent vers le bas la croûte océanique locale, laquelle tend à s'échapper latéralement, subissant ce que l'on nomme la «poussée aux dorsales». À leurs autres extrémités, les plaques entrent en collision et l'une d'entre elles chevauche l'autre, qui s'enfonce profondément dans le manteau: son poids produit ce que l'on nomme la «traction de subduction». La friction entre deux plaques qui coulisent produit aussi une force résistante. Enfin, le manteau terrestre – la couche de roches chaudes s'écoulant lentement au sein de la Terre – mijote tel le contenu d'une immense casserole planétaire, parcourue par des courants de sa base à sa surface: cette circulation induit une résistance aux mouvements des plaques nommée «entraînement par le manteau». L'ensemble de ces forces tectoniques se combinent pour lentement sculpter la Terre.

L'ŒUF ET LA POULE DE LA GEODYNAMIQUE

In fine, les modèles géodynamiques posent une question paradoxale: est-ce l'intérieur de la Terre qui conforme sa surface ou la surface de la Terre qui conforme son intérieur? Depuis plus de cinquante ans, les scientifiques élaborent des calculs numériques, où ils combinent les forces tectoniques afin d'apprécier lesquelles dominent. Modélisant le plancher océanique par des blocs rigides, ils ont calculé les forces nécessaires pour les déplacer aux vitesses observées en surface. Ces travaux donnent des résultats contradictoires: si dans la plupart des cas la traction de subduction domine sur la poussée aux dorsales, dans d'autres, c'est l'inverse, et le débat reste ouvert sur l'impact de l'entraînement du manteau.

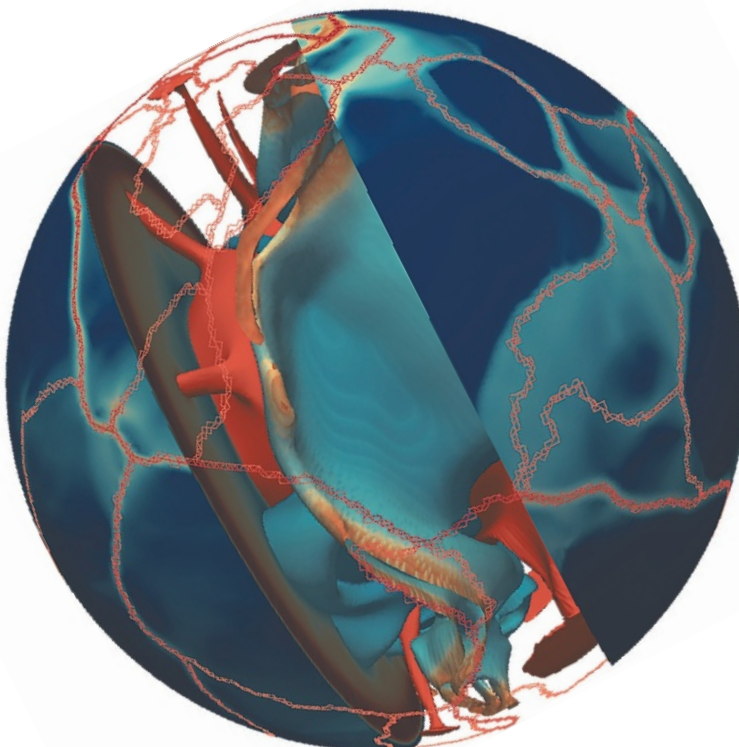
Face à ces contradictions, les géodynamiciens ont tenté de décrire le système entier constitué par le manteau et la croûte: le «système manteau-croûte». Or si ces deux couches sont constituées de matériaux similaires, des roches silicatées, il faut tenir compte à la fois des forces s'exerçant en profondeur et de celles s'exerçant en surface. Pour attaquer le problème, ces scientifiques ont développé des simulations plus complètes, dans lesquelles le système manteau-croûte est divisé en millions de petites cellules quasi cubiques adjacentes au sein desquelles on résout les équations décrivant le transport de la matière et de l'énergie. Dans les premières

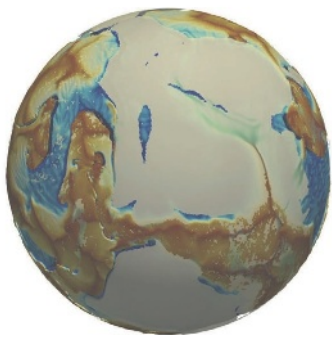
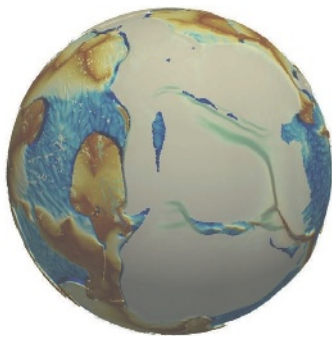
Les mouvements profonds des roches mantelliques sont à l'origine des grandes plaques tectoniques de la Terre, que la résistance au glissement dans les zones de subduction réduit en fragments de taille bien plus modeste. La doctorante Claire Mallard a dressé cette carte de la résistance à l'«écoulement» rocheux, c'est-à-dire de la viscosité en surface mise en regard des flux rocheux dans le manteau sous-jacent. Les régions bleu foncé sont les continents, des zones à viscosité élevée, tandis que les limites rouges représentent les limites entre plaques, où la viscosité est bien plus faible. À l'intérieur de cette simulation de la planète, les flux rouges représentent les panaches s'élevant jusqu'à des points chauds et les surfaces bleu clair des plaques en subduction.

générations de modèles, toutefois, on simplifiait grandement les caractéristiques mécaniques et thermiques des matériaux – densité, viscosité, conductivité thermique... – et on ne pouvait décrire qu'un état instantané de la géologie terrestre. Pour faire mieux, il fallait aussi prendre en compte la complexité de la déformation des roches et les évolutions de la température interne de la Terre sur des millions d'années.

Les roches se déforment parce que les liaisons entre atomes et molécules qui les constituent résistent aux forces appliquées sur elles, phénomène que l'on décrit en calculant des contraintes cisailantes: des forces par unité de surface que les roches exercent les unes sur les autres. Pour chaque «cellule», des contraintes cisailantes s'appliquent sur chaque facette ainsi que la pression. Les contraintes cisailantes s'accompagnent de déformations résultant des propriétés mécaniques du matériau; ces déformations traduisent la résistance des roches au mouvement, en d'autres termes leur élasticité ou plasticité.

Pour une masse rocheuse dans le manteau terrestre, ces efforts s'opposent exactement à la force de flottabilité (égale à l'accélération de la pesanteur multipliée par le volume de ces roches et par la différence entre leur densité et celle du milieu extérieur). À chaque instant l'équilibre est donc complètement réalisé. Ainsi les courants ascensionnels dans le manteau résultent d'une flottabilité positive et de contraintes résistant au mouvement. À l'inverse, les courants descendants – par exemple les plaques plongeant dans le manteau après leur subduction – résultent





Avec la doctorante Maëlis Arnould et d'autres collègues, nous avons développé une simulation géophysique d'une planète tellurique entière décrivant à la fois ce qui se produit à sa surface (colonne de gauche) et les profonds mouvements convectifs en son intérieur (colonne de droite). Les plaques se rencontrent et interagissent dans les régions colorées, comme les dorsales médio-océaniques (marron) et les zones de subduction (bleues), là où une plaque plonge sous une autre. Les mouvements ascensionnels de roches au sein du manteau sont aussi représentés (colonne de droite), qui dirigent vers la surface des panaches de roches amollies par la chaleur interne de la Terre.

d'une flottabilité négative et de contraintes résistant au mouvement.

Soumises à ces forces, les roches et les plaques peuvent-elles accélérer ou décélérer? Oui, mais leurs vitesses sont extrêmement faibles: la plaque pacifique, par exemple, qui se déplace de 10 centimètres par an, a une énergie cinétique équivalente à celle d'une voiture lancée à 40 kilomètres par heure. Cette énergie est donc si limitée à l'échelle de cette immense plaque que ses variations sont extrêmement faibles. Cela implique que l'accélération de la plaque – proportionnelle à ces variations – est presque négligeable. L'accélération étant quasi nulle, la vitesse d'une plaque tectonique ne dépend en aucun instant de sa valeur initiale.

ESTIMER LES CONTRAINTES SUR LES ROCHES

Cette dépendance étant inexistante, les modélisateurs affrontent la question de l'estimation des contraintes présentes au sein de chacune des millions de cellules rocheuses définies pour décrire le système manteau-croûte et de la force de flottabilité s'exerçant sur elles. Contrairement à l'atmosphère ou l'océan, le manteau est un milieu solide, de sorte que la prise en compte des contraintes implique de comprendre comment les roches leur résistent. Cela varie en fonction des conditions de température, de pression et... de l'intensité des contraintes elles-mêmes. Pour sa part, la flottabilité varie en fonction de la température (un volume qui chauffe se dilate), mais aussi de différences chimiques affectant la densité des roches mantelliques profondes.

Pour préciser leurs idées, les scientifiques qui travaillent sur ce sujet ont mené des expériences de laboratoire afin d'évaluer de quelle façon les contraintes et la température déforment de petits cylindres de roches (voir l'image page 27). Ils les ont d'abord placés dans une presse à moins de 400 °C – soit une faible température pour un géologue – puis ont observé à quel seuil de contrainte cisailante les cylindres se brisaient. Ces expériences montrent que les contraintes limites mesurées varient peu d'un matériau rocheux à l'autre. Ensuite, lorsque les scientifiques ont mis les cylindres sous pression à plus de 500 °C, ils ont observé que la roche les constituant commençait à «s'écouler», c'est-à-dire à se déformer plastiquement avant de céder à certaines contraintes extrêmes. Les scientifiques ont affiné encore ces essais en changeant les tailles des échantillons et leurs formes. Ils ont poussé leurs expériences aussi à très haute pression afin d'appréhender la structure adoptée par les matériaux en les observant à travers de puissants microscopes.

Il ressort de ces expériences qu'aux pressions de l'intérieur de la Terre les mécanismes physiques à l'œuvre pendant la déformation des

roches et les lois les décrivant ne sont clairs qu'au-dessus de 1500°C. Aux températures intermédiaires, en revanche, la façon dont les roches «s'écoulent» est difficile à appréhender. Plusieurs mécanismes de déformation concourent. Leur point commun est que, au-dessus de certains seuils de contrainte, l'écoulement, c'est-à-dire la déformation irréversible de la roche – on dit le «fluage» –, se produit d'abord au sein de toutes petites bandes que cela rend très faibles mécaniquement. En ces zones restreintes affaiblies, la roche se déforme plus facilement. Ainsi, cette rétroaction positive rend la déformation très locale. Nous nous sommes donc inspirés de ces observations pour écrire des lois effectives décrivant la déformation des roches, en quelque sorte leur façon de «s'écouler».

Comme évoqué plus haut, les forces de flottabilité s'exerçant au sein du manteau terrestre découlent des différences de densité existant entre des volumes de roches adjacents. Lorsque la température augmente, la densité diminue, car les roches se dilatent. Les régions chaudes

d'écoulements dans le manteau, il faut les intégrer au sein de simulations de l'évolution du système manteau-croûte entier.

À la fin des années 1990, une poignée de géodynamiciens a mis au point des simulations dont le principe était de traduire l'équilibre existant entre les contraintes et la flottabilité dans un volume comparable à celui du manteau terrestre, en tenant compte de la complexité mécanique des roches. Comme nous l'avons évoqué plus haut, ils ont pour cela modélisé de façon simplifiée la façon dont les roches «s'écoulent» à basse température, mais en préservant les caractéristiques essentielles du phénomène. Cette logique fonctionne bien dans le manteau, où les roches se contraignent les unes les autres, de sorte qu'elles se déplacent lentement ensemble et en grandes masses. Il en va autrement sur la surface terrestre, puisque des roches séparées par de faibles distances peuvent s'y déplacer à des vitesses différentes. Les déformations que subissent les plaques se produisent en effet quasi totalement à leurs frontières, parfois sur seulement dix kilomètres de large. Les modélisateurs ont donc dû construire des algorithmes capables de décrire sur toute la planète des changements importants à ce type d'échelle aussi.

Autre difficulté: il s'est avéré que la modélisation des lois d'«écoulement» de la roche issue des expériences de laboratoire à toute petite échelle ne produisait pas à grande échelle des mouvements ressemblant à ceux des plaques tectoniques. Nous avons donc dû prendre en compte ces effets d'échelles en réglant les paramètres de cette modélisation afin d'obtenir des solutions décrivant l'expansion des fonds océaniques et la subduction. Cette optimisation des paramètres n'empêche toutefois pas les simulations de l'évolution du système manteau-croûte d'exiger de très grandes ressources calculatoires, soit des mois de temps de calcul sur des superordinateurs massivement parallèles.

En 1995, ces machines sont devenues assez performantes pour que plusieurs équipes abandonnent leurs approches partielles de la convection mantellique en faveur de simulations d'un manteau sphérique complet. Mais ce n'est qu'en 2010 que les grands calculateurs sont devenus assez abordables pour qu'il soit possible de se lancer dans les simulations bien plus complexes de la Terre entière en trois dimensions. C'est aussi à peu près à ce moment que Paul Tackley est parvenu à rendre son code capable de résoudre les équations de transport et de conservation de l'énergie dans des matériaux dont les propriétés varient fortement. Mon équipe a donc pu utiliser dans les simulations les lois empiriques de la déformation caractérisées par des contraintes-seuil découvertes en laboratoire et adaptées aux grandes échelles pour simuler simultanément la convection dans le manteau et la tectonique en surface.

Les forces de flottabilité découlent des différences de densité entre roches

internes à la Terre ont donc tendance à s'élever, tandis que les régions froides, plus denses, s'enfoncent. Des différences chimiques affectent ces mouvements: par exemple les roches riches en fer tendent à être plus denses que les roches riches en magnésium. Des études sismologiques suggèrent par ailleurs que des régions du manteau de la taille de continents, posées sur la surface du noyau, sont caractérisées par une composition chimique particulière. Pour comprendre ce que cela change en matière de densité, les scientifiques ont placé des échantillons de roches à températures et pressions extrêmes. Ces échantillons de laboratoire sont toutefois très petits comparativement aux régions de tailles continentales posées sur la surface du noyau en question, et les durées pendant lesquelles ils subissent des contraintes sont très courtes par rapport à celles qui caractérisent la déformation des roches à l'échelle des temps géologiques. Dès lors, pour pouvoir correctement prendre en compte ces effets microscopiques à l'échelle de plaques tectoniques, de montagnes ou encore

Avant ma collaboration avec Paul Tackley et Tobias Rolf sur les grandes simulations en 3D, j'avais étudié la structure chimique du manteau terrestre. Des décennies durant, pour les géochimistes, le manteau était stratifié en un manteau supérieur et un manteau inférieur distinct chimiquement. Alors que pour les géophysiciens, leurs roches se mouvaient dans l'ensemble du manteau. La façon dont des masses importantes ou des domaines chimiques persistent au sein d'un système convectif n'avait donc rien de clair. Pour mieux comprendre, j'ai entrepris de rapprocher les observations géophysiques des observations chimiques faites sur les dorsales médio-océaniques et sur des points chauds, comme Hawaii, les îles Galápagos. Ces recherches ont abouti à un compromis: non, le manteau terrestre n'est pas stratifié en deux coquilles concentriques, mais il contient d'immenses domaines se distinguant chimiquement, car capables de résister au mélange des milliards d'années durant.

LA STRUCTURE CHIMIQUE DU MANTEAU

Alors que je travaillais sur la structure chimique du manteau, j'ai pris conscience que la genèse des continents constituait le plus gros problème à résoudre. La formation de croûte continentale aspire en effet certains éléments chimiques, ce qui modifie la composition du manteau sous-jacent. Les continents jouent en outre un rôle au sein du système convectif du manteau et contribuent au refroidissement à long terme de la planète. Collaborant avec des pétrologues, j'avais échafaudé des modèles à continents dérivants suggérant que la formation d'un supercontinent échauffe les roches sous-jacentes. J'avais besoin de prendre en compte l'influence de la convection sur les plaques tectoniques dans ces travaux. C'est ce qui m'a amené à contacter Paul Tackley.

Lors de notre rencontre, j'avais ressenti que Paul Tackley et Tobias Rolf ne prenaient pas toute la mesure de la puissance de leurs modèles 3D. Allongé dans le lit de cette chambre d'hôtel de Zurich en 2010, j'avais compris que nous disposions de la puissance de calcul et des algorithmes nécessaires pour modéliser enfin les profondeurs de la Terre de la même manière que les climatologues et les météorologues modélisent les courants atmosphériques et les fronts de tempête. Je voulais être en mesure de saisir l'intérieur de la Terre au même niveau de détail et de complexité. Les limites fondamentales de la tectonique des plaques proviennent du fait que l'on suppose que les plaques qui interagissent à la surface de la Terre sont parfaitement rigides et que l'on néglige les mécanismes physiques en jeu. Les modèles dynamiques utilisés en climatologie et en météorologie décrivent des interfaces

plus souples, plus «fluides» entre les grands phénomènes atmosphériques, comme les cyclones, les anticyclones, etc., et ils sont construits pour prédire l'évolution des conditions météorologiques sur plusieurs jours. Ces prévisions résultent d'observations effectuées en divers lieux et moments et de modèles physiques capables d'extrapoler les conditions à venir. La même chose est possible concernant des plaques tectoniques, mais il s'agit cette fois d'extrapoler des processus beaucoup plus lents et vers le passé plutôt que vers l'avenir. Il nous fallait créer un modèle prédictif de la tectonique des plaques et l'exploiter dans une simulation assez bien faite pour pouvoir y intégrer les observations géologiques et géophysiques. Cela seulement pouvait nous rendre capables de reconstruire l'évolution de notre vaste planète au cours des dernières dizaines ou centaines de millions d'années.

Toutefois, même si j'avais désormais un objectif clair en tête, sa réalisation allait demander des années de travail. Nous devions d'abord repousser les limites des modèles de Paul Tackley et de Tobias Rolf afin qu'ils deviennent capables de rendre compte de l'essentiel de la tectonique des plaques. Claire Mallard, une doctorante de mon équipe, a commencé à travailler sur eux, et elle a compris ce qu'il faudrait faire pour obtenir des planètes

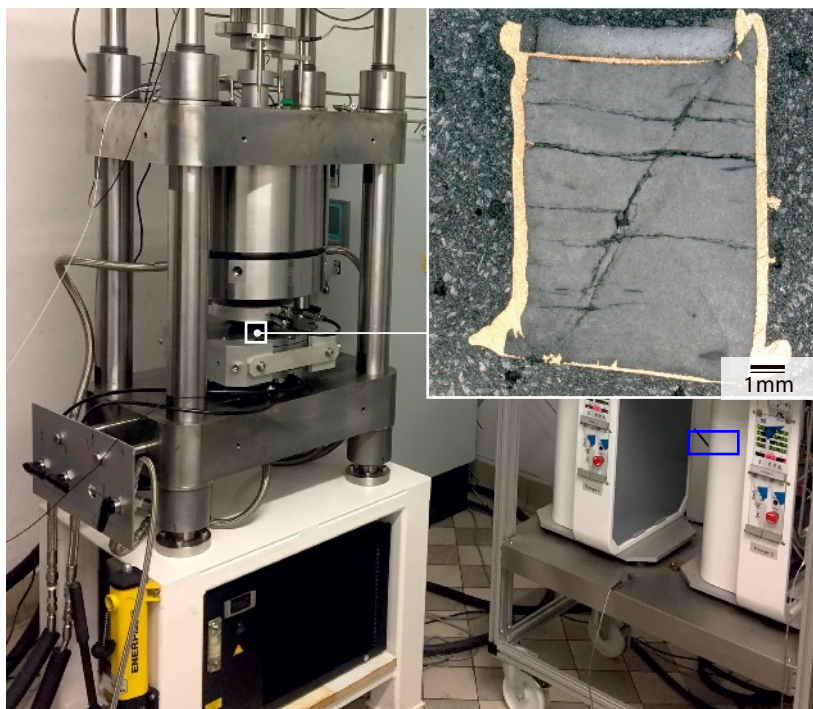
Nous voulions construire le modèle complet d'une planète tellurique comparable à la Terre

virtuelles pavées d'une façon comparable à la Terre. Grâce à sa série de modèles, nous avons compris que ce sont les mouvements profonds du manteau qui forgent les grandes plaques, tandis que la résistance des plaques près des zones de subduction débite de gros blocs crustaux en une série d'«éclats». Ces deux résultats dépendent d'une seule propriété physique: la résistance des roches à proximité de la surface. Lorsque les roches ont une résistance élevée, la subduction est peu fréquente et les plaques restent grandes plutôt que de se fragmenter en morceaux. Si les roches sont beaucoup plus tendres, les grandes plaques ne peuvent rester intactes, mais se morcellent, ce qui produit les blocs crustaux plus petits dispersés sur Terre

que nous évoquions plus haut. La répartition des tailles de plaques à la surface de la Terre nous apprend que les forces exercées par le manteau doivent être de l'ordre de la résistance des plaques, et que ce sont ces deux phénomènes qui déterminent comment les planchers océaniques se déplacent et les continents dérivent. Le travail de Claire Mallard nous a fourni des indications précises sur les paramètres jouant un rôle crucial dans le modèle.

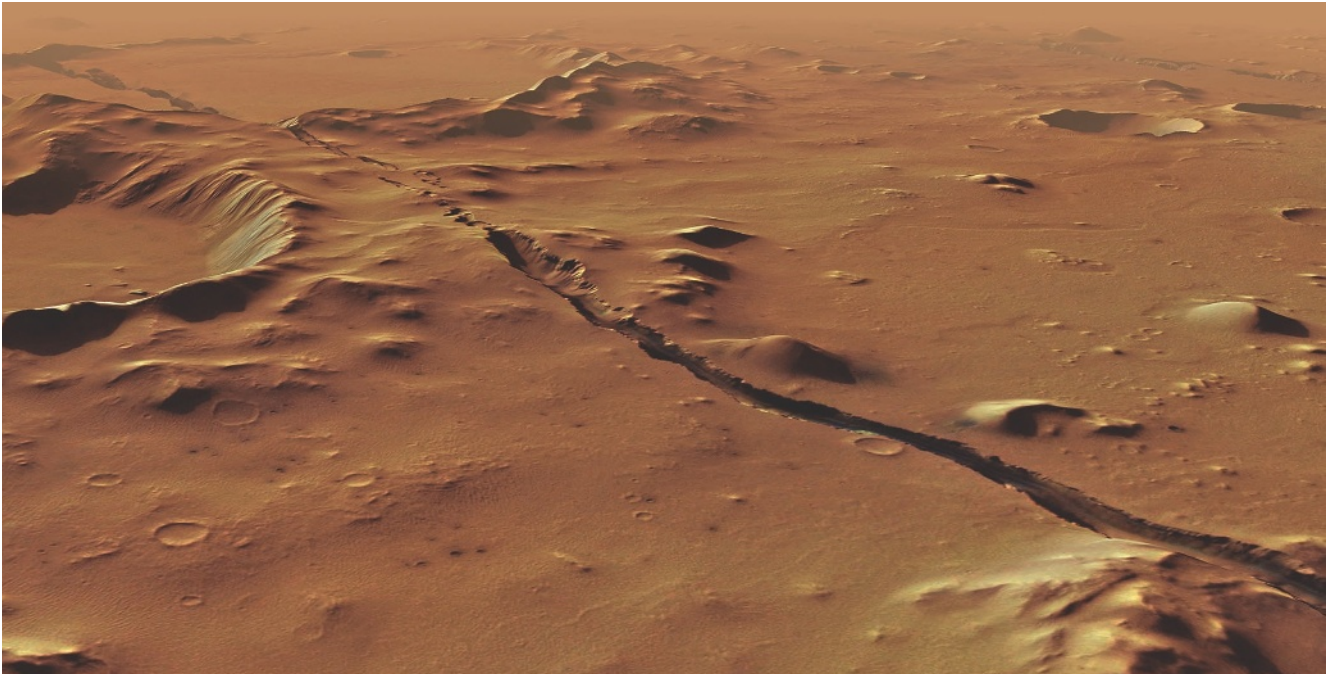
Maëlis Arnould, une autre doctorante de mon équipe, et moi-même avons ensuite poussé le travail afin de construire le modèle complet d'une planète tellurique comparable à la Terre depuis la croûte jusqu'à la surface du noyau. Pour y parvenir, nous avons optimisé la réalisation des calculs afin que les ordinateurs puissent résoudre plus vite les équations sans changer la qualité des solutions. Des astuces étaient nécessaires, car le calcul de l'évolution en trois dimensions d'une planète entière prend des mois... Il n'était donc guère possible de multiplier les essais à l'aveugle... J'ai en particulier passé un été à faire tourner le supercalculateur une semaine avant de l'arrêter pour optimiser les paramètres des modèles influençant les calculs, avant de recommencer encore et encore. Cette campagne d'essais nous a permis d'obtenir des simulations de l'évolution planétaire au bout de plusieurs mois au lieu d'années. Pendant que petit à petit je mettais au point le fonctionnement calculatoire de notre grand modèle, Maëlis Arnould essayait de comprendre à l'aide de modèles 2D comment les courants de convection façonnent la topographie observée. Ce travail nous a indiqué comment interpréter divers phénomènes, comme l'élévation du plancher océanique ou les mouvements verticaux de portions de marges continentales mesurant de 500 à 10 000 kilomètres de long.

Dans nos modèles, la loi de viscosité, qui décrit la façon dont les roches «s'écoulent» en se déformant, joue un rôle central. Nous l'avons formulée d'une façon telle qu'elle varie avec la température puisque les roches froides sont rigides, tandis que les roches chaudes sont molles... Nous tenons aussi compte de la résistance des roches aux contraintes cisailantes: une fois un certain seuil atteint, leur viscosité diminue et elles se ramollissent. Pour ressembler à ce qui existe sur Terre, la viscosité moyenne du manteau doit être fixée à un niveau permettant d'enclencher une convection assez vigoureuse. Il nous fallait aussi appliquer ces modélisations à travers tout le globe au sein d'un maillage assez dense pour produire des images détaillées des plaques et de leurs interactions: notre simulation procède de calculs effectués dans 50 millions de cellules rocheuses, et nous y avons incorporé un milliard de «traceurs», sortes de petites «billes» capables de transporter les caractéristiques des roches en circulation.



La «presse de Griggs» du laboratoire de géologie de l'ENS à Paris sert à l'étude du comportement des roches dans les conditions régnant dans le manteau terrestre supérieur, soit sous des pressions pouvant atteindre 4000 atmosphères et des températures supérieures à 1000°C. Visibles en bas à droite, des pompes hydrauliques actionnent deux pistons imbriqués qui produisent la pression et la force axiale déformant l'échantillon placé sous les pistons (carré blanc). En haut à droite, la coupe d'un échantillon dans sa capsule en or révèle dans l'objectif du microscope l'état de la roche après sa déformation : ses moitiés sont décalées et séparées par une faille.

Un seul «instantané» dans cette simulation – un état de la Terre à un moment donné – représente plus de 20 gigaoctets de données. L'un des principaux défis de ce travail de simulation est que la convection et les plaques constituent un système complexe, au sein duquel la tectonique – en d'autres termes l'apparition spontanée d'un pavage – est une propriété émergente résultant des nombreuses interactions qui se produisent dans le système. Ce comportement d'ensemble est imprévisible, un peu comme celui d'une foule ne résulte pas de façon simple de ceux des individus. Il en va de même dans notre simulation: même si nous avons choisi à bon escient les paramètres du modèle et commencé nos calculs, nous ne pouvions savoir si une tectonique semblable à celle de la Terre, avec ses cycles de subduction et ses formations intermittentes de supercontinents, émergerait. Les caractéristiques de notre modèle sont entrelacées de façon si intime que la simulation doit fonctionner des mois pour que nous puissions évaluer l'intérêt des structures émergentes, sachant que nous avons eu besoin de plusieurs essais afin de saisir comment nos hypothèses de travail influençaient le résultat des calculs. Dès lors, quand la simulation nous a semblé enfin prête à être lancée, j'ai su que, étant donné que nous devrions



attendre pendant des mois la fin de sa fort onéreuse exécution, nous n'aurions qu'une seule chance de voir si elle fonctionnait. Cette partie du projet fut pour moi intimidante et solitaire, un peu comme si j'étais parti explorer la haute mer sur un petit bateau.

OBSERVER L'ÉVOLUTION D'UNE PLANÈTE

En 2018, nous avons été fin prêts à réaliser la simulation qui serait le plus proche possible de la Terre et le calcul s'est poursuivi pendant neuf mois, pendant lesquels nous avons surveillé ses progrès. Chaque jour de simulation représentait plusieurs millions d'années sur Terre, un laps de temps pendant lequel un continent se déplace d'environ 100 kilomètres. Dix jours de calcul étaient nécessaires pour simuler l'évolution planétaire pendant 50 millions d'années, soit à peu près le temps de la formation des Alpes. À mesure que les mois défilaient, nous sommes devenus de plus en plus enthousiastes devant l'évolution des caractéristiques de notre Terre virtuelle, s'agissant tant de la dérive des continents que des subductions. Nous avons vu apparaître des fosses abyssales et des points chauds. Des structures ressemblant à des plaques se sont formées et sont parfois entrées en subduction à leurs extrémités, tandis que dans le manteau de la matière chaude effectuait des mouvements ascensionnels vers la surface.

Même si j'avais consacré des années à l'élaboration de cette simulation, ce n'est qu'au bout de quelques mois que j'ai pris conscience que le modèle de la dynamique terrestre sous-jacent à nos calculs constituait une avancée scientifique

Sur les autres planètes telluriques du Système solaire, le jeu complexe des forces géophysiques façonne aussi la surface. Mars, par exemple, est zébrée par un réseau de failles et de tranchées, telles les fosses de Cerbère, dont cette image fut prise par l'orbiteur *Mars Express*, de l'Agence spatiale européenne. Les données sismiques avancées de l'actuelle mission *InSight*, de la Nasa, combinées à nos simulations du système croûte-manteau, pourraient aider les planétologues à appréhender l'évolution géologique de la Planète rouge.

majeure et pas seulement la réalisation exigeante d'une séquence impressionnante d'images. Tant de choses restaient à tenter, tandis que nous croulions sous le travail d'analyse des données: pour nous y coller, nous avons organisé un atelier de deux semaines dans le sud de la France, et nous avons invité Laurent Husson, de l'université de Grenoble, Claudio Faccenna, de l'université Roma 3, et Thorsten Becker, de celle d'Austin, au Texas, pour nous aider à nous concentrer sur les principales forces sous-tendant la tectonique des plaques.

Dans les modèles que nous avons construits, le manteau et les plaques constituent un système qui s'organise de façon à faire apparaître et se mouvoir des plaques, c'est-à-dire la tectonique. Ainsi, nous étions devenus capables d'exploiter la simulation pour étudier où les forces motrices du système opèrent et comment elles évoluent aux échelles de temps géologiques. Nous avons commencé à explorer et à décrire les relations entre les profondeurs de la Terre et la surface: la topographie, le mouvement de l'axe de rotation par rapport aux enveloppes solides de la Terre, le lien entre les profondeurs de la Terre et le climat, et les modifications du comportement du champ magnétique en réponse à la convection et à la tectonique. Ces simulations produisent désormais des données que nous pouvons comparer aux archives géologiques et géophysiques.

Outre ce calcul de neuf mois, j'ai réalisé d'autres simulations plus petites et plus simples: un seul calcul ne suffit pas en effet à comprendre le système. En synthétisant nos conclusions, nous sommes parvenus à l'idée que dans ce système autoorganisé qui engendre

une circulation profonde et une tectonique de surface, les forces aux plus grands effets – les forces dominantes – agissent dans les 100 premiers kilomètres sous la surface. Ce sont les zones de subduction qui sont associées à celles-ci. En ces endroits, la circulation mantellique sous les plaques en subduction ne suit pas les mouvements de la surface.

Dans les zones continentales, en revanche, tout particulièrement sous les montagnes en formation, ces forces dominantes agissent sur une profondeur de 100 à 500 kilomètres, ce qui nous prouve que les mouvements au sein du manteau peuvent entraîner la surface. Dans ce cas, les vitesses tectoniques sont plus faibles que lorsque les forces sont peu profondes, et atteignent des valeurs d'environ 1 centimètre plutôt que de 10 centimètres par an. Les forces plus profondes dominent lorsque les continents se rejoignent, formant finalement des chaînes de montagnes par collision. Dans l'histoire de la Terre, cela correspond à la période de formation de la Pangée, il y a 300 millions d'années, et peut-être à des agrégations continentales plus récentes. Aujourd'hui, l'Afrique est entrée en collision avec l'Eurasie, l'Inde l'a fait il y a quelque 50 millions d'années et, au cours du dernier million d'années, l'Australie s'est approchée de l'Indonésie.

Nous pouvions aussi étudier le rôle des panaches mantelliques, ces courants ascensionnels de roches chaudes s'élevant de la base du manteau jusqu'à celle des plaques, où ils induisent une activité volcanique: un point chaud. La formation de Hawaï et de l'Islande, par exemple, résulte de ce phénomène, et les géophysiciens s'interrogent pour savoir si l'activité des panaches sépare les continents ou s'il s'agit d'autres phénomènes. Nos modèles suggèrent que les panaches ascendants ne sont pas la cause première de la fragmentation des continents: ils chauffent et ainsi ramollissent les roches par en dessous, ce qui facilite leur déformation. Dès lors, lorsque les plaques continentales sont sous tension, des fractures, futures limites de plaque, tendent à s'y propager. Au cours des 200 derniers millions d'années, les panaches situés aujourd'hui sous l'Islande, Tristan da Cunha ou encore sous l'île norvégienne de Bouvet ont contribué à découper le dernier supercontinent – la Pangée – en plusieurs morceaux.

Attendre plusieurs mois que nos calculs aient produit des évolutions planétaires numériques en valait la peine, car la combinaison de nos modèles – grands ou petits – finit par nous donner une vue d'ensemble des forces à l'origine des mouvements tectoniques actuels et des cycles d'agrégation et de dispersion des continents qui se sont succédé.

Nous aimerions maintenant étudier les failles transformantes, ces limites sans subduction ni dorsale, où les plaques coulissent

horizontalement les unes par rapport aux autres. Dans nos modélisations, ces frontières actives sont diffuses et larges, mais elles sont nettes dans la réalité du terrain, et nous ignorons ce qui induit leur formation et leur évolution. Nous aimerions aussi comprendre comment les montagnes se forment et comment la tectonique des plaques a évolué depuis l'Archéen (–4 000 à –2 500 millions d'années), la plus longue période géologique de la Terre. Enfin, nous aimerions aussi étudier comment les changements induits par la tectonique des plaques influencent le champ magnétique terrestre et le climat de la Terre. Des questions qui ont toujours été importantes, de sorte que maintenant que nous disposons d'une simulation de la convection mantellique globale, nous pouvons essayer de les élucider.

MODÉLISER D'AUTRES MONDES

Comme la théorie de la tectonique des plaques, nos simulations ne sont pas parfaites. Elles ne rendent par exemple pas compte de l'érosion en surface, des failles cassantes de la croûte supérieure, de la migration du magma ou de l'élasticité des roches. Toutefois, elles représentent un outil puissant pour élucider la physique qui sous-tend la tectonique des plaques. Pour les mettre au point, nous avons profité du travail pionnier d'autres équipes, qui nous a permis de simuler l'évolution d'une planète virtuelle entière d'une façon reproduisant les fonctionnements de base de la tectonique et de la convection mantellique. Mon objectif n'a jamais été de produire une planète numérique, mais de construire des outils et des données pour relier les observations de surface aux phénomènes intérieurs à la Terre. La physique sous-tendant nos modèles ne se limite pas à la Terre. Elle peut aussi servir à étudier d'autres planètes, ce qui permettrait d'étudier les relations entre les intérieurs de Mercure, de Vénus et de Mars et leurs surfaces observables.

Cette idée est d'autant plus séduisante que la mission *InSight*, de la Nasa, effectuée désormais des mesures sismiques à la surface de Mars, ce qui nous donne des perspectives sur le fonctionnement de son manteau. Combinée avec les données prélevées sur la Planète rouge, la physique sous-tendant nos simulations pourrait aider les planétologues à élucider des questions essentielles, comme savoir si Mars a eu une tectonique des plaques au début de son histoire. Nous espérons qu'un jour ce genre de simulation aidera les planétologues à comprendre pourquoi les quatre premières planètes de notre Système solaire sont aussi différentes alors qu'elles sont composées de matériaux comparables. Et nous espérons aussi que ces simulations qui expliquent comment les lois de la physique ont façonné notre planète nous montreront aussi comment elles sculptent d'autres mondes. ■

Cet article est traduit et adapté de celui publié dans la revue *American Scientist* (mai-juin 2021) sous le titre « The Chicken, the Egg, and Plate Tectonics », avec son aimable autorisation.

BIBLIOGRAPHIE

- M. Arnould et al., **Plate tectonics and mantle controls on plume dynamics**, *Earth and Planetary Science Letters*, 2020.
- N. Coltice, **What drives tectonic plates?**, *Science Advances*, 2019.
- M. Arnould et al., **On the scales of dynamic topography in whole mantle convection models**, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018.
- N. Coltice et al., **A mantle convection perspective on global tectonics**, *Earth-Science Reviews*, 2017.
- C. Mallard et al., **Subduction controls the distribution and fragmentation of Earth's tectonic plates**, *Nature*, 2016.
- C. P. Conrad, **How mantle slabs drive plate tectonics**, *Science*, 2002.
- D. Bercovici et al., **The relationship between mantle dynamics and plate tectonics: A primer**, dans M. Richards et al. (éd.), **The History and Dynamics of Global Plate Motions**, Geophysical Monograph, American Geophysical Union, 2000.
- D. Forsyth, **On the relative importance of the driving forces of plate motion**, *Geophysical Journal International*, 1975.

L'ESSENTIEL

> **Momies** et représentations révèlent que les Égyptiens de l'Antiquité vénéraient les babouins, mais uniquement ceux de l'espèce *Papio hamadryas*.

> Le comportement de ces singes expliquerait cette adoration : en se réchauffant au soleil matinal, ces singes semblent accueillir Rê.

> En réalité, la chaleur les aide plutôt à remettre en route leur microbiote intestinal pour une digestion optimale.

> L'analyse des momies de babouins aide également à situer sur une carte le pays de Pount, d'où ces primates étaient importés.

L'AUTEUR



NATHANIEL DOMINY
primatologue et biologiste de l'évolution au Dartmouth College, à Hanover, aux États-Unis

Sacrés babouins!

La primatologie actuelle explique pourquoi les Anciens Égyptiens vénéraient une espèce de babouin, et pas une autre. Au passage, on découvre l'emplacement probable d'un royaume légendaire.

Dans les collections du British Museum, à Londres, l'objet référencé EA6736 jouit d'un repos éternel. Il s'agit d'une momie récupérée dans le temple dédié à Khonsou, le dieu de la Lune, à Louxor, et datée du Nouvel Empire, entre 1550 et 1069 avant notre ère, une période prospère marquée par les règnes de Hatchepsout, de Toutânkhamon, des Ramsès... Qui a profité de cet embaumement? Quelques indices mettent sur la voie. D'abord, certains endroits où les bandes de lin soigneusement disposées n'ont pas résisté à l'usure du temps laissent entrevoir une... fourrure. Au niveau des pieds, des ongles bien robustes dépassent des bandages et ressemblent davantage à des griffes. Les rayons X ont révélé le squelette et le crâne à long museau d'un primate. Pas de doute, la créature momifiée est *Papio hamadryas*, le babouin hamadryas, une espèce sacrée dans l'Égypte ancienne.

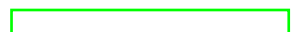
Apparaissant dans de nombreux bas-reliefs, peintures, statues et bijoux, les babouins sont

un motif récurrent à travers trois mille ans d'histoire égyptienne. La statue d'un babouin hamadryas portant le nom du roi Narmer, le fondateur de la I^{re} dynastie, date d'environ 3100 avant notre ère. Toutânkhamon, qui a régné d'environ 1335 à 1327 avant notre ère, avait un collier décoré de babouins adorant le soleil (voir la photo page 32), et une peinture sur le mur ouest de sa tombe représente douze babouins censés marquer les différentes heures de la nuit.

LE BESTIAIRE DU PANTHÉON

Les Égyptiens vénéraient le babouin hamadryas comme une des incarnations (l'autre étant l'ibis) de Thot, dieu de la Lune, de la sagesse, de l'écriture et conseiller de Rê, dieu du Soleil. Ce n'est pas le seul exemple d'animal à avoir été ainsi divinisé: le chacal est associé à Anubis, dieu de la mort; le faucon à Horus, dieu du ciel; l'hippopotame à Taweret, déesse de la fertilité... Cependant, le babouin détonne dans ce bestiaire. D'abord, la plupart de ceux qui ont eu affaire à ces singes les considèrent comme de dangereux parasites. Ensuite, c'est

Par le soin apporté à sa momification, le babouin trouvé dans la tombe KV 51 dans la vallée des Rois, en Égypte, révèle le statut social très élevé de ces animaux en qui on voyait des intercesseurs avec Rê, le dieu du Soleil.

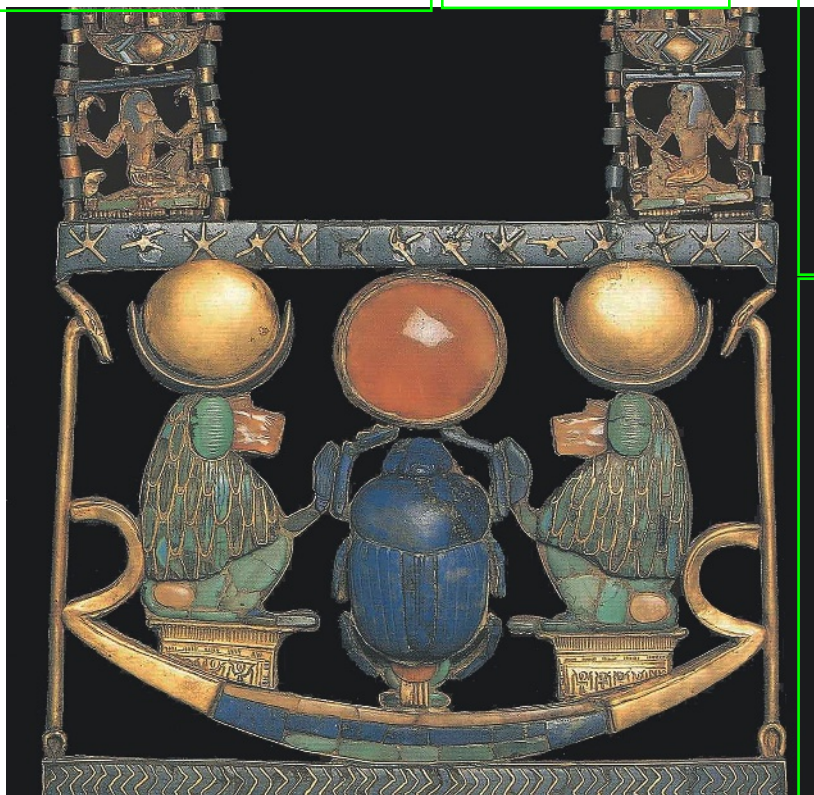


le seul animal du panthéon égyptien qui ne soit pas originaire... d'Égypte. Plusieurs découvertes récentes aident à y voir plus clair sur la déification de l'espèce et la provenance de ces animaux. Ils nous conduisent même vers le légendaire royaume de Pount...

Je fais partie de ceux qui ont eu maille à partir avec les babouins. Avec ma famille, nous vivions au Kenya lorsqu'une troupe de vingt de ces singes a déboulé dans notre jardin où l'on fêtait un anniversaire. Tandis que les invités effrayés se dispersaient avec force cris, les envahisseurs se sont précipités vers la table qui regorgeait de petits gâteaux, de fruits et de jus de fruits. Le pire a été d'observer les deux mâles qui bâillaient dans ma direction. En tant que primatologue, je sais que ce comportement, loin d'être un signe de fatigue, a une signification sociale forte: il consiste à exhiber des canines acérées en guise d'arme de dissuasion. Dans ce contexte, cependant, les bâillements semblaient relever non pas de l'intimidation, mais d'une certaine suffisance.

Les collègues kenyans à qui j'ai raconté cette histoire ont hoché la tête d'un air entendu et m'ont répondu par un proverbe: «Tous les babouins qui entrent dans un champ de maïs n'en ressortent pas satisfaits.» Comme beaucoup de proverbes, celui-ci est riche de sens. Il traduit l'insatiabilité dramatique de ces singes. Catherine Hill, de l'université Brookes, à Oxford, en Angleterre, a calculé que les babouins réduisent jusqu'à 50% le rendement des cultures

Ce collier ayant appartenu à Toutânkhamon est l'un des nombreux exemples de babouins hamadryas représentés dans l'art et la religion de l'Égypte ancienne.



pour certaines familles de l'ouest de l'Ouganda. Plus largement, ces singes sont la principale nuisance pour de nombreux agriculteurs en Afrique, et leur aversion envers ces animaux est profonde. Si l'effacement est la mesure ultime du mépris, on comprend pourquoi dans les traditions artistiques et artisanales de l'Afrique subsaharienne les babouins sont largement absents. Dès lors, l'adoration de cette créature par les Anciens Égyptiens, et son omniprésence dans leur art, a de quoi laisser perplexe.

Notons avant d'aller plus avant que les babouins actuels se répartissent en six espèces, toutes originaires d'Afrique subsaharienne et du sud-ouest de l'Arabie, et toutes sont considérées comme nuisibles. Les chercheurs savent, grâce à des vestiges archéologiques, que les Anciens Égyptiens importaient à la fois le babouin olive *Papio anubis* et *P. hamadryas*. Mais ils ne déifiaient que ces derniers. Pourquoi vénérer une espèce et pas l'autre?

Pour répondre, les chercheurs ont examiné la façon dont le babouin est représenté dans l'art égyptien, en remarquant deux formes iconiques. Dans la première, un mâle est assis sur la peau épaisse de son postérieur, les mains sur les genoux, la queue recourbée vers la droite et avec au-dessus de sa tête un disque représentant la Lune. Dans la seconde, celle dite «du geste d'adoration», les bras du mâle sont levés, la paume des mains tournée vers Rê, le dieu du soleil. De fait, de nombreuses sources littéraires associent les babouins à Rê. Par exemple, les *Textes des pyramides*, les plus anciens écrits religieux connus (ils figuraient déjà dans le tombeau du pharaon Ounas, daté du xxiv^e siècle avant notre ère), décrivent le babouin comme le fils le plus âgé ou le plus aimé de Rê. Dans le *Livre des morts* (un «guide de voyage» pour les défunts dans l'au-delà), il est recommandé de déclarer: «J'ai chanté et loué le disque solaire. J'ai rejoint les babouins, et je suis l'un d'entre eux.»

Pour expliquer ce lien entre les babouins et Rê, l'égyptologue Elizabeth Thomas a suggéré en 1979 que les Anciens Égyptiens auraient pu voir ces singes faire face au soleil levant pour se réchauffer et interpréter ce comportement comme une sorte d'accueil à la divinité. Son idée a été confortée et complétée dix ans plus tard, lorsque Herman te Velde, un autre égyptologue, a décrit les vocalises des babouins lors de ce réchauffement matinal dans lesquelles on peut aussi voir des salutations au soleil. De fait, des textes provenant du complexe religieux de Karnak, près de Louxor, décrivent les babouins comme «annonçant» Rê alors qu'«ils dansent pour lui, sautent gaïement pour lui, chantent des louanges pour lui et crient pour lui». Les babouins étaient sacrés probablement parce qu'ils semblaient communiquer directement avec Rê par leur «jubilation» gestuelle et un langage *a priori* impénétrable.

Les hypothèses des deux égyptologues sont séduisantes, mais sont-elles plausibles?

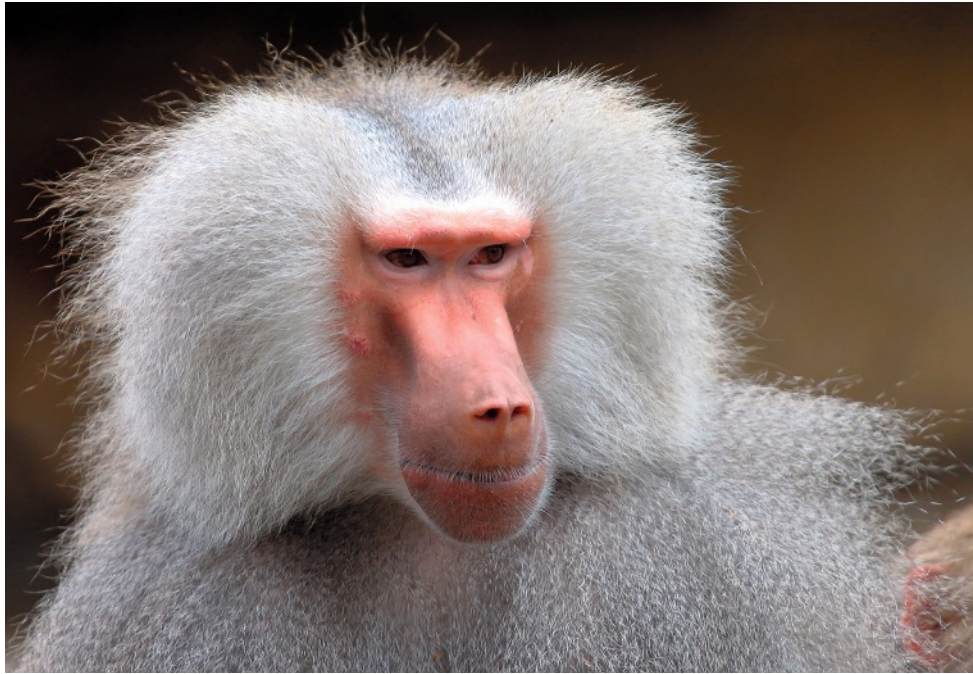
Les babouins portent-ils réellement une attention particulière au soleil du matin? Et les babouins hamadryas se distinguent-ils à cet égard des babouins olive? Aucune de ces idées n'avait été évaluée à l'aune de la primatologie jusqu'à récemment.

LE MICROBIOTE AU SOLEIL

De nombreux animaux se prélassent au soleil, une activité que la plupart des biologistes considèrent comme un moyen de minimiser le coût énergétique du réchauffement du corps après une nuit froide. Les lémuriens à queue annelée de Madagascar, par exemple, se placent souvent face au soleil du matin dans une posture ressemblant à la position du lotus au yoga. La primatologue Alison Jolly avait noté qu'une légende malgache décrit des lémuriens adorant le soleil, les bras tendus en signe de prière. En 2016, Elizabeth Kelley, du zoo de Saint Louis, aux États-Unis, a montré que ces singes se prélassent d'autant plus au soleil que la nuit a été fraîche. La primatologue et ses collègues ont également découvert que la peau de la poitrine et de l'abdomen de ces lémuriens contient plus de mélanine que celle du dos: c'est l'inverse du schéma le plus fréquent des mammifères. Or la mélanine est un pigment qui absorbe la lumière, et une plus grande quantité dans la zone abdominale indique donc qu'elle est souvent exposée. Plus précisément, la mélanine protège l'ADN des cellules de la peau des rayons ultraviolets du soleil en les absorbant et en restituant l'énergie reçue sous forme de chaleur, celle-ci pouvant bénéficier à la digestion.

Des études sur les primates menées ces dernières années indiquent que les babouins tirent également des avantages digestifs de l'exposition au soleil. Les microbes qui vivent dans les intestins de ces animaux sont essentiels à la digestion des matières végétales. Une augmentation de la température corporelle stimule l'activité de ces microorganismes, ce qui améliore l'absorption des nutriments. Le bain de soleil est donc un moyen simple et efficace de réactiver les microbes au petit matin. Les avantages sont doubles. D'abord, la digestion elle-même génère de la chaleur, ce qui réchauffe un corps refroidi durant la nuit. Ensuite, après le ralentissement nocturne de la digestion, il est à la fois efficace et prudent pour un primate de finir de digérer le repas de la veille avant d'en chercher un nouveau.

Que certaines espèces de primates se prélassent au soleil plus que d'autres, selon l'endroit où elles vivent et ce qu'elles mangent, n'est donc pas surprenant. Les babouins hamadryas fréquentent les habitats arides de la Corne de l'Afrique et de certaines régions



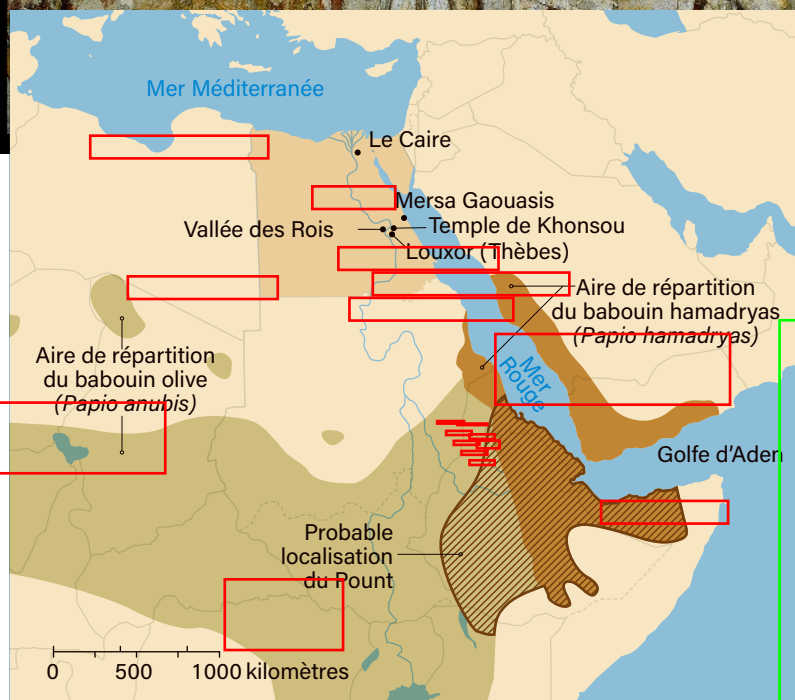
d'Arabie (voir la carte page suivante) de part et d'autre de la mer Rouge et du golfe d'Aden. La limite occidentale de leur aire de répartition géographique correspond à la frontière orientale de celle de *Papio anubis*. À en croire les observations, les babouins hamadryas mangent plus de végétaux feuillus que les babouins olive, plus omnivores, ce qui se traduit par un régime plus riche en fibres.

En théorie, compte tenu de leurs régimes alimentaires distincts, les babouins hamadryas et les babouins olive devraient différer dans l'abondance et les types de microbes dont ils ont besoin pour digérer les aliments végétaux. C'est bien ce que nous avons confirmé avec Steven Leigh, de l'université du Colorado, à Boulder, et ses collègues. Ainsi, nous avons observé que le microbiote du babouin hamadryas est plus riche en bactéries cellulolytiques, c'est-à-dire qui dégradent les parois cellulaires des feuilles, que celui du babouin olive, conformément à ce que laissait présager leurs régimes alimentaires. On en déduit que le babouin hamadryas a plus à gagner d'un bain de soleil matinal que le babouin olive.

Nos résultats corroborent l'hypothèse d'Elizabeth Thomas selon laquelle les Égyptiens auraient vu des babouins hamadryas «accueillir le disque solaire». Ils expliquent également, au moins en partie, pourquoi les Égyptiens vénéraient *P. hamadryas* plutôt que *P. anubis*: celui-ci ayant une écologie alimentaire à part, ses comportements résonnaient moins avec les croyances religieuses en vigueur.

Quelle que soit la raison de leur dévotion pour cette espèce, les Égyptiens de l'Antiquité se donnaient beaucoup de mal pour acquérir des babouins hamadryas vivants. La demande

Le babouin *Papio hamadryas* était déifié dans l'Égypte ancienne, à l'inverse du babouin olive *P. anubis*.



Sur cette peinture murale de la tombe thébaine n° 100, datant de la fin du ^{xv}^e siècle avant notre ère, une délégation venue de Nubie (dans le sud de l'Égypte) défile avec un babouin hamadryas, parmi d'autres marchandises de luxe et animaux exotiques. Ces articles étaient importés du pays de Pount, un royaume mystérieux que l'on situe sur les bords sud de la mer Rouge.

pour ces animaux, ainsi que pour d'autres produits de luxe, notamment l'or, l'encens et l'ivoire, a façonné le commerce mondial et le cours de l'histoire.

En 1906, Theodore Davis, un avocat et financier américain haut en couleur, a découvert cinq momies de *P. hamadryas* dans la vallée des Rois. Les momies provenaient de tombes attribuées au roi Amenhotep II ou Horemheb, tous deux de la première dynastie du Nouvel Empire (la XVIII^e, si l'on se reporte à l'histoire entière). La tombe du père d'Amenhotep II, Thoutmôsis III, contenait le crâne d'un

babouin qui avait apparemment été déballé d'une momie puis jeté par des pilliers. Bien que l'on connaisse des représentations plus anciennes, ces momies sont les premiers restes physiques connus de babouins hamadryas en Égypte. L'apparition de *P. hamadryas* dans ces contextes funéraires de haut rang suggère qu'il a été importé à grands frais. Selon Salima Ikram, de l'université américaine du Caire, ces babouins étaient des animaux de compagnie très appréciés et les symboles d'un statut social élevé. Leur présence dans les tombes royales et la haute qualité de leur momification, avec des longueurs prodigieuses du lin le plus fin, témoignent de leur valeur. Seuls les Égyptiens les plus riches pouvaient se les offrir.

BIENVENUE EN TERRE INCONNUE

Pour déterminer d'où venaient les babouins hamadryas, nous avons analysé deux momies, dont l'une était EA6736, que nous avons citée plus haut. Les deux spécimens avaient été achetés par Henry Salt, consul général britannique en Égypte de 1816 à 1827, puis acquis par le British Museum. Bien que l'âge de ces momies ne soit pas connu avec autant de précision que celui des momies mises au jour par Theodore Davis, elles datent vraisemblablement du Nouvel Empire.



Les textes et les inscriptions de cette époque indiquent que les Égyptiens utilisaient leur port de Mersa Gaouasis pour mener des expéditions maritimes vers le mystérieux pays de Pount, un royaume lointain également nommé Ta Nétjer, soit « pays du dieu ». Cette région regorgeant de produits de luxe très recherchés a eu une importance historique considérable. L'historien britannique John Keay a décrit la route maritime de l'Égypte vers le Pount comme la première grande étape ayant mené à la route des épices, un réseau commercial qui a façonné la géopolitique mondiale pendant des millénaires. Mais il y a un problème, comme l'a observé l'archéologue Jacke Phillips en 1997 : « Pount n'a pas encore été situé avec certitude sur une carte, et aucun vestige archéologique attestant ce royaume n'a jamais été découvert. » Les babouins hamadryas peuvent-ils nous aider ?

Si les Égyptiens se fournissaient en singes à Pount, alors retracer plus précisément l'origine géographique des spécimens momifiés aiderait à localiser ce lieu légendaire. C'est possible grâce à l'analyse de la composition chimique de leurs tissus. Notre groupe s'est intéressé au strontium et à ses isotopes dont les proportions dans la roche-mère varient d'un endroit à l'autre. Cet élément passant dans le sol et l'eau puis entrant dans la chaîne

alimentaire, le rapport des différents isotopes dans les dents d'un animal, qui se développent tôt, renseigne sur son lieu de naissance. De même, le strontium présent dans les os et les poils, qui évoluent tout au long de la vie, informe sur le lieu où il vivait juste avant sa mort.

Nous avons comparé les compositions en strontium des os et des dents des momies avec celles des babouins vivant dans diverses régions d'Afrique. Notre analyse indique que les animaux embaumés sont nés hors d'Égypte, dans une région du sud de la mer Rouge, qui englobe les actuels Éthiopie, Érythrée, Djibouti et Somalie. C'est justement là que la plupart des historiens s'accordent à situer le pays de Pount, sur la base d'écrits et d'images de plantes et d'animaux. Le royaume et l'aire de répartition des *P. hamadryas* se superposent et confirment les hypothèses des spécialistes.

On peut se demander ce que les commerçants de Pount pensaient de l'obsession des Égyptiens pour les babouins. Il est tentant de supposer qu'ils n'étaient que trop désireux d'échanger des trublions agités contre des produits égyptiens. Et c'est sans doute grâce à ces différences culturelles que nous pouvons éclairer l'une des plus importantes routes commerciales de l'histoire de l'humanité. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Dominy et al., **Mummified baboons reveal the far reach of early Egyptian mariners**, *eLife*, 2020.

K. Amato et al., **Convergence of human and Old World monkey gut microbiomes demonstrates the importance of human ecology over phylogen**, *Genome Biology*, 2019.

E. Kelley et al., **Behavioral thermoregulation in *Lemur catta* : The significance of sunning and huddling behaviors**, *Am. J. Primatol.*, 2016.

A. Webber et C. Hill, **Using participatory risk mapping (PRM) to identify and understand people's perceptions of crop loss to animals in Uganda**, *Plos One*, 2014.

L'ère des tempêtes de vapeur

Pluies torrentielles, ouragans intenses, inondations éclair... tous ces événements extrêmes dont la fréquence et l'intensité augmentent avec le réchauffement climatique ont une même source d'énergie : la vapeur d'eau de l'atmosphère.

L'été 2021 a été un avertissement douloureux de la météo extrême que nous réserve un monde qui se réchauffe. À la mi-juillet, des tempêtes dans l'ouest de l'Allemagne et en Belgique ont déversé jusqu'à 20 centimètres de pluie en deux jours. Dans certains villages, les inondations ont déraciné des bâtiments entiers avant de les jeter dans les rues.

Une semaine plus tard, la province chinoise du Henan a reçu l'équivalent d'une année de pluie (soit plus de 60 centimètres) en trois jours seulement. Des centaines de milliers de personnes ont fui les rivières qui étaient sorties de leur lit. Dans la capitale locale, Zhengzhou, des internautes ont mis en ligne des vidéos montrant des passagers piégés à l'intérieur des rames de métro inondées, tendant la tête vers le plafond pour profiter de la poche d'air qui régressait face à la montée rapide des eaux. À la mi-août, une déviation marquée du *jet stream* (ou « courant-jet »), un courant de vents violents qui soufflent d'ouest en est et font le tour de l'hémisphère Nord, a provoqué dans le Tennessee des pluies torrentielles qui ont relâché plus de 43 centimètres d'eau en seulement vingt-quatre heures; des inondations catastrophiques ont tué au moins vingt personnes. Aucune de ces tempêtes n'était un ouragan ou une dépression tropicale.

Peu après, cependant, l'ouragan Ida tourbillonnait dans le golfe du Mexique, devenant la neuvième tempête tropicale de cette saison particulièrement active de l'Atlantique Nord. Le 28 août, Ida se limitait à une tempête de catégorie 1, avec des vents soutenus de 130 kilomètres par heure. Moins de vingt-quatre heures plus tard, elle explosait en catégorie 4, se renforçant à une vitesse presque deux fois plus élevée que celle utilisée par le Centre américain des ouragans pour définir une tempête qui s'intensifie rapidement. Ida a frappé la côte de la Louisiane avec des vents de 240 kilomètres par heure. Plus d'un million de personnes sont restées sans électricité et plus de 600 000 sans eau pendant plusieurs jours.

Le point commun de tous ces événements destructeurs est la vapeur d'eau atmosphérique. La vapeur d'eau – version gazeuse de la molécule H_2O – joue un rôle prépondérant dans l'alimentation des tempêtes dévastatrices et l'accélération du changement climatique. En même temps que les océans et l'atmosphère se réchauffent, de l'eau additionnelle s'évapore dans l'air. Un air plus chaud, en retour, peut contenir davantage de vapeur avant que celle-ci ne se condense sous forme de gouttelettes en nuages qui provoqueront des pluies diluviennes. La quantité de vapeur dans l'atmosphère a augmenté de 4% à l'échelle mondiale depuis le milieu des années 1990. Le chiffre

L'ESSENTIEL

À cause du réchauffement planétaire, l'atmosphère se charge de plus en plus en humidité.

> Cette vapeur supplémentaire nourrit en énergie les tempêtes de toutes sortes, intensifiant notamment les ouragans et les pluies diluviennes.

> De plus, par forte chaleur, l'humidité accrue de l'atmosphère empêche l'évaporation de la sueur, mettant en danger la santé humaine et animale.

> Les météorologues tentent de mieux prévoir ces événements extrêmes, notamment en scrutant en profondeur l'une des premières sources de vapeur atmosphérique : les océans.

L'AUTRICE



JENNIFER FRANCIS
météorologue au Centre de recherche climatique Woodwell, spécialiste du réchauffement de l'Arctique et de l'étude de la vapeur atmosphérique

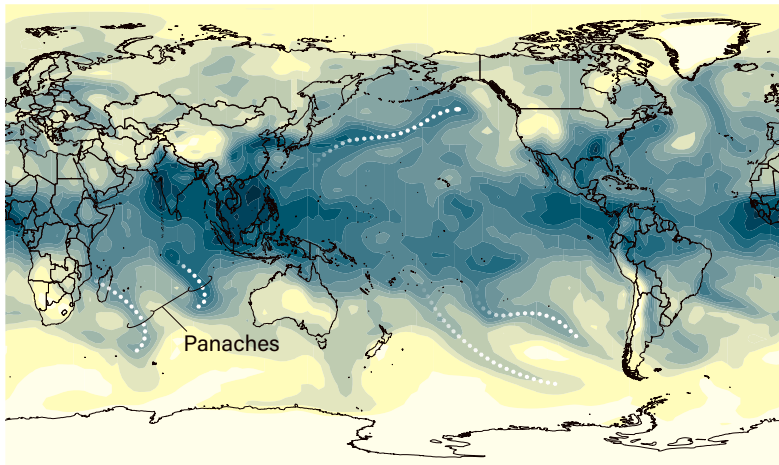
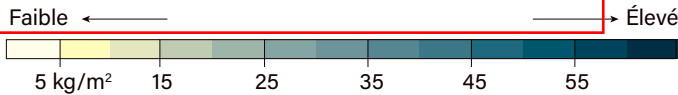


UN MONDE PLUS HUMIDE

L'humidité atmosphérique est répartie de façon inégale sur le globe. Elle abonde généralement dans les latitudes équatoriales et se raréfie vers les pôles, mais les tempêtes et les vents peuvent aussi souffler des panaches de vapeur d'eau tropicale dans ces directions. La quantité de vapeur d'eau en suspension dans l'air augmente globalement à mesure que la planète se réchauffe, au-dessus des océans et encore plus au-dessus des terres.

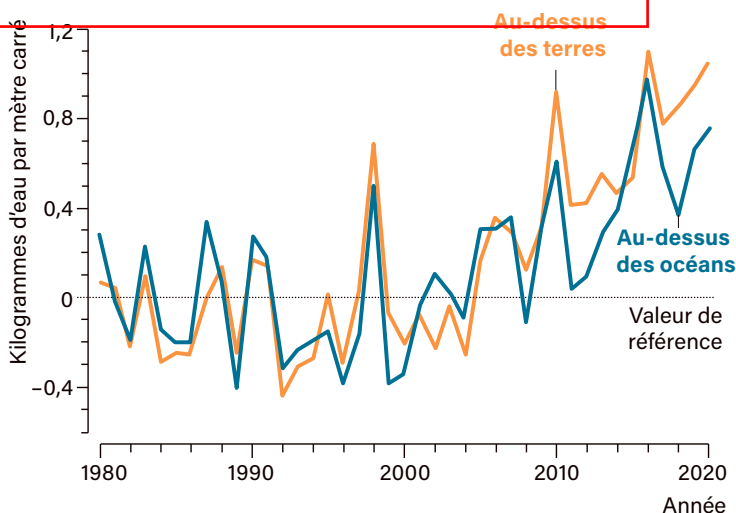
L'humidité dans l'atmosphère le 31 août 2021

La couleur indique le nombre de kilogrammes d'eau présents dans une colonne verticale de l'atmosphère ayant pour base 1 mètre carré de la surface de la Terre, si toute l'humidité se condensait et tombait. La signature de l'ouragan Ida est la petite tache sombre dans le sud-est des États-Unis.



Une hausse de la quantité de vapeur d'eau atmosphérique

Ces dernières années, la quantité d'humidité a augmenté au-dessus des océans et des continents par rapport à la valeur moyenne mesurée entre 1981 et 2010.



paraît faible, mais il a d'énormes conséquences sur le système climatique. Une atmosphère enrichie en vapeur d'eau nourrit en énergie et en humidité les tempêtes de toutes sortes, dont les orages d'été, les ouragans et même les tempêtes de neige. La vapeur supplémentaire contribue également à l'intensification accélérée des tempêtes tropicales comme Ida, ce qui laisse très peu de temps à la sécurité civile pour avertir les personnes exposées au danger.

Les scientifiques ont compris depuis longtemps que le réchauffement climatique enrichirait le ciel en vapeur d'eau et que le phénomène se traduirait par des « orages de vapeur », des monstres météorologiques crachant pluie et neige. Les mesures confirment aujourd'hui que les précipitations frappent le monde plus durement qu'avant, et à un rythme plus soutenu. En août 2017, par exemple, l'ouragan Harvey avait déversé la quantité ahurissante de 1,5 mètre de pluie en cinq jours sur certains quartiers de Houston, aux États-Unis. Une analyse a conclu que le changement climatique a rendu ces précipitations record trois fois plus probables et 15% plus intenses.

Contrairement à la plupart des autres gaz atmosphériques, la vapeur d'eau n'est pas répartie uniformément sur le globe. Elle abonde dans les régions tropicales humides à cheval sur l'équateur et forme parfois de longs panaches d'air humide qui s'étendent vers les pôles, plus froids et plus secs, causant en chemin des précipitations violentes et durables sur les régions des moyennes et hautes latitudes. Ces rivières de chaleur et d'humidité contribuent à équilibrer la distribution de l'énergie atmosphérique de la Terre et dégénèrent en de puissants orages de vapeur le long de leur trajectoire.

UNE POMPE À ÉNERGIE

Quand nous transpirons sous un soleil brûlant ou lorsque nous faisons bouillir une casserole d'eau, nous convertissons de l'eau liquide en vapeur. De même, la chaleur du système climatique provoque l'évaporation dans l'air de l'eau contenue dans les sols humides, les plantes, les océans, les lacs et les cours d'eau. Or la vapeur transporte avec elle une forme d'énergie appelée « chaleur latente ». Si la vapeur se condense ensuite et redevient liquide – formant un nuage ou la rosée matinale –, cette chaleur est libérée dans l'atmosphère, où elle crée une bulle d'air chaud. Parce qu'elle est plus légère que l'air environnant, cette bulle s'élève. Comme les températures sont généralement plus fraîches en altitude, la bulle continue parfois à monter et à grossir en accumulant de la chaleur due à la transformation de vapeur en gouttelettes de nuage. Si vous avez déjà traversé en avion un gros nuage en forme de chou-fleur, vous avez ressenti la turbulence créée par ces colonnes d'air ascendant.

La chaleur latente est le principal carburant des ouragans, orages et épisodes de mauvais temps. L'énergie qu'elle contient est considérable; dans un ouragan typique, la quantité d'énergie thermique libérée en une journée représente plus de 200 fois l'énergie de toute l'électricité produite dans le monde par jour.

La conséquence la plus inquiétante d'une atmosphère enrichie en vapeur d'eau est peut-être la fulgurance avec laquelle les tempêtes tropicales s'intensifient. Il existe deux critères pour déclarer qu'une tempête est en train de grossir rapidement: soit la vitesse maximale des vents a augmenté d'au moins 30 nœuds (55 kilomètres par heure) en vingt-quatre heures, soit la pression au centre du Goliath climatique a chuté au moins de 42 millibars sur la même période. La probabilité d'observer dans l'année une tempête s'intensifier rapidement a été multipliée par cinq au cours de ces quarante dernières années. En 2020 seulement,

dans l'Atlantique, dix cyclones se sont comportés ainsi: Hanna, Laura, Sally, Teddy, Gamma, Delta, Epsilon, Zeta, Eta et Iota. En 2021, cinq des six ouragans de l'Atlantique qui se sont formés à la mi-septembre ont subi une intensification rapide, notamment Ida et Nicholas.

Des recherches récentes valident ce que suggérait le bon sens physique: ce crescendo puise sa source dans l'océan, qui se réchauffe et injecte davantage d'humidité et d'énergie, sous forme de chaleur latente, dans l'atmosphère. Les océans absorbent environ 90% de la chaleur piégée par les gaz à effet de serre que nous, humains, émettons. Cette chaleur augmente la température de l'eau, tant en surface qu'en profondeur. Depuis plus de vingt ans, la majorité de l'océan Atlantique nord tropical est ainsi anormalement chaude, ce qui entraîne un excès d'évaporation qui alimente non seulement de puissants ouragans, mais aussi les tempêtes non tropicales.

Le 29 août 2021, l'ouragan Ida a déversé 43 centimètres de pluie sur la ville de LaPlace, dans la banlieue de La Nouvelle-Orléans.



L'augmentation de la vapeur d'eau n'est cependant pas le seul impact du changement climatique sur les tempêtes tropicales. La diminution du cisaillement du vent (la différence de vitesse ou de direction entre les vents proches du sol et ceux qui soufflent dans les hautes couches de l'atmosphère) favorise également le développement des tempêtes, car les colonnes d'air ascendant risquent moins d'être déchirées. D'autres modificateurs de ces phénomènes sont à l'étude, notamment les changements dans les concentrations de particules de poussière et de pollution dans l'air, ainsi que les différences dans le réchauffement de l'atmosphère entre la basse et la haute altitude, qui influent sur la vitesse à laquelle les bulles d'air chaud s'élèvent.

UNE CHALEUR MORTELLE

La menace que l'augmentation de la vapeur d'eau fait peser sur nos sociétés va bien au-delà des tempêtes. La moiteur de l'air contribue à

rendre les nuits de canicule encore plus intolérables pour les populations fragiles. Depuis le milieu des années 1990, les températures minimales nocturnes mesurées en été au-dessus des continents augmentent plus vite que les minimales diurnes. La raison ? Comme la vapeur d'eau est un gaz à effet de serre, un surcroît d'humidité chauffe l'atmosphère : la chaleur qui s'échapperait normalement dans l'espace la nuit est au contraire piégée, empêchant le refroidissement de la surface de la Terre. Et contrairement au dioxyde de carbone, qui se répand dans le monde entier quel que soit son lieu d'émission, la vapeur a tendance à stagner localement.

En outre, une humidité élevée empêche l'évaporation de la sueur, le système de refroidissement naturel du corps, ce qui entraîne une surchauffe et nuit au sommeil. L'une des mesures de cet inconfort est l'indice de chaleur, qui combine les effets de la température et de

EN FRANCE, UN AVENIR INCERTAIN SOUS INFLUENCE DE LA MÉDITERRANÉE

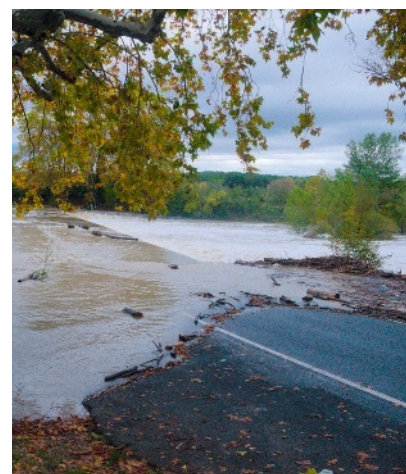
L'augmentation des précipitations extrêmes, prévue par les modèles numériques de climat, est clairement observée dans les régions continentales des moyennes latitudes. Dans les régions tropicales et subtropicales, l'effet est encore incertain. Quant à l'échelle plus petite, des différences régionales apparaissent. Pourquoi ? La météo en un lieu donné est en général sous l'influence de la localisation géographique, de la présence de côtes, de montagnes et du type de sol. Localement, les précipitations sont ainsi liées à des processus physiques différents : aux mouvements météorologiques de grande échelle, comme les fronts et les cyclones, ou alors aux mouvements verticaux de l'air liés aux orages ou aux reliefs. Les détails du sol, ou la température de la mer et d'autres phénomènes influent de façon plus ou moins marquée. L'augmentation de l'humidité intervient de manière différente dans chacun de ces mécanismes.

Qu'annoncent les modèles pour la France, dans les prochaines décennies ? L'augmentation des précipitations extrêmes devrait être à peu près uniforme sur tout le pays. La région méditerranéenne est néanmoins celle où l'impact pourrait être le plus fort. En effet, le Sud-Est connaît déjà en temps normal des épisodes de pluie plus intense, en particulier à l'automne. À cette saison, les grandes perturbations venant de l'Atlantique rencontrent une Méditerranée encore très chaude, ce qui crée des situations de très forte instabilité,

dont les célèbres épisodes « cévenols » qui déversent des torrents de pluie sur le sud du Massif central. Les météorologues prévoient que ces événements méditerranéens continueront à augmenter dans le futur, à cause de l'humidité, mais surtout à cause de l'augmentation de température de la Méditerranée. Difficile aujourd'hui de préciser si le changement climatique modifiera le troisième ingrédient, les perturbations atlantiques.

D'un point de vue concret, on peut se poser la question aujourd'hui : observons-nous déjà une augmentation des inondations et de crues en France ? Il est difficile d'y répondre à vrai dire. De nombreuses incertitudes sans lien avec la météo planent sur cette évaluation. L'ampleur des précipitations n'est en effet pas l'unique facteur de risque. La vulnérabilité des populations dépend aussi de la gestion du territoire. Les qualités et densité du bâti, la bétonisation, les pratiques agricoles, variables selon les régions, influencent énormément les dégâts occasionnés par un épisode de pluie extrême, et parfois ces paramètres jouent un rôle aussi important que ce qui tombe sur nos têtes. Comprendre exactement leur impact à l'échelle du territoire et leur évolution future reste toutefois délicat.

Pour revenir à la météorologie, les épisodes méditerranéens illustrent la complexité de la physique des pluies. Si on imagine que la pluie est comme un seau que l'on renverse, l'augmentation de l'humidité atmosphérique ne fait que remplir un peu plus ce seau. Certes,



Une inondation à Villetelle, dans l'Hérault, à la suite d'un épisode cévenol survenu en octobre 2021.

mais de nombreuses variations autour de ce mécanisme central pourraient survenir à l'avenir : il pourrait y avoir plus de seaux (plus de perturbations) ou des seaux qui se renversent lentement ou d'un seul coup (plus ou moins d'instabilité), ou encore d'autres effets physiques plus complexes.

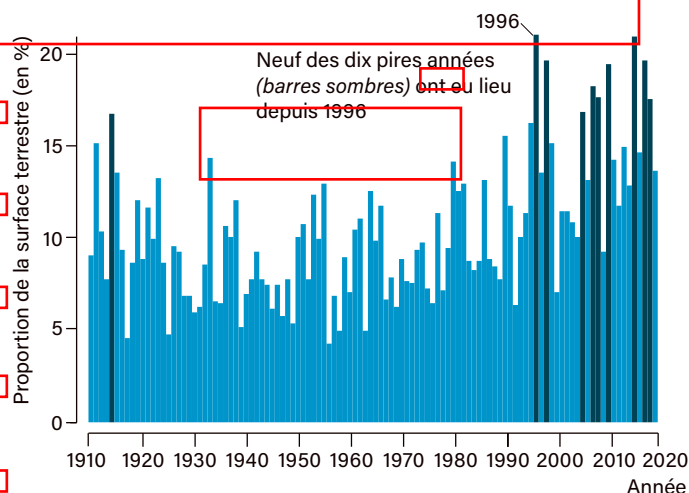
Dès lors, une question générale se pose : allons-nous vers un monde où la météo restera à peu près celle que l'on connaît en termes de phénomènes, mais où chacun de ces phénomènes sera un peu plus chaud et un peu plus humide ? Ou verrons-nous une météorologie encore inconnue émerger ?

FABIO D'ANDREA

Laboratoire de météorologie dynamique,
Ecole normale supérieure de Paris

DES PLUIES PLUS ABONDANTES

Les chutes catastrophiques de pluie et de neige sont plus fréquentes qu'auparavant, car le réchauffement de l'air et des océans produit davantage de vapeur dans l'atmosphère. Une tempête qualifiée d'« extrême » déverse plus de précipitations en une seule fois que le cumul de 90 % des tempêtes de l'année. Ces dernières décennies, ces épisodes se sont multipliés dans de nombreuses zones urbaines et rurales et deviendront de plus en plus la norme.



Proportion de la superficie des États-Unis (les 48 États contigus) où des pluies ou des neiges extrêmes tombées en une seule journée ont largement dépassé la valeur moyenne des précipitations annuelles.

accroît l'effet d'îlot urbain de chaleur. En juillet 2020, l'indice de chaleur de Houston a dépassé les 43 °C, bien au-delà du pénible.

Si les gaz à effet de serre continuent de s'accumuler dans l'atmosphère, ces conditions deviendront bientôt monnaie courante dans de nombreuses villes du Sud et des latitudes moyennes, comme Atlanta et Washington. Avant 2000, la capitale des États-Unis connaissait en moyenne une nuit tous les cinq ans avec une température minimale supérieure à 27 °C. Depuis, ces nuits torrides se produisent environ deux fois par an, soit dix fois plus en seulement vingt ans.

Pourtant, c'est dans les tropiques que les pays souffriront – et souffrent déjà – le plus. En mai 2015, une sévère vague de chaleur, qu'il serait peut-être préférable de qualifier de « vague de vapeur », a frappé l'Inde et le Pakistan. Les indices diurnes de chaleur ont dépassé 46 °C pendant plusieurs jours, et l'humidité élevée a empêché le refroidissement nocturne; plus de 3 500 personnes ont succombé à ces conditions étouffantes. Lorsque le changement climatique ajoutera un autre demi-degré au réchauffement, le nombre de personnes menacées par les chaleurs extrêmes doublera pour atteindre environ 500 millions dans le monde.

UN AMPLIFICATEUR DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Comme si les tempêtes intensives et les nuits étouffantes ne suffisaient pas, la vapeur d'eau aggrave également le réchauffement climatique. La vapeur d'eau est de loin le plus important gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Elle absorbe bien plus d'énergie infrarouge émise par la Terre que les autres gaz. Or même si des « boucles de rétroaction » (des interactions entre phénomènes qui jouent le rôle d'amplificateurs), telles que la disparition de la glace de mer, font régulièrement la une des médias, celle de la vapeur d'eau – le réchauffement entraîne l'évaporation, qui piège la chaleur, créant ainsi un réchauffement encore plus important – est la plus forte du système climatique.

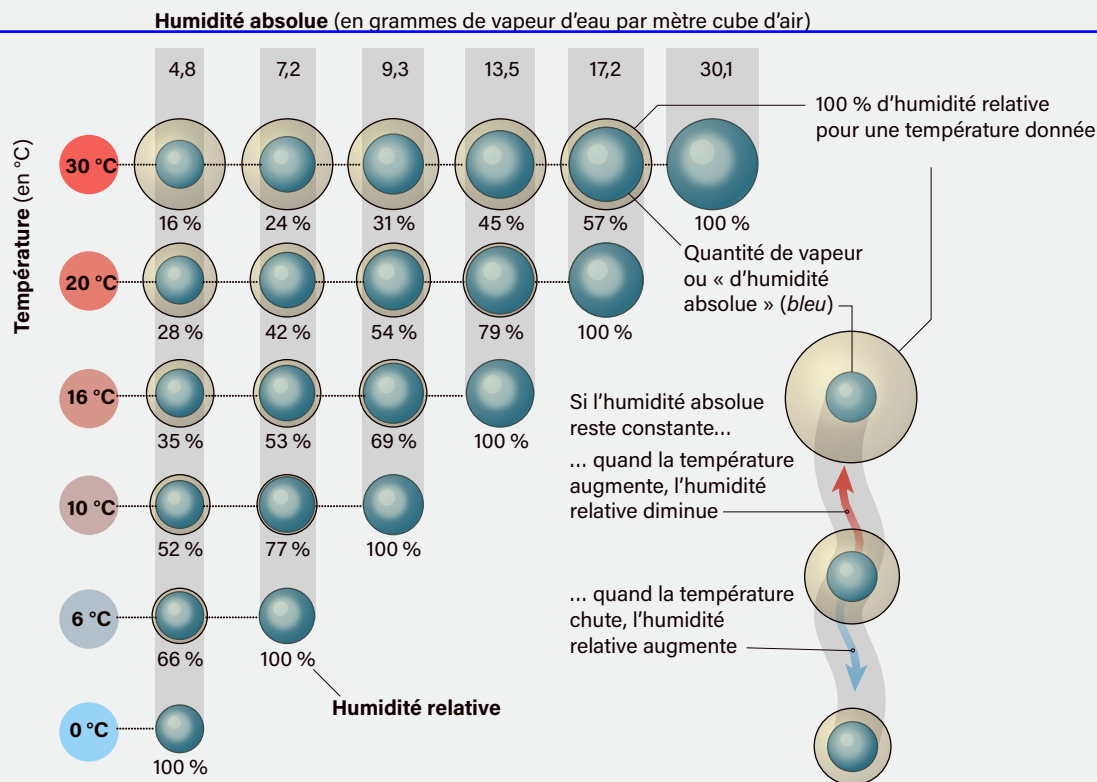
Le renforcement des vagues de chaleur dans l'Arctique, en nombre comme en sévérité, est clairement le symptôme de l'arrivée plus fréquente et plus durable de bouffées d'air chaud et humide en provenance de latitudes plus basses – ces panaches qui s'étendent vers le nord à partir des tropiques. En janvier 2021, par exemple, les températures ont dépassé de 20 °C la normale dans de vastes zones de l'océan Arctique. L'augmentation des vagues de chaleur dans l'Arctique, en particulier pendant l'hiver, ralentit le gel annuel de la glace de mer et contribue à la disparition de la couverture de glace.

l'humidité pour représenter le stress réellement ressenti par le corps. Un indice supérieur à environ 38 °C est considéré comme dangereux; une exposition prolongée peut être fatale, en particulier pour les personnes âgées et les nourrissons. La chaleur tourmente également le bétail et les animaux domestiques. Sans refroidissement nocturne, elle s'accumule par ailleurs dans les sols, où elle tue certaines plantes et insectes tout en permettant à d'autres espèces, qui aiment la chaleur, de prospérer. Selon une déclaration sur le changement climatique et la santé signée en 2021 par un groupe de trente-deux organisations américaines de santé, la chaleur nocturne augmente également le risque d'exposition aux maladies transmises par les insectes et menace tout autant humains, animaux et cultures.

Le danger associé à la chaleur nocturne guette non seulement les pays tropicaux, mais de plus en plus aussi les territoires très éloignés de l'équateur. Les villes situées le long de la côte américaine du golfe du Mexique ont déjà dépassé le seuil d'alerte à de nombreuses reprises. Le réchauffement à Houston a augmenté de plus de 2 °C depuis 1970 en raison de la proximité de la ville avec le golfe du Mexique et de son développement galopant et tentaculaire, qui

L'HUMIDITÉ, UNE DONNÉE RELATIVE

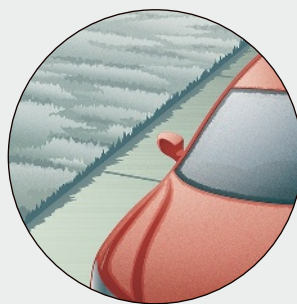
L'air qui nous environne est parfois collant ou sec. Cette impression est une question d'humidité relative. Dans un air à 0 °C, la concentration en vapeur d'eau ne dépasse pas environ 0,6 %. À 30 °C, l'air peut contenir beaucoup plus de vapeur, jusqu'à environ 4,2 %. À une température donnée, lorsque l'air renferme la quantité maximale de vapeur possible, son humidité relative est de 100 %.



Nuages : Nous ne pouvons pas voir la vapeur d'eau, mais s'il s'en ajoute à de l'air dont l'humidité relative est de 100 %, un nuage apparaît. Les nuages se forment simplement par condensation de l'excès de vapeur en gouttelettes d'eau liquide. Un nuage germe aussi quand de l'air ayant une humidité relative de 100 % se refroidit. Les nuages se forment dans de nombreuses circonstances, par exemple quand de l'air froid avec une humidité relative inférieure à 100 % souffle de la terre ferme vers l'océan, où l'évaporation augmente l'humidité relative.



Brouillard : Le brouillard est un nuage près du sol. Lorsque de l'air chaud se déplace au-dessus d'une zone plus froide – comme lorsqu'un vent tiède souffle en été sur les eaux côtières froides de l'ouest de la Bretagne – la vapeur d'eau se condense et engendre du brouillard. Lorsque l'air chaud s'élève à une altitude plus élevée et plus fraîche – par exemple lorsque les vents soufflent sur le versant d'une montagne –, du brouillard ou des nuages peuvent se former. Enfin, après une journée chaude, lorsque l'air nocturne rayonne de l'énergie infrarouge vers l'espace, sa température se refroidit et un brouillard matinal se forme parfois sur les champs et les vallées.



Rosée et givre : Le rayonnement de chaleur d'une nuit claire et calme est susceptible de créer de la rosée ou du givre. Comparées à l'air, les surfaces perdent plus facilement de la chaleur par rayonnement infrarouge et se refroidissent donc plus rapidement. La vapeur d'eau contenue dans l'air qui entre en contact avec une surface plus froide se condense en gouttelettes sur l'herbe ou gèle en cristaux sur les pelouses et les pare-brise des voitures si la température est suffisamment basse.



Votre souffle : Lorsque vous expirez, votre souffle ajoute de la vapeur d'eau à l'air. Si vous exhalez suffisamment de vapeur pour que l'humidité relative dépasse 100 %, se forme temporairement un panache de buée, c'est-à-dire un petit nuage qui se dissipe rapidement lorsque les minuscules gouttelettes s'évaporent. Comme l'air frais contient moins de vapeur que le chaud, nous avons tendance à voir notre souffle les jours plus froids.

Le développement nuageux pourrait compenser l'effet de piégeage de la chaleur dû à l'apport d'humidité. En effet, si les nuages capturent la chaleur, ils réfléchissent aussi les rayons du soleil, d'où un effet de refroidissement. De fait, au-dessus des océans, le refroidissement a tendance à dominer. Néanmoins, l'influence du réchauffement l'emporte dans les hautes latitudes. De récentes études suggèrent qu'en moyenne sur l'ensemble du globe, l'effet chauffant triomphe, ce qui engendre ainsi un autre cercle vicieux impliquant la vapeur d'eau.

MIEUX ANTICIPER LES TEMPÊTES DE VAPEUR

À quel avenir devons-nous nous attendre? Tant que les activités humaines continueront à émettre des gaz à effet de serre, le réchauffement des océans et de l'atmosphère se poursuivra, de l'eau supplémentaire s'évaporerait, et les tempêtes de vapeur comme les canicules humides se multiplieront. Les ouragans des catégories les plus élevées se produiront plus souvent, tout comme les tempêtes à développement rapide. Anticiper ces brusques événements représentera un défi pour les météorologues. Lorsque les tempêtes s'intensifieront près des côtes, comme cela a été le cas pour l'ouragan Ida, les responsables disposeront de très peu de temps pour sonner l'alerte et les gens n'auront que quelques heures pour évacuer.

Le principal obstacle à la prévision de ces événements surpuissants est le manque de mesures de la température sous la surface de la mer. Une couche profonde d'eau chaude contient beaucoup plus de « carburant » à tempête qu'une couche superficielle, mais les satellites ne mesurent que les températures en surface de l'océan. Les chercheurs tentent de trouver des moyens de déterminer la quantité d'énergie contenue dans la première centaine de mètres des eaux marines, principal réservoir où s'alimentent les tempêtes. Ils développent des sous-marins océaniques autonomes qui parcourent la partie supérieure de l'océan à différentes profondeurs tout en échantillonnant la température et la salinité. Ils reçoivent également l'aide de satellites capables de cartographier les variations du niveau de la mer : comme une couche profonde d'eau chaude se dilate par rapport aux zones adjacentes, le phénomène crée en surface une bosse visible de l'espace. Les données satellitaires sont extrêmement précieuses, mais nous avons également besoin d'instruments *in situ* pour mesurer la température, l'humidité et les vents. Nous continuerons donc de nous reposer sur les « chasseurs d'ouragans », ces avions qui volent vers les tempêtes pour larguer des appareils de mesure autour et à l'intérieur d'elles.

Le principal obstacle à la prévision de ces tempêtes est le manque de mesures de la température sous la surface de la mer

L'humidité provient d'une myriade de sources et affecte de nombreux processus atmosphériques. Les scientifiques ne comprennent pas complètement certaines de ces interactions, et les modèles numériques peinent encore à prévoir totalement l'influence de la vapeur d'eau dans un système climatique changeant. Même la réponse à une question apparemment simple comme « À quelle vitesse l'eau d'un océan ou d'un lac s'évapore-t-elle? » dépend de nombreux facteurs, tels que la différence entre la température de l'eau et celle de l'air juste au-dessus, la quantité de vapeur déjà présente dans l'atmosphère et la vitesse des vents. Sur terre, le calcul est encore plus complexe, car il fait intervenir des variables supplémentaires telles que le degré d'humidité du sol et le type de végétation qui y pousse.

Prédire ce qu'il adviendra de la vapeur une fois qu'elle entrera dans l'atmosphère est un autre défi. Est-ce qu'elle se condensera en nuages et alimentera une tempête, avant de retomber sous forme de pluie ou de neige? À moins qu'elle ne se condense sur les surfaces sous forme de rosée ou de givre? Ou encore qu'elle voyage sur des centaines, voire des milliers de kilomètres, à partir des tropiques vers les latitudes plus élevées? Toute erreur dans l'un de ces calculs affectera les prévisions des changements futurs de température et des perturbations atmosphériques.

Nous ne pouvons pas contrôler directement la quantité de vapeur d'eau présente dans le ciel. En revanche, nous pouvons la réduire indirectement en freinant le réchauffement causé principalement par nos émissions de dioxyde de carbone et de méthane, ainsi que par le défrichement des arbres qui contribuent à absorber le carbone de l'air. Si nous y parvenons, nous ralentirons l'intensification future des tempêtes de vapeur – et les ravages qu'elles causent. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Trambly et al., **Pluies extrêmes et crues : se préparer à leur intensification**, Pour la Science Hors-Série, février-mars 2021.

J. Francis et al., **Increased persistence of large-scale circulation regimes over Asia in the era of amplified Arctic warming, past and future**, *Scientific Reports*, 2020.

S. Shamekh et al., **How Do Ocean Warm Anomalies Favor the Aggregation of Deep Convective Clouds?**, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020.

J. Francis et S. J. Vavrus, **Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes**, *Geophysical Research Letters*, 2012.

La distribution électrique face aux défis de la prévision

L'arrivée massive de producteurs décentralisés d'électricité d'origine renouvelable, la nécessité d'anticiper des opérations de maintenance et l'évolution des usages sur le long terme demandent une prévision de plus en plus fine de la production et de la consommation d'électricité, notamment en fonction de la météo. Pour cela, Enedis développe divers modèles fondés sur l'intelligence artificielle et le *machine learning*.

En 2020, les énergies renouvelables ont représenté 26,9% de la consommation d'électricité en France métropolitaine, contre 23,1% l'année précédente. Parmi elles, l'éolien représente 8,8% de la fourniture totale d'énergie, le photovoltaïque 2,8%. Une croissance qui pose des défis quant à l'acheminement de cette électricité verte qui n'est pas produite à la demande, contrairement à celle des centrales. D'où le maître mot qui s'impose désormais chez tout distributeur

d'électricité: prévoir. «C'est indispensable en effet, insiste Pierre Mallet, directeur Recherche et Développement (R&D) chez Enedis. Nous devons prévoir à très long terme, jusqu'à vers 2050, pour dimensionner nos investissements en fonction de l'évolution des habitudes de consommation. Mais nous devons aussi prévoir à moyen terme la production et la consommation afin de planifier nos opérations de maintenance sur le réseau. Et enfin à court terme la consommation et la production d'origine renouvelable liée aux conditions météo.»

Dans le cas de l'éolien et du photovoltaïque, cela nécessite la mise au point de modèles qui permettront d'estimer la production à quatorze jours, soit le maximum des capacités de prévision de Météo-France. «Nous développons des modèles de prévisions de production (fondés sur l'intelligence artificielle et le *machine learning*) à partir des prévisions météorologiques de trois modèles différents, détaille Stéphanie Dubost, chargée des prévisions de production à EDF R&D. Deux modèles européens plus celui de Météo-France, qui nous donnent en variables d'entrée la force du vent, les températures, la pression atmosphérique, l'ensoleillement... L'objectif est de combiner ces modèles pour obtenir une prévision de production électrique concrète.»

Pour tirer le meilleur des modèles météo, les chercheurs attribuent à chaque modèle un coefficient en fonction de ses performances passées, afin de le pondérer.



Cette pondération permet d'obtenir *in fine* une prévision plus fiable que la plus fiable des prévisions de chaque modèle pris individuellement.

UNE MEILLEURE FIABILITÉ

Difficulté supplémentaire, ces prévisions doivent se faire à différentes échelles de temps. Or si les modèles météo donnent des estimations à quatorze jours, celles-ci se dégradent nettement au bout de sept. «Au-delà d'une semaine, Météo-France ne

fournit plus des données précises, mais des tendances. Impossible alors de faire des prévisions déterministes avec une seule valeur de production électrique. Nous parlons plutôt de "scénarios". Et nous préférons dire que, à quatorze jours, deux scénarios se dessinent plutôt que de prendre la valeur moyenne des deux scénarios qui pourrait ne correspondre à rien...»

À plus courte échéance, les prévisionnistes disposent de davantage d'outils, notamment des prévisions heure par heure. Mais prévoir la production d'une

ferme d'éoliennes ou d'un champ de panneaux photovoltaïques dans l'heure nécessite aussi une grande précision spatiale. Quelques nuages peuvent modifier considérablement la production solaire pendant quelques heures, mais il faut être sûr qu'ils passeront bien juste au-dessus des panneaux. Pour cela, il faut affiner leurs prévisions quasiment en temps réel avec d'autres types de données. «Les modèles mettent entre quatre et six heures à fournir un résultat. Nous cherchons à avoir des informations plus récentes qui nous permettent de savoir comment les prévisions ont évolué durant le temps du calcul. C'est le cas des photos satellites qui sont prises toutes les quinze minutes. Nous prévoyons le déplacement des masses nuageuses, puis nous faisons le lien entre le déplacement des nuages et la production. Les images satellites ont une grande portée, par contre la résolution est d'environ 5 kilomètres sur la France, ce qui n'est pas

**Combiner caméras au sol
et photos satellites
pour mieux traquer les nuages**

▶ toujours suffisant à la maille locale. Alors nous développons le recours à des caméras au sol tournées vers le ciel. Cette photographie du firmament au-dessus de l'installation à une précision très grande, mais sa portée est évidemment beaucoup moins large puisqu'elle se limite à ce qui se passe au-dessus du site. Néanmoins, c'est l'idéal pour prévoir l'ensoleillement d'une ferme solaire.» Dernière donnée: la remontée de production en temps réel. «Si je connais la production d'une centrale photovoltaïque à 9 h 30, je peux estimer qu'elle sera du même ordre à 10 heures. En tout cas, ce sera mieux que le modèle qui a tourné à partir d'images prises à minuit.»

Prévoir la production est une chose, mais anticiper la consommation est aussi nécessaire. «Le réseau est dimensionné pour qu'il n'y ait pas de contraintes lorsqu'il est dans son état nominal, rappelle Benoît Bouzigon, chef de projet au département Conduite d'Enedis. En revanche, s'il y a des incidents, du matériel endommagé, par exemple, il faut pouvoir se passer d'une partie du réseau le temps de faire la réparation. Nous devons prévoir la consommation et la production à la maille locale afin de ne pas se retrouver en contrainte. Ces prévisions sont aussi nécessaires afin de planifier les travaux de maintenance, pour remplacer des

infrastructures anciennes, ou en développer de nouvelles en vue d'une évolution du réseau sur le long terme, par exemple avec le développement de bornes de recharge rapide pour l'automobile ou le raccordement de producteurs ENR.»

LIMITER LES INCERTITUDES

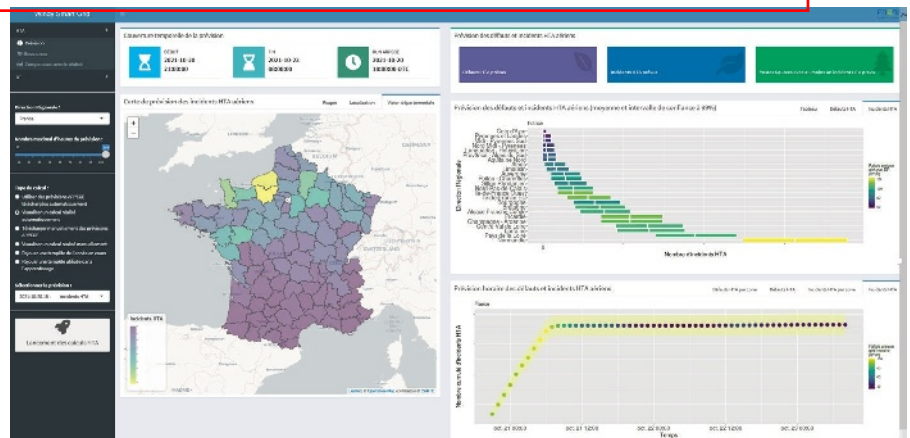
«Parfois, le raccordement d'un producteur éolien ou photovoltaïque génère localement des contraintes et nécessite des investissements supplémentaires, ajoute Benoît Bouzigon. Des offres alternatives permettent de les raccorder plus rapidement et à moindre coût en s'appuyant sur les

ESTIMER LES DÉGÂTS POTENTIELS GRÂCE À L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Dans la nuit du 20 au 21 octobre 2021, la majeure partie du nord de la France est balayée par la tempête Aurore. Près de 250 000 foyers sont plongés dans le noir. En 14 heures, 90% des clients sont réalimentés grâce au déploiement de la FIRE, la Force d'intervention rapide électricité d'Enedis. Ces agents en provenance de toute la France ont pu être mobilisés à l'avance grâce à un nouvel outil déployé cet hiver: Windy Smart Grid.

«Pour intervenir le plus rapidement possible, il est primordial d'avoir une estimation des dégâts potentiels, explique François Meyer, responsable de la gestion de crise à Enedis. Quelle ampleur d'incidents aurons-nous? Des poteaux effondrés? Des lignes arrachées? Sur quelle zone? Grâce aux prévisions de ce nouvel outil, nous pouvons mobiliser du personnel et du matériel, comme des groupes électrogènes, au bon endroit et en effectif suffisant.» Windy a passé avec succès ce premier test grandeur nature: il s'est montré capable de prévoir 87% des incidents s'étant effectivement produits sur le réseau moyenne tension (HTA). «Ce réseau est un enjeu majeur, rappelle François Meyer. Il est piloté par les ACR (Agences de conduite régionale) depuis lesquelles nous pouvons constater les incidents. Nous pouvons alors manœuvrer à distance le réseau (comme une déviation routière) afin de rétablir rapidement le plus de clients possible, c'est ce que nous appelons les "manœuvres". Ensuite, nous envoyons des équipes réparer sur place et, grâce à Windy, nous savons d'avance où ce sera nécessaire.»

L'outil commandé par Enedis en 2018 a demandé des mois de recherche au département R&D d'EDF. Il s'agissait de mettre au point un modèle capable d'anticiper les dégâts dus aux tempêtes, mais pas seulement. Les orages, la neige «collante», qui pèse sur les lignes,



ou les inondations peuvent aussi endommager le réseau. «Nous sommes partis sur un modèle dit "de Cox", à risques proportionnels, explique Grégory Michel, du département R&D d'EDF. Le principe consiste à additionner l'ensemble des risques sur l'ensemble des éléments du réseau qui peuvent tomber en panne. Nous appliquons ensuite des facteurs d'occurrences. Par exemple, si vous avez un réseau de 100 kilomètres et un autre de 200 kilomètres, il y a deux fois plus de chances qu'un événement se produise sur ce dernier.»

FAIRE PARLER LES DONNÉES

En plus de la mise au point et du paramétrage du modèle, il faut déterminer les données pertinentes en entrée pour parvenir à un résultat satisfaisant en sortie. «Il y a les conditions météorologiques classiques (vitesse du vent, précipitations...), mais pas seulement, reprend Grégory Michel. Nous cherchons à avoir une connaissance physique approfondie des mécanismes susceptibles d'endommager le réseau. Par exemple, un poteau peut s'effondrer à cause du sol devenu trop meuble.

À l'approche d'une tempête, il faut donc connaître la pluviométrie à cet endroit les jours précédents, et pas seulement la force du vent, pour savoir si le poteau tiendra le coup.» Autre aspect important: le «nettoyage» de la donnée. En effet, si le modèle est alimenté avec une quantité considérable d'informations, il ne travaillera que sur des valeurs moyennes. Or une tempête est par nature exceptionnelle. Le modèle doit retenir uniquement ces moments clés, qu'il faut savoir reconnaître dans les données. «Pour les mettre en exergue, nous concentrons l'apprentissage sur celles correspondant à la tempête, en mettant des seuils sur la puissance du vent par exemple.» Les données sélectionnées servent ainsi de base d'apprentissage au modèle, qui peut ensuite les relier aux conséquences réelles sur le réseau. Ainsi entraîné, il devient capable de faire ses propres prévisions. «L'outil a été déployé à la maille nationale durant l'hiver 2020-2021, avec des résultats excellents, conclut François Meyer. Pour l'hiver 2021-2022, il le sera cette fois à la maille régionale. Avec comme objectif de faire évoluer peu à peu cet outil vers le réseau basse tension.»



Intervention des équipes Enedis pour rétablir l'électricité dans les foyers à proximité de Quimper, après le passage de la tempête Zeus (mars 2017).

réseaux existants à condition qu'ils acceptent, quelques heures par an, de limiter leur production en cas de surcharge du réseau. Pour éviter le plus possible de se priver de ces énergies renouvelables, il faut affiner nos estimations et limiter les incertitudes. Pour cela, on améliore la «granularité» du réseau, que l'on peut se représenter comme un ensemble de points de consommation en aval d'un poste source.

35 ANNÉES DE DONNÉES

Enedis dispose d'ores et déjà de trente-cinq années de données sur la consommation, ce qui permet de se faire une bonne idée des variations saisonnières. Mais si celle des gros producteurs (entreprises, industries...) est relativement facile à prévoir, celle des particuliers est plus erratique. On compte une cinquantaine d'applications de l'électricité dans un foyer (chauffage, TV, frigo, éclairage...), dont l'utilisation relève de la vie privée. Comment anticiper dans ces conditions? Grâce aux corrélations. «Nous utilisons des modèles de type GAM (generalized additive model), explique Benoît Bouzigon. Cela

consiste à superposer les différents effets constitutifs du phénomène que nous cherchons à prévoir. Pour la consommation, il faut prendre en compte la météo (surtout la température), le jour de la semaine, les vacances ou un jour férié, et tout événement particulier, comme un match de football. Ensuite, vous établissez des corrélations entre ces différents paramètres et la consommation.»

ANTICIPER LES PERTES ÉLECTRIQUES

En plus de la production et de la consommation, un autre poste doit faire l'objet d'une estimation rigoureuse: les pertes électriques. «Une partie de l'électricité produite par les différentes sources disparaît via des pertes techniques dues aux phénomènes physiques que l'on ne peut pas éviter, notamment l'effet joule (échauffement qui se produit lors du passage du courant). Elles représentent 1 TWh par mois en moyenne, explique Audrey Lagache, prévisionniste à la division Bilan électrique et prévision d'Enedis. Il faut y ajouter les pertes non techniques, qui correspondent à du courant consommé mais non vendu à cause de fraudes, d'entreprises en faillite...»

Anticiper ces pertes est donc nécessaire pour que la consommation n'excède pas la production, ce qui mettrait le réseau en tension. «Pour éviter cela, nous achetons en permanence du courant auprès de divers producteurs, détaille Isabelle Jacob, qui dirige le département Bilan électrique et Marge brute d'acheminement d'Enedis. Mais ces achats se font heure par heure. Ce qui nous oblige à avoir des prévisions fiables à très court terme et à un pas de temps très fin.»

Les équipes chargées de compenser ces pertes sont donc amenées à développer leur propre outil de prévision. La prévision des pertes se fait à partir d'un polynôme de degré 2 (du type $ax^2 + bx + cy + d$), donnant les pertes en fonction de toute l'énergie injectée sur le réseau et de la production (variable x) et de la consommation des clients alimentés par de la moyenne tension sur le réseau (variable y). Le modèle

utilisé aujourd'hui par les prévisionnistes fournit un jeu de 4 coefficients (a, b, c, d), qui change selon la saison, les jours fériés. Cette présentation des pertes à l'aide d'un polynôme paraît simple... et c'est voulu. «La commission de régulation de l'énergie nous impose d'être transparents, rappelle Isabelle Jacob. Nous devons donc fournir une formule simple à comprendre à tous les acteurs de la production. Ce qui ne signifie pas qu'elle est simple à établir...»

En effet, pour prévoir les pertes, il faut donc prévoir les variables x et y du polynôme avec un excellent niveau de précision. Pour cela, on utilise une approche purement statistique, explique Audrey Lagache. «Nous cherchons à établir des corrélations entre divers facteurs (le plus important étant la météo) et les pertes mesurées, sans pour autant savoir comment ils sont reliés précisément. Pour cela, nous utilisons des algorithmes de machine learning et de l'intelligence artificielle qui vont permettre d'établir ces corrélations, qui peuvent être linéaires ou non linéaires et donc plus complexes. Ensuite, nous avons un gros travail de suivi quotidien des modèles pour guetter quand ils commencent à dériver et les corriger.» Autre aspect fondamental: la sélection des données en entrée des modèles de prévision. «Il y a potentiellement plusieurs centaines de variables disponibles. Il faut donc filtrer pour ne garder que ce qui est pertinent. Pour cela, nous utilisons nos connaissances métier, à savoir une connaissance approfondie des données récoltées sur la consommation et la production d'électricité en France pendant des décennies ainsi qu'une maîtrise poussée des méthodes statistiques de prévision.»

Le droit à l'erreur étant très mince, les prévisions de pertes sont régulièrement confrontées aux pertes effectivement constatées pour ajuster le modèle. Cette comparaison du «prévu» avec le «réalisé» constitue d'ailleurs une grande marge de progression. «Aujourd'hui, il faut attendre sept jours pour avoir un retour, souligne Audrey Lagache. C'est long pour corriger le modèle même si, en cas d'événement imprévu, comme une brutale vague de froid, nous pouvons modifier immédiatement le polynôme. À l'avenir, nous espérons avoir un retour à J+3 avec une optimisation des remontées d'informations du réseau.» Cet objectif nécessite de connaître en temps réel les données vitales du réseau jusque dans les endroits les plus reculés de tout le territoire, et de les centraliser. Un prochain défi? ■

Filtrer les données en entrée
les plus pertinentes
grâce aux connaissances métier

L'ESSENTIEL

> Le gallium et certains de ses alliages sont des métaux qui restent à l'état liquide à température ambiante, comme le mercure.

> La surface du gallium liquide s'oxyde très vite et forme une couche de protection, propriété intéressante dans divers contextes.

> Les propriétés du gallium et de ses alliages, encore peu explorées et comprises, pourraient donner lieu à de nombreuses applications.

> Contrairement au mercure, le gallium est peu toxique.

L'AUTEUR



MICHAEL DICKEY
professeur au département de chimie et génie biomoléculaire de l'université d'État de la Caroline du Nord à Raleigh, aux États-Unis.

Le gallium un métal liquide d'avenir

Conducteur, étirable, autocicatrisant, façonnable à l'envi, sensible aux signaux tactiles... Le gallium se révèle très prometteur dans des domaines aussi variés que l'impression 3D, l'électronique moléculaire ou la production de capteurs ultrasensibles.

Quand on parle de «métal liquide», on pense tout de suite au mercure, celui des anciens thermomètres, interdits à la vente en Europe depuis plus de dix ans, et aux petites billes argentées et dangereuses qui s'en échappent quand ils se brisent, ou à celui des chapeliers fous, intoxiqués par cet élément aux XVIII^e et XIX^e siècles. On se rappelle aussi du méchant dans le film *Terminator 2*, personnage dont le rendu visuel était fondé sur ce même mercure. Autant dire que l'expression «métal liquide» a des connotations plutôt négatives... Mais tout espoir de bonne réputation n'est pas perdu pour les métaux liquides, grâce au gallium (Ga).

Cet élément métallique a en effet un point de fusion proche des températures ambiantes, sans être toxique comme le mercure. Dès 1871, le chimiste russe Dmitri Mendeleïev avait prédit son existence d'après l'emplacement vide dans son tableau, et l'avait nommé eka-aluminium (car il est situé juste sous l'aluminium). Quatre ans plus tard, en 1875, le chimiste français Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran a confirmé l'hypothèse de Mendeleïev. Le mercure (Hg), pour sa

part, était déjà connu depuis plus d'un millénaire et on l'utilisait dans les thermomètres, les réactions électrochimiques et les plombages dentaires. Pourquoi ne pas avoir simplement remplacé le mercure toxique par du gallium?

En fait, ce dernier réagit vite avec l'oxygène: il se forme à sa surface une mince couche d'oxydation. La constitution d'oxydes en surface est un phénomène courant. Les métaux nobles tels que le platine et l'or sont de rares exemples de métaux qui ne s'oxydent pratiquement jamais. À l'inverse, le gallium, comme l'aluminium, s'oxyde presque instantanément (en quelques microsecondes dans l'air). Cette oxydation de surface est parfois un atout, car elle protège de l'oxydation le métal sous-jacent. Celle du gallium est cependant problématique pour les applications exigeant un métal qui s'écoule librement. Elle peut également entraver les réactions électrochimiques, et cela explique pourquoi les chimistes choisissent toujours le mercure plutôt que le gallium comme matériau d'électrode dans certaines expériences. Le gallium se corrode aussi dans l'eau, une des raisons pour lesquelles les dentistes ont longtemps continué à reboucher les caries avec des amalgames au mercure.

Malgré sa toxicité, le mercure n'est ainsi pas facile à remplacer. Depuis une dizaine d'années, cependant, le gallium et ses alliages liquides connaissent un regain d'intérêt, en raison d'un large éventail de propriétés que les chercheurs sont en train d'explorer.

IL FOND DANS LA MAIN

L'aspect le plus marquant du gallium est que ses propriétés électriques et thermiques sont celles d'un métal, et pourtant sa température de fusion est de seulement 30°C. Cette dernière est assez basse pour qu'il fonde au creux de la main. Une température susceptible d'être encore abaissée en y ajoutant d'autres métaux, tels que l'iridium ou l'étain. Les deux options les plus fréquentes sont l'alliage eutectique de gallium et d'indium, noté EGaIn («eutectique» qualifie un mélange de corps purs qui fond et se solidifie à température constante et de façon uniforme), et l'alliage eutectique de gallium, d'indium et d'étain, le Galinstan.

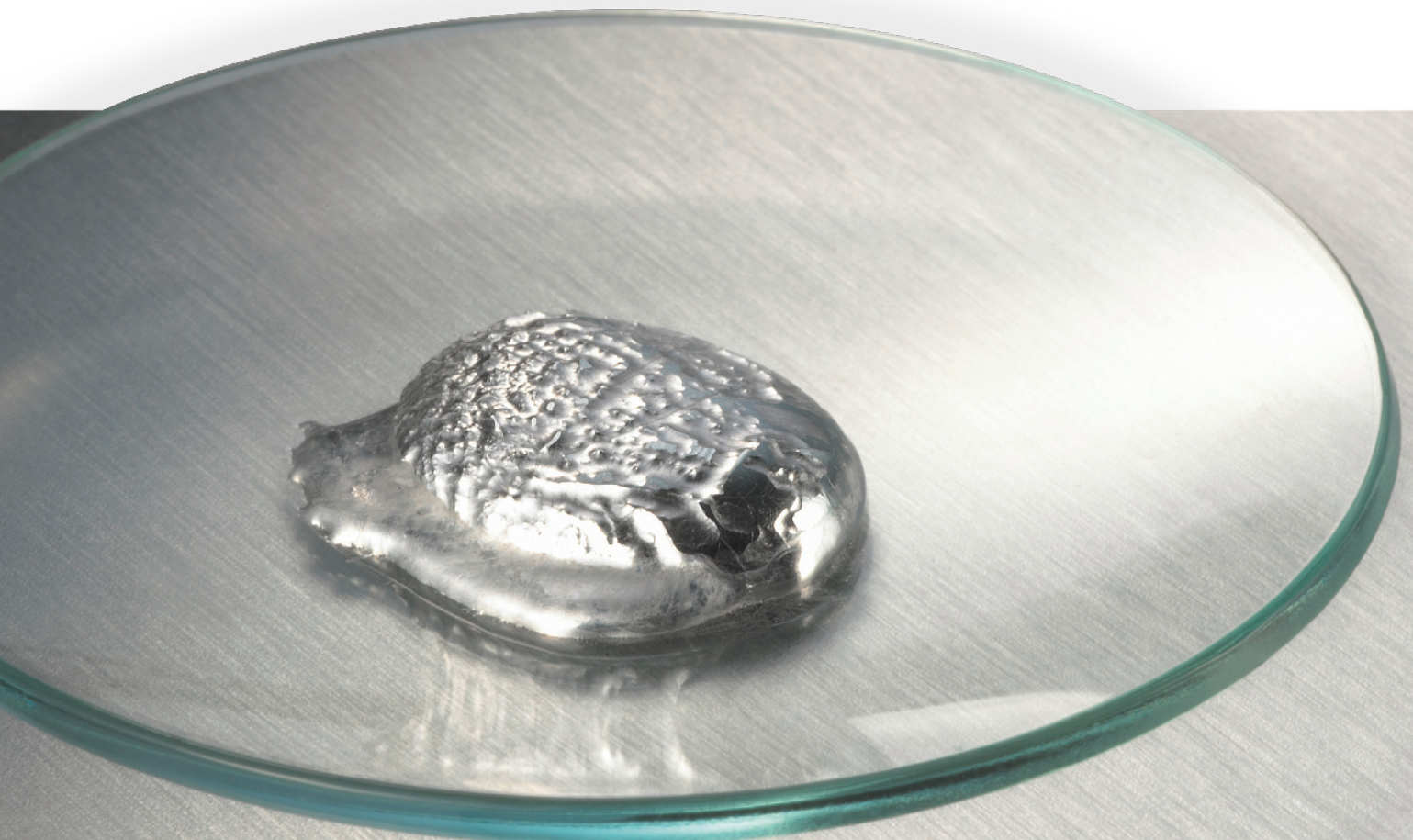
En théorie, les points de fusion et de solidification d'un matériau donné devraient être identiques. On pourrait donc s'attendre à ce que le gallium et ses alliages se solidifient quand la température passe sous le point de fusion. Toutefois, les liquides ont tendance à rester en surfusion, ce qui signifie qu'ils se

solidifient à des températures bien inférieures à leur point de fusion. L'expérience peut être menée avec une bouteille d'eau minérale au congélateur, où elle peut subsister à l'état liquide malgré la température bien en dessous de 0°C, mais la moindre perturbation déclenche le changement de phase de cet état métastable. De même, une fois fondus, le gallium et nombre de ses alliages restent liquides à température ambiante et au-dessous. Par exemple, pendant des mois, des chercheurs de mon laboratoire ont conservé du EGaIn liquide dans un congélateur à -15°C, soit 30°C de moins que le point de fusion du matériau. Il ne s'est pas encore solidifié.

Autre point commun avec l'eau, le gallium est l'un des rares matériaux qui se dilatent en se solidifiant. Il devient aussi meilleur conducteur électrique dans son état liquide, ce qui est également inhabituel pour un métal.

À température ambiante, le gallium a une pression partielle de vapeur (la pression due à la vapeur que le liquide dégage) nulle. Alors que l'eau, l'éthanol et d'autres liquides familiers s'évaporent dans les conditions ambiantes, ce n'est pas du tout le cas du gallium. Cela signifie que cet élément est manipulable sans masque, sans risque d'inhalation. En fait, il faut le chauffer au-dessus de 2400°C pour qu'il commence à bouillir. Et il

À température ambiante, le gallium est liquide. Une propriété rare pour un métal.



supporte aussi d'être placé sous vide, donc à très faible pression, des conditions souvent utilisées pour étudier les matériaux. Normalement, ces faibles pressions entraîneraient l'évaporation du liquide. Pas avec le gallium!

Comme la plupart des métaux fondus, le gallium a une faible viscosité: elle ne représente que le double de celle de l'eau. Sa tension de surface, notion qui traduit la cohésion d'un liquide et sa capacité à s'étaler ou mouiller une surface, est de 500 millinewtons par mètre (mN/m). C'est la plus élevée qui soit pour un liquide à température ambiante (par comparaison, la tension de surface de l'eau est de 72 mN/m, et celle de l'éthanol 22 mN/m). Ainsi, en l'absence de couche superficielle d'oxyde, le métal coule comme l'eau grâce à sa faible viscosité, et forme naturellement des gouttes bien sphériques à cause de sa tension de surface élevée (pour que l'énergie élastique emmagasinée par la surface soit minimale, la superficie doit être minimale, ce qui, pour un volume donné de liquide, correspond à une sphère).

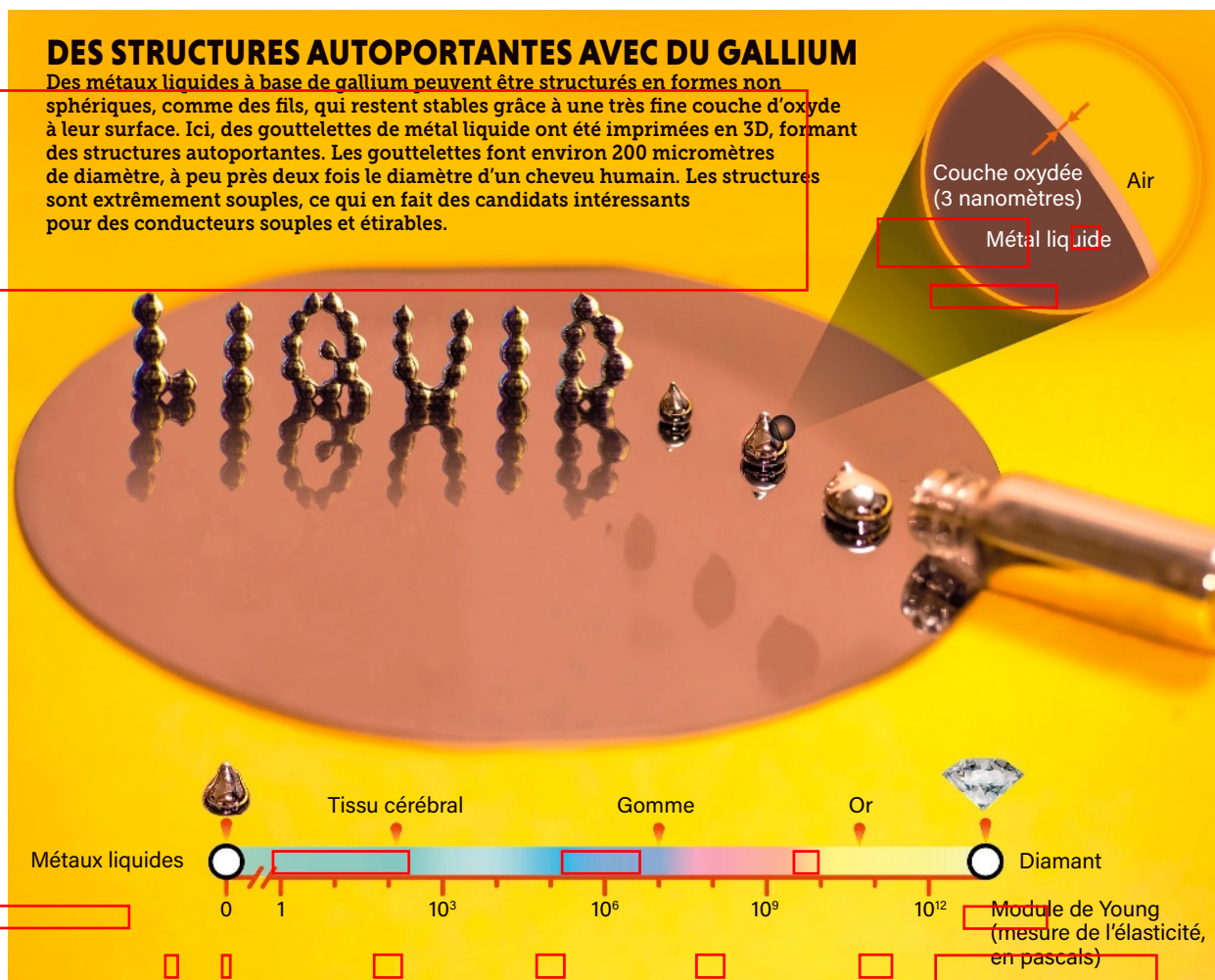
Cet article est traduit et adapté de celui publié dans *Physics Today* (avril 2021, pp. 30-36) sous le titre « Liquid metals at room temperature » avec l'autorisation de l'American Institute of Physics.

Enfin, caractéristique importante, le gallium a une faible toxicité, et le corps humain est capable de l'éliminer s'il est ingéré. Ses sels ont été approuvés par la FDA (l'autorité des États-Unis en matière d'alimentation et de médicaments) pour une utilisation chez l'humain dans des applications telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Bien que cet élément soit relativement abondant dans le sol, il est difficile à extraire. On le trouve en particulier sous forme d'impuretés dans l'alumine (précurseur de l'aluminium), ce qui en fait un matériau cher; un gramme de gallium coûte entre 0,2 et 0,9 euro environ. Ce métal a des applications industrielles en tant que précurseur pour des composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs) et le nitrure de gallium (GaN). Les chercheurs étudient aussi l'oxyde de gallium Ga_2O_3 . Ce semi-conducteur a une tension de claquage élevée et une large bande d'énergie interdite: une piste prometteuse pour l'électronique de puissance (pour les véhicules

DES STRUCTURES AUTOPORTANTES AVEC DU GALLIUM

Des métaux liquides à base de gallium peuvent être structurés en formes non sphériques, comme des fils, qui restent stables grâce à une très fine couche d'oxyde à leur surface. Ici, des gouttelettes de métal liquide ont été imprimées en 3D, formant des structures autoportantes. Les gouttelettes font environ 200 micromètres de diamètre, à peu près deux fois le diamètre d'un cheveu humain. Les structures sont extrêmement souples, ce qui en fait des candidats intéressants pour des conducteurs souples et étirables.



électriques et les énergies renouvelables par exemple) et pour l'optoélectronique dans le domaine ultraviolet.

Quant au gallium lui-même et à ses alliages liquides, leurs applications en sont toujours aux étapes initiales de développement, mais plusieurs entreprises commencent à mettre à profit leurs propriétés uniques. Passons en revue quelques-unes de ces propriétés et leurs utilisations possibles.

L'OXYDATION, INCONVÉNIENT OU ATOUT ?

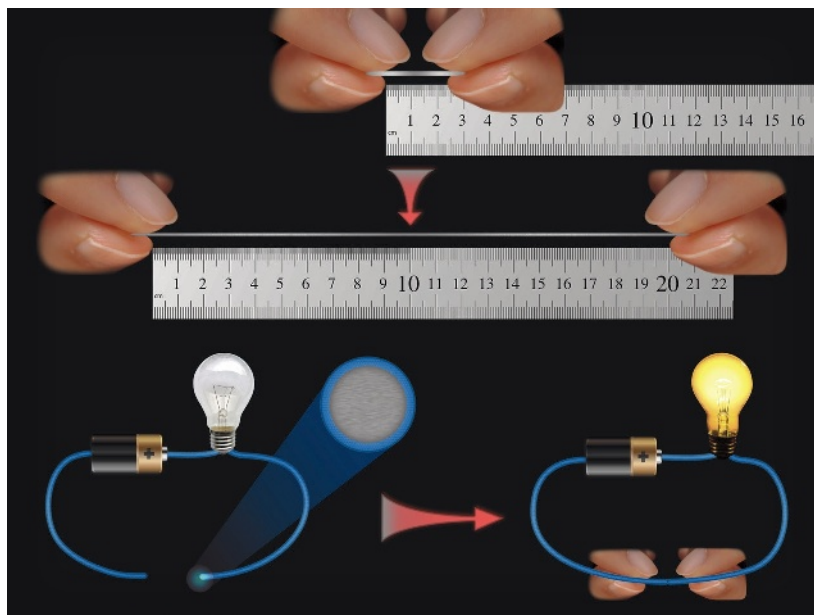
La propriété la plus importante du gallium pour les applications est sans doute la formation rapide d'une pellicule d'oxyde à sa surface. Cette couche d'oxyde a une épaisseur de quelques nanomètres (un cheveu humain est environ 30000 fois plus épais). Nous l'avons mentionné plus haut, ce film d'oxydation était autrefois considéré comme un inconvénient. Cependant, grâce à lui, on structure le métal liquide selon des formes qui seraient impossibles à obtenir avec des liquides classiques, en particulier ceux qui, comme le gallium, présentent une faible viscosité et une tension de surface élevée (voir l'encadré page ci-contre).

Le gallium liquide et certains de ses alliages peuvent être imprimés et structurés de diverses façons qui ne seraient pas possibles avec des métaux solides. On peut par exemple les injecter, les peindre, les étaler, les mouiller, les mouler ou les imprimer. Bien que très mince, la couche d'oxyde stabilise les structures résultantes. Mais si les contraintes mécaniques exercées sur la surface dépassent un certain seuil, la couche d'oxyde se rompt et le métal, peu visqueux, coule alors facilement.

La résistance du film d'oxyde dépend non seulement de l'oxyde lui-même, mais aussi de la courbure de la surface qu'il recouvre. Ainsi, le propre poids d'une goutte sphérique de gallium peut briser la couche d'oxyde quand son diamètre excède quelques millimètres, tandis qu'un cylindre vertical de 0,1 millimètre de diamètre atteint plusieurs centimètres de haut sans s'effondrer.

En l'absence de contrainte, la couche d'oxyde se forme rapidement et contribue à maintenir la forme du métal. C'est un peu l'équivalent, à petite échelle, d'un matelas à eau : une mince barrière solide contient le liquide. Mais alors qu'un matelas à eau fuirait s'il était percé, la couche qui enrobe le gallium liquide se referme spontanément après une rupture. La capacité de ce métal à couler lorsque l'oxyde est brisé, combinée à la capacité de l'oxyde à se reformer, est ce qui rend possible la structuration du gallium liquide.

La façon la plus simple de structurer le métal est sans doute de l'injecter dans un tube. Si le tube a un diamètre inférieur à 1 millimètre



environ, on peut le considérer comme un microcanal, utile pour manipuler les fluides dans diverses applications. Parmi celles-ci figurent les dispositifs intégrés de «laboratoire sur puce» permettant, par exemple, de miniaturiser des analyses de liquides biologiques. L'injection du métal liquide dans de tels canaux est une façon simple de créer des électrodes, des pompes, des valves et d'autres composants microfluidiques.

Il est aussi possible d'utiliser le gallium liquide en impression 3D, une technique aujourd'hui répandue de fabrication de structures par addition de matière. La plupart des imprimantes 3D du commerce «impriment» des polymères, mais on pourrait renforcer l'intérêt de ces structures en réalisant des composites qui intègrent des métaux liquides à une matrice de polymères.

Par ailleurs, l'oxyde de surface qui se forme sur le gallium liquide a pour conséquence de rendre le matériau adhérent à la plupart des surfaces, une propriété nécessaire pour maintenir une forme imprimée. En l'absence d'oxyde, le gallium formerait des gouttes sphériques et n'adhérerait pas sur la plupart des matériaux.

ÉTIRABLE ET AUTORÉPARABLE

Avec un métal liquide tel que le gallium ou certains de ses alliages, il est aussi possible de créer des fils électriques mous et extensibles. En effet, en plaçant le métal liquide dans un tube étroit en caoutchouc ou en un autre matériau extensible, on produit un fil qui conserve la conductivité électrique du métal tout en restant étirable. On s'affranchit ainsi d'un compromis classique que l'on doit faire avec les conducteurs constitués de matériaux composites : l'ajout de particules conductrices, en

Des fils constitués de métal liquide cumulent les avantages :

la conductivité d'un métal et les propriétés mécaniques du caoutchouc. Une fibre d'élastomère creuse remplie de métal liquide (en haut) peut être étirée jusqu'à dix fois sa longueur initiale. Son extensibilité n'est limitée que par les propriétés du polymère. Le métal liquide peut également former des circuits (en bas) qui se réparent électriquement après avoir été sectionnés. Le métal reste bien contenu au niveau de l'interface sectionnée, sans déborder, parce qu'il forme une couche d'oxyde au contact de l'air. Les interfaces fusionnent à nouveau quand on les applique l'une contre l'autre. En revêtant le métal d'une enveloppe isolante de polymère autoréparateur (en bleu), on permet au circuit de se réparer mécaniquement.

métal ou en carbone, à du caoutchouc augmente sa conductivité, mais change ses propriétés mécaniques. Les métaux liquides, en revanche, ne les modifient pas notablement. On crée ainsi des fils qui peuvent s'étirer jusqu'à dix fois leur longueur initiale tout en conservant la même conductivité métallique (voir la figure page 51).

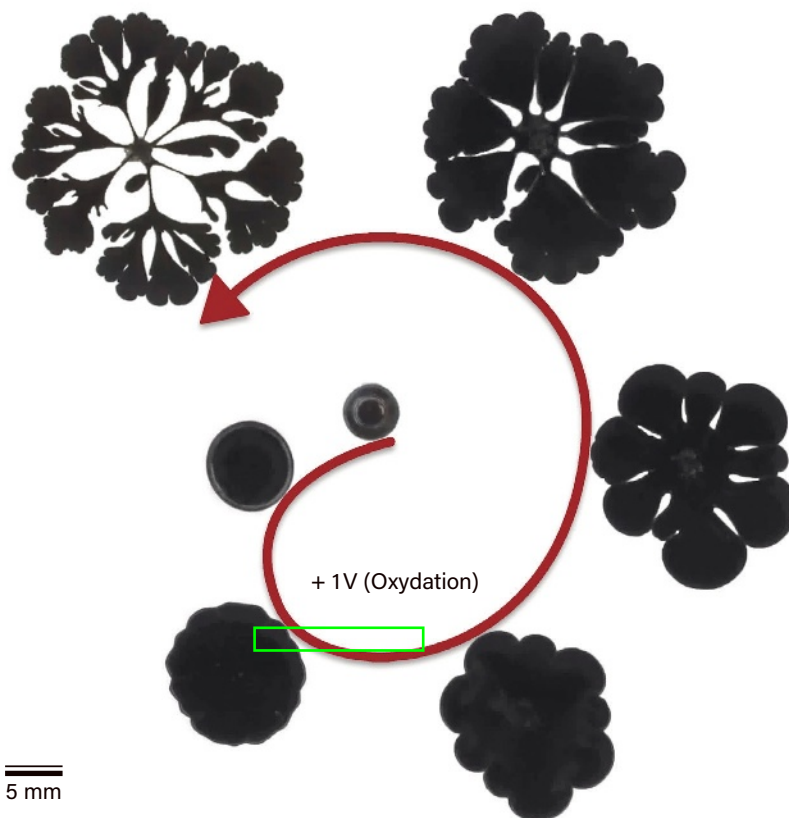
Par exemple, le gallium est utilisé dans des dispositifs où il sert d'interconnecteur électrique entre des petites puces rigides insérées dans une matrice d'élastomère. Ces systèmes hybrides souples combinent dès lors les fonctionnalités des puces avec les capacités de déformation élastique de la matrice. Ils ouvrent donc la voie vers des dispositifs électroniques performants à porter sur soi ou à fixer sur la peau, ou encore vers des capteurs souples qui imitent les propriétés mécaniques de la peau.

Autre atout des conducteurs en gallium liquide: ils se réparent eux-mêmes lorsqu'ils sont endommagés. Quand un fil de métal liquide est coupé, il se forme rapidement une pellicule d'oxyde qui empêche le matériau de fuir hors du circuit (voir la figure page 51). Et lorsque les extrémités sectionnées sont réunies, les interfaces exposées fusionnent (la mince couche d'oxyde se rompt et le liquide se reconnecte) et la connexion électrique se rétablit. En 2012, avec mes collègues, nous avons incorporé des fils de métal liquide dans une matrice de polymère lui-même autocicatrisant. Dans ce cas, c'est le circuit tout entier qui se répare par simple contact.

Les propriétés des métaux liquides peuvent également être mises au service de l'étude de surfaces (monocouches moléculaires, par exemple) à l'aide d'électrodes molles, comme nous l'avons montré dès 2007. Plutôt que de déposer des électrodes métalliques au moyen d'un équipement coûteux qui nécessite souvent des températures élevées, susceptibles d'altérer les propriétés des molécules, on place simplement le métal liquide sur la surface, avec laquelle le contact s'établit en douceur. L'électrode sert alors à mesurer les propriétés électriques des molécules de la surface. Cette approche est utile en électronique moléculaire, où l'on explore la possibilité d'utiliser des molécules comme éléments de base de composants électroniques tels que des transistors.

imiter les neurones de la pieuvre

Les conducteurs au gallium peuvent aussi servir de capteurs. Quand on déplace ou tord des fils conducteurs classiques, tels ceux à base de cuivre, leur section ne varie pas. En revanche, en réponse à des déformations, les conducteurs à métal liquide changent de géométrie, et donc modifient la capacitance ou la



DE SURPRENANTES FIGURES FRACTALES

Les gouttelettes de gallium ont une tension de surface énorme en l'absence de couche superficielle d'oxyde, et forment donc des sphères (au centre). Mais lorsqu'on place une gouttelette dans un électrolyte et qu'on applique un potentiel positif, on déclenche une oxydation superficielle. Ici, une gouttelette est reliée par le dessous à un petit fil (non illustré) et plongée dans une solution électrolytique d'hydroxyde de sodium; elle est photographiée par le dessus et semble noire parce qu'elle est rétroéclairée. Le processus d'oxydation entraîne un étalement du métal en forme de fractales, ce qui suggère que la tension effective est pratiquement nulle dans les conditions présentées.

résistance du composant dont ils font partie. Ils offrent ainsi la possibilité de détecter un contact, une contrainte mécanique ou d'autres modes de déformation.

Récemment, en 2019, des étudiants de mon groupe de recherche ont mis à profit de tels circuits tactiles pour créer des matériaux souples qui effectuent des opérations logiques simples, sans utiliser de transistors classiques. Nous nous sommes inspirés de la pieuvre, dont les neurones répartis le long des bras ont la capacité de produire une réponse localisée à un stimulus sensoriel sans faire appel à un processeur centralisé comme le cerveau.

Pour faire la démonstration du concept de «logique des matériaux», nous avons créé des circuits composés de fils de métal liquide insérés dans un composite de silicone, circuits où le courant électrique peut suivre divers chemins. Une pression sur l'une des portions du circuit réduit la section du fil et augmente donc la résistance localement. Ce changement dévie le courant vers d'autres chemins ou modifie les chutes de potentiel dans certaines parties du

circuit. Moyennant une conception appropriée, un circuit souple de ce type produit une réponse qui dépend uniquement du nombre de points de contact et de leur emplacement. Le principe est potentiellement utile pour la mise au point de matériaux intelligents, qui répondent à des signaux tactiles de façon complexe et adaptée.

MODULATION DE LA TENSION DE SURFACE

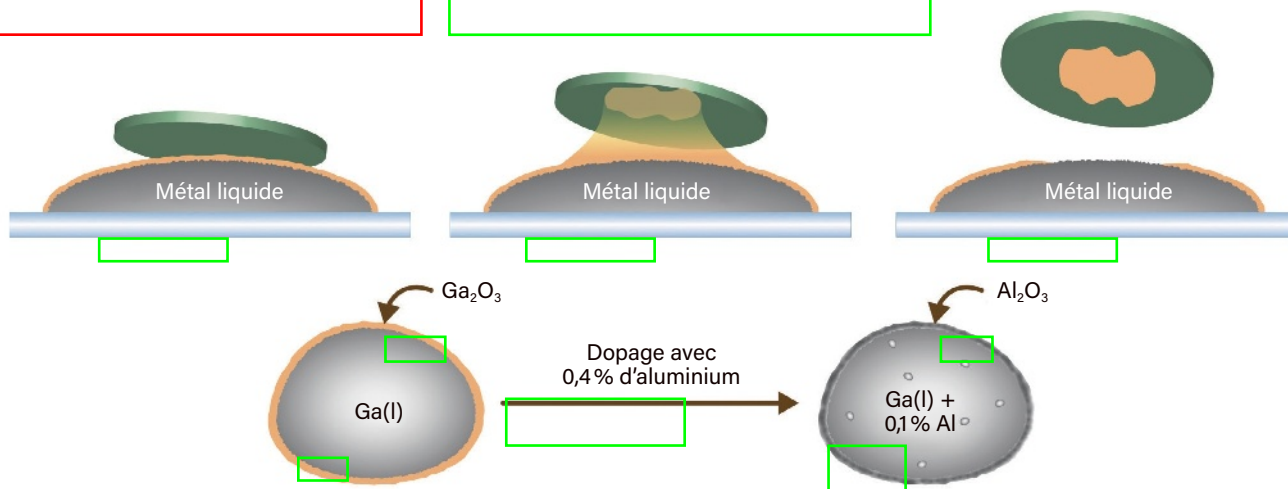
Revenons à la tension de surface exceptionnelle du gallium. Quiconque a eu la maladresse de casser un thermomètre au mercure connaît les gouttelettes sphériques de métal ainsi produites. Ces gouttelettes sont bien sphériques parce que les métaux liquides ont, en l'absence de couche oxydée, une tension de surface énorme. Et de fait, sans sa couche superficielle d'oxyde, le gallium a une tension de surface encore plus élevée que le mercure. L'oxyde peut être éliminé à l'aide d'un acide ou d'une base, mais de tels liquides sont corrosifs. En principe, on pourrait empêcher la couche d'oxyde d'apparaître en travaillant dans un environnement dépourvu d'oxygène, mais en pratique l'oxygène est difficile à éviter.

La réduction électrochimique apporte une solution simple à mettre en œuvre pour éliminer la couche d'oxyde du gallium. En appliquant au métal un potentiel réducteur modeste, de l'ordre de -1 volt, par rapport à une contre-électrode, on peut retransformer en gallium métallique les ions Ga^{3+} de la surface oxydée, grâce à l'apport d'électrons. Quand l'oxyde disparaît, le métal forme des billes (voir la figure page ci-contre, au centre). L'oxyde se reforme spontanément dès que l'on cesse d'appliquer le potentiel.

En 2014, mon équipe a découvert un phénomène inattendu qui se produit lorsqu'on applique un potentiel positif de (par exemple) $+1$ volt à une gouttelette de gallium liquide immergée dans une solution d'hydroxyde de sodium, NaOH (solution basique) : la gouttelette s'étale alors de manière fractale (voir la figure page ci-contre). Comment un liquide dont la tension de surface est dix fois supérieure à celle de l'eau, et donc qui tend fortement à minimiser sa surface, peut-il former une fractale ?

L'application d'un potentiel positif active la formation d'oxyde de surface. On pourrait s'attendre à ce que la couche d'oxyde forme une croûte à la surface du métal et entrave son écoulement. Mais nous avons constaté que, au cours de l'oxydation électrochimique, les gouttelettes se comportent comme si leur tension de surface était très faible. En fait, le NaOH dissout lentement mais continûment l'oxyde, qui se dépose à la surface de la gouttelette, de telle sorte que le métal peut continuer à s'écouler malgré la formation d'oxyde. La tension de surface étant notablement abaissée par l'oxydation électrochimique, la gravité aplatit la goutte, et les petits gradients de tension superficielle entraînent des écoulements dits « de Marangoni », qui contribuent à la formation des inhabituels motifs fractals.

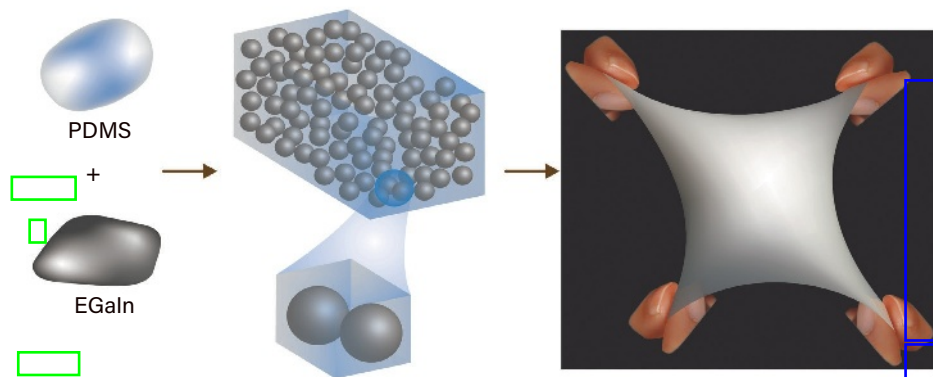
Reste à comprendre la baisse de la tension de surface. Dans le phénomène d'électrocapillarité observé sur des électrodes au mercure, la charge qui s'accumule à l'interface métal-électrolyte peut abaisser la tension superficielle d'une gouttelette de métal. Cependant, pour différentes raisons, l'électrocapillarité n'explique pas à elle seule le comportement observé avec le gallium. En particulier, le changement de tension de surface, qui passe de plus de



EXFOLIER DES COUCHES MINCES

Différentes espèces d'oxydes se forment lorsqu'un métal liquide réagit avec l'air. Ces espèces peuvent être transférées à d'autres surfaces par exfoliation (en haut). Par ce procédé, il est simple de créer des couches ultraminces d'oxyde à température ambiante. En ajoutant de petites

quantités d'un dopant réactif au gallium liquide (en bas), on peut transformer la surface d'oxyde natif (Ga_2O_3) en une espèce chimique différente. Par exemple, en ajoutant 0,4% d'aluminium, on obtient une surface constituée d' Al_2O_3 .



500 mN/m à près de 0, est trop grand pour être dû à l'électrocapillarité associée à un potentiel typique de 1 volt; un potentiel aussi faible ne ferait baisser la tension de surface que jusqu'à 400 mN/m environ...

EXFOLIATION DE COUCHES MINCES

En 2017, l'équipe de Kourosh Kalantar-Zadeh, de l'université de Nouvelle-Galles du Sud, en Australie, et de Torben Daeneke, de l'institut royal de technologie de Melbourne, a découvert que la mince couche d'oxyde Ga_2O_3 qui se forme sur du métal liquide peut être retirée par une technique d'exfoliation, en mettant en contact le métal liquide avec un substrat solide: le film d'oxyde adhère alors à celui-ci (voir la figure du haut page 53). Cette idée rappelle celle mise en œuvre par Andre Geim, de l'université de Manchester, pour obtenir des couches monoatomiques de graphène à partir de graphite. Cette technique est un moyen séduisant de déposer à température ambiante des couches minces d'oxyde sur des surfaces, utilisables pour transférer de minces films isolants, conducteurs ou semi-conducteurs sur des surfaces arbitraires.

En effet, il est possible de transformer chimiquement les couches minces d'oxyde ainsi obtenues en d'autres espèces, par exemple du sulfure de gallium. Une autre façon de modifier la composition de l'oxyde superficiel consiste à doper la gouttelette de gallium liquide avec de petites quantités d'autres métaux avant l'exfoliation. Si la formation de l'oxyde du métal dopant est plus favorable énergétiquement, il peut se former préférentiellement au Ga_2O_3 . Par exemple, en ajoutant des traces d'aluminium au gallium, on peut produire de l'alumine (Al_2O_3) à sa surface (voir la figure du bas page 53).

Un autre intérêt des métaux liquides tels que le gallium est qu'on peut les mélanger à des polymères pour former des composites ayant des propriétés nouvelles ou renforcées. Il est bien connu qu'en ajoutant des particules solides à un polymère, on peut fortement modifier les propriétés mécaniques de celui-ci; par exemple,

Des particules stables de métaux liquides peuvent être formées en mélangeant simplement le métal en présence d'un autre liquide. Le mélange de métal liquide (eutectique de gallium et d'indium, EGaIn) dans du silicone (polydiméthylsiloxane, PDMS) crée un composite mou lorsqu'on quitte le silicone. L'ajout de particules solides à du caoutchouc le rend normalement plus raide, mais avec des particules liquides, le composite reste mou.

les fabricants de pneumatiques rigidifient les pneus en caoutchouc en adjoignant à ce matériau des particules de carbone. Mais ces mêmes particules solides permettent aussi de rendre des élastomères (des matériaux caoutchouteux) moins étirables. Par contraste, les particules de métal liquide ont très peu d'impact sur l'extensibilité du caoutchouc du fait de leur malléabilité (voir la figure ci-contre).

Cependant, selon la charge en particules et leur taille, les particules de métal liquide ont parfois des effets non négligeables sur la mécanique d'un élastomère, et la compréhension de ces effets est un domaine de recherche actif. Ainsi, l'ajout de métal liquide peut augmenter la résistance au déchirement d'un élastomère en atténuant les fissures, qui sont les endroits où les efforts se concentrent et conduisent à la défaillance.

L'ajout de particules de métal liquide peut aussi accroître la conductivité d'un matériau composite à base d'élastomère. L'étirement d'un composite caoutchouteux chargé en particules solides, des paillettes d'argent par exemple, augmente les distances entre les particules, et donc la résistance électrique et thermique du matériau. À l'inverse, l'étirement de caoutchouc chargé en particules de métal liquide entraîne l'allongement des particules qui, de sphériques, deviennent ellipsoïdales. Cela crée une anisotropie de la conductivité thermique: la capacité à conduire la chaleur croît dans le sens de l'étirement.

UN CAPTEUR DE CONTRAINTES MÉCANIQUES

En 2019, avec des collègues de l'université de Wollongong, en Australie, nous avons montré qu'en ajoutant des particules magnétiques telles que du fer à des composites de métal liquide, il est possible d'obtenir une piézoconductivité, ce qui signifie que le matériau devient plus conducteur lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique; la plupart des composites présentent au contraire une piézorésistivité. Il est possible de concevoir des capteurs mécaniques avec ce genre de matériau composite. De plus, ces systèmes chargés en particules de métal liquide auto-cicatrisent électriquement quand ils sont sectionnés, car les particules de métal coulent sur la région endommagée.

Depuis quelques années, le paysage des applications potentielles du gallium et de ses alliages liquides s'est donc considérablement enrichi. Elles reposent sur leurs propriétés inédites, que les chercheurs doivent encore explorer pour mieux les comprendre sur le plan fondamental. Avec un avenir aussi prometteur, ces matériaux devraient redorer le blason des métaux liquides, qui avait été quelque peu terni par le mercure. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Yun et al., **Liquid metal composites with anisotropic and unconventional piezoconductivity**, *Matter*, 2020.

K. Kalantar-Zadeh et al., **Emergence of liquid metals in nanotechnology**, *ACS Nano*, 2019.

T. Daeneke et al., **Liquid metals: Fundamentals and applications in chemistry**, *Chem. Soc. Rev.*, 2018.

M. D. Dickey, **Emerging applications of liquid metals featuring surface oxides**, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2014.

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 531 (Jan. 22)
réf. PL531



N° 530 (Déc. 21)
réf. PL530



N° 529 (Nov. 21)
réf. PL529



N° 528 (Oct. 21)
réf. PL528



N° 527 (Sept. 21)
réf. PL527



N° 526 (Août 21)
réf. PL526



N° 525 (Juillet 21)
réf. PL525



N° 524 (Juin 21)
réf. PL524



N° 523 (Mai 21)
réf. PL523



N° 522 (Avril 21)
réf. PL522



N° 521 (Mars 21)
réf. PL521



N° 520 (Fév 21)
réf. PL520

À retourner accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,40 €**

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

1^{re} réf. 01 x 9,40 € = 9,40 €
 2^e réf. x 9,40 € = €
 3^e réf. x 9,40 € = €
 4^e réf. x 9,40 € = €
 5^e réf. x 9,40 € = €
 6^e réf. x 9,40 € = €
TOTAL À RÉGLER €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
 Nom :
 Prénom :
 Adresse :
 Code postal Ville :
 Téléphone
 Courriel :
 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
 en nous retournant ce bulletin complété

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z
 En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>.
 Offre valable jusqu'au 21/12/2022 en France Métropolitaine uniquement.
 Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utilisons 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@pouirlascience.fr.



Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr



L'ESSENTIEL

> Les fusions de galaxies sont des événements fréquents à l'échelle du cosmos. Au sein des galaxies, elles déclenchent l'effondrement de vastes régions de gaz où naissent des étoiles.

> On étudie ces événements dans l'infrarouge, pour voir à travers les nuages de poussière qui nimbent les galaxies et bloquent les autres longueurs d'onde.

> En combinant les observations de télescopes terrestres et spatiaux dans différents domaines de longueur d'onde, le projet Goals a déterminé que la formation d'étoiles serait la source majeure de luminosité dans les galaxies infrarouges lumineuses.

> « Supervents », bulles et jets : des gaz s'échappent des galaxies en fusion et réguleraient la formation d'étoiles et la croissance des trous noirs galactiques.

LES AUTEURS



AARON S. EVANS
professeur d'astronomie à l'université de Virginie, aux États-Unis, et astronome à l'Observatoire américain de radioastronomie (NRAO) et au centre nord-américain d'Alma



LEE ARMUS
chercheur au Centre de traitement et d'analyse du rayonnement infrarouge à Caltech

Au cœur des collisions galactiques

Lorsque deux galaxies fusionnent, une myriade d'étoiles s'allument, les trous noirs supermassifs s'activent et des supervents sèment le chaos. Petit aperçu de ce qui attend la Voie lactée et la galaxie d'Andromède dans plusieurs milliards d'années...

Dans environ 5 milliards d'années, alors que le Soleil se sera transformé en une étoile géante rouge dont le diamètre correspondra à peu près à l'orbite de la Terre, la Voie lactée et sa voisine la plus proche, la galaxie d'Andromède, entreront en collision, attirées l'une vers l'autre par les forces gravitationnelles. Leurs étoiles seront arrachées de leurs orbites et constitueront des queues spectaculaires, tandis que le gaz et la poussière se précipiteront vers les centres galactiques. Ces mouvements détruiront les deux structures spiralées majestueuses qui existaient déjà il y a près de 10 milliards d'années, lorsque l'Univers avait près d'un quart de son âge actuel.

Cette vue d'artiste illustre les bouleversements du ciel dans 5 milliards d'années. Vu depuis Pluton, le Soleil sera devenu une étoile géante rouge dont le rayon atteindra la Terre. Et la Voie lactée sera entrée en collision avec la galaxie d'Andromède, ce qui perturbera toute sa structure. Le Système solaire pourrait ainsi être rejeté en périphérie de la galaxie, offrant alors une vue idéale sur cette rencontre cosmique.

Puis, les deux centres galactiques finiront par fusionner pour n'en faire qu'un. Dans les parages de ce nouveau cœur galactique, le gaz sera si dense que la formation d'étoiles accélérera pour devenir environ cent fois plus rapide qu'aujourd'hui. Le gaz nourrira aussi les deux trous noirs supermassifs qui se cachent au centre de la Voie lactée et d'Andromède. Actuellement silencieux, les deux trous noirs sortiront de leur torpeur en transformant une partie de cet apport de matière en une tempête de particules énergétiques et de rayonnement dont l'intensité surpassera largement la lumière des étoiles des deux galaxies. Environ 100 millions d'années après la collision galactique, ils fusionneront à leur tour dans un cataclysme qui enverra de puissantes ondes gravitationnelles dans tout l'Univers.

Cependant, malgré les événements spectaculaires qui accompagnent la fusion de galaxies, ce processus n'est pas une «collision» au sens strict, car les galaxies sont essentiellement constituées de vide: les 300 milliards d'étoiles d'une galaxie comme la Voie lactée sont, en moyenne, séparées par cinq années-lumière. La densité de l'air au niveau de la mer sur Terre est environ 100 millions de milliards de fois plus élevée que la densité moyenne du gaz dans l'espace interstellaire. Ainsi, même si la fusion galactique en bouleversera la structure, la plupart des étoiles ne feront que passer à côté les unes des autres.

Les fusions de galaxies n'en restent pas moins fascinantes. Leur étude nous permet de mieux comprendre l'avenir de notre propre

galaxie et l'histoire de l'Univers. En effet, lorsque le cosmos était plus jeune et plus dense, les collisions galactiques étaient beaucoup plus fréquentes qu'aujourd'hui. Les simulations suggèrent qu'au cours des 10 derniers milliards d'années, la Voie lactée a subi jusqu'à cinq fusions majeures avant de devenir la vaste spirale décrite aujourd'hui.

Jusqu'à récemment, les astronomes ne disposaient pas des outils nécessaires pour observer et modéliser avec précision les fusions de galaxies. En effet, la plupart des collisions sont cachées dans d'épais nuages de poussière, opaques aux longueurs d'onde visibles même pour les plus grands télescopes. Grâce aux instruments sensibles à d'autres domaines de longueur d'onde, installés sur les télescopes actuels et futurs, nous commençons à répondre à certaines questions cruciales sur les fusions de galaxies, notamment sur la façon dont les étoiles naissent dans le chaos d'une collision galactique et sur la manière dont les radiations émises par les trous noirs centraux qui grossissent et finissent par fusionner affectent la nouvelle galaxie qui prend forme autour d'eux.

DES «NÉBULEUSES» EN COLLISION

Près d'un siècle s'est écoulé depuis qu'Edwin Hubble a découvert que de nombreuses taches lumineuses dans le ciel – connues à l'époque sous le nom de «nébuleuses» – ne sont pas des objets appartenant à la Voie lactée, mais des «univers insulaires», situés en dehors de celle-ci. Il a classé ces «nébuleuses extragalactiques»

UNE COLLISION GALACTIQUE

La gravité entrainera la fusion de la Voie lactée et de sa galaxie spirale voisine, Andromède. Cette fusion prendra plusieurs milliards d'années et n'aura pas de conséquence directe sur la plupart des étoiles et des planètes à l'intérieur des galaxies, car elles sont trop espacées les unes des autres pour subir des collisions. En revanche, elles seront dispersées à l'intérieur des deux galaxies lors de la fusion. En 2012, Gurtina Besla, de l'université de l'Arizona, et Roeland van der Marel, de l'Institut des sciences des télescopes spatiaux, à Baltimore, ont réalisé une simulation numérique de cet événement en s'appuyant sur les observations du télescope spatial *Hubble*. Cette séquence montre comment les deux galaxies spirales donneront naissance à une galaxie elliptique.



en trois catégories: celles qui ont une forme sphérique ou elliptique (les galaxies elliptiques), celles qui ont un disque aplati et parfois barré avec un renflement central (les galaxies spirales, comme la nôtre) et celles qui sont irrégulières (les galaxies irrégulières).

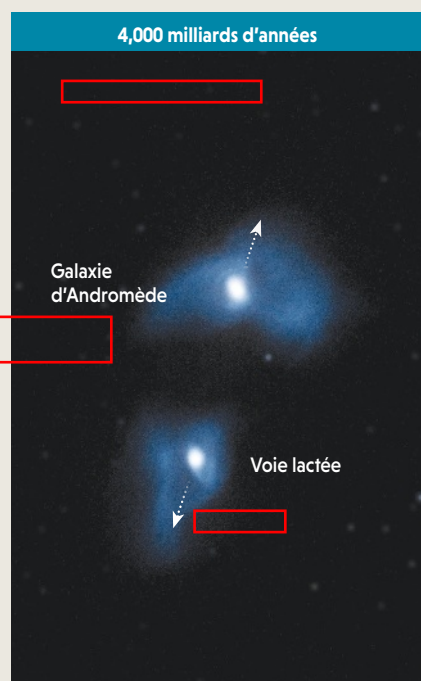
Une petite fraction de ces dernières sont en fait constituées d'au moins deux galaxies fortement déformées. Dans les années qui ont suivi la découverte de Hubble, des pionniers tels que le Russe Boris Vorontsov-Velyaminov, le Suisse Fritz Zwicky et l'Américain Halton Arp ont étudié en détail cette catégorie de «galaxies interconnectées». Les images enregistrées sur des plaques photographiques avec de longues expositions et publiées dans l'*Atlas of Peculiar Galaxies* de Arp, en 1966, montrent clairement les déformations qui sont aujourd'hui la signature de galaxies en fusion.

Dans les années 1970, des simulations d'interactions de galaxies «simples» (des disques avec des orbites paraboliques) ont permis de recréer les formes de plusieurs galaxies particulières – notamment les longues queues d'étoiles projetées sur de grandes distances par la fusion de leurs galaxies hôtes. Ces premières simulations et d'autres par la suite ont montré que les caractéristiques inhabituelles et parfois spectaculaires mises en évidence par Arp et d'autres chercheurs ne pouvaient s'expliquer que par des interactions gravitationnelles. Depuis la fin des années 1980, sous l'impulsion de spécialistes comme Joshua Barnes, de l'université d'Hawaii, Lars Hernquist, de l'université Harvard, ou encore Philip Fajardo

La densité de l'air au niveau de la mer sur Terre est environ 100 millions de milliards de fois plus élevée que celle du gaz dans l'espace interstellaire de la Galaxie

Hopkins, de l'institut de technologie de Californie (Caltech), des simulations plus poussées effectuées sur des supercalculateurs ont dévoilé la diversité des interactions de galaxies et l'importance des fusions dans le cycle de vie des galaxies.

En 1983, le lancement du satellite *Iras* (*Infrared Astronomical Satellite*) est un



tournant majeur dans l'exploration de ces phénomènes. Avec ses données, les chercheurs ont réalisé la première carte du ciel dans l'infrarouge lointain, révélant ainsi tout un pan jusque-là caché de l'Univers. Ils ont notamment observé le rayonnement thermique des poussières qui, dans les galaxies, signalent presque toujours des pouponnières d'étoiles. Habituellement, les étoiles naissent dans des nuages de gaz composés principalement d'hydrogène moléculaire, ainsi que de poussières issues des débris d'anciennes générations d'étoiles. En effet, lorsque les étoiles évoluent et meurent, elles se débarrassent d'éléments lourds produits par la fusion nucléaire stellaire, tels que le carbone et l'oxygène, et enrichissent les nuages environnants.

Ce processus d'apparition d'étoiles est démultiplié dans les galaxies qui entrent en collision, car la fusion de galaxies concentre le gaz et la poussière dans des régions denses, déclenchant des sursauts de formation d'étoiles, qui fabriquent à leur tour des éléments lourds et de la poussière. Cependant, bien que les étoiles jeunes et massives libèrent la majeure partie de leur énergie dans les longueurs d'onde ultraviolettes, seule une très faible part des émissions ultraviolettes des étoiles jeunes parvient jusqu'à la Terre, car les grains de poussière environnants absorbent cette lumière et la réémettent dans l'infrarouge. D'où l'intérêt de télescopes équipés de détecteurs infrarouges très sensibles comme *Iras*, qui, en captant cette lumière, nous permettent de regarder à travers les voiles de poussière et d'étudier les premiers stades de la

Les galaxies infrarouges ultralumineuses sont des objets rares et spectaculaires avec une luminosité dans l'infrarouge lointain de plus de mille milliards de fois celle du Soleil

naissance des étoiles et la croissance des trous noirs supermassifs.

Grâce à *Iras*, les astrophysiciens ont détecté de nombreuses pouponnières stellaires dans la Voie lactée et dans des milliers d'autres galaxies. De plus, ils ont réalisé le premier recensement des galaxies en collision, uniquement sur la base de leur émission infrarouge. Certaines de ces collisions sont si éloignées de la Terre que la lumière que nous détectons



aujourd'hui a été émise lorsque l'Univers avait moins de 2 milliards d'années.

Les mesures précises de l'énergie produite au sein de galaxies en fusion ont confirmé que ces dernières sont parmi les objets les plus intrinsèquement lumineux de l'Univers. Dans certaines galaxies en fusion, plus de 90% de la puissance totale émise se situe dans des longueurs d'onde de l'infrarouge lointain: leur véritable nature est donc complètement cachée aux télescopes optiques.

DES OBJETS ULTRALUMINEUX

Lors de ce recensement avec *Iras*, les chercheurs ont découvert en particulier une classe de galaxies nommées «galaxies infrarouges lumineuses», ou LIRG en abrégé. Avec une luminosité dans l'infrarouge lointain au moins 100 milliards de fois celle du Soleil, soit environ trois fois plus que la production énergétique totale de toutes les étoiles de la Voie lactée, ces objets sont souvent des galaxies en cours de fusion. Les «galaxies infrarouges ultralumineuses», ou ULIRG, sont encore plus rares et plus spectaculaires avec une luminosité dans l'infrarouge lointain de plus de mille milliards de fois celle du Soleil.

En 1988, David Sanders, alors à Caltech, et ses collègues ont suggéré que ces galaxies infrarouges ultralumineuses seraient le résultat de fusions particulièrement violentes de galaxies et qu'elles constitueraient la première étape de la vie de quasars. Ces derniers sont les objets les plus énergétiques de l'Univers. Leur énergie provient du trou noir supermassif au centre de ces quasars qui devient actif, alimenté par de

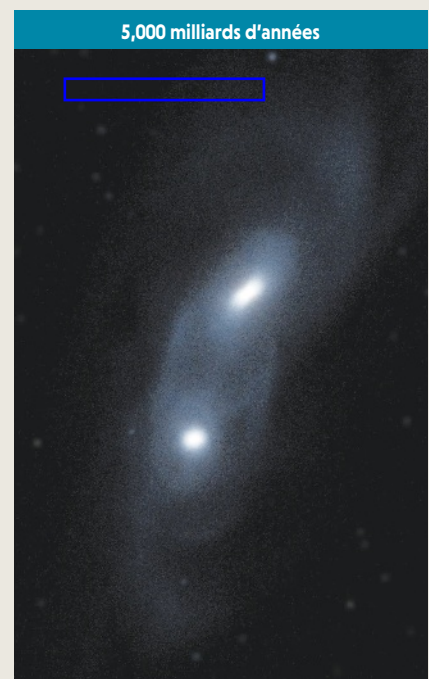
grandes quantités de matière. Ce scénario reliant ULIRG et quasars s'appuyait sur de

nombreuses observations montrant que les galaxies abritant des trous noirs centraux actifs ont souvent un aspect déformé, indiquant qu'il s'agit très probablement du résultat d'une fusion de galaxies.

Ce lien entre des objets aussi différents que des galaxies infrarouges lumineuses et les quasars a permis de poser les bases d'un modèle retraçant l'évolution des galaxies. Il a aussi suscité un intérêt grandissant pour les galaxies en cours de fusion, une étape cruciale dans cette évolution, et pour l'astronomie infrarouge, la gamme de longueurs d'onde privilégiée pour étudier ces collisions.

DÉCORTIQUER LES COLLISIONS

En 2004, nous avons lancé un grand projet nommé *Goals* (pour *Great Observatories All-Sky LIRG Survey*), qui recueille les images et les spectres de galaxies en collision de trois des grands observatoires astronomiques: les télescopes spatiaux *Spitzer*, *Hubble* et le *Chandra X-ray Observatory*. Ces instruments fournissent des mesures dans différentes gammes de longueurs d'onde afin de documenter toutes les étapes de la fusion galactique. Le catalogue *Goals* est constitué de toutes les galaxies lumineuses infrarouges les plus brillantes de l'Univers local, soit environ 200 objets situés dans un rayon de 1,3 milliard d'années-lumière. Notre équipe utilise aussi des télescopes terrestres tels que le *Very Large Array (VLA)*, au Nouveau-Mexique, le télescope *Hale*, en Californie, les télescopes jumeaux *Keck*, à Hawaï, le radiotélescope *Alma*



(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), au Chili, ainsi que les télescopes spatiaux européen *Herschel* (infrarouge lointain) et américain *NuSTAR* (rayons X).

Le projet *Goals* a déjà porté ses fruits et considérablement amélioré nos connaissances sur les galaxies en collision. Une question de longue date, par exemple, est de savoir si la lumière des galaxies en fusion provient davantage des sursauts de formation d'étoiles ou des trous noirs actifs. Une façon de distinguer leurs contributions respectives à différents moments du cycle de vie de la fusion galactique est d'examiner les différents profils énergétiques des deux types d'objets, c'est-à-dire la quantité d'énergie libérée en fonction de la longueur d'onde.

D'OÙ VIENT LA LUMIÈRE DES GALAXIES EN FUSION ?

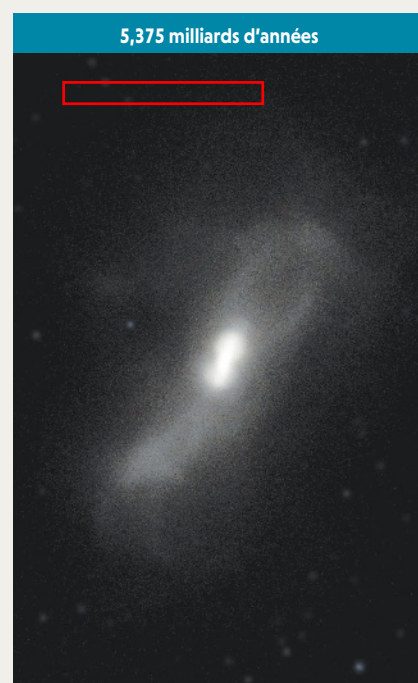
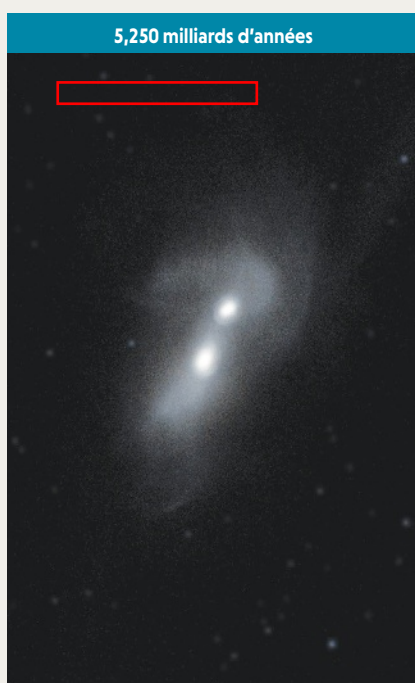
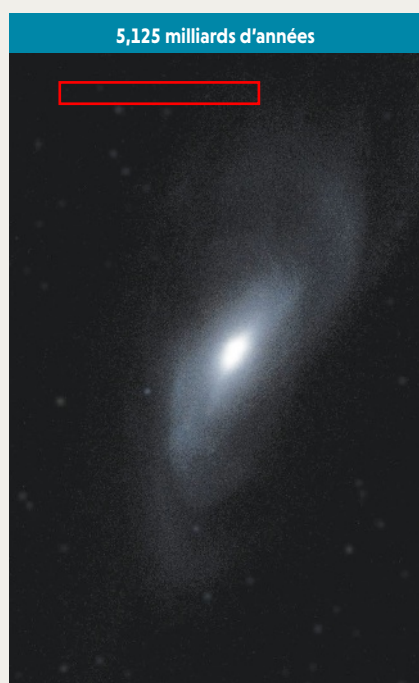
Les étoiles sont de simples sources thermiques de rayonnement : elles émettent la majeure partie de leur énergie à une longueur d'onde maximale qui dépend de leur température, et leur production d'énergie décline très rapidement à des longueurs d'onde plus courtes et plus longues. En revanche, le disque d'accrétion que forme la matière autour d'un trou noir est visqueux et chaud, et sa température augmente de l'extérieur vers l'intérieur. Un disque d'accrétion a donc un profil énergétique beaucoup plus large et produit une fraction beaucoup plus importante de rayonnement à haute énergie qu'une étoile, et il peut chauffer et ioniser un large éventail d'éléments dans le gaz environnant. La découverte d'une émission d'éléments hautement ionisés dans le spectre

d'une galaxie est un signe fort qu'un trou noir supermassif et actif se trouve en son centre.

Nos collègues ont constaté que dans l'ensemble de la population des LIRG, les sursauts de formation d'étoiles semblent être la source prédominante d'énergie, même dans les galaxies infrarouges lumineuses qui hébergent des trous noirs supermassifs actifs (environ un cinquième de la population de LIRG étudiée par *Goals*). Cependant, il est possible que ces données soient incomplètes : les trous noirs au cœur des galaxies pourraient être quasi complètement cachés par la poussière, même en observant dans l'infrarouge.

De plus, nous avons tendance à détecter des trous noirs actifs seulement au cours des derniers stades des fusions de galaxies. Cela suggère qu'une grande partie de la croissance des trous noirs supermassifs est peut-être retardée par rapport au sursaut de formation d'étoiles, ce qui donnerait aux jeunes étoiles plus de temps pour contribuer à l'énergie totale des LIRG. Cependant, grâce à certaines observations dans l'infrarouge à plus haute résolution, Anne Medling, de l'université de Toledo, aux États-Unis, a suggéré au contraire une croissance précoce de certains trous noirs.

De fait, la chronologie précise suivant laquelle les phénomènes de sursauts de formation d'étoiles et les trous noirs supermassifs centraux se développent à l'intérieur des galaxies fait encore l'objet de nombreuses recherches, qui permettront peut-être de comprendre l'un des plus grands mystères de ces deux dernières décennies en astrophysique : pourquoi la masse du trou noir central et des



étoiles dans les bulbes des galaxies spirales et elliptiques actuelles ont un rapport de masse presque constant (environ un pour mille dans les galaxies actuelles).

D'autres projets récents ont révélé de nouveaux indices sur les LIRG et sur la formation des étoiles dans les galaxies en collision. Par exemple, en 2020, en cartographiant le gaz chauffé par les étoiles les plus massives à l'intérieur de ces objets, Kirsten Larson, de l'Institut des sciences des télescopes spatiaux, à Baltimore, et ses collègues ont découvert que la plupart des sursauts de formation d'étoiles dans les LIRG se produisent dans des régions extrêmement denses et énergétiques. Dans ces régions, les taux de formation d'étoiles et les densités de gaz sont au moins dix fois plus importants que dans les galaxies normales. Au début du processus de fusion, les régions de formation d'étoiles les plus actives ont tendance à se trouver sur l'extérieur des LIRG, puis migrent vers le centre à mesure que la fusion galactique progresse.

À la fin des fusions galactiques particulièrement énergétiques, la densité de gaz moléculaire s'approche de celle des nuages moléculaires géants. Par exemple, la galaxie infrarouge ultralumineuse Arp 220 (la plus proche de nous, à 250 millions d'années-lumière) contient l'équivalent de plusieurs fois la Voie lactée de gaz moléculaire concentré dans une région ne dépassant pas 3 000 années-lumière de diamètre, c'est-à-dire une région vingt fois plus petite que le disque gazeux de notre galaxie.

Étonnamment, bien que les fusions de galaxies soient de puissantes usines stellaires, les

amas d'étoiles qui s'y forment ont parfois des durées de vie très courtes. À partir de données du télescope spatial *Hubble*, Angela Adamo, de l'université de Stockholm, et Sean Linden, de l'université du Massachusetts à Amherst, ont montré en effet une chute spectaculaire du nombre d'amas d'étoiles en fonction de leur âge. Ces observations suggèrent qu'un nombre important d'amas d'étoiles sont détruits peu après leur naissance dans les galaxies en cours de fusion, à cause des forces de marée gravitationnelle et des vents des supernovæ (des explosions très puissantes d'étoiles en fin de vie).

DE LA MATIÈRE ÉJECTÉE DE LA ZONE DE COLLISION

La fusion de galaxies elle-même peut être victime de cette rétroaction des supernovæ et des trous noirs centraux. Au début des années 1990, Timothy Heckman, de l'université Johns-Hopkins, et ses collègues avaient découvert des vents puissants composés de gaz ionisés qui s'échappaient de certaines LIRG et ULIRG. Avec les données plus récentes, les astrophysiciens ont montré que les plus rapides de ces « supervents » expulsent du gaz jusque dans l'espace intergalactique. À une échelle plus fine, Anne Medling et Vivian U, de l'université de Californie à Irvine, ont constaté la présence de jets (colonnes de gaz rapides) et de bulles de gaz chaud, émis depuis le noyau galactique vers le reste de la galaxie. Ces phénomènes alimenteraient les supervents.

Mais ces supervents ne contiendraient pas forcément que du gaz chaud. En étudiant le gaz moléculaire dense des supervents, Kazushi

Les sursauts de formation d'étoiles semblent la source prédominante d'énergie des galaxies infrarouges lumineuses, même dans celles qui hébergent des trous noirs supermassifs actifs



Sakamoto, de l'Académie Sinica, à Taïwan, et d'autres collègues du projet *Goals* ont découvert que de grandes quantités de gaz froid s'échappent des galaxies en fusion. Ces flux s'étendent souvent jusqu'à 10000 années-lumière et transportent parfois plus de gaz que ce qui est transformé en étoiles dans les noyaux galactiques, privant ainsi la galaxie de matière pour alimenter la formation d'étoiles en cours. Les supervents peuvent aussi emporter des métaux (des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium) et de la poussière dans l'espace intergalactique. Dans presque tous les cas, les flux sortants semblent émerger à proximité du noyau de la fusion galactique, sous l'effet combiné des supernovæ, de la pression de radiation et des jets provenant du trou noir central.

Les supervents joueraient ainsi un rôle important dans le cycle de vie des galaxies, comme le montrent les simulations de Chris Hayward, de l'institut Flatiron, à New York, qui suggèrent que la rétroaction stellaire régule simultanément la formation d'étoiles et les flux s'échappant des galaxies en fusion.

PLACE À UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'INSTRUMENTS

Lancé en décembre 2021, le télescope spatial *James-Webb* élargira considérablement notre compréhension des fusions de galaxies au cours de l'histoire cosmique. Ce télescope infrarouge de 6,5 mètres de diamètre succédera à *Iras*, l'observatoire spatial infrarouge des années 1990, et à *Spitzer*, dont la mission s'est terminée en 2020. *James-Webb* sera au moins cinquante fois plus sensible et aura une résolution spatiale près de dix fois supérieure à celle de *Spitzer*, ce qui permettra d'obtenir des images plus nettes de galaxies dans la partie proche et moyenne du spectre infrarouge. Avec ses spectromètres imageurs capables de produire des centaines de spectres en un seul pointage, il pourra aussi cartographier les régions de formation d'étoiles et les régions autour des trous noirs supermassifs en accréation active dans les fusions galactiques les plus proches.

Dans le cadre du programme scientifique préliminaire du *James-Webb*, la collaboration *Goals* s'intéressera ainsi en particulier à quatre galaxies infrarouges lumineuses proches. D'autres cibles sont aussi prévues, dont des galaxies en cours de fusion avec de puissants sursauts de formation d'étoiles, des trous noirs centraux actifs et des supervents galactiques. Des chercheurs utiliseront par ailleurs l'observatoire pour cibler des galaxies actives proches et lumineuses, des quasars lointains et des champs vides profonds à la recherche des premières galaxies. Dans un deuxième temps, plusieurs projets d'observation ont été sélectionnés pour examiner la rétroaction des jeunes amas d'étoiles et des trous noirs actifs, la fraction de

Le télescope spatial «James-Webb» permettra d'obtenir des images plus nettes de galaxies dans la partie proche et moyenne du spectre infrarouge

la formation d'étoiles qui nous est cachée aux longueurs d'onde optiques et la nature des noyaux obscurs dans les LIRG.

Autre nouveau moyen d'observation, sur Terre cette fois: le *Very Large Array*, un interféromètre radio et à ondes millimétriques, passera de 27 à 263 antennes d'ici à quelques années (le programme scientifique devrait commencer en 2029). Il observera les régions de formation d'étoiles, les trous noirs actifs et la lumière associée aux étoiles explosives, avec une sensibilité et une résolution dix fois supérieures à celles de son prédécesseur.

Ces nouveaux télescopes préciseront les phénomènes astrophysiques qui se produisent lors des fusions de galaxies, aussi bien dans l'Univers actuel que dans les temps les plus reculés. Les simulations de haute résolution couplées à ces nouvelles observations détaillées apporteront de nombreux indices sur la façon dont la rétroaction stellaire régule la formation des étoiles et la croissance des trous noirs dans les galaxies en fusion. De futurs observatoires – déjà prévus ou proposés – détecteront par ailleurs les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs supermassifs en collision et les noyaux poussiéreux de galaxies en formation, et ce tout au long d'une grande partie de l'histoire de l'Univers.

Ces informations nous permettent de mieux comprendre comment les galaxies naissent et évoluent, mais éclairent aussi le destin de la Voie lactée et de sa future rencontre avec la galaxie d'Andromède. Cet événement, qui bouleversera notre galaxie, s'accompagnera d'une magnifique flambée de nouvelles étoiles. Un spectacle auquel nous ne pourrons pas assister, mais dont l'Univers nous donne une chance de voir de nombreuses répétitions ailleurs dans le cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. L. Larson et al., **Star-forming Clumps in Local Luminous Infrared Galaxies**, *The Astrophysical Journal*, 2020.

S. Aalto et al., **Extremely obscured galaxy nuclei – hidden AGNs and extreme starbursts**, *Bulletin of the AAS*, 2019.

S. Linden et al., **Massive Star Cluster Formation and Destruction in Luminous Infrared Galaxies in GOALS**, *The Astrophysical Journal*, 2017.

T. J. Cox et A. Loeb, **The collision between the Milky Way and Andromeda**, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008.

T. Di Matteo et al., **Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies**, *Nature*, 2005.

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT!**



N° 114 (févr. 22)
réf. DO114



N° 113 (nov. 21)
réf. DO113



N° 112 (août 21)
réf. DO112



N° 111 (mai 21)
réf. DO111



N° 110 (fév. 20)
réf. DO110



N° 109 (nov. 20)
réf. DO109



N° 108 (sept. 20)
réf. DO108



N° 107 (mai 20)
réf. DO107



N° 106 (févr. 20)
réf. DO106



N° 105 (nov. 19)
réf. DO105



N° 104 (juil. 19)
réf. DO104



N° 103 (avr. 19)
réf. DO103

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR [BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR](http://boutique.groupepourlascience.fr)

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève– 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

☒ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,40 €.**

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

1^{re} réf. 01 x 10,40 € = 10,40 €
2^e réf. x 10,40 € = €
3^e réf. x 10,40 € = €
4^e réf. x 10,40 € = €
5^e réf. x 10,40 € = €
6^e réf. x 10,40 € = €

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 en nous retournant ce bulletin complété

 **Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr**

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>. Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utilisons 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.

L'ESSENTIEL

→ La barrière hématoencéphalique (BHE), le bouclier cellulaire interne qui protège le cerveau, commence à présenter des fuites à mesure que l'on vieillit. Ce qui laisse pénétrer des molécules potentiellement toxiques, comme l'albumine.

→ L'albumine est à l'origine d'une cascade de réactions

dans le cerveau, qui aboutit à des dysfonctionnements des neurones, à des troubles cognitifs, voire à des pathologies comme la maladie d'Alzheimer ou l'épilepsie.

→ Bonne nouvelle : neutraliser ces réactions permet de restaurer les capacités cognitives chez des souris atteintes de déclin cognitif.

LES AUTEURS



DANIELA KAUFER
chercheuse à l'institut des neurosciences Helen-Wills et professeure à l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis



ALON FRIEDMAN
professeur de neurosciences à l'université Dalhousie en Nouvelle-Écosse et à l'université Ben-Gourion du Néguev, en Israël

Quand le bouclier du cerveau se fissure

Notre cerveau est entouré d'une fine paroi qui le protège des microbes et de substances potentiellement toxiques. En se dégradant au fil des ans, cette barrière laisse pénétrer des composants étrangers qui favoriseraient les maladies neurodégénératives. En restaurant son intégrité, on espère préserver le cerveau des atteintes de l'âge...

Au milieu de la nuit, à Jérusalem, nous regardions les souris nager. C'était en 1994 et nous étions tous deux accroupis au-dessus d'une piscine d'eau froide dans un laboratoire de l'université hébraïque. Il faisait très frais dans la pièce, nos dos voûtés nous faisaient mal, et nous passions le même genre de nuits depuis plusieurs jours, si bien que nous étions fatigués et mal à l'aise. Nos souris aussi. Ces dernières n'aiment vraiment pas nager, surtout dans l'eau froide. Notre objectif était de les stresser.

Nous faisons partie de l'équipe de nuit, parce que nous avons tous deux d'autres choses à faire en journée (Daniela Kaufer préparait un doctorat en neurobiologie moléculaire et Alon Friedman était médecin des Forces de défense israéliennes, souvent de garde). Pourquoi nous réunissions-nous tous les soirs avec des souris ? Nous tentions de percer un mystère médical : le syndrome de la guerre du Golfe.

En effet, après la fin du conflit en 1991, de plus en plus d'études ont révélé que des soldats de la coalition dirigée par les États-Unis



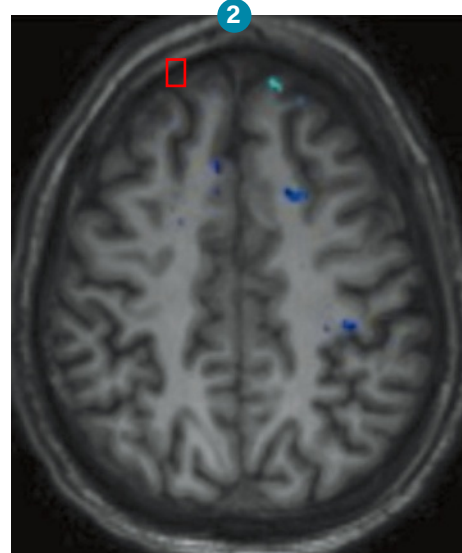
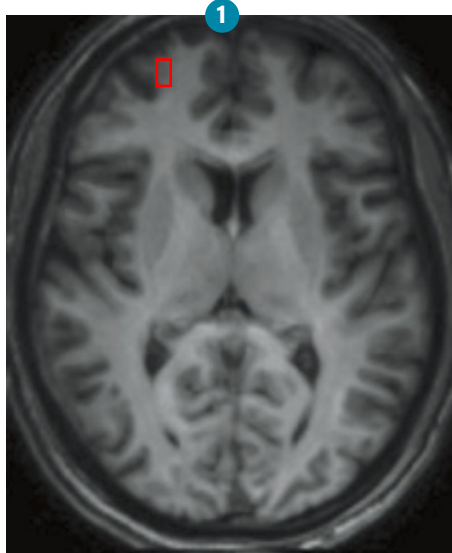
souffraient de fatigue chronique, de douleurs musculaires, de troubles du sommeil et cognitifs, et se retrouvaient en général davantage hospitalisés que les anciens combattants non déployés sur le terrain. Certains médecins pensaient que la pyridostigmine, un médicament administré aux militaires pour les protéger des armes chimiques, provoquait peut-être ces symptômes si elle atteignait leur cerveau.

Mais cette théorie présentait un gros souci : la pyridostigmine qui se retrouve dans le sang n'est pas censée pénétrer dans le cerveau. Car les vaisseaux sanguins traversant cet organe ont des parois constituées de cellules spécialisées, étroitement resserrées les unes contre les autres, et capables de contrôler tout ce qui est susceptible d'entrer ou de sortir du cerveau. Elles forment un bouclier protecteur qui conserve les toxines, les agents pathogènes – comme les bactéries – et la plupart des médicaments à l'intérieur des vaisseaux sanguins, en toute sécurité, loin du tissu nerveux. On appelle cette structure la « barrière hématoencéphalique », ou BHE, et la pyridostigmine ne devait pas la traverser.

MAIS LA BARRIÈRE N'EST PLUS PERMEABLE

Sauf si... le bouclier est fissuré. C'est pour quoi nous nous sommes demandé si le stress physique et mental lié au combat était capable, en quelque sorte, de provoquer des fuites dans la barrière protectrice du cerveau. Nos souris nageant en eaux froides nous permettaient donc de tester si le stress cause des dégâts à la BHE. Une fois leur séance de natation terminée, nous sortions chaque animal de la piscine et leur injections quelques gouttes de colorant bleu en intraveineuse. Puis nous attendions que le colorant diffuse dans leur corps, rendant progressivement les souris bleues... Sauf, bien sûr, l'intérieur de leur cerveau si leur BHE était intacte et empêchait le colorant d'y pénétrer. Nous avons donc euthanasié les rongeurs pour examiner leur cerveau au microscope. Après plusieurs nuits de labeur au cours desquelles nous avons testé différentes durées de nage – et donc de stress –, nous n'avons cependant constaté aucun souci : leur BHE restait imperméable et leur cerveau conservait sa couleur naturelle.

Mais ce soir-là, en 1994, après deux bains dans une eau légèrement plus froide que d'habitude, les choses ont changé : le cerveau des souris était devenu bleu. Notre expérience avait fonctionné : nous avions la preuve que des événements stressants provoquent parfois des fuites dans la BHE. Ensuite, avec notre mentor, la neuroscientifique Hermona Soreq, nous avons montré que de telles modifications permettaient effectivement à la pyridostigmine de



rentrer dans le cerveau des soldats et de modifier l'activité de ses cellules. Nous avons publié ces résultats en 1996 et en 1998.

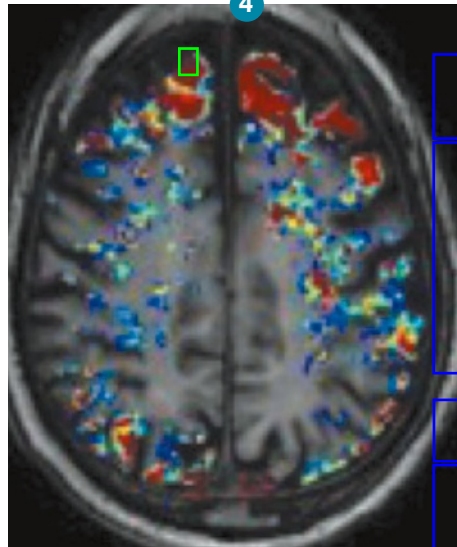
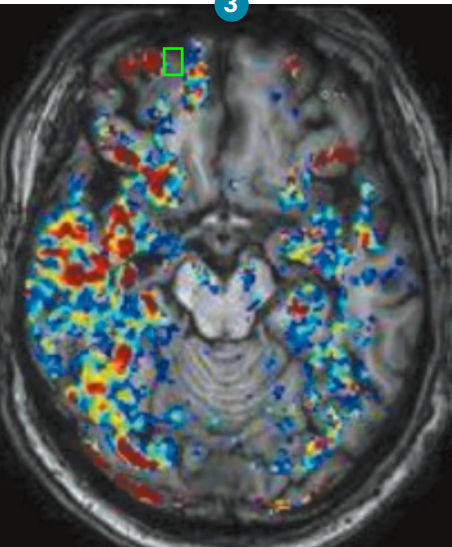
Un quart de siècle plus tard, cette observation des cerveaux bleus s'est révélée être un moment déterminant pour nos deux carrières et pour la connaissance scientifique dans son ensemble. Au fil des années, nous avons étudié plus précisément comment des fuites de la BHE, qui protège normalement le cerveau, engendrent parfois des maladies ou des troubles cérébraux.

Aujourd'hui, nous savons que la pénétration de la pyridostigmine dans le tissu cérébral participe au syndrome de la guerre du Golfe, bien que d'autres causes entrent également en jeu. Nos études ont aussi montré l'existence de

La barrière hématoencéphalique retient les agents pathogènes à l'intérieur des vaisseaux sanguins, en toute sécurité, loin du tissu nerveux

3

4



liens entre des lésions de la BHE – causées par le stress, mais aussi le vieillissement ou certaines blessures – et plusieurs pathologies cérébrales bien connues comme la maladie d'Alzheimer et des démences apparentées, les épilepsies et les lésions cérébrales dues à des traumatismes. Dans deux articles publiés en 2019, nous avons mis en évidence qu'avec l'âge, le bouclier protecteur du cerveau perd de son intégrité et commence à fuir, laissant entrer dans le tissu cérébral des protéines du sang qui ne s'y trouvent pas normalement. Ces protéines activent ensuite, à leur tour, une cascade de voies de signalisation dans les cellules cérébrales qui provoquent parfois certains des troubles les plus fréquents associés au vieillissement et à certaines maladies, dont la maladie d'Alzheimer: inflammation, activité anormale des neurones et troubles cognitifs.

LES FUITES DE LA BARRIÈRE PERTURBENT LES NEURONES

Ce lien de cause à effet est si puissant que si l'on bloque les réactions cellulaires provoquées par ces fuites, il est possible de faire régresser les signes de la maladie d'Alzheimer, du moins chez les rongeurs. C'est ce que nous avons fait: dans une de nos expériences, nous avons supprimé la réaction inflammatoire due à l'infiltration de protéines sanguines chez des souris âgées, grâce à un médicament qui protège les cellules du cerveau ou à des modifications génétiques qui empêchent certaines cellules de libérer des molécules inflammatoires. Quelques jours après ces traitements, les cerveaux âgés de ces souris ont commencé à fonctionner davantage comme des cerveaux plus jeunes: l'activité électrique anormale des neurones a diminué et les marqueurs de l'inflammation ont presque disparu. De plus, placées dans un

Après injection d'un traceur dans le sang, on est capable de visualiser les fuites de la barrière hématoencéphalique grâce à des scanners cérébraux: les infiltrations sont de plus en plus importantes à mesure qu'on vieillit. On ne voit en effet rien pour une personne âgée de 30 ans (1); à 42 ans, des taches bleues indiquent de petites fuites (2); à 65 ans, les taches rouges et jaunes signalent des flux plus importants (3); et à 76 ans, les fissures se répandent de plus en plus, laissant entrer dans le cerveau davantage de traceurs (4).

labyrinthe, les souris âgées se frayaient des chemins aussi rapidement et précisément que les jeunes rongeurs.

Il n'est pas envisageable de réaliser des expériences similaires chez l'humain, pour des raisons éthiques. Mais grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, nous avons pu comparer le cerveau de personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer à celui de personnes saines: nous avons constaté que les malades d'Alzheimer ont une BHE qui fuit.

EN CAUSE DANS LA MALADIE D'ALZHEIMER?

Les dégâts de la BHE sont-ils la vraie cause de la maladie d'Alzheimer ou d'autres pathologies cérébrales? Ils jouent certainement un rôle. Mais les choses sont rarement si simples. D'autres facteurs peuvent intervenir, notamment génétiques, ou des anomalies liées au vieillissement. Ou encore, les lésions de la BHE pourraient être un dommage collatéral de la maladie... Les expériences avec les souris ne permettent pas toujours de déterminer ce qui se passe réellement chez l'humain...

En tout cas, la théorie dominante sur la maladie d'Alzheimer (selon laquelle cette pathologie serait provoquée par l'accumulation d'une protéine anormale appelée «bêta-amyloïde» dans le cerveau) a été contestée ces dernières années. Ainsi, dans diverses expériences, les chercheurs ont réussi à diminuer les quantités de cette protéine dans le cerveau sans pour autant que la maladie ou ses troubles cognitifs ne disparaissent. Et les médicaments qui ciblent la protéine bêta-amyloïde ne se sont pas encore vraiment imposés comme traitement contre cette maladie.

Selon l'Organisation mondiale de la santé, 50 millions de personnes souffrent de démence dans le monde et 10 millions supplémentaires sont diagnostiquées chaque année, de sorte que de nombreux scientifiques affirment qu'il est grand temps d'envisager d'autres explications. Si des fissures dans le bouclier protecteur du cerveau déclenchent une chaîne de réactions conduisant à la maladie – une chaîne que, selon nos expériences, nous pourrions bloquer pour protéger le cerveau –, il s'agit d'une voie de recherche qui mérite d'être poursuivie.

Le terme même de «barrière» hématoencéphalique laisse entendre qu'il s'agirait d'une muraille entourant le cerveau. Mais en réalité, c'est plutôt un filtre. Notre cerveau reçoit 15 à 20% du sang enrichi en oxygène et pompé par le cœur, grâce à un réseau complexe de vaisseaux sanguins. Ces vaisseaux diffèrent de ceux du reste du corps, car ils possèdent des parois constituées de cellules très serrées et dotées de systèmes spécifiques de transport des molécules, ce qui forme un filtre semi-perméable. Les réseaux de cellules

cérébrales ont en effet besoin d'un environnement soigneusement contrôlé pour bien fonctionner. Ce filtre laisse donc passer des substances comme l'oxygène et le glucose (qui fournissent l'énergie nécessaire au fonctionnement des cellules), mais bloque les protéines sanguines, certains ions, les cellules du système immunitaire et les agents pathogènes.

Ce bouclier protecteur s'étend à la plupart des régions du cerveau, des couches externes du cortex, où se déroulent les fonctions cognitives les plus complexes, jusqu'aux profondeurs du cerveau, comme l'hippocampe, impliqué dans la mémoire. Des anomalies de ce filtre sont donc susceptibles de provoquer toutes sortes de troubles neurologiques.

Dans les années 1990, quand nous terminions nos premiers travaux sur le syndrome de la guerre du Golfe, nous savions que d'autres chercheurs avaient constaté des lésions de la BHE dans certains troubles cérébraux, dont la maladie d'Alzheimer. Après avoir travaillé à Jérusalem, l'une de nous (Daniela Kaufer) est alors allée à l'université Stanford pour son stage postdoctoral et apprendre davantage sur la façon dont le stress affecte le cerveau des souris, et l'autre (Alon Friedman) a poursuivi sa formation médicale en Israël, se spécialisant en neurochirurgie et, dans son propre cabinet, a confirmé les premières observations d'autres chercheurs qui avaient constaté des BHE défectueuses chez de nombreux patients souffrant de troubles neurologiques très différents. Mais que se passait-il, au juste, avec un bouclier endommagé?

DES « CULTURES » DE CERVEAUX

Pour le savoir, au milieu des années 2000, nous avons eu la chance de travailler à Berlin avec le regretté neuroscientifique Uwe Heinemann, de l'Institut de neurophysiologie, au sein du centre de médecine fondamentale de la Charité. Nous voulions évaluer les fonctions cérébrales juste après le début du dysfonctionnement de la BHE. Nous avons donc administré à des rats une substance chimique qui provoque des «trous» dans la barrière, puis nous avons disséqué leur cerveau et l'avons coupé en tranches, que nous avons gardées «vivantes» en les cultivant dans un liquide nourricier. Tout cela pour planter des électrodes dans les neurones des tranches de cerveau afin d'enregistrer leurs signaux électriques et leur mode de communication.

Les premiers jours ont été ennuyeux... Les neurones émettaient des signaux les uns après les autres, en *staccato*, de façon irrégulière, «parlant» comme si rien d'anormal ne s'était produit. Mais le cinquième jour, le «bavardage» des neurones a changé. De plus en plus de neurones se sont mis à émettre des signaux

ensemble, de façon synchronisée. Après une semaine, nous les avons alors stimulés avec un petit signal électrique, imitant un bref message provenant du cortex cérébral. Ce stimulus a alors provoqué une «tempête» électrique: tous les neurones se sont activés ensemble, à l'instar de ce que l'on observe dans le cerveau des personnes et des animaux souffrant d'épilepsie.

C'est un peu comme une «tempête Twitter»... Imaginez que vous créiez un compte Twitter aujourd'hui et que vous tweetiez quelque chose de sensationnel. Vous aurez probablement très peu de réactions, car vous n'avez pas encore beaucoup de followers. Mais si, dans les jours qui suivent, vous vous constituez un réseau plus important de followers et

Quand l'albumine traverse la barrière de protection cérébrale, une réaction en chaîne provoque la destruction des cellules cérébrales

que vous tweetez à nouveau la même déclaration, celle-ci aura alors de grandes chances d'être retweetée, ce qui recrutera d'autres followers, qui la retweeteront à leur tour, provoquant finalement une tempête de tweets sur la plateforme du média social.

DES TEMPÊTES ÉLECTRIQUES AU SEIN DES NEURONES!

De même, dans l'expérience où nous avons abîmé la BHE des rats, les neurones de leur cerveau ne se sont pas tout de suite désorganisés; mais après qu'ils ont passé une semaine à construire un nouveau réseau de connexions, une simple secousse a provoqué une tempête électrique. Ces décharges électriques, que nous appelons des «événements paroxystiques à ondes lentes», sont semblables à l'activité observée par d'autres scientifiques dans le cerveau de personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer ou d'épilepsie.

Cette tempête s'est produite seulement lorsque nous avons au préalable provoqué des fuites de la BHE; sans cela, les tranches de

cerveau émettaient normalement. Nous avons donc supposé qu'une substance présente dans le sang atteignait les neurones pour déclencher cette réaction. Nous avons alors injecté du sang directement dans le cerveau d'un jeune rat en bonne santé, dont la BHE était normale, et avons surveillé son activité électrique. Après plusieurs jours, la même tempête électrique est apparue dans son cerveau et s'est propagée. Mais quel facteur du sang, qui contient de nombreuses cellules et protéines, était en cause? Plusieurs expériences de filtrages et de tests nous ont permis d'identifier le coupable: l'albumine.

L'ALBUMINE: LE DÉBUT DES ENNUIS

Ce n'était pas vraiment une bonne nouvelle... Car l'albumine est présente un peu partout dans l'organisme et remplit de nombreuses fonctions. Que faisait-elle donc dans ce cas précis? Pour déterminer les étapes entre la perturbation du bouclier, la fuite d'albumine et l'apparition de troubles neurologiques, nous avons dû évoluer dans notre travail: l'une de nous (Daniela Kaufer) a déménagé à l'université de Californie, à Berkeley, pour diriger son propre laboratoire, et l'autre (Alon Friedman) a créé le sien, d'abord à l'université Ben-Gourion du Néguev, en Israël, puis à l'université Dalhousie, en Nouvelle-Écosse, et nous avons planifié une série d'expériences conjointes, à distance, sur plusieurs années.

D'abord, nous avons montré que, dans le cerveau, l'albumine stimule les astrocytes, des cellules cérébrales en forme d'étoiles qui soutiennent et protègent les neurones, tout en participant à leurs échanges. Lorsque l'albumine entre en contact avec un astrocyte, elle se lie à des récepteurs qui servent normalement de stations d'accueil pour une autre molécule appelée «facteur de croissance transformant bêta» (TGFβ). Entre autres choses, le TGFβ active les astrocytes et les cellules sentinelles nommées «microglies» pour déclencher une réaction inflammatoire.

Quand tout va bien, en général, une inflammation localisée et modérée permet au cerveau de limiter certains dommages en détruisant les cellules défaillantes ou les agents toxiques. Mais si l'albumine s'infiltre trop, les astrocytes et les microglies sont hyperstimulés et libèrent des quantités excessives de substances chimiques, notamment une surabondance de TGFβ. De sorte que cela détruit de nombreuses cellules cérébrales aux alentours, et les circuits neuronaux sont modifiés ou affaiblis: leurs fonctions s'en trouvent détériorées. Les médecins ont souvent observé cette même cascade inflammatoire destructrice chez des patients atteints de lésions

cérébrales traumatiques; d'ailleurs, cette dernière conduit parfois à des crises d'épilepsie.

Cette séquence se développe également dans le cerveau vieillissant, comme le laissent penser nos expériences avec des souris. Ces animaux vivent en moyenne un peu plus de deux ans. Nous avons donc laissé une colonie de souris vieillir paisiblement et avons examiné l'intérieur de leur cerveau à différentes périodes. Aucune albumine n'était présente dans le cerveau des jeunes souris; en revanche, la protéine commençait à s'amasser dans celui des rongeurs à partir d'un âge moyen. Nous avons alors constaté un net déclin de l'intégrité de la barrière, et la situation s'est aggravée à mesure que les souris vieillissaient. De plus, les animaux vieillissants avaient davantage de difficultés à se souvenir de leur chemin dans un labyrinthe, en comparaison de leurs congénères plus jeunes dont le cerveau ne contenait pas d'albumine.

Par ailleurs, quand l'albumine apparaît dans le cerveau, nous avons montré que le TGFβ est alors très actif. Nous avons donc coloré le cerveau des rongeurs afin de mettre en évidence la forme activée du facteur de croissance, ainsi que les astrocytes qui le produisaient. Résultat: l'inflammation liée au TGFβ commençait toujours après l'apparition de l'albumine dans le cerveau, et elle s'aggravait à mesure que la protéine s'infilttrait. Ce phénomène était même particulièrement important dans l'hippocampe, une région du cerveau qui joue un rôle clé dans la mémorisation.

CHEZ L'HUMAIN AUSSI

Mais qu'en est-il chez l'humain? Depuis cinq ans environ, nous avons prouvé que ce même processus se produit également. Nous avons utilisé des traceurs pour marquer les signes de fuite de la BHE dans le cerveau de personnes âgées de 20 à 70 ans. Et grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM), nous avons constaté que les fuites sont d'autant plus massives que les sujets sont âgés (voir la figure pages 68-69). D'autres chercheurs, comme Berislav V. Zlokovic de la Keck School of Medicine de l'université de Californie du Sud et ses collègues, ont utilisé des méthodes d'imagerie légèrement différentes pour mettre en évidence la détérioration de la barrière chez des personnes vieillissantes souffrant de troubles cognitifs. Par ailleurs, nous avons pu autopsier le cerveau de certains de nos sujets et avons constaté que des concentrations élevées d'albumine s'accompagnaient toujours de doses importantes de TGFβ au niveau des astrocytes. D'ailleurs, ces concentrations étaient d'autant plus fortes que les personnes étaient âgées ou avaient souffert de la maladie d'Alzheimer avant leur décès.

LA BARRIÈRE HÉMATOENCÉPHALIQUE VIEILLIT...

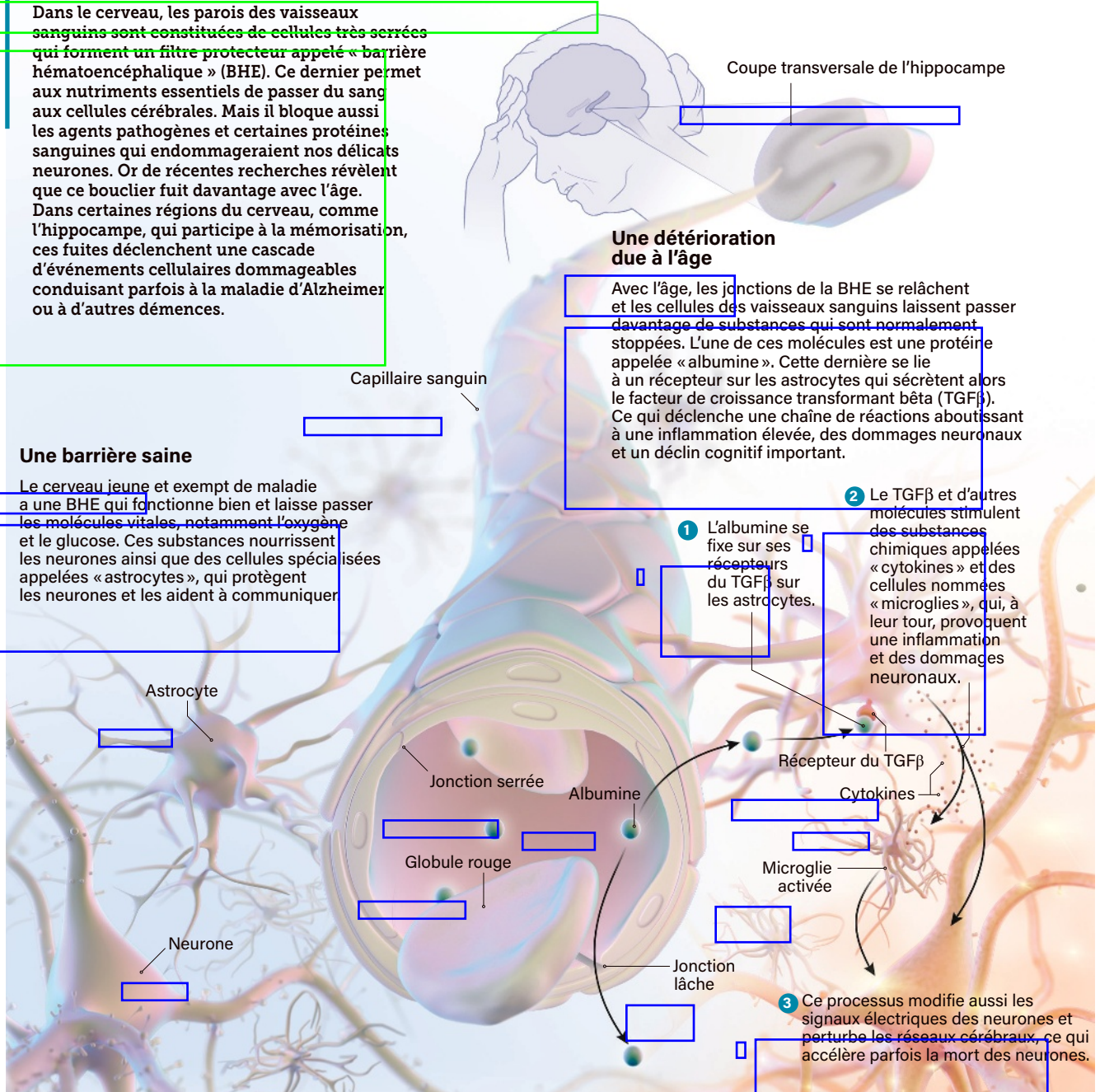
Dans le cerveau, les parois des vaisseaux sanguins sont constituées de cellules très serrées qui forment un filtre protecteur appelé « barrière hématoencéphalique » (BHE). Ce dernier permet aux nutriments essentiels de passer du sang aux cellules cérébrales. Mais il bloque aussi les agents pathogènes et certaines protéines sanguines qui endommageraient nos délicats neurones. Or de récentes recherches révèlent que ce bouclier fuit davantage avec l'âge. Dans certaines régions du cerveau, comme l'hippocampe, qui participe à la mémorisation, ces fuites déclenchent une cascade d'événements cellulaires dommageables conduisant parfois à la maladie d'Alzheimer ou à d'autres démences.

Une barrière saine

Le cerveau jeune et exempt de maladie a une BHE qui fonctionne bien et laisse passer les molécules vitales, notamment l'oxygène et le glucose. Ces substances nourrissent les neurones ainsi que des cellules spécialisées appelées « astrocytes », qui protègent les neurones et les aident à communiquer.

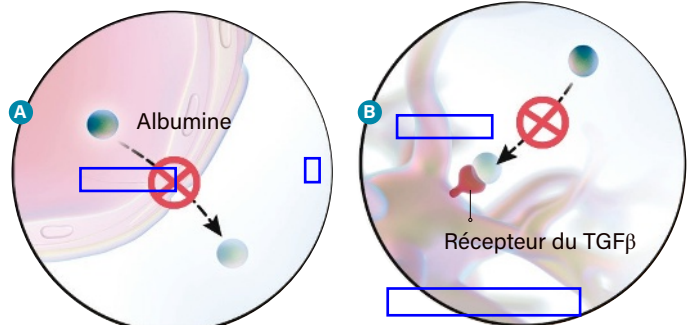
Une détérioration due à l'âge

Avec l'âge, les jonctions de la BHE se relâchent et les cellules des vaisseaux sanguins laissent passer davantage de substances qui sont normalement stoppées. L'une de ces molécules est une protéine appelée « albumine ». Cette dernière se lie à un récepteur sur les astrocytes qui sécrètent alors le facteur de croissance transformant bêta (TGFβ). Ce qui déclenche une chaîne de réactions aboutissant à une inflammation élevée, des dommages neuronaux et un déclin cognitif important.



Comment boucher les fuites ?

Parce que l'albumine qui traverse la BHE semble déclencher une réaction en chaîne dommageable pour le cerveau, les scientifiques souhaiteraient arrêter cette cascade. Une approche consisterait à colmater les fissures initiales du bouclier, mais les chercheurs n'ont pas encore trouvé un moyen efficace d'y parvenir (A). Ils ont donc décidé d'interrompre la séquence plus loin, quand l'albumine entre en contact avec les astrocytes. Chez les souris, un médicament expérimental appelé IPW bloque ainsi les récepteurs du TGFβ sur ces cellules, de sorte que l'albumine ne peut plus s'y accrocher (B). Les chercheurs ont aussi modifié génétiquement des rongeurs pour que leurs astrocytes ne produisent pas ces récepteurs. Ces deux techniques ont permis de « rajeunir » des cerveaux endommagés de souris âgées.



Mais que faire si la détérioration du bouchier se produit forcément avec l'âge? Il faut trouver un moyen de la bloquer... Ce que nous avons réalisé avec nos souris! Pas en empêchant l'albumine de s'infiltrer à travers la BHE, mais en bloquant la cascade de réactions produites par le TGFβ. Pour ce faire, nous avons produit des souris chez lesquelles nous avons «génétiquement» coupé la portion d'ADN qui permet aux astrocytes de produire des récepteurs du TGFβ. Lorsque les rongeurs étaient encore assez jeunes, nous avons implanté dans leur cerveau une petite pompe injectant de l'albumine. Et nous avons fait la même chose à un groupe de jeunes souris non modifiées génétiquement. Ensuite, nous avons placé tous les animaux dans un labyrinthe aquatique complexe (nous regardons souvent des souris nager!)

Résultat: les rongeurs portant encore des récepteurs du TGFβ sur leurs astrocytes ont eu beaucoup de difficulté dans le labyrinthe, alors que les souris sans récepteurs nageaient bien, rapidement et avec précision pour se sortir de la piscine, comme des animaux en bonne santé ne présentant pas d'albumine dans leur cerveau. Et quand nous avons modifié la configuration du labyrinthe, ces dernières ont aussi appris facilement le nouveau parcours, contrairement aux rongeurs avec les récepteurs. De plus, dans les cerveaux sans récepteur du TGFβ, tout allait bien: pas d'inflammation excessive ni d'activité neuronale anormale.

IPW: UNE FONTAINE DE JOUVENCE POUR LE CERVEAU?

Toutefois, chez les humains, le fait d'«invader» le gène codant le récepteur du TGFβ sur les astrocytes n'est pas une thérapie envisageable de sitôt. Il fallait donc trouver une autre solution... Or, à cette période, Barry Hart, chimiste chez Innovation Pathways, une jeune entreprise pharmaceutique de Palo Alto, en Californie, a conçu un médicament anticancéreux bloquant spécifiquement l'activité du récepteur du TGFβ. Hart nous a donc contactés pour nous suggérer de tester cette molécule, nommée IPW, sur nos souris (et depuis, nous avons tous les trois créé une entreprise pour poursuivre le développement de ce traitement).

Dès lors, quand nous avons administré le médicament à des souris d'âge moyen commençant à présenter des fuites d'albumine, nous avons constaté que leur cerveau retrouvait toute sa jeunesse. L'activité du TGFβ chutait à des niveaux observés chez des rongeurs jeunes et les marqueurs de l'inflammation diminuaient, tout comme l'activité neuronale anormale et la sensibilité aux crises épileptiques.

Autre surprise de taille quand nous avons testé le comportement et les facultés cognitives des souris traitées: elles se portaient bien! En effet, nous avons installé un autre labyrinthe et, cette fois-ci, y avons fait circuler des souris plus âgées, certaines traitées avec le IPW, d'autres non. Nous n'avions pas vraiment prévu que les rongeurs âgés s'en sortent bien, car nous pensions que leur cerveau présentait déjà des dommages irréversibles. Mais, en quelques jours, les animaux traités étaient presque aussi doués dans le labyrinthe que des rongeurs deux fois moins vieux, alors que les souris âgées sans traitement se sont contentées de nager sans but. En outre, les souris ayant reçu le médicament ne présentaient aucun signe de «tempête Twitter», et peu d'inflammation. C'était comme si le brouillard inflammatoire s'était levé, permettant au cerveau de retrouver toute sa jeunesse.

Ce résultat était inattendu, même pour nous! Car, comme la plupart des gens, nous pensions que les dommages liés au vieillissement correspondaient à un voyage aller, sans retour possible... C'est probablement le cas pour les troubles cérébraux graves, comme dans la maladie de Parkinson ou celle d'Alzheimer à des stades avancés, après que les protéines anormales se sont énormément accumulées au point de tuer des réseaux entiers de cellules cérébrales. Mais nos travaux montrent qu'une intervention précoce, avant l'apparition d'une forte mortalité cellulaire, permettrait au cerveau vieillissant de rebondir.

Et nos études sont aussi valables pour des blessures cérébrales ponctuelles – pas seulement pour la détérioration progressive de la BHE. En effet, le fait de traiter des rongeurs avec l'IPW après une commotion ou une lésion cérébrale a atténué l'inflammation, les crises épileptiques et le déclin cognitif associés normalement à ce genre de traumatisme, en comparaison avec les animaux n'ayant pas reçu le médicament.

Nous vieillissons tous... C'est un fait. Et les neuroscientifiques comprennent encore mal tous les mécanismes en jeu lors de la transition d'un cerveau jeune et sain à un cerveau vieux et dysfonctionnel. Mais aujourd'hui, les fuites de la BHE sont à prendre en considération. D'autant que nos premiers résultats suggèrent que le cerveau vieillissant conserve encore des capacités à se remodeler et à se restaurer, peut-être avec un petit coup de pouce. De sorte que nous allons continuer à chercher des stratégies et thérapies permettant de réduire les fuites de la BHE. Ironie du sort: dans le passé, les recherches sur la barrière se concentraient sur les moyens d'augmenter sa perméabilité, et non de la limiter, afin de faire passer plus de médicaments dans le cerveau pour traiter des tumeurs ou des infections. Il est donc temps d'inverser la tendance! ■

BIBLIOGRAPHIE

V. V. Senatorov Jr et al., **Blood-brain barrier dysfunction in aging induces hyperactivation of TGFβ signaling and chronic yet reversible neural dysfunction**, *Science Translational Medicine*, 2019.

D. Z. Milikovsky et al., **Paroxysmal slow cortical activity in Alzheimer's disease and epilepsy is associated with blood-brain barrier dysfunction**, *Science Translational Medicine*, 2019.

D. Kaufer et al., **Acute stress facilitates long-lasting changes in cholinergic gene expression**, *Nature*, 1998.

A. Friedman et al., **Pyridostigmine brain penetration under stress enhances neuronal excitability and induces early immediate transcriptional response**, *Nature Medicine*, 1996.

L'ESSENTIEL

> Au début du ^{xx}e siècle, à la suite d'un stage dans une station marine, un jeune homme, Édouard Chatton, se prit de passion pour l'étude de la multitude d'organismes unicellulaires qui peuplent les eaux : les protistes.

> À cette époque, on commençait juste à découvrir leur étonnante diversité et leur abondance.

> De Banyuls-sur-Mer à Sète en passant par Paris, Tunis et Strasbourg, Chatton a scruté ces vies minuscules et décrit la biologie de nombre d'entre elles.

> En cherchant à construire un arbre du vivant les englobant, il a notamment fait émerger des concepts visionnaires, comme la distinction entre cellules procaryotes (sans noyau) et eucaryotes (avec noyau).

LES AUTEURS



CATHERINE JESSUS
directrice de recherche du CNRS au sein du Laboratoire de biologie du développement, à l'institut de biologie Paris-Seine, à Sorbonne Université



VINCENT LAUDET
professeur de biologie marine à l'institut de science et technologie d'Okinawa, au Japon, et à l'Academia Sinica, à Taïwan

Édouard Chatton, des mondes

Un pilulier, un microscope, des pastels et une passion à toute épreuve, tels sont les ingrédients qui, dans la première moitié du ^{xx}e siècle, ont conduit un jeune étudiant sur les traces d'un peuple invisible d'une richesse insoupçonnée...

Août 1984, Banyuls-sur-Mer, à quelques kilomètres de la frontière espagnole. L'équipe du laboratoire Arago profite de l'été pour se lancer dans un grand nettoyage des greniers poussiéreux de la station méditerranéenne, aujourd'hui connue sous le nom d'«observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer». Ce faisant, ils exhument plusieurs dizaines de vieux rouleaux de papier cartonné de plus de 1 mètre de large, dont certains en assez mauvais état, recouverts de dessins aux couleurs vives réalisés à la craie ou au pastel sec. Destinées à la décharge, ces planches de 1,50 mètre de hauteur sont sauvées *in extremis* par Marie-Odile Soyer-Gobillard, alors chercheuse en biologie cellulaire marine au laboratoire, qui y reconnaît la main d'un ancien directeur de la station, Édouard Chatton. Ce que confirme le disciple et ami de ce dernier, André Lwoff, alors âgé de 82 ans, présent dans la station balnéaire cet été-là.

Lauréat du prix Nobel de physiologie ou médecine en 1965 avec François Jacob et Jacques Monod pour «leurs découvertes sur la régulation génétique de la synthèse des enzymes et des virus», Lwoff a en effet

commencé sa carrière dans les stations marines de Roscoff et de Banyuls, en y étudiant la morphologie des ciliés – des organismes unicellulaires munis de cils – sous la direction de Chatton. Et il connaît fort bien ces planches, qui, pour la plupart, représentent les objets des études de son maître: les protistes. Ces organismes unicellulaires peuplent toutes les eaux, que ce soient les mers et océans où ils sont les constituants majoritaires du plancton, les eaux douces – des lacs jusqu'aux flaques de boue –, ou l'intérieur d'autres organismes vivants où ils vivent en symbiose, en parasites ou en simples commensaux. Les grandes planches murales de Chatton servaient à illustrer les cours de biologie qu'il donnait en amphithéâtre. Enthousiaste, Marie-Odile Soyer-Gobillard les met en valeur à la faveur de quelques expositions, puis elles regagnent les archives de la station marine.

Elles prenaient à nouveau la poussière quand, il y a quelques années, nous sommes tombés à notre tour en arrêt devant elles. Même dans la pénombre de la bibliothèque, leurs couleurs nous ont fascinés. L'un de nous (Vincent Laudet) venait de prendre la direction du laboratoire Arago, en 2015, mais à notre grande confusion, nous ignorions tous deux qui était Chatton.

Les *Eudorina*, des algues vertes unicellulaires d'eau douce qui vivent sous forme de colonies, font partie des protistes qu'Édouard Chatton a dessinés pour ses étudiants. Sur les 125 planches murales qu'il a préparées, seules 72 nous sont parvenues. On découvre aujourd'hui encore de nombreuses espèces de ce groupe.



arpenteur minuscules

Depuis, au fil de nos recherches bibliographiques, nous avons découvert qu'au-delà du talentueux dessinateur et coloriste, Chatton a été un chercheur passionné et visionnaire à une période charnière, la première moitié du ^{xx}e siècle, où les concepts qui gouvernaient la biologie étaient en profonde mutation. En France, les réticences à ces changements étaient grandes. La théorie de la sélection naturelle de Darwin peinait à s'imposer dans le pays du naturaliste Jean-Baptiste Lamarck qui, au début du ^{xix}e siècle, avait défendu une vision de l'évolution fondée sur la transmission à sa descendance de caractères acquis par un organisme lors de son adaptation à un environnement particulier. Quant aux sciences expérimentales, elles avaient du mal à percer face aux courants conservateurs menés par des naturalistes cantonnés à la description. Embrassant la théorie darwinienne et les sciences expérimentales, Chatton est parvenu à faire émerger des concepts clés de la biologie moderne.

UNE RÉVÉLATION DANS UNE GOUTTE D'EAU

Né en 1883 en Suisse, près de Fribourg, Chatton a passé son enfance à Belfort où, très jeune, sous l'influence d'un grand-père botaniste amateur, il a été saisi par le démon du naturalisme. Bachelier en 1901, le biologiste en herbe s'est installé à Paris pour y débiter une

licence de sciences naturelles à la Sorbonne. À l'époque, les stations marines avaient déjà fleuri sur les côtes françaises, en particulier celles de Roscoff et de Banyuls, qu'Henri de Lacaze-Duthiers, professeur à la Sorbonne, avait fondées à la fin du ^{xix}e siècle. Elles accueillèrent professeurs, assistants et étudiants pour des vacances studieuses dédiées à l'observation des faune et flore marines. C'est ainsi qu'en 1902, à Roscoff, le jeune homme a éprouvé le choc qui a déterminé toute sa vie scientifique : il a découvert le foisonnement des êtres unicellulaires qui pullulaient dans la petite goutte d'eau de mer qu'il avait placée sous son microscope. Émerveillé par leur diversité prodigieuse, leur activité incroyable, leur beauté, Chatton eut, comme il l'écrivit par la suite, « la révélation d'un monde nouveau », un monde qu'il pressentait immense et qui était inexploré à l'époque.

Munis d'un noyau et de toute une compartimentation intracellulaire, les organismes unicellulaires qui l'intéressaient, les protistes, sont bien plus complexes que les bactéries. On sait aujourd'hui qu'il règne une incroyable diversité parmi eux, ce qui permet de comprendre la mise en place des grandes fonctions des cellules retrouvées chez les organismes multicellulaires, dont l'humain. En ce début du ^{xx}e siècle, les scientifiques n'étaient qu'à l'orée de ce monde immense, qu'aujourd'hui nous sommes encore loin d'avoir fini d'explorer (voir l'encadré ci-dessous).

LES PROTISTES, UNE PRODIGIEUSE DIVERSITÉ

Océan, flaque d'eau, échantillon de sol, fragment de glace polaire, lac salé, étang pollué, intestins des animaux, tous ces milieux bouillonnent de vies minuscules d'une richesse insoupçonnée. Ce monde bouge, se reproduit, mange et meurt à une échelle où agissent des forces qui n'existent pas pour nous. À cette échelle, un étang est un océan, une simple flaque un lac immense et une heure, une vie entière. Ce monde fascinant est celui des protistes, un groupe hétéroclite d'organismes à une seule cellule, aujourd'hui connus sous le nom d'« eucaryotes unicellulaires » (eucaryote signifiant organisme dont les cellules ont un noyau).

Il existe des milliers, voire des millions d'espèces de protistes, certains photosynthétiques, d'autres prédateurs ; certains libres, d'autres fixés, certains vivant en symbiose, associations mutuellement profitables avec d'autres organismes y compris l'humain, d'autres parasites et responsables de maladies graves, et d'autres encore s'assemblant en groupes ou colonies. Tous les modes possibles de vie existent, et on en découvre tous les jours. Il a fallu plus

d'une centaine d'années pour que les scientifiques commencent à comprendre quelles sont leurs parentés. Aujourd'hui, ils sont regroupés en neuf grands ensembles. On y rencontre par exemple les trypanosomes, responsables de la maladie du sommeil, les dinoflagellés (ci-contre), grâce auxquels les coraux édifient leurs fantastiques architectures, les amibes, parfois responsables de dysenteries spectaculaires, les coccolithophores, qui s'accumulent au fond des océans et permettent aux prospecteurs de pétrole de détecter des gisements, les volvox, qui représentent une tentative de vie multicellulaire, et même le fameux blob, dont la cellule géante a, semble-t-il, des facultés d'apprentissage.

Les dinoflagellés du genre *Haplozoon* s'organisent en chaînes de cellules au fil des divisions cellulaires à partir d'une seule cellule munie d'un stylet qui lui permet de pénétrer dans les cellules intestinales du ver marin que ces organismes parasitent. Sur ce dessin d'Édouard Chatton, on distingue les chromosomes de chaque cellule.





André Lwoff (debout) et son maître Édouard Chatton, probablement dans les années 1930.

Chatton fut fasciné par la complexité des microarchitectures présentes dans les cellules des protistes et des métamorphoses bouleversantes qui ponctuent leur vie, qui leur permettent de coloniser différents milieux, de se déplacer ou de se fixer, de se nourrir, de se reproduire de façon sexuée ou clonale, bref de récapituler l'ensemble des fonctions du vivant de façon extrêmement élaborée, à l'échelle de leur unique cellule. Il comprit que pour les étudier, il lui faudrait travailler dans des stations marines, car s'ils peuplaient tous les milieux, la mer restait la source majeure de ces petits organismes. À la suite de sa licence, en 1904, il entreprit des travaux de recherche au laboratoire Arago de Banyuls, alors dirigé par Georges Pruvot. Ce dernier, qui avait délaissé la zoologie pour l'océanologie, laissa le jeune homme libre de choisir ses sujets d'études et de les mener en toute autonomie.

DES DINOFLAGELLÉS À L'INSTITUT PASTEUR

Les premières découvertes de Chatton furent d'emblée fracassantes. Il fut le premier à identifier et décrire certaines familles de dinoflagellés, des protistes pourvus d'un flagelle qui leur permet de nager. Si les amateurs d'huîtres connaissent trop bien ces microorganismes parfois responsables d'intoxication alimentaire, certains vivent aussi en symbiose avec les coraux, leur assurant 80% de leur source d'énergie. Le naturaliste se consacra à leur étude de nombreuses années. Dès ses débuts, il renversa quelques dogmes bien établis. Il montra ainsi que certains dinoflagellés sont parasites alors qu'on les considérait comme des êtres exclusivement libres. Il observa aussi qu'ils sont capables de rester agrégés en longs

cordons, des formes précédemment décrites par erreur comme étant des êtres multicellulaires (voir le dessin page ci-contre).

Par ailleurs, il prouva que ce qui avait été interprété comme des formes musculaires atypiques de certains petits crustacés n'était rien d'autre que les chromosomes géants de dinoflagellés parasites. Une observation importante, car, quelques années plus tôt, plusieurs biologistes aux États-Unis et en Allemagne avaient émis l'hypothèse que les chromosomes étaient le support de l'hérédité. À cette époque en effet, on venait de redécouvrir les travaux de Gregor Mendel sur les lois de l'hérédité, et les biologistes recherchaient activement quel élément des cellules transportait les gènes – les caractères transmis – d'une génération à une autre. Tout organisme muni de chromosomes bien visibles les intéressait donc dans ce contexte.

En 1906, à 23 ans, Chatton publia ses quatre premiers articles, qui le consacrèrent comme le spécialiste des dinoflagellés parasites et, plus largement, comme un protistologue à suivre. L'année suivante, il fit un choix de carrière *a priori* surprenant, mais soigneusement réfléchi: il rentra à l'institut Pasteur, à Paris. Cette année-là, le pasteurien Alphonse Laveran obtint le prix Nobel pour la découverte de l'agent du paludisme: le plasmodium... un protiste! Cette découverte avait révolutionné la vision des agents pathogènes, alors considérés exclusivement comme des bactéries ou des virus. L'institut Pasteur s'était alors ouvert à ce «nouveau monde» et en avait accueilli un jeune expert, Chatton.

L'institut fit preuve d'une grande ouverture d'esprit en acceptant que, pendant ses douze années comme pasteurien, le jeune homme continue ses études sur les protistes marins, non pathogènes pour l'humain, en parallèle de ses travaux sur les agents infectieux d'intérêt de l'institut. Chatton poursuivit donc ses séjours à Roscoff, mais surtout à Banyuls, dont l'attrait était peut-être décuplé par le fait qu'il était tombé amoureux de Marie Herre, une jeune Banyulencque, qu'il épousa en 1908. Pourquoi avoir choisi l'institut Pasteur? En premier lieu, la recherche y bénéficiait de moyens significatifs, supérieurs à ceux des universités. Et, surtout, l'institut développait une méthode expérimentale rigoureuse qui reposait sur l'établissement de cultures cellulaires. Celles-ci permettaient une étude précise des protistes, isolés, sans contaminants, dans des milieux contrôlés par le chercheur... à l'opposé du naturalisme prôné par les universités, où l'on se limitait souvent à observer des communautés d'organismes unicellulaires grouillant dans leur milieu naturel. Ces cultures pures rendaient le chercheur maître du jeu: il pouvait perturber les conditions du milieu afin d'en voir les conséquences sur la physiologie de

l'organisme qu'il étudiait, sans se soucier que d'autres organismes contaminants ne soient à l'origine des réponses qu'il observait.

Cette formation pasteurienne marqua toute la vie scientifique de Chatton, promoteur et expert reconnu de la culture pure. C'est ainsi qu'en 1933, le jeune Jacques Monod le remercia pour l'envoi de souches de paramécies en mentionnant : « Quant à leur pureté, j'y crois beaucoup plus qu'à l'évangile de mes pères. » Pour autant, la période ne fut pas calme pour Chatton. En 1913, il fut envoyé à l'institut Pasteur de Tunis pour y seconder Charles Nicolle (Prix Nobel en 1928 pour ses travaux sur le typhus). Sommé par la déclaration de guerre de choisir entre ses deux nationalités, suisse ou française, il opta pour la seconde afin de mieux servir le pays où il avait été éduqué. La première lui aurait pourtant évité l'ordre de mobilisation qui l'envoya en 1914 dans l'enfer des tranchées du nord de la France. En 1915, il en sortit assez gravement blessé, et, après plusieurs mois de convalescence, rejoignit son dépôt à Tunis, d'où il fut envoyé, en 1916, sur une nouvelle zone de combat dans le Sud tunisien.

SUR LA PISTE DES MICROBES HUMAINS

Cependant, privé de son principal collaborateur, Charles Nicolle s'impatientait. Il convainquit l'état-major des armées que Chatton servirait mieux l'effort de guerre en étudiant les agents de la dysenterie qui dévastait les troupes françaises qu'en faisant le coup de feu dans le Sud tunisien. Et voici le protistologue chargé de monter de toutes pièces un laboratoire militaire de bactériologie à Gabès, ce dont il s'acquitta avec succès. En 1918, il rejoignit Tunis, où il devint directeur-adjoint de l'institut Pasteur. Pendant toute sa période tunisienne, Chatton explora et décrivit les cycles de vie d'un énorme nombre d'agents pathogènes humains qu'il extrayait d'à peu près toutes les parties du corps, intestin, sang, liquide céphalorachidien, conjonctifs, téguments... et qu'il étudiait avec la rigueur inhérente aux méthodes pasteuriennes.

De retour à Paris en 1919, le jeune homme fit un nouveau choix de carrière, encore une fois étonnant à première vue, mais de fait mûrement pesé : l'université de Strasbourg. D'allemande, cette université était devenue française et l'État avait décidé de fortement la soutenir, pour qu'elle garde le niveau de modernité de sa période germanique et n'ait aucun regret vis-à-vis de son ancienne nationalité... Il y avait donc

Les eucaryotes proviennent de la symbiose entre une archée et une bactérie. De nombreuses lignées se sont éteintes entre Feca, le premier organisme qui s'est séparé des archées pour ne donner que des eucaryotes, et Leca, l'ancêtre commun de tous les eucaryotes actuels.

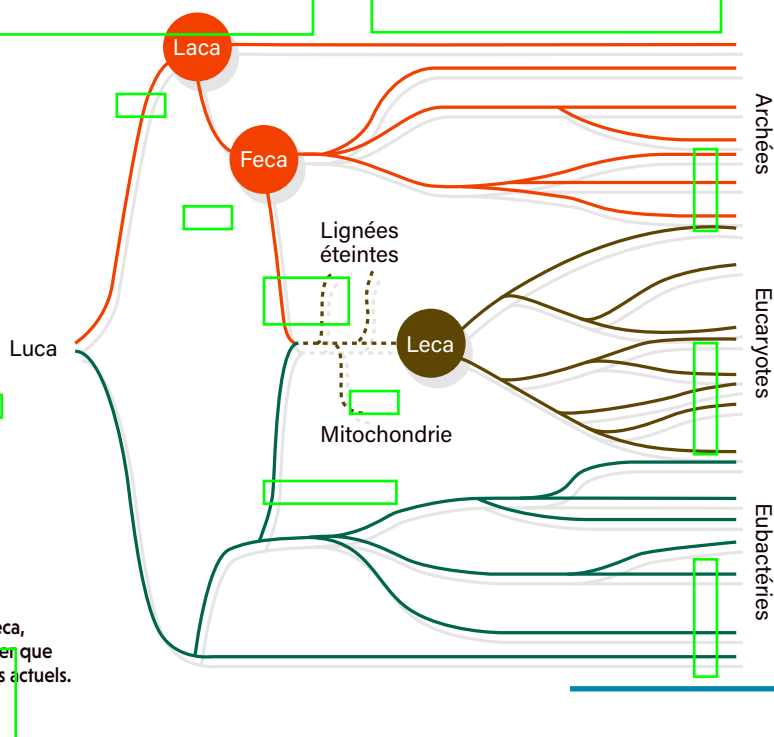
PROCARYOTES ET EUCARYOTES, UN CONCEPT CLÉ

Tous les organismes vivant sur la Terre descendent d'un organisme qui vivait il y a environ 3,7 milliards d'années, Luca (pour *Last universal common ancestor*). Les premières formes de vie étaient simples : une membrane séparant milieux intérieur et extérieur et contrôlant les échanges avec l'environnement, un cytoplasme fournissant un milieu favorable pour les réactions chimiques de la vie et, flottant dans ce cytoplasme, le matériel génétique, un filament d'ADN ou d'ARN, le plus souvent circulaire, contenant les instructions codées pour produire un nouvel organisme. Pendant 1,5 milliard d'années, ces cellules ont ainsi représenté l'unique forme de vie présente sur notre planète. Pendant cette période, elles se sont énormément diversifiées, donnant en particulier deux grandes séries d'organismes dits « procaryotes » (c'est-à-dire sans noyau cellulaire), les bactéries et les archées.

Mais il y a environ 1,5 milliard d'années, une innovation essentielle s'est produite : l'association symbiotique entre une bactérie et une archée a produit une nouvelle cellule équipée d'une mitochondrie (une centrale énergétique) et dont le matériel génétique s'est entouré d'une enveloppe le séparant du reste du cytoplasme : le noyau cellulaire était né et, avec lui, les eucaryotes,

subdivision du monde vivant qui regroupe tous les organismes dont les cellules contiennent un noyau individualisé : animaux, paramécies, plantes, amibes, champignons, algues... Cette innovation spectaculaire a été déterminante pour la suite de l'histoire de la vie, car elle a permis une spécialisation de plus en plus raffinée des cellules. C'est dire l'importance conceptuelle des termes « eucaryotes » et « procaryotes », forgés par Édouard Chatton.

L'une des grandes questions actuelles de la biologie est de savoir comment les eucaryotes sont apparus. Une découverte récente amène des éléments très intéressants de ce point de vue. En effet un groupe particulier d'archées, dit « d'Asgård » (en référence au royaume divin de la mythologie scandinave), a été identifié comme étant le groupe frère de tous les eucaryotes. Cette découverte est importante, car elle bat en brèche notre vision de l'organisation du vivant en trois règnes (bactéries, archées et eucaryotes) en n'en maintenant plus que deux, les bactéries et les archées. Les eucaryotes ne sont, dans cette vision, qu'un groupe d'archées qui a splendidement réussi. Les archées d'Asgård sont anaérobies, c'est-à-dire qu'elles ne supportent pas l'oxygène, et surtout elles ne vivent pas seules, mais doivent être associées à d'autres archées et à d'autres bactéries. La coopération entre cellules serait donc à la base de notre histoire !



là des moyens, y compris en salaires. Car à l'institut Pasteur, si les laboratoires étaient bien équipés, les émoluments étaient à l'époque misérables, suivant en cela les principes de son directeur, Émile Roux, auquel on prête l'adage «l'homme est ainsi fait qu'il ne travaille bien que dans le besoin».

Autre aspect essentiel pour Chatton: l'université, par rapport à l'institut Pasteur, lui garantissait la liberté de choix de ses sujets de recherche, qu'il souhaitait orientés vers la connaissance du monde des unicellulaires, indépendamment de leur potentiel pouvoir pathogène pour l'humain. Et, enfin, le biologiste était motivé par l'enseignement. La réalisation des planches murales qu'il débuta à Strasbourg est évocatrice de ses talents de pédagogue, attestés par ses nombreux élèves. En 1927, à la demande du ministère, il publia deux rapports sur l'enseignement des sciences naturelles, qu'il proposa de réformer en profondeur en décroissant et diversifiant les disciplines, en rendant les étudiants plus actifs et plus impliqués et en prônant le concept de pluridisciplinarité, toujours d'actualité: «La subordination de plus en plus étroite des sciences biologiques aux sciences physiques est le trait le plus caractéristique de leur évolution récente. Il n'est pas de question où le chercheur ne se heurte aujourd'hui à un problème physico-chimique et souvent mathématique. Hormis le classificateur, il n'y aura plus dans l'avenir de naturaliste qui puisse se dispenser d'une initiation physico-chimique et partant mathématique.» Un constat formulé à l'identique de nos jours!

DES TRÉSORS DANS UN PILULIER

Le voici donc professeur de l'université de Strasbourg, où il organisa un laboratoire de protistologie. Il passait ses étés dans les stations marines de Roscoff ou Banyuls à collecter les protistes qu'il rapportait à Strasbourg, où il les mettait en culture et les étudiait. La mer n'en était pas la seule source d'ailleurs, car ils sont partout! Chatton ne sortait jamais sans quelques piluliers dans ses poches où il recueillait tout liquide qu'il suspectait d'abriter des protistes inconnus. Les héros de ses 250 publications venaient des endroits les plus divers: lacs vosgiens, tourbières rhénanes, plages du Massachussetts, étangs d'eau saumâtre, marais salants, bassin des crocodiles du Muséum national d'histoire naturelle, lagunes bordelaises, abattoirs parisiens, égouts divers, Sahara tunisien, cathédrale de Strasbourg... Mais il les extrayait aussi d'un abondant bestiaire: vers, mollusques, crustacés, mouches (dont la célèbre tsé-tsé), moustiques, hannetons, tiques, puces, punaises, poux, poissons, geckos, vipères, lézards, chauves-souris, chiens, chats, souris, moutons... Ce fut également l'époque à laquelle il forma ses premiers élèves, dont certains eurent des carrières scientifiques prestigieuses.

À LIRE

Retrouvez les méticuleux dessins d'Édouard Chatton dans l'ouvrage de Catherine Jessus et Vincent Laudet, *Les Vies minuscules d'Édouard Chatton*, CNRS, 2020.



Rhipidodendron splendidum est un protiste d'eau douce qui vit en colonies en forme de drapeaux. Les cellules sont disposées à l'extrémité de tubes fusionnés entre eux à leur base. Végétal ou animal? La question a fait l'objet de nombreux débats depuis le XIX^e siècle, cet organisme ressemblant à une algue ayant perdu son chloroplaste, un compartiment caractéristique des végétaux. L'étude de son génome a finalement révélé qu'il ne s'agit pas d'une algue à proprement parler.



Ainsi, en 1921, à Roscoff, il encadra le stage d'un très jeune étudiant: André Lwoff. Une rencontre qui bouleversa la vie des deux protagonistes. Lwoff apprit la science des protistes sous la direction de Chatton, à qui il voua une admiration éperdue pendant toute sa vie, comme en témoigne une correspondance fournie que seule la mort du maître a interrompue. Lwoff dépassa vite le statut d'élève pour devenir le collaborateur du protistologue et son meilleur ami. Chatton forma par ailleurs un futur comparse de Lwoff, Jacques Monod, devenu son assistant à Strasbourg.

Après treize années en Alsace, cependant, Chatton souffrit de l'éloignement de la source majeure des protistes qu'il étudiait, la mer. Il postula avec succès à un poste de professeur à l'université de Montpellier, dotée de ce dont il rêvait: une station de biologie marine, localisée à Sète. En 1932, il s'y installa et prit la direction de cette station, qu'il trouva dans une situation assez délabrée. Le protistologue déploya l'énergie dont il était coutumier pour la moderniser et l'ouvrir à l'international. Enfin, en 1937, il réalisa son rêve: devenu professeur à la Sorbonne, il prit la direction de la station marine de Banyuls, où il avait fait ses premiers pas de chercheur et ses premières grandes découvertes, où était installé un laboratoire moderne, où étudiants et chercheurs de toutes nationalités séjournaient dans une ambiance stimulante d'émulation intellectuelle, où, enfin, le littoral offrait un environnement particulièrement riche en protistes.

Hélas, après une petite année d'installation, la guerre débuta. Édouard Chatton passa tout son temps, toute son énergie à maintenir en activité le laboratoire, face aux contraintes du régime

LA PROTISTOLOGIE, UNE SCIENCE D'AVENIR

Un siècle après Edouard Chatton, on pourrait imaginer qu'on a fait le tour de la question, décrit l'essentiel des protistes et que cette science s'est étiolée. C'est tout le contraire ! Plus on plonge dans ce monde minuscule, plus on découvre des nouveautés phénoménales. Le plus fascinant est qu'il n'est pas nécessaire d'aller loin, certaines découvertes récentes ont été faites dans des flaques d'eau devant nos portes !

Notre connaissance des eucaryotes unicellulaires s'est construite en isolant et cultivant des protistes comme Chatton le faisait et en collectant des données précises sur chacun de ces organismes. Mais seule une infime partie des espèces de protistes sont étudiables de cette façon, car nombre d'entre eux ne se multiplient pas en culture dans les laboratoires. Mais ces dernières années, des approches utilisant les techniques récentes de séquençage de l'ADN à haut débit ont permis de caractériser la diversité des organismes présents dans un échantillon d'un milieu donné, grâce à l'obtention de la séquence complète ou quasi complète des génomes de ces organismes. On obtient ainsi des informations sur des eucaryotes unicellulaires très divers impossibles à cultiver, ni même à observer. Grâce à ces nouveaux développements, l'écologie microbienne se développe vite et notre connaissance de ces organismes progresse de façon spectaculaire.

Les protistologues d'aujourd'hui échantillonnent partout sur la planète en séquençant leurs collectes. C'est ce qu'ont réalisé les membres de l'expédition Tara Océan (et en particulier des chercheurs des stations de Roscoff, de Banyuls et de Villefranche-sur-Mer, chères à Chatton) qui ont ainsi évalué la diversité de plus de 300 communautés marines de plancton prélevées dans les océans. Ils ont révélé plus de 150 000 séquences individuelles distinctes, dont plus d'un tiers représentent des espèces et même des groupes entiers totalement nouveaux. Les données de Tara ont ainsi mis en évidence l'énorme biodiversité marine des protistes, jusqu'alors sous-estimée

malgré les efforts de Chatton et de ses collègues. Mais les chercheurs n'ont pas seulement « ratissé large » en découvrant de nouvelles formes de vie, ils ont aussi « labouré profond » en étudiant en détail le fonctionnement de protistes bien connus, comme la paramécie. Ainsi, des chercheurs anglais ont récemment visualisé comment les cils présents dans sa cavité orale manipulent les particules alimentaires. Ils ont caractérisé les mouvements collectifs de ces cils et les propriétés complexes qui émergent de leurs battements. Ils tentent à présent de créer des structures artificielles qui fonctionnent sur le même principe et qui pourraient servir de microtamis « intelligents ». Ces études apportent aussi des données intéressantes pour comprendre des maladies congénitales graves, les ciliopathies, liées à des anomalies de ces cils qui induisent des défauts du développement embryonnaire. Chatton, qui a été le premier à comprendre l'organisation des cils chez les protistes ciliés comme la paramécie, aurait sans doute savouré ces nombreuses avancées !



Le voilier
de l'expédition
Tara Océan.

de Vichy, aux réquisitions forcées de matériel, à la désorganisation de la Sorbonne... Finalement, l'armée allemande évacua en totalité le village de Banyuls et l'occupa. Exilé à Prades, Chatton se désespérait à l'idée des dégradations que devait subir sa station marine. De fait, elles furent considérables malgré l'énergie incroyable qu'il avait déployée pour sauver ce qui pouvait l'être. En 1945, il put installer à nouveau le laboratoire, mais n'en profita pas. Victime d'un accident vasculaire cérébral en 1946, il s'éteignit l'année suivante, à l'âge de 63 ans.

UNE VISION GLOBALE DU VIVANT

Quelles découvertes, quels concepts Chatton nous a-t-il légués ? Il fut d'abord l'explorateur pionnier d'un monde géant, celui des milliers, voire millions d'espèces de protistes. Mais il

n'arpentait pas ce monde avec l'esprit du naturaliste soucieux d'établir des catalogues exhaustifs. En cette période marquée par la théorie de l'évolution de Lamarck, sous-tendue par la sélection naturelle des espèces que Darwin avait proposée, Chatton s'attachait à comprendre les filiations entre ces protistes, à édifier leur arbre généalogique, à en déterminer les racines, qui nous rapprochent des premières cellules apparues sur la planète il y a quelques milliards d'années, à en dessiner le foisonnement des branches que forment leurs descendants, les organismes multicellulaires. Il avait une capacité rare à faire jaillir à partir de petites observations méticuleuses une vision globale du monde vivant, à synthétiser et à conceptualiser.

En 1925, il récupéra une amibe inconnue dans le bassin des crocodiles du Jardin des plantes. Peinant à comprendre où elle se plaçait



Grâce à deux techniques distinctes (coloration au fer, à gauche, à l'argent, à droite), Édouard Chatton a mis en évidence deux structures bien distinctes dans le protiste cilié *Glaucoma piriformis* : des stries rectilignes munies de granules, ou cinétosomes (à gauche), et des cordons sinueux (à droite). Il a ainsi montré que les stries et les granules persistaient au fil des divisions cellulaires et produisaient les cils du protiste.

dans l'arbre phylogénétique des organismes unicellulaires, il la nomma *Pansporella perplexa*. C'est pourtant à partir de ses réflexions sur cette petite amibe qu'il édifia un arbre phylogénétique du vivant. Pour cela, il ne se contenta pas de comparer la morphologie des organismes unicellulaires, mais il prit en compte l'ensemble du cycle de vie de ces organismes et révéla ainsi des filiations qui auraient été invisibles sans la connaissance des différentes formes successives adoptées par la cellule au cours de sa vie. C'est grâce à cette méthode et aux réflexions que lui inspirait *Pansporella* qu'il proposa de séparer le vivant en deux catégories, qu'il nomma les cellules « procaryotes », dépourvues de noyau, et les cellules « eucaryotes » qui en ont un (voir l'encadré page 78). Cette paternité est tombée dans l'oubli alors même qu'il s'agit d'un concept qui sert de cadre à toute la biologie!

Chatton est également l'un des pionniers de la biologie cellulaire, notamment sur deux aspects qu'il a abordés en profondeur à travers l'étude de divers protistes, depuis son arrivée à Strasbourg en 1919 jusqu'à sa mort: les mécanismes de la division de la cellule d'une part et, d'autre part, l'organisation et le fonctionnement des cils et des flagelles, de petites expansions qui permettent aux protistes qui en sont pourvus de se déplacer, mais aussi de se fixer sur des supports, de guider la nourriture vers de petits entonnoirs leur servant de bouches, ou encore de former des microharpons à usage défensif ou agressif. Avant l'arrivée de la microscopie électronique, il décrivit ces microarchitectures dans leurs moindres détails, perçant leur fonctionnement et les secrets de leur origine.

La question était complexe: comment ces structures si élaborées et stéréotypées s'organisaient-elles dans des cellules issues de la division d'une cellule mère qui en était dépourvue? Il renversa le dogme de l'autoorganisation, en vigueur à l'époque, pour démontrer qu'il existait une continuité lors de la division, et que, même dépourvue de cils, la cellule mère léguait à ses filles un réseau de petits granules, les cinétosomes (aujourd'hui appelés « centrosomes ») qui dictaient le plan de réorganisation de la ciliature (voir le dessin ci-contre).

Au début des années 1920, le biologiste décrypta aussi le déterminisme de la sexualité des protistes ciliés dans des travaux très modernes menés avec Marie Chatton, son épouse, et montra comment la présence de certaines bactéries spécifiques guide le choix entre sexualité et simple division clonale. Il découvrit nombre de cycles de vie de nouveaux protistes parasites ou symbiotes, ce qui l'entraîna à discuter du poids respectif de l'hérédité des caractères acquis et des caractères innés. Avec un demi-siècle d'avance, il jeta ainsi les bases de l'épigénétique, l'étude des mécanismes qui modifient les caractères d'un organisme sans modifier les gènes eux-mêmes, mais en jouant sur leur activité, et qui peuvent être hérités chez les organismes unicellulaires d'une génération à une autre par la division cellulaire – aujourd'hui un domaine passionnant de recherche.

INVENTEUR À SES HEURES

Ces découvertes ne découlaient pas que de la curiosité clairvoyante de Chatton. Elles ont requis l'invention de techniques longues et délicates. Ainsi, en 1930, le biologiste mit au point une technique d'imprégnation argentine permettant des observations de haute résolution d'organismes unicellulaires marins, encore utilisée de nos jours. En 1921, grâce à ses talents de bricoleur, il inventa aussi un régulateur à fléau bimétallique pour thermostats à chauffage électrique pour équiper les étuves de laboratoire, ce qui permit d'éliminer les feux permanents des étuves à gaz et de mieux stabiliser les températures requises.

Édouard Chatton est une belle figure qui devrait inspirer les biologistes du XXI^e siècle. Il récapitule en effet les qualités attendues des chercheurs, qu'ils soient d'hier ou d'aujourd'hui: la capacité à mettre les observations les plus pointues au service d'une vision d'ensemble cohérente; la curiosité, la soif d'explorer l'inconnu, le goût du risque; la liberté d'esprit, la force de s'affranchir des dogmes et de pouvoir en renverser. Sa passion et son émerveillement devant les êtres minuscules qui peuplent les eaux ont pavé la voie de la protistologie (voir l'encadré page ci-contre) et nous ont légué de fabuleux dessins de ces mondes infinitésimaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Jessus et V. Laudet, **Les Vies minuscules d'Édouard Chatton**, CNRS, 2020.

M. O. Soyer-Gobillard et J. Schrevel, **The discoveries and artistic talents of Édouard Chatton and André Lwoff famous biologists**, Cambridge Scholars Publishing, 2020.

E. Karsenti, **Aux sources de la vie : de la cellule à l'être humain**, Flammarion, 2018.

L. Loison, **André Lwoff, une autobiographie. Itinéraire scientifique d'un Prix Nobel**, Hermann, 2017.

M. Morange, **Les Mousquetaires de la nouvelle biologie**, Les Génies de la Science, février 2002.

E. Chatton, **Titres et travaux scientifiques (1906-1937)**, Sottano, 1937.

R

ENDEZ-VOUS

P.82 Logique & calcul

P.88 Idées de physique

P.92 Chroniques de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

P.98 À picorer

L'ÉTRANGE THÉORÈME DE PICK

Depuis plus d'un siècle, ce résultat élémentaire de géométrie du plan intrigue les mathématiciens, qui cherchent à le généraliser et à en simplifier la démonstration.

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)

Certains résultats mathématiques semblent improbables, voire impossibles, avant qu'on les démontre, et ce n'est qu'en suivant pas à pas leur démonstration qu'on se convainc de leur validité. Parfois même, on n'est vraiment certain de la justesse d'un résultat qu'en le démontrant par plusieurs méthodes différentes, aussi variées que possible.

Le théorème de Pick appartient à cette catégorie. Il indique comment calculer la surface de certains polygones en se contentant de repérer l'emplacement des points d'un quadrillage, ce qui, *a priori*, semble insuffisant pour un résultat précis. Exceptionnellement, cette rubrique va explorer plusieurs démonstrations du résultat, car elles montrent comment des arguments indépendants aboutissent à une même conclusion, ce qui est une situation courante en mathématiques... et la meilleure façon d'être absolument certain qu'un résultat surprenant est correct!

L'aspect déconcertant du théorème de Pick a non seulement conduit à en chercher des preuves variées invoquant parfois des arguments de physique, mais aussi à en formuler des généralisations. En effet, c'est parfois la généralisation d'un résultat qui en fait saisir le sens profond. Le côté visuel et élémentaire de

l'énoncé a suscité un intérêt ininterrompu pour l'étrange découverte de Pick, dont on a proposé des démonstrations pour collégiens en même temps que des développements parfois très savants. Les travaux de recherche sur le thème sont devenus difficiles à collecter totalement et, bien que disposant de plus de 50 articles liés au théorème, il m'en manque encore certainement. On présentera aussi une nouvelle famille de généralisations du théorème de Pick, récentes et particulièrement élégantes.

DES SURFACES ET DES POINTS

Georg Pick (1859-1942) a joué un rôle discret mais important dans l'histoire des sciences du ^{xx}e siècle. Outre son théorème sur les polygones, publié en 1899 dans une revue de mathématiques à Prague et popularisé par le mathématicien polonais Hugo Steinhaus, qui le présenta dans son livre *Mathematical Snapshots* en 1969, il a côtoyé plusieurs grands chercheurs de son temps. Il a ainsi été l'élève d'Ernst Mach, le célèbre physicien dont le nom sert d'unité de mesure de la vitesse, en fonction de celle du son dans un milieu donné. Pick a aussi travaillé avec le mathématicien allemand Felix Klein, auquel on doit d'importants travaux en théorie des groupes. Surtout, à l'université de Prague, où Albert Einstein fut



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

recruté en 1910, Pick a initié ce dernier au calcul tensoriel, qui a ensuite joué un rôle important dans la formulation de la théorie de la relativité générale: sans lui, elle n'aurait donc peut-être pas été conçue. Le 13 juillet 1942, à cause de son origine juive, Pick fut arrêté par les nazis et déporté au camp de Theresienstadt, où il mourut treize jours plus tard, à l'âge de 82 ans.

En quoi consiste le célèbre théorème qu'il nous a légué? On considère le plan et tous ses points de coordonnées entières: $(1,1)$, $(51,12)$, $(-3,7)$, etc., que l'on dénomme «points du réseau». On construit un polygone P dont les sommets sont des points du réseau. On suppose que le polygone est d'un seul tenant, sans trou, et que le bord du polygone ne se recoupe pas; autrement dit, on suppose qu'en suivant le bord de P , on en fait le tour sans passer deux fois par le même point, et qu'il n'y a pas d'autre point du bord que ceux rencontrés dans ce parcours.

Le théorème de Georg Pick affirme que la surface d'un tel polygone est donnée par la formule $S = I + B/2 - 1$, où I est le nombre de points du réseau situés à l'intérieur du polygone et B le nombre de points du réseau

appartenant au bord du polygone (voir des exemples dans l'encadré 1).

Une démonstration élémentaire du théorème est proposée dans l'encadré 2. Elle est assez longue, mais chacune de ses étapes peut être expliquée à un élève de collège. Une autre démonstration est proposée dans l'encadré 5. Plus rapide, elle demande peut-être un effort de concentration plus grand. Une troisième démonstration, fondée sur une idée physique de diffusion de la chaleur, est encore plus courte. Elle est expliquée dans l'encadré 4. Elle suggère une démonstration par dissection du polygone, purement visuelle, mais pas pour autant très facile à comprendre.

Amusez-vous à suivre ces démonstrations. Il n'y a pas de doute que vous vous convaincrez pleinement que ce théorème étrange, et même douteux au premier regard, est parfaitement exact.

UN THÉORÈME AUX MULTIPLES APPLICATIONS

On pourrait reprocher au théorème de Pick de ne permettre le calcul d'une surface que dans des cas très particuliers. Ce n'est pas exact pour plusieurs raisons.

LE THÉORÈME DE PICK : QUELQUES EXEMPLES

Le théorème de Pick donne une méthode pour calculer la surface S d'un polygone ayant ses sommets sur le réseau des points à coordonnées entières. Selon ce résultat, il suffit de compter le nombre de points du réseau à l'intérieur du polygone (en bleu), noté I , le nombre de points du réseau sur le bord du polygone (en rouge), B , et d'utiliser la formule :

$$S = I + B/2 - 1.$$

Pour le dessin 1, on a $I = 9$ et $B = 4$, ce qui donne $S = 10$.

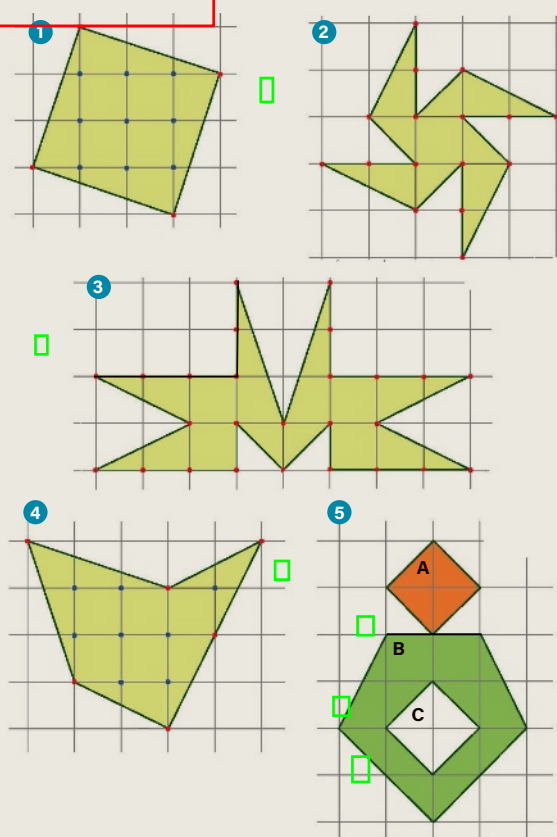
Pour le dessin 2, $I = 0$ et $B = 16$, donc $S = 7$.

Pour le dessin 3, $I = 0$ et $B = 26$, donc $S = 12$.

Pour le dessin 4, $I = 8$ et $B = 6$, donc $S = 10$.

Le théorème de Pick n'est valable que si le polygone est d'un seul tenant, ne possède pas de trou et que si son bord ne se recoupe pas. Quand un polygone dont les sommets sont sur le réseau ne vérifie pas ces conditions, il est facile de le décomposer en plusieurs morceaux que le théorème permet de traiter.

Ainsi, sur le dessin 5, on utilise le théorème de Pick pour les trois polygones A, B et C, ce qui donne $S(A) = 2$, $S(B) = 10$, $S(C) = 2$, donc $S(P) = 2 + 10 - 2 = 10$.



2

DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE PICK

La démonstration se fait en plusieurs étapes, qui sont toutes élémentaires. Pour simplifier le langage, tous les rectangles, triangles et polygones mentionnés sont supposés d'un seul tenant et sans trou, ont un bord qui ne se recoupe pas, et les sommets sont sur des points à coordonnées entières. Le but est de démontrer que la surface d'un polygone P est $S = I + B/2 - 1$, où I est le nombre des points du réseau à l'intérieur de P et B est le nombre de points du réseau sur le bord de P .

A/ Soient deux polygones P_1 et P_2 qui ne se chevauchent pas et qui vérifient le théorème de Pick. Le polygone P obtenu en les réunissant par la partie commune de leurs bords vérifie aussi le théorème de Pick.
Soient P_1 et P_2 deux polygones qu'on assemble par la partie commune de leurs bords, ce qui donne P (voir la figure 1). Notons I_1, B_1, I_2, B_2, I, B les paramètres de P_1, P_2, P , et J le nombre de points du réseau qui sont sur la partie des bords collés, à l'exception des extrémités ($J = 3$ sur le dessin). On a les égalités suivantes, toutes évidentes par construction ou opérations :
 $(I_1 + B_1/2 - 1) + (I_2 + B_2/2 - 1) =$
 $(I_1 + I_2) + (B_1 + B_2)/2 - 2 =$
 $I - J + (B_1 + B_2)/2 - 2 =$
 $I + (B_1 + B_2 - 2J)/2 - 1 =$
 $I + B/2 - 1$

En notant S_1 et S_2 les surfaces des polygones P_1 et P_2 , dont on suppose qu'ils vérifient le théorème de Pick, et S celle de leur assemblage, on a donc :
 $S = S_1 + S_2 =$
 $(I_1 + B_1/2 - 1) + (I_2 + B_2/2 - 1) =$
 $I + B/2 - 1$
Ce qui signifie que le nouveau polygone vérifie aussi le théorème de Pick.

B/ Si un polygone P est obtenu en collant deux polygones P_1 et P_2 , et si P_1 et P_2 vérifient le théorème de Pick, alors P le vérifie aussi.
Au paragraphe A, on a obtenu :
 $(I_1 + B_1/2 - 1) + (I_2 + B_2/2 - 1) =$
 $I + B/2 - 1$.
On en tire que $S_2 = S - S_1 =$
 $(I + B/2 - 1) - (I_1 + B_1/2 - 1) =$
 $I_2 + B_2/2 - 1$.
 P_2 vérifie donc le théorème de Pick.

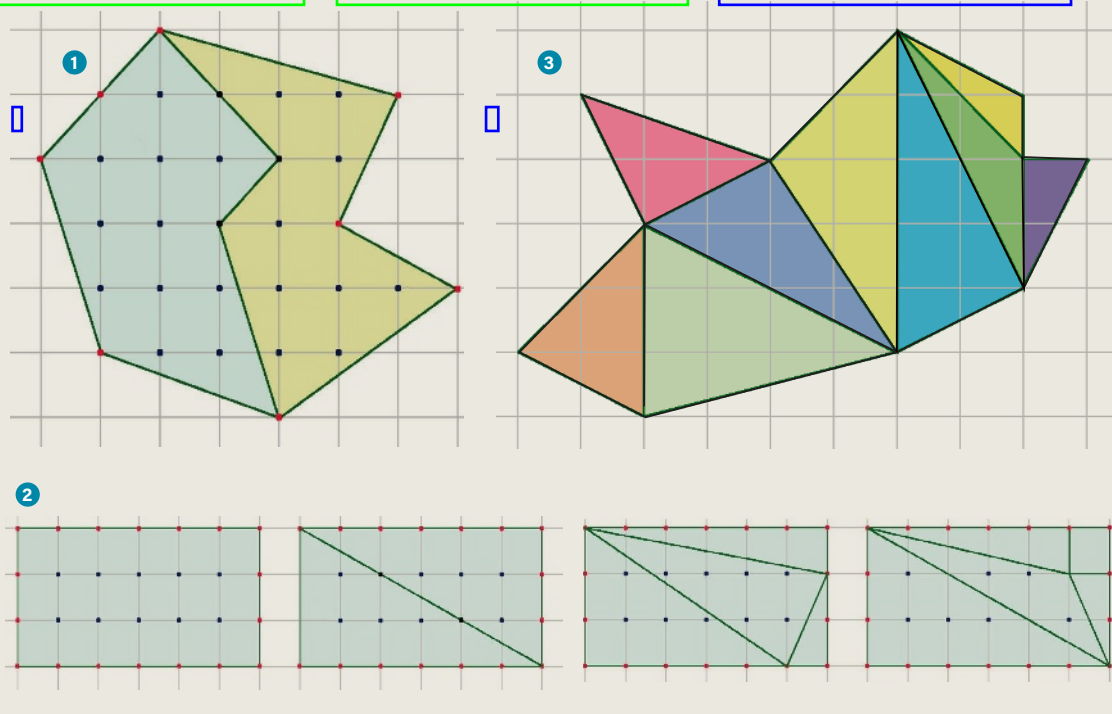
C/ Le théorème de Pick est vrai pour un rectangle.
Soit a sa hauteur et b sa largeur.
 $I = (a - 1) \times (b - 1), B = 2a + 2b$.
Donc $I + B/2 - 1 =$
 $ab - a - b + 1 + a + b - 1 = ab$,
ce qui est bien la surface attendue (voir la figure 2).

D/ Le théorème de Pick est vrai pour un triangle rectangle dont l'un des petits côtés est horizontal et l'autre vertical.
En accolant une copie de ce triangle contre son hypoténuse, on obtient

un rectangle, pour lequel on sait que le théorème est vrai. Si on note S, I, B les paramètres du rectangle et S', I', B' les paramètres du triangle rectangle, d'après la formule du paragraphe A, on a :
 $S = I + B/2 - 1 = 2(I' + B'/2 - 1) = 2S'$.
Donc $S' = (I' + B'/2 - 1)$. Le triangle vérifie le théorème de Pick.

E/ Le théorème de Pick est vrai pour tout triangle.
Deux cas se présentent (voir la figure 2), mais, à chaque fois, en partant du rectangle (qui vérifie le théorème de Pick, d'après le paragraphe C) le plus petit qui contient le triangle, et en enlevant des triangles rectangles (qui vérifient aussi le théorème) ou des rectangles (pour le deuxième cas), on passe progressivement à d'autres polygones qui vérifient le théorème de Pick (d'après le paragraphe B), jusqu'à arriver au triangle central qui le vérifie donc aussi.

F/ Le théorème est vrai pour tout polygone.
Il suffit de décomposer le polygone en triangles ayant pour sommets des points du réseau. D'après le paragraphe E, chacun vérifie le théorème de Pick. En les assemblant un par un, on arrive (grâce au résultat du paragraphe A) au polygone voulu qui vérifie donc le théorème de Pick (voir la figure 3).



(a) Si le polygone n'est pas d'un seul tenant, possède des trous ou que son bord se recoupe, il est facile de décomposer le calcul de son aire en utilisant plusieurs fois le théorème de Pick: on l'applique une fois pour chaque trou (on soustraira les surfaces trouvées), et on décompose le polygone en plusieurs polygones qui vérifient les hypothèses attendues si c'est nécessaire (voir le dessin 5 de l'encadré 1).

(b) Toute partie du plan un tant soit peu régulière se laisse approcher par un polygone dont les sommets ont des coordonnées entières, quitte à réduire la taille du quadrillage.

(c) Si vous mesurez les positions des sommets d'un polygone avec une précision limitée, par exemple le millimètre, alors, en prenant le millimètre comme unité pour le quadrillage, les sommets du polygone seront sur le réseau des points de coordonnées entières, et donc le théorème de Pick s'appliquera.

En dehors des applications pratiques au calcul d'aires, le théorème permet de démontrer facilement certains résultats théoriques. L'affirmation selon laquelle un triangle équilatéral ne peut pas avoir ses trois sommets sur une grille carrée est l'un de ces résultats.

En effet, si les sommets d'un triangle équilatéral avaient des coordonnées entières, ce triangle aurait, d'après le théorème de Pick,

une surface de la forme $M/2$, avec M entier (et égal à $2I + B - 2$). Mais d'après le théorème de Pythagore, le côté du triangle serait de la forme $L = \sqrt{a^2 + b^2}$, avec a et b entiers. Puisque la surface d'un triangle équilatéral de côté L est $L^2(\sqrt{3})/4$, on aurait donc $(a^2 + b^2)(\sqrt{3})/4 = M/2$, donc $\sqrt{3}$ serait un quotient de deux entiers... ce qu'on sait être faux.

Notons aussi qu'on peut utiliser le théorème de Pick pour démontrer la formule d'Euler pour les graphes planaires composés de triangles.

GÉNÉRALISATION À L'ESPACE

Une généralisation facile à démontrer de la formule de Pick quand on accepte les trous est $S = I + B/2 - 1 + t$, où t est le nombre de trous. D'autres généralisations du même type existent qui permettent de connaître S en évitant d'avoir à décomposer le polygone, comme suggéré plus haut, mais elles ne sont pas vraiment utiles.

Bien sûr, lorsqu'un théorème valable pour les polygones du plan est découvert, on se demande s'il est possible de trouver un résultat analogue pour l'espace. La question a été soigneusement explorée, et John Reeve, de l'université de Reading, en Angleterre, a proposé une double réponse à cette interrogation.

Il a d'abord montré qu'un résultat aussi simple était impossible en trois dimensions, car

UNE TOUTE NOUVELLE GÉNÉRALISATION

3

Alexander Belyaev et Pierre-Alain Fayolle ont proposé une version nouvelle remarquable du théorème de Pick. Il est étrange que cette version soit restée si longtemps ignorée.

On se donne cette fois un polygone P ayant des sommets à coordonnées entières, possédant éventuellement des trous, dont le bord peut se recouper, et éventuellement en plusieurs morceaux. On s'intéresse à un ensemble de droites parallèles à une direction fixée, par exemple verticale, et passant par les points à coordonnées entières.

On regarde les intersections de ces droites avec P , ce qui donne un ensemble de segments parallèles. En les comptant, on associe trois paramètres à P : E = nombre de segments entre deux points du réseau et entièrement contenus dans P (dessinés en bleu); B = nombre de segments entre deux points du réseau et entièrement sur le bord de P (dessinés en rouge); P = nombre de segments partiellement dans le polygone et dont une extrémité est un point du réseau (dessinés en jaune).

Les deux chercheurs ont montré que la surface S de P est alors :

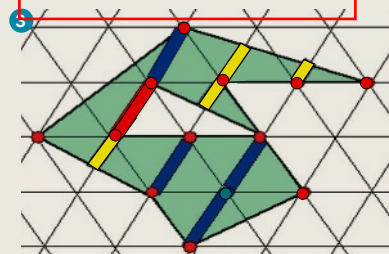
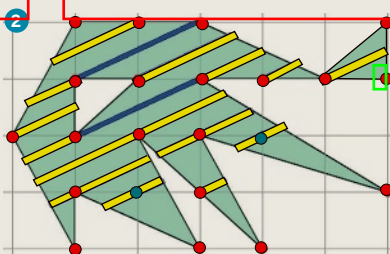
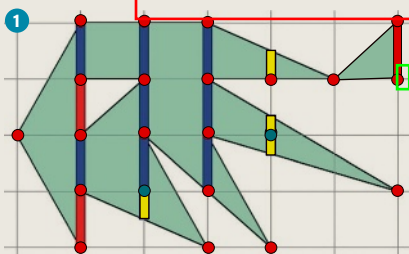
$$S = E + B/2 + P/2.$$

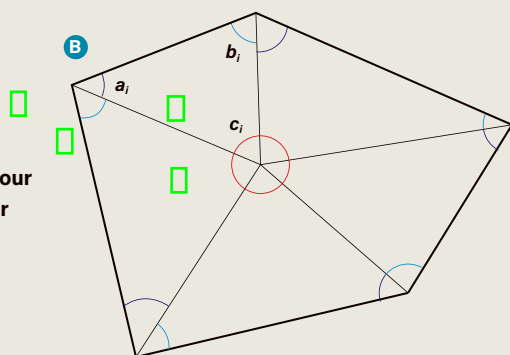
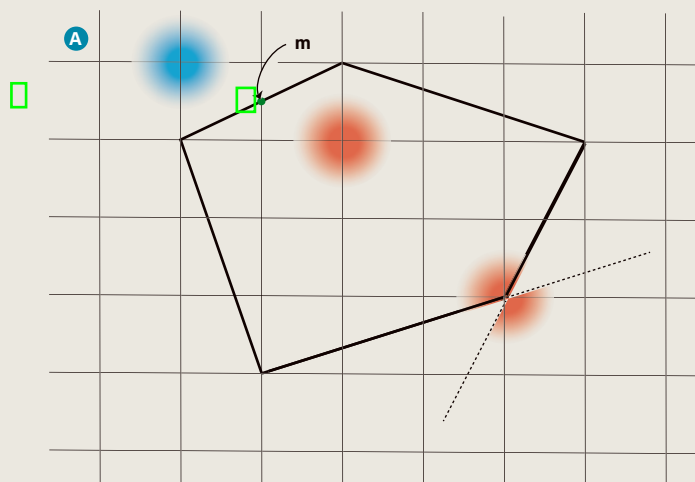
Pour le dessin 1, on a $E = 8$, $B = 3$ et $P = 4$, ce qui donne $S = 11,5$.

La direction utilisée pour trouver les segments des décomptes n'est pas nécessairement horizontale ou verticale.

Pour le dessin 2, $E = 2$, $B = 0$ et $P = 19$, ce qui donne $S = 11,5$. Le réseau peut aussi être triangulaire.

Pour le dessin 3, on a $E = 4$, $B = 1$ et $P = 4$, ce qui donne $S = 6,5$ (l'unité est la surface d'un losange).





$$\sum (a_i + b_i + c_i) = \sum (a_i + b_i) + 1 \text{ tour}$$

$$\sum (a_i + b_i) = n \times 1/2 \text{ tour} - 1 \text{ tour}$$

UNE ANALOGIE PHYSIQUE POUR DÉMONSTRER LE THÉORÈME

4

Voici une troublante démonstration physique du théorème de Pick, due à Christian Blatter, de l'école polytechnique fédérale de Zurich, et utilisant la diffusion de la chaleur. Soit P un polygone conforme aux hypothèses du théorème de Pick. Supposons qu'au temps 0, une unité de chaleur soit concentrée en chaque point (de coordonnées entières) du réseau infini. Cette chaleur diffuse ensuite dans la totalité du plan par conduction thermique, de façon isotrope dans un angle de 2π (un tour). Au bout d'un temps infini, elle est également répartie sur le plan avec une densité uniforme : la quantité de chaleur contenue dans le polygone P est la surface S de P .

D'où vient cette chaleur ? Chaque point du réseau intérieur au polygone contribue pour une unité

de chaleur, soit, au total, I . La chaleur émise par un point du réseau (rouge) qui est perdue lors de la traversée d'un côté du polygone est en effet compensée par la chaleur envoyée par le point (bleu) extérieur au polygone symétrique par rapport au milieu m du côté.

Chaque point du réseau situé sur le bord du polygone et qui n'est pas un sommet envoie dans le polygone la moitié de la quantité de chaleur émise de façon isotrope ; dans le cas d'un sommet, cette quantité est proportionnelle à l'angle au sommet en ce point (voir la figure A). Or, la somme des angles aux sommets d'un polygone à n côtés est $n/2$ tours moins 1, ce que l'on démontre facilement en triangulant le polygone (voir la figure B). D'où la contribution calorifique $B/2 - 1$ de la formule de Pick.

il ne peut pas exister, pour le volume d'un polyèdre ayant des sommets à coordonnées entières dans l'espace, de formule qui ne dépende que des trois paramètres suivants: nombre de points du réseau à l'intérieur du polyèdre, nombre de points du réseau sur les arêtes et nombre de points du réseau sur les faces.

On peut le voir grâce à la famille de tétraèdres T_h dépendant du paramètre h et ayant pour quatre sommets les points $(1,0,0)$, $(0,1,0)$, $(1,1,0)$, $(0,0,h)$, avec h entier. Ces tétraèdres ne possèdent aucun point du réseau ni à l'intérieur de leur volume, ni sur leurs faces ou arêtes. Par conséquent, si la formule existait, elle fournirait le même résultat pour tous les T_h , alors que leur volume, $h/6$, varie avec h .

C'est un peu décevant. En cherchant des formules un peu moins simples, John Reeve est cependant parvenu à trouver et à démontrer un résultat qui peut être vu comme une généralisation pour l'espace du théorème de Pick.

Soit P un polyèdre (ses faces sont donc des polygones) ayant des sommets à coordonnées entières, dont on suppose qu'il n'a pas de trou et que sa surface ne se recoupe pas. On considère un entier n plus grand que 2 et le polyèdre P_n déduit de P en multipliant toutes les coordonnées par n . P_n est donc une version agrandie de P . On note I et I_n le nombre de points du réseau intérieurs à P et P_n respectivement, et B et B_n le nombre de points du réseau sur les faces et arêtes de P et P_n . La formule suivante donne alors le volume V de P :

$$V = [2I_n - B_n - n(2I - B)] / [2n(n-1)(n+1)].$$

Cette formule a par la suite été généralisée pour des espaces de dimension supérieure à 3 par Ian Macdonald (*The Volume of a Lattice Polyhedron*, *Proc. Camb. Phil.*, 2008), ce qui a été le point de départ d'autres travaux encore, mais nous ferait quitter le domaine des mathématiques récréatives!

UNE JOLIE GÉNÉRALISATION OUBLIÉE

De façon étonnante – le théorème de Pick ayant fait l'objet d'une attention soutenue depuis plus d'un siècle –, une généralisation remarquable, qui n'a été publiée qu'en 2019 par Alexander Belyaev, de l'université d'Édimbourg, en Écosse, et Pierre-Alain Fayolle, de l'université d'Aizu, au Japon, semble être passée inaperçue.

Revenons au plan et aux points de coordonnées entières. On s'intéresse cette fois à un ensemble de droites parallèles à une direction fixée (par exemple verticale) passant par les points à coordonnées entières. On regarde les intersections de ces droites avec le polygone, et on distingue trois sortes de segments:

UNE AUTRE DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE PICK

5

On dénomme « triangles minces » les triangles dont les sommets sont sur le réseau des points à coordonnées entières et qui n'ont aucun point du réseau dans leur intérieur ni sur leurs côtés.

A/ La surface d'un triangle mince est $1/2$.

En collant à un tel triangle le même triangle tourné de 180° sur l'un de ses côtés, on forme un parallélogramme. En translatant ce parallélogramme une fois, deux fois, etc., on obtient une bande de largeur constante. En translatant cette bande une fois, deux fois, etc., on obtient un pavage du plan où chaque point du réseau touche 6 triangles minces. Puisque chaque triangle mince passe par trois points du réseau, la densité des triangles minces

est deux fois supérieure à celle des points du réseau, qui est 1, et donc la surface du triangle mince est $1/2$.

B/ Tout polygone du théorème de Pick se décompose en un nombre fini de triangles minces.

En effet, chaque carré entièrement inclus dans le polygone se décompose en deux triangles minces. Une fois cette décomposition partielle faite, en joignant les points du réseau sur le bord du polygone aux points internes les plus proches, on crée une décomposition complète du polygone en triangles minces.

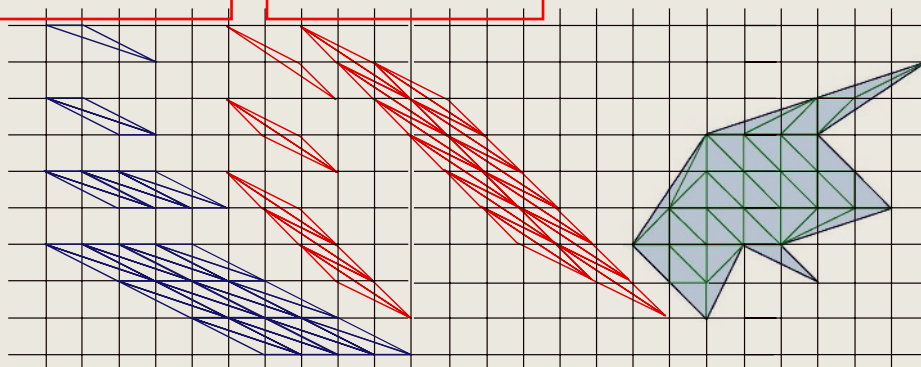
C/ Si on ajoute un triangle mince à un polygone qui vérifie le théorème de Pick, on crée un polygone qui vérifie encore le théorème. En effet, si le triangle ajouté est collé par un côté unique,

alors I reste identique et B est augmenté de 1, donc $I + B/2 - 1$ est augmenté de $1/2$, comme S .

Si le triangle ajouté est collé à deux côtés, alors I augmente de 1 et B diminue de 1 donc $I + B/2 - 1$ augmente de $1/2$, comme S .

D/ Fin du raisonnement

Un triangle mince vérifie le théorème de Pick. En effet, $I = 0$, $B = 3$ et donc $I + B/2 - 1 = 1/2$. Partant d'un triangle mince de la décomposition du polygone en triangles minces, et ajoutant un à un les autres triangles minces (choisis à chaque étape pour les coller par un côté ou deux côtés à ceux déjà en place), on reconstitue le polygone qui, d'après la partie précédente du raisonnement, vérifie le théorème de Pick.



a) Les segments entre deux points du réseau, entièrement contenus dans le polygone; on note E leur nombre;

b) les segments entre deux points du réseau, situés sur le bord du polygone; on note B leur nombre;

c) les segments partiellement dans le polygone et dont une extrémité est un point du réseau; on note P leur nombre.

Le théorème indique alors que la surface du polygone ne dépend que de ces trois paramètres et qu'elle est donnée par la formule $S = E + B/2 + P/2$. Le résultat est valable même si le polygone n'est pas d'un seul tenant, s'il y a des trous ou si son bord se recoupe (voir l'encadré 3).

Le plus surprenant concernant cette formule est qu'elle est valide avec les droites verticales, avec les droites horizontales, mais aussi avec des droites obliques. Plus étonnant encore: si le réseau n'est pas carré mais triangulaire, la même formule fonctionne encore. D'autres extensions que nous ne mentionnons pas ici sont possibles.

Les auteurs racontent que l'idée de leur nouveau théorème provient d'une démonstration tirée de la physique fondée sur la diffusion de la chaleur (voir l'encadré 4), ce qui montre, encore une fois, que disposer de plusieurs démonstrations pour un même résultat est utile en mathématiques! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Belyaev et P. A. Rayolle, **Counting parallel segments - New variants of Pick's area**, *Math Intelligencer*, 2019.

M. Aigner et G. M. Ziegler, **Proofs from the Book**, Springer, 2018.

C. Blatter, **Another proof of Pick's area theorem**, *Mathematics Magazine*, 1997.

J. Reeve, **On the volume of lattice polyhedra**, *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1957.

G. Pick, **Geometrisches zur Zahlentheorie**, *Sitzungsberichte des Deutschen Naturwissenschaftlich-Medicinischen Vereines für Böhmen "Lotos" in Prag*, 1899.

LES AUTEURS



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

POUR UN « STRIKE » PARFAIT

Au bowling, faire tomber toutes les quilles d'un coup (le « strike ») requiert d'exploiter l'huile qui recouvre la piste, l'asymétrie du cœur de la boule et bien d'autres subtilités physiques.

Après cinq pas d'élan, l'homme vêtu d'un survêtement violet lance sa boule en lui imprimant un mouvement de rotation. La trajectoire rectiligne que prend la boule au départ semble la conduire irrémédiablement vers la gouttière. Le coup serait-il raté? Pas du tout: au dernier moment, la trajectoire de la boule s'incurve et celle-ci vient frapper la quille centrale, puis les trois quilles situées juste derrière elle. Projetées avec force, ces quilles font chuter toutes les autres et c'est le *strike*! Jesús Quintana exulte, il est fin prêt pour le match prévu contre le Dude et son équipe (dans le film *The Big Lebowski*, des frères Cohen). C'est que « personne ne manque de respect à Jesús », surtout après un *strike*. Comment a-t-il fait? L'effet donné à la boule lors du lancer est un ingrédient important, mais au bowling comme ailleurs, l'essentiel est

invisible pour les yeux. Huilage de la piste, revêtement de la boule et noyau non sphérique sont au cœur des subtilités les plus importantes de la physique du bowling.

UN JEU DE QUILLES À BALAYER

L'objectif du bowling est de faire tomber 10 quilles organisées en triangle (voir la figure ci-dessus) en les percutant avec une boule. Plus facile à dire qu'à faire... Une difficulté tient à la distance à laquelle elles se trouvent: à l'extrémité d'une piste longue de 60 pieds (soit 18,29 mètres). Une autre résulte de l'écartement entre les quilles: les deux situées à la base du triangle sont sur les bords de la piste dont la largeur est 1,05 mètre. Enfin, aucun rebond n'est possible sur les bords de la piste: deux

gouttières sont placées de part et d'autre, de sorte que si la boule y tombe, elle ne revient plus sur la piste.

Comment dès lors faire tomber toutes les quilles en un seul lancer et faire un *strike*? La solution la plus efficace est de provoquer une réaction en chaîne (voir la figure ci-dessus, à droite) en frappant avec la boule d'abord les quilles 1 et 3 de sorte que la première renverse les quilles 2, 4 et 7, la seconde les 6 et 10. La boule heurte ensuite les quilles 5 et 9, la 5 faisant enfin tomber la 8 (pour un gaucher, la séquence est symétrique).

Réussir toutes ces collisions requiert que la boule transmette assez d'énergie aux quilles frappées, et notamment la 1 jusqu'à la 9. Elle doit donc être suffisamment lourde et rapide. La masse des quilles étant réglementairement

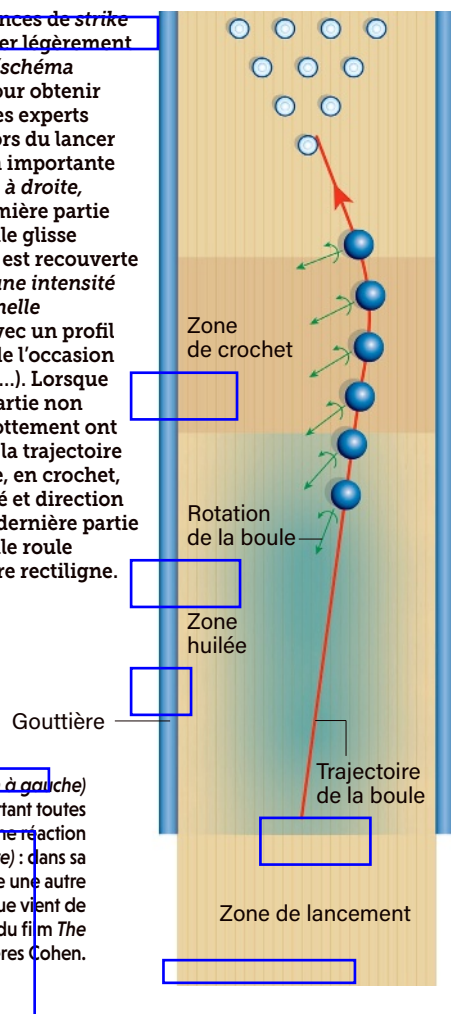


Disposition des quilles



LA TRAJECTOIRE IDÉALE

Pour optimiser les chances de *strike* il est préférable d'arriver légèrement de biais sur la quille 1 (schéma ci-contre à gauche). Pour obtenir l'angle optimal de 6° , les experts du bowling donnent lors du lancer une vitesse de rotation importante à leur boule (ci-contre, à droite, en vert). Durant la première partie de la trajectoire, la boule glisse sur la piste car celle-ci est recouverte d'huile (en bleu, avec une intensité de couleur proportionnelle à l'épaisseur d'huile) avec un profil d'huilage qui dépend de l'occasion (amateur, compétition...). Lorsque la boule arrive sur la partie non huilée, les forces de frottement ont pour effet de donner à la trajectoire une forme parabolique, en crochet, et de modifier intensité et direction de la rotation. Dans la dernière partie de la trajectoire, la boule roule et a ainsi une trajectoire rectiligne.



L'écartement des 10 quilles (dans l'écran à gauche) empêche de faire un *strike* en les heurtant toutes avec la boule. On y parvient grâce à une réaction en chaîne (dans l'écran à droite) : dans sa chute, chaque quille en entraîne une autre située derrière. C'est ce que vient de faire Jesús Quintana, héros du film *The Big Lebowski*, des frères Cohen.

comprise entre 1 531 et 1 645 grammes, celle de la boule doit être nettement supérieure. Plus la boule est légère, plus elle est déviée et ralentie lors des chocs. Le règlement impose que le coefficient de restitution (le rapport entre les vitesses relatives de la quille et de la boule respectivement après et avant la collision) doit être compris entre 65 et 75%. Les bons joueurs préfèrent donc des boules lourdes, mais sans excès : l'impact d'une boule trop lourde sur la piste pourrait l'endommager, nous y reviendrons. Surtout, cela poserait des problèmes de santé avec des efforts excessifs sur l'articulation du poignet. Pour cette raison, la réglementation limite la masse à 16 livres et le choix des joueurs expérimentés se porte vers des boules de 14 à 15 livres (entre 6 et 7 kilogrammes). Ainsi, la déviation

maximale de la direction de la boule lors du choc avec une quille est comprise entre 0 et 10° .

UNE TRAJECTOIRE AUX PETITS OIGNONS

Avec une boule de masse adaptée, le lanceur doit ensuite bien viser afin de frapper la quille 1 par exemple légèrement sur sa droite de sorte que cette quille parte vers la gauche, et se débrouiller pour qu'après la collision la boule soit déviée vers la quille 3 sur sa droite. Si on donne à la boule une trajectoire rectiligne parallèle aux bords de la piste, la zone cible à atteindre fait 1,3 centimètre de largeur (la moitié d'une latte du plancher) : un challenge, même pour les experts.

Comment accroître ses chances de faire un *strike*? La solution est géométrique : atteindre les quilles de biais.

L'expérimentation montre que l'angle d'arrivée idéal est de 6° par rapport à l'axe de la piste. Le problème est que pour y parvenir en lançant la boule en ligne droite, il faudrait se placer au-delà du milieu de la piste d'à côté : l'angle maximal possible atteignable sur une piste donnée, compte tenu de sa largeur et de sa longueur, est de $1,67^\circ$.

Se décaler ne suffit donc pas. Seule option, donner une trajectoire courbe à la boule. Si on fait tourner la boule sur elle-même selon un axe parallèle à l'axe de la piste (de sa position, le joueur

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



droitier la voit tourner dans le sens contraire des aiguilles d'une montre), le frottement, solide, entre la boule et la piste provoque une force latérale, régie par les lois de Coulomb: dès qu'il y a glissement entre la boule et la piste, la force de frottement est égale au produit du poids de la boule par le coefficient de frottement entre la boule et la piste. Comme cette force est constante, les lois de la dynamique montrent que la trajectoire de la boule est une parabole, mais dès que le glissement cesse et que la force s'annule, elle devient rectiligne uniforme (à vitesse constante). Dans ces conditions, il est théoriquement possible d'avoir une trajectoire qui s'achève avec les 6° désirés sans que la boule ne sorte de la piste et ne tombe dans les gouttières. Mais la sensibilité de la déviation à la valeur du coefficient de frottement et la brièveté de la phase parabolique, compte tenu des vitesses (de translation et de rotation) qu'on peut donner à la boule, la rendent impossible à obtenir en pratique.

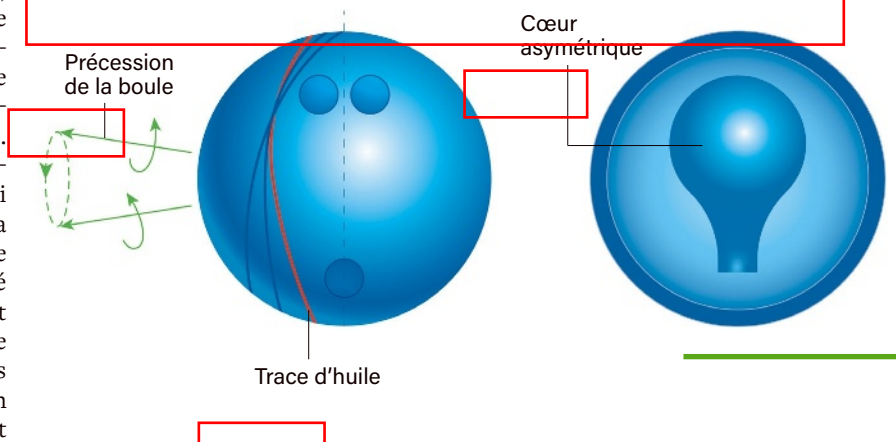
DE L'HUILE, MAIS PAS TROP

C'est là qu'un élément invisible à l'œil non averti intervient: la tête de piste (c'est-à-dire le début) est recouverte d'huile. L'objectif est d'abord de réduire le plus possible la force de frottement lors de l'impact de la boule avec la piste juste après le lancer. Malgré une piste et une boule déjà traitées pour réduire le frottement, sans huile, l'échauffement local atteindrait 500 °C et serait destructeur à la longue. Huiler la piste réduit encore plus les frottements et donc l'échauffement, mais complique alors l'exécution d'une trajectoire courbe. C'est pourquoi la piste n'est pas huilée sur toute sa longueur. En pratique, il existe de très nombreuses façons de répartir l'huile qui rendent le jeu plus facile (on huile plus le milieu que les bords, ce qui rabat les boules vers le centre) ou plus difficile (huilage uniforme sur toute la largeur). Le résultat est que la trajectoire de la boule se déroule en 3 phases: une partie rectiligne, où la boule glisse sur l'huile tout en tournant sur elle-même, puis une trajectoire parabolique (appelée le *hook*, c'est-à-dire le «crochet») sur la piste sèche, et enfin une trajectoire rectiligne, où la boule se met à rouler sans glisser.

Tout semble réglé, mais hélas, le diable se niche dans les détails: durant toute sa trajectoire sur la partie huilée, la

LES SECRETS D'UNE BOULE

Lors de la première phase de la trajectoire, les endroits de la surface de la boule qui entrent en contact avec la piste se recouvrent d'huile (à gauche). Pour éviter que ces surfaces n'entrent à nouveau en contact avec la piste et permettent aux boules d'« accrocher » dès qu'elles atteignent la zone non huilée, celles-ci sont conçues de sorte que leur axe de rotation effectue un mouvement de précession. Pour cela le cœur des boules est constitué d'un noyau, composé d'un matériau dense, qui n'a pas de symétrie sphérique (à droite).



surface de la boule qui entre en contact avec la piste se couvre d'huile. Puisque la boule est animée d'un mouvement de rotation, il s'agit d'un cercle. Mais une fois arrivée sur la partie sèche de la piste, c'est cette même surface qui entre en contact avec le bois: la boule va continuer à glisser et ne va pas aussi bien accrocher que si elle aussi était sèche. Ce n'est que lorsque toute l'huile accumulée se sera redéposée sur la piste que la boule accrochera vraiment.

La solution à cela est de se débrouiller pour que la surface de la boule qui entre en contact avec la piste soit toujours «sèche». Comment? Avec une boule dont l'intérieur n'est pas homogène. Au centre de la boule se trouve un noyau plus dense que le reste et de forme non sphérique. Cela engendre un mouvement de précession: l'axe de rotation de la boule n'est plus fixe. Le résultat est que c'est toujours une portion de surface sèche qui entre en contact avec la piste. Résultat, le *hook* se produit dès que la boule arrive sur la partie sèche de la piste. On trouve toute une diversité de formes de noyaux. Ajoutez à cela les différentes possibilités de revêtement extérieur, de leur état de surface... et vous disposerez d'un choix considérable de boules, que vous soyez expert ou non. De quoi réussir un jeu parfait, soit douze *strikes* consécutifs, et mériter un total... respect! ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Frohlich, *What makes bowling balls hook?*, American Journal of Physics, 2004.

D. C. Hopkins et J. D. Patterson, *Bowling Frames. Paths of a Bowling Ball*, American Journal of Physics, 1977.

AVEZ-VOUS
DES RESSOURCES
QUE L'ON ÉCONOMISE
QUAND ON RECYCLE ?

EN 2018, 1,3 MILLION DE TONNES
DE PAPIERS ONT ÉTÉ RECYCLÉES.
CE SONT 25 MILLIARDS DE LITRES D'EAU
ÉCONOMISÉS, L'ÉQUIVALENT
DE 8000 PISCINES OLYMPIQUES. ET ÇA,
C'EST GRÂCE À VOTRE GESTE DE TRI.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR [TRIERCESTDONNER.FR](https://triercestdonner.fr)



Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

L'AUTEUR

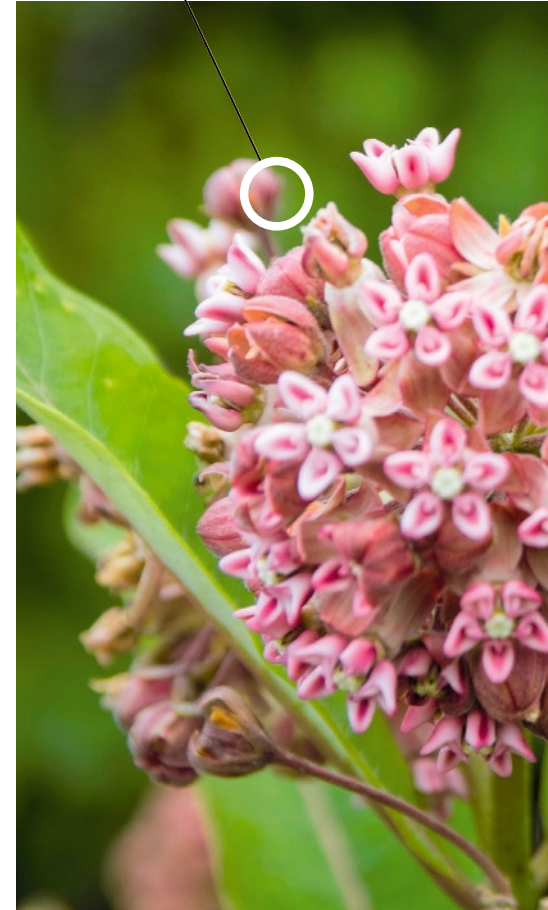


HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite
de biologie évolutive
à Sorbonne Université,
à Paris

LE MONARQUE, LE CARDINAL ET L'ASCLÉPIADE

Insensible au poison que l'asclépiade produit, le papillon monarque non seulement se nourrissait de ses fleurs sans dommage, mais était devenu toxique pour ses prédateurs. Le cardinal à tête noire, cependant, n'avait pas dit son dernier mot...

La plupart des espèces d'asclépiades sont toxiques pour nombre d'animaux. Le genre *Asclepias* compte plus de 200 espèces principalement réparties sur les continents africain et américain.



Le monarque (*Danaus plexippus*) est le célèbre papillon qui effectue des migrations sur le continent nord-américain, des grands lacs dans le nord-est des États-Unis jusqu'au Mexique. Ce lépidoptère de grande taille, coloré, est toxique pour ses éventuels prédateurs – surtout des oiseaux. Et pour cause. La chenille se nourrit essentiellement sur des asclépiades, des plantes à latex abondant (d'où leur dénomination anglaise de *milkweed*, «herbe à lait»). Or celles-ci synthétisent une molécule très toxique pour le cœur: un glycoside (un sucre associé à une autre molécule) qui bloque la pompe sodium-potassium ($\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$), une enzyme plantée dans la membrane cellulaire et responsable, chez les animaux, du maintien au repos des cellules excitables ou de leur retour au repos après excitation.

Un tel poison paraît une précieuse protection contre les herbivores. Pourtant,

les monarques n'en ont cure: non seulement ils ne sont pas intoxiqués, mais ils stockent le glycoside, lequel, maintenant, les protège contre d'éventuels prédateurs. Enfin c'est ce qu'on pensait, mais récemment, Simon Groan, de l'université de Californie à Riverside, et Noah Whiteman, de l'université de Californie à Berkeley, se sont aperçus que plusieurs prédateurs des monarques utilisent le même mécanisme pour déjouer à leur tour la protection de ces insectes. On ne change pas une recette qui fonctionne...

LA BOTTE DU MONARQUE: PAS SI SECRÈTE ?

Depuis longtemps, les zoologistes savent que différents oiseaux se nourrissent de monarques, comme le cardinal à tête noire (*Pheucticus melanocephalus*) et l'oriole d'Abeillé (*Icterus abeillei*), ainsi que des mammifères, notamment la souris à oreilles noires (*Peromyscus melanotis*).



Hervé Le Guyader
a récemment publié:
**Ma galerie
de l'évolution**
(Le Pommier, 2021).



Monarque (*Danaus plexippus*)
Envergure des ailes: 9-10 cm

Si la vie larvaire du monarque a lieu exclusivement sur des asclépiades, le papillon adulte diversifie sa nourriture.

EN CHIFFRES

4 000 KM

À l'automne, le papillon monarque parcourt jusqu'à environ 4 000 kilomètres lors de sa migration du nord-est de l'Amérique au centre du Mexique.

4,5 CM

La chenille du monarque subit cinq mues avant de se métamorphoser en papillon, chaque stade larvaire qu'elles délimitent durant trois à cinq jours. À la dernière mue, elle mesure jusqu'à 4,5 centimètres de long, contre 2 à 6 millimètres à la première.

78 %

L'enzyme Na⁺-K⁺-ATPase, cible du poison de l'asclépiade, est très conservée dans le règne animal. Ses séquences protéiques présentent 78 % d'identité entre insectes et mammifères, et 87 % d'identité entre les insectes.

Le cardinal à tête noire (environ 19 centimètres de long) est l'un des prédateurs du monarque. Oiseau migrateur, il rejoint comme le papillon le centre du Mexique à l'automne, mais en provenance du nord-ouest de l'Amérique.



Mais c'est une chose d'observer que des prédateurs sont insensibles à la toxine, une autre de prouver qu'ils utilisent le même mécanisme.

D'abord, quel est ce mécanisme? C'est une difficile enquête, amorcée par différents laboratoires américains au début de ce siècle, qui a permis de décrypter l'action du glycoside sur l'enzyme. La toxine se lie à une boucle de cette protéine, ce qui bloque son activité (voir l'encadré page 94). Or, chez le monarque, l'enzyme présente une très faible affinité pour le glycoside, en raison – au moins partiellement – de la substitution, dans une boucle spatialement proche de la première, de l'acide aminé en position 122 (les acides aminés

sont les constituants des protéines), une asparagine, par un autre (une histidine).

D'autres insectes étant aussi connus pour résister au glycoside, en 2012, Susanne Dobler, à l'université de Hambourg, en Allemagne, et ses collègues ont voulu savoir si le mécanisme en jeu était le même. Ils ont donc étudié, outre le monarque, 17 insectes insensibles provenant de quatre branches différentes de l'arbre du vivant. À leur grande surprise, ils n'ont trouvé la même substitution d'acide aminé que chez un seul coléoptère. Chez les autres insectes, les substitutions différaient. Ainsi, pour acquérir une telle adaptation, les insectes, dont les branches ont divergé depuis 300 millions d'années, ont suivi des

chemins évolutifs différents, ce que l'on appelle des «convergences».

Pourtant, en examinant chez les 18 insectes les substitutions sur l'ensemble de la boucle qui, chez le monarque, présente une mutation en position 122, l'équipe a repéré que chez 11 d'entre eux, l'acide aminé en position 111 (normalement une glutamine) est remplacé par un autre. Elle a alors décidé d'expérimenter sur des cellules de drosophile et d'y réaliser des substitutions aux positions 122 et 111. Elle a ainsi constaté qu'introduire une valine en 111 et une histidine en 122 accroissait de manière inattendue la résistance au glycoside, bien plus que la somme des deux

substitutions prises individuellement. Il y avait donc un effet de synergie entre les deux mutations, ce qu'on appelle en génétique de «l'épistasie».

Enthousiasmé par ces travaux, Noah Whiteman s'est à son tour impliqué dans cette recherche, en se focalisant sur la compréhension des phénomènes de convergence. En premier lieu, son groupe a découvert qu'il fallait ajouter la position 119 aux deux autres pour compléter la liste des sites clés de la résistance au glycoside. Se posait alors une question: les trois substitutions se sont-elles réalisées indépendamment les unes des autres au fil de l'évolution, ou y a-t-il eu un ordre privilégié, un chemin évolutif particulier?

Les études comparatives chez les insectes montrent que les substitutions des sites 111 et 122 sont souvent associées. La substitution du site 119 a un statut particulier. Elle paraît coévoluer avec celle du site 111, mais, seule, ne provoque aucune résistance au glycoside, et on la trouve fréquemment chez d'autres insectes qui ne sont pas confrontés à cette molécule. Des chemins mutationnels privilégiés semblent donc exister. Mais quels sont-ils?

Si de tels chemins existent, ils doivent répondre à trois prédictions: l'adaptation au glycoside doit augmenter au fur et à mesure des mutations (par exemple par une tolérance à des concentrations de poison de plus en plus élevées); par ailleurs, une séquestration de plus en plus importante du glycoside doit être autorisée; enfin, l'épistasie doit jouer pour augmenter la résistance au glycoside. Vu l'ampleur du travail, Noah Whiteman et ses collègues se sont focalisés sur le chemin mutationnel du monarque, en tentant de le mimer chez la drosophile au moyen de la nouvelle technique d'édition du génome nommée CRISPR-Cas9. Ils ont ainsi trouvé un chemin possible qui permet d'obtenir une «drosophile-monarque» en satisfaisant pas à pas aux trois prédictions: tout d'abord la substitution en 111; en même temps ou après, celle en 119, puis celle en 122. Mais il est vraisemblable que d'autres existent

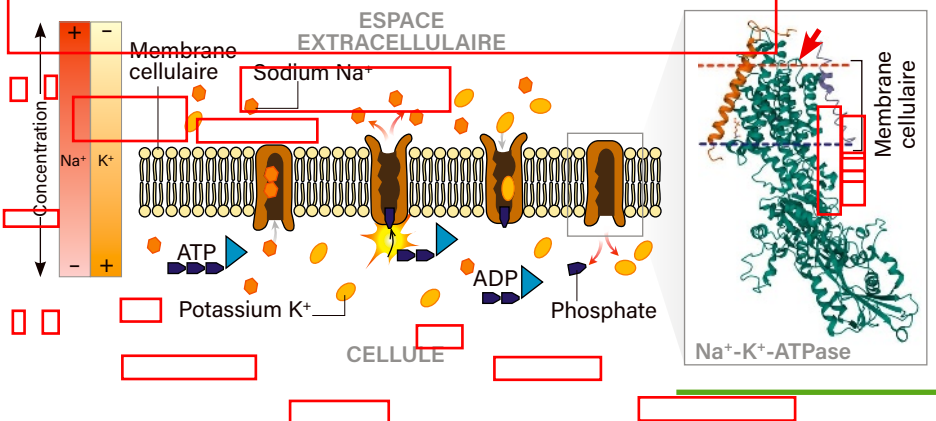
LE CARDINAL DÉMASQUÉ

C'est alors seulement que Noah Whiteman et Simon Groan se sont interrogés sur les prédateurs des monarques: ces insectivores pouvaient-ils, à leur tour, acquérir une protection contre le glycoside? Les deux chercheurs ont donc séquencé chez certains prédateurs la portion du gène de l'enzyme correspondant

LE RÔLE ESSENTIEL DE LA POMPE Na^+/K^+ -ATPASE

Toute cellule vivante présente un potentiel de membrane (une différence de charges électriques, la face interne étant négative et la face externe, positive), assuré par un déséquilibre ionique entre le cytoplasme et l'extérieur de la cellule. Les ions potassium K^+ , entre autres, sont majoritaires à l'intérieur de la cellule et les ions sodium Na^+ , majoritaires à l'extérieur. Moyennant une dépense énergétique, la protéine Na^+/K^+ -ATPase maintient continuellement ces différences de concentration en rejetant des ions Na^+ hors de la cellule et en faisant entrer des ions K^+ dans la cellule. Le schéma ci-dessous présente les quatre états importants de l'enzyme. La pompe a une forte affinité avec l'ATP (source d'énergie) et les ions Na^+ ; elle récupère un groupe phosphate de l'ATP (phosphorylation), ce qui la referme sur trois ions Na^+ ; son affinité augmente alors pour les ions K^+ ; elle libère les trois ions Na^+ et gagne deux ions K^+ ; une déphosphorylation spontanée a alors lieu, qui libère les ions K^+ et rend à l'enzyme son état initial.

L'enzyme est une protéine complexe composée de plusieurs sous-unités. L'unité notée α comporte dix segments transmembranaires qui forment le pore par où voyagent les ions. Le glycoside toxique de l'ascépiade se lie à une boucle extracellulaire de cette unité (flèche), ce qui obture en partie le pore et altère le fonctionnement de la pompe.



à la fameuse boucle où, chez le monarque, ont lieu les substitutions. Résultat: les sites 111 et 119 sont substitués chez le cardinal à tête noire! C'est aussi le cas chez la souris à oreilles noires. Et même chez la guêpe parasitoïde *Trichogramma pretiosum*, qui pond ses œufs dans la chenille du monarque.

Curieusement, toutes les espèces de nématodes (de minuscules vers) séquencées présentaient de telles substitutions, alors que bon nombre ne sont jamais confrontées au glycoside. Seule l'une d'elles, *Steinernema carpocapsae*, portait en plus une substitution au site 122. Une espèce justement connue pour consommer sans souci les chenilles du monarque... Ainsi, des prédateurs aussi différents que oiseaux, mammifères, insectes ou nématodes paraissent avoir suivi un chemin mutationnel mimant celui du monarque, de manière incomplète ou complète. D'un point de vue écologique, on assiste à un effet domino avec des convergences évolutives étonnantes. Jusqu'où ira-t-il? ■

BIBLIOGRAPHIE

- S. Groen et N. Whiteman, **Convergent evolution of cardiac-glycoside resistance in predators and parasites of milkweed herbivores**, *Curr. Biol.*, 2021.
- M. Karageorgi et al., **Genome editing retraces the evolution of toxin resistance in the monarch butterfly**, *Nature*, 2019.
- N. Whiteman et K. Mooney, **Insects converge on resistance**, *Nature*, 2012.
- S. Dobler et al., **Community-wide convergent evolution in insect adaptation to toxic cardenolides by substitutions in the Na^+/K^+ -ATPase**, *PNAS*, 2012.

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 pouirlascience.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

A renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepouirlascience.fr

PAG22STD



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 en ligne

99€

Au lieu de 174,40€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

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 en nous retournant ce bulletin d'abonnement complété



Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepouirlascience.fr

* 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 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepouirlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>. 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@pouirlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 5814 Z

L'AUTEUR



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

L'EUSSES-TU CRU? AVEC OU SANS ŒUFS, C'EST PAREIL!

Une expérience montre que l'œuf n'a qu'une influence imperceptible sur le goût d'une pâte à foncer.

Les pâtes sont essentielles pour les métiers du goût : pâtes à dresser pour les pâtés, fonds de tarte... Il y a à cela des raisons biologiques : l'amidon de la farine et le sucre, c'est de l'énergie pour l'organisme, les lipides du beurre sont utiles pour construire les membranes cellulaires.

Faut-il y mettre de l'œuf ? Lors d'un tout récent séminaire de gastronomie moléculaire, ces réunions mensuelles où nous effectuons des expériences publiques afin d'explorer les idées culinaires souvent retransmises sans vérification, nous avons exploré cette question. Nous nous sommes intéressés aux « pâtes à foncer », ces pâtes que l'on met au fond des moules. La pâtisserie actuelle préconise deux techniques : soit le « sablage » (on commence par frotter le beurre et la farine entre les doigts pour faire une sorte de sable grossier) qui précède l'ajout d'eau ou d'œuf ; soit par « crémage » (mélange préalable de l'élément liquide et du beurre, avant l'ajout de farine). Toutefois des tests sensoriels rigoureux, effectués dans un séminaire précédent, avaient établi que les deux techniques donnaient des résultats indifférenciables.

Mais l'œuf, lui, a-t-il une influence sur le croustillant de la pâte, ou sur le goût ? Une pâte à foncer se résume à un ensemble de grains d'amidon enrobés dans une matrice de beurre et, éventuellement, de protéines (le « gluten ») pontées par des molécules d'eau. L'œuf, en coagulant et avec ses lipides (35%), peut changer la consistance et le goût. De fait, le jaune d'œuf donne notoirement beaucoup de goût aux préparations culinaires, sans compter que la cuisson du blanc ou du jaune libère de petites quantités d'un

Les pâtes à foncer, celles que l'on met au fond des moules à tarte, sont-elles meilleures si on y incorpore de l'œuf ou pas ?

gaz, l'hydrogène sulfuré, par décomposition des protéines ; ce gaz est essentiel pour l'odeur d'œuf cuit.

Pour tester nos hypothèses, nous avons utilisé le sablage et divisé la masse de pâte en quatre parties égales, auxquelles nous avons ajouté la même quantité d'eau, mais sous quatre formes différentes : eau pure, jaune d'œuf (dont 50% d'eau), blanc d'œuf (dont 88% d'eau) ou œuf entier (dont 75% d'eau). Avant la cuisson, les échantillons avaient des aspects bien différents : la pâte dont l'eau venait du jaune d'œuf était d'un jaune très soutenu, et la pâte avec un œuf entier était intermédiaire. Puis les quatre pâtes ont été abaissées et cuites ensemble, dans le même four, en disposant des échantillons de sorte que l'on puisse détecter d'éventuelles irrégularités de cuisson. Enfin, à la sortie de la cuisson, des volontaires ont goûté les pâtes cuites en aveugle.

Nos prévisions sont réfutées : les dégustateurs n'ont perçu ni différence de croustillant, ni différences de goût. Au moins dans les conditions de nos expériences, l'œuf n'a donc pas d'intérêt, alors qu'il est plus coûteux que l'eau.

Pour autant, pour certaines pâtes sucrées, on peut l'utiliser à condition de bien comprendre les phénomènes. Par exemple, si on bat l'œuf (entier ou seulement le jaune) avec du sucre, jusqu'à ce que le mélange blanchisse (pour « faire le ruban »), alors on obtient une mousse,



c'est-à-dire un mélange de très nombreuses petites bulles d'air dans l'œuf ayant dissous le sucre. Mêlée au beurre et à la farine, cette mousse change la consistance, mais peu le goût. Ou si on utilise du jaune d'œuf dur cuit de façon soutenue, alors on introduit dans la pâte un goût supplémentaire. Et on n'oubliera pas l'importance essentielle du beurre, pour le goût et pour la consistance. ■

LA RECETTE

- 1 Sabler 300 grammes de farine avec 150 grammes de beurre.
- 2 Diviser la masse en deux moitiés égales.
- 3 À la première, ajouter deux jaunes d'œuf cuits durs pendant 20 minutes afin de faire apparaître le goût d'œuf cuit, plus 20 grammes d'eau.
- 4 À la seconde, ajouter 60 grammes d'eau.
- 5 Abaisser les deux pâtes, et les couper par la moitié.
- 6 Afin de pouvoir comparer, assembler dans un même moule deux moitiés de fonds de tarte, l'une à l'œuf dur et l'autre à l'eau.
- 7 Dans la pâte, verser du lard (le goût s'harmonise à celui de l'œuf) et un mélange de lait, crème et œuf battu (en parts égales).
- 8 Cuire au four à 180 degrés jusqu'à voir la garniture gonfler.

ABONNEZ-VOUS À

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

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 pouirlascience.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 :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

PAG22STD

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

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

4,90€
PAR MOIS
-29 %

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

☐ FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

6,50€
PAR MOIS
-31 %

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

☐ FORMULE
INTÉGRALE

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

8,20€
PAR MOIS
-43 %

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2/ Mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Tél. :

Courriel :@.....

(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 le prélèvement de mon abonnement dès 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.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

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

* 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 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €. En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>

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@pouirlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

4/ **MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

p. 74

PROTISTE

Océan, flaque d'eau, poignée de terre... Tous ces milieux bouillonnent d'organismes unicellulaires munis d'un noyau, aujourd'hui connus sous le nom d'« eucaryotes unicellulaires », mais plus communément appelés « protistes ». Symbiotiques ou parasites, libres ou fixés, seuls ou en colonie, il en existe des millions d'espèces, dont les trypanosomes, responsables de la maladie du sommeil et... le blob, une cellule géante capable d'apprendre.

p. 48

MÉTAL LIQUIDE

Comme le mercure, le gallium est un métal liquide à température ambiante. S'il fusionne à 30 °C, certains de ses alliages fondent à des températures encore plus basses. Et contrairement au mercure, il n'est pas toxique !

p. 18

De nombreux énoncés présentés comme allant de soi contiennent des postulats implicites qui, lorsqu'ils sont explicités, peuvent être mis en doute, invalidant alors une démonstration qui semblait convaincante.

YVES GINGRAS sociologue des sciences à l'université du Québec

p. 88

500 °C

Si le début de la piste de bowling n'était pas huilé, les frottements de la boule produiraient un échauffement local qui atteindrait 500 °C, de quoi détériorer la piste sur le long terme.

p. 30

PAYS DE POUNT

Ce royaume légendaire apparaît dans de nombreux récits de l'Égypte antique, notamment dans le cadre d'échanges commerciaux. Sa localisation reste incertaine, mais de nombreux indices, dont la provenance de babouins momifiés retrouvés en Égypte, suggèrent qu'il était situé sur les rives africaines de la mer Rouge, dans une région qui englobe les actuels Éthiopie, Érythrée, Djibouti et Somalie.

p. 92

ÉPISTASIE

Deux mutations différentes peuvent avoir le même effet, comme conférer une résistance contre une toxine. Or parfois, quand les deux mutations sont présentes, l'effet obtenu est bien plus important que celui de la somme des deux mutations prises individuellement. On parle alors d'« épistasie » – un phénomène important dans les processus évolutifs.

p. 13

50

C'est le nombre d'incisions ponctuelles que compte un pendentif en ivoire de mammoth découvert dans la grotte de Stajnia, en Pologne. Ces encoches dessinent une ligne et un lobe. Servaient-elles à compter des proies, des lunaisons ou autre chose ? Avaient-elles un rôle purement esthétique ? Une chose est sûre : vieilles de 41 500 ans, ce sont les plus vieux pointillés connus.



Ensemble

- AIDONS LES ENFANTS MALADES.
- SOUTENONS LA RECHERCHE MÉDICALE.

CONTRE LE CANCER DES ENFANTS

JE M'ENGAGE,

JE FAIS UN DON* !



Je donne en ligne sur luluetlpbl.com,
rubrique "Soutenez-nous"

ou par chèque à l'ordre de Lulu et LPBL
à nous adresser par courrier.

*DONS DÉDUCTIBLES DES IMPÔTS

Je verse 30€, mon don ne me coûtera
que 10€ après réduction fiscale.

DÉCOUVREZ
NOS ACTIONS
SUR NOTRE SITE

LULUETLPBL.COM

SUIVEZ-NOUS SUR  

Ensemble contre
le cancer, Pour la vie !

LULU & LES P'TITES BOUILLES DE LUNE

Association loi 1901

8, allée Edith Cavell

77310 SAINT-FARGEAU-PONTHIERRY

Courriel : contact@luluetlpbl.com

luluetlpbl.com

BRAINCAST

La voix des neurones

Le podcast de *Cerveau & Psycho*

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

9^{ème} épisode

Réparer les neurones :

l'ultime défi de la sclérose en plaques

www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/



9^{ème} épisode

avec la Pr **Catherine Lubetzki**

interviewée par Sébastien Bohler

Neurologue
Directrice médicale
de l'Institut du Cerveau