Pour la Science

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

Le feuillet retrouvé du palimpseste d'Archimède

Une centrale nucléaire sur la Lune ?

L'habitabilité, clé de voûte de la protection de l'environnement

Faut-il réinventer **la particule ?**



Scientific American – Octobre 2026 - n° 588 Édition française de

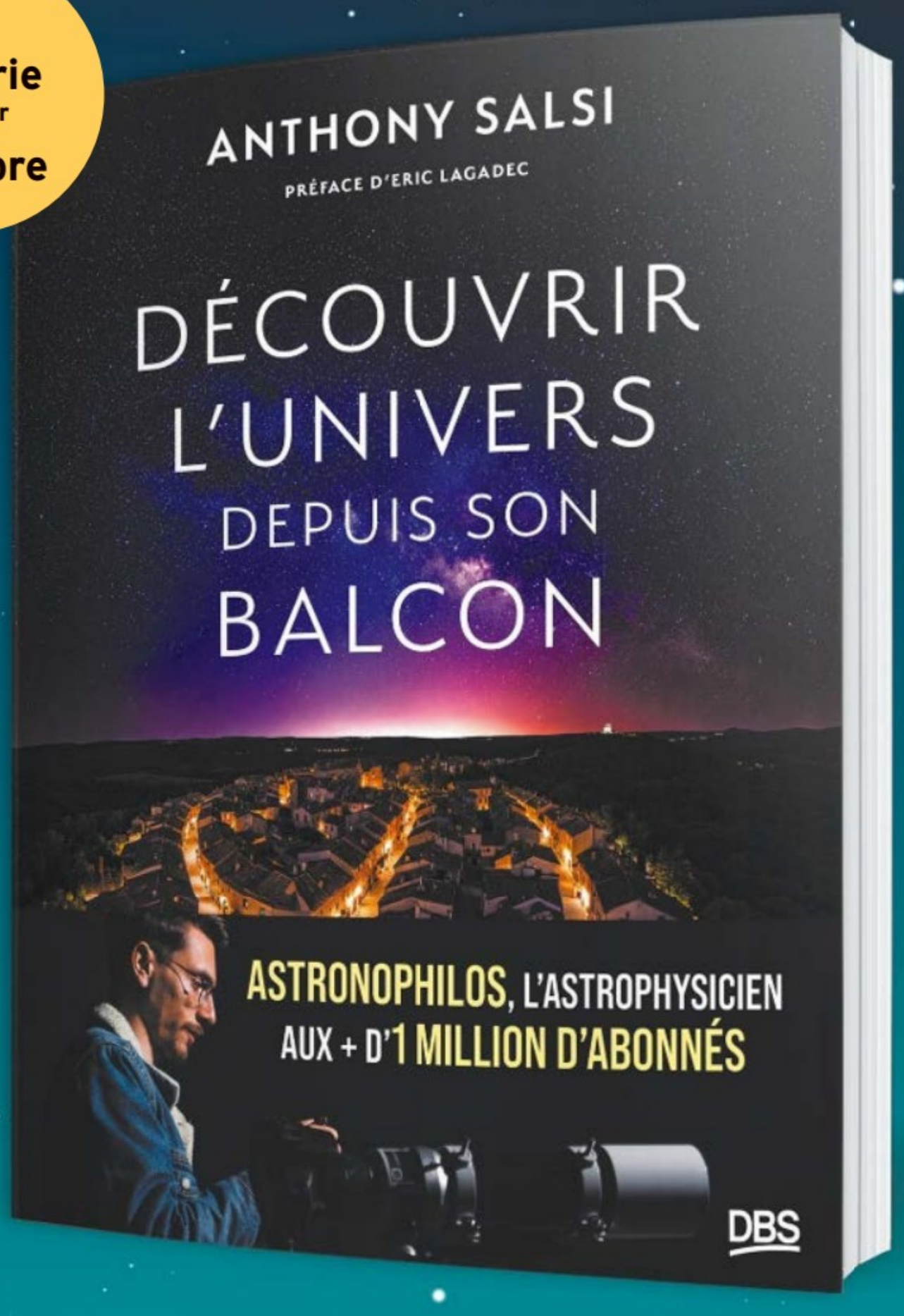
DOM : 9,00 € – BEL./LUX. : 9,00 € – CH : 12,70 FS – CAN. : 13,99 $CA – D. : 9,50 € – PORT. CONT. : 9,00 € – MAR : 86,00 DH – TOM : 1 150 XPF – TUN. : 15,70 TND

L 13256 - 588 H - F: 7,50 € - RD

10.26

Quand l'exploration de l'Univers devient accessible à tous !

En librairie le 1er octobre



224 pages • 9782807**371774** • **25,90 €**

www.deboecksuperieur.com

DBS

Suivez-nous sur les réseaux sociaux



François Lassagne
rédacteur en chef

Stimulantes simulations

Les tétras à nez rouge n'y voient que du feu : ces petits poissons suivent les simulations numériques de leurs congénères, projetées dans leur aquarium, comme s'ils étaient de chair et d'arêtes. En mimant les comportements réels, l'ingénieux dispositif met en lumière la dynamique sociale des bancs de poissons. Mais les simulations numériques offrent bien plus. Sauveront-elles les physiciens des particules de l'impasse où ils se trouvent, et dont le paradigme central (conquérir des énergies toujours plus hautes pour éprouver le modèle standard) s'effrite ? Les énergies des collisions de particules du projet de Futur collisionneur circulaire du Cern (FCC) s'annoncent insuffisantes pour atteindre les échelles envisagées pour la « grande unification ».

Que devient une science lorsque ses objets centraux deviennent inaccessibles ? Elle n'a d'autre choix que de faire évoluer ses cadres conceptuels. Comme le souligne l'historien et philosophe des sciences Jean-Philippe Martinez, « la particule apparaît moins comme un objet donné une fois pour toutes que comme le résultat d'un ajustement continu entre calculs, dispositifs et phénomènes ».

L'avenir de la physique des particules relèverait moins désormais de la production de nouvelles particules que de « l'attention portée aux écarts, même infimes, qu'une physique plus profonde pourrait laisser dans les interactions connues ». Or c'est là un autre atout des simulations numériques : produire des aperçus du réel plausibles et malléables pour en extirper de nouveaux cadres conceptuels. En l'occurrence, les succès des récentes simulations numériques conduites pour expliquer l'anomalie du moment magnétique du muon, que détaille le physicien Laurent Lellouch, sont prometteurs.

En matière de climat, pas besoin de nouvelles simulations pour montrer l'urgence de préserver de dégradations fatales la fine couche de terre et d'atmosphère qui nous fait vivre. Fictions post-apocalyptiques, modèles climatiques et jumeaux numériques exhibent le détail des crises à venir, sans grand effet sur le *business as usual*. C'est plutôt, directement, la capacité à identifier de nouveaux cadres conceptuels qu'il semble pressant de mobiliser. Celui d'habitabilité, qui affirme qu'il n'y a pas de plus haute valeur à protéger que la possibilité même de vivre durablement sur Terre, a en particulier suscité dans notre rédaction un intérêt… non simulé. ■

Remerciements

Yosuke Ashida, physicien (université du Tohoku) ;
Erwan Morgand, immunologue (Inserm) ;
Thomas Mueller, physicien (laboratoire Leprince-Ringuet)

SOMMAIRE

–Actualités–

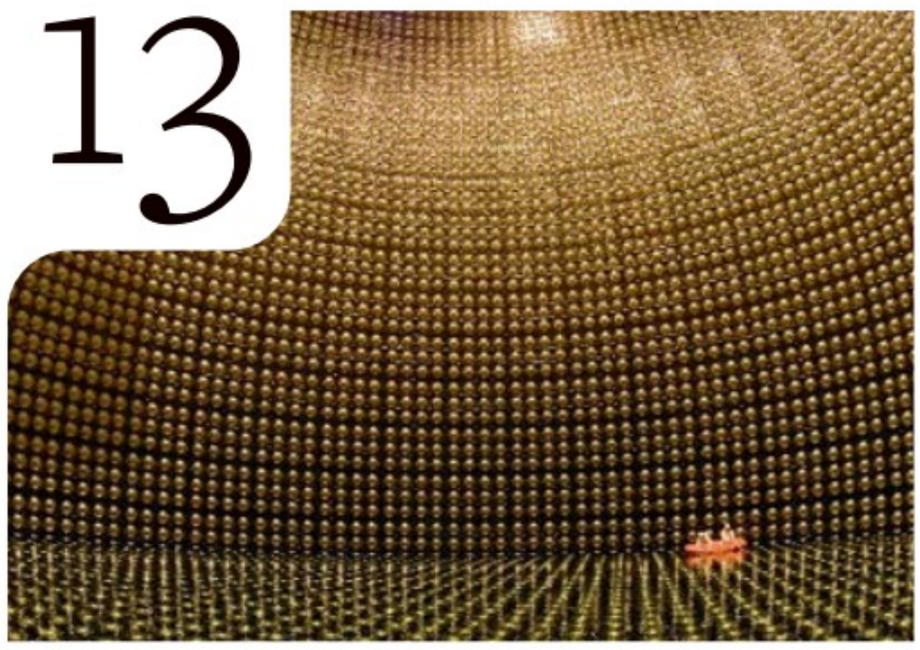
06 Hypertension intracrânienne idiopathique: le drainage cérébral en cause

08 Quand la supraconductivité renaît

09 Homo naledi: un site funéraire réservé aux femmes?

11 La biodiversité insulaire menacée

13 Des neutrinos venus de loin



Cahier partenaire – pages I à III (après la p. 37)

Automatiser la dosimétrie biologique individuelle grâce à l'IA

parrainé par ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

–Points de vue–

62 La vie dans tous ses états
Vivre avec des robots
Perig Pitrou

64 Les sciences à la loupe
La censure inattendue de Max Planck
Yves Gingras

66 Redresseur de code
Les «transformers» ou l'attention robotisée
Thomas Gerbaud

68 Retour sur image
La longue tradition des vues d'artiste
Charlotte Bigg

HISTOIRE DES SCIENCES

Faire parler le palimpseste d'Archimède 42

Victor Gysembergh

Un feuillet issu d'une copie millénaire d'un traité du mathématicien grec devrait bientôt livrer ses secrets.

INGÉNIERIE SPATIALE

Une centrale nucléaire sur la Lune? 48

Robin George Andrews

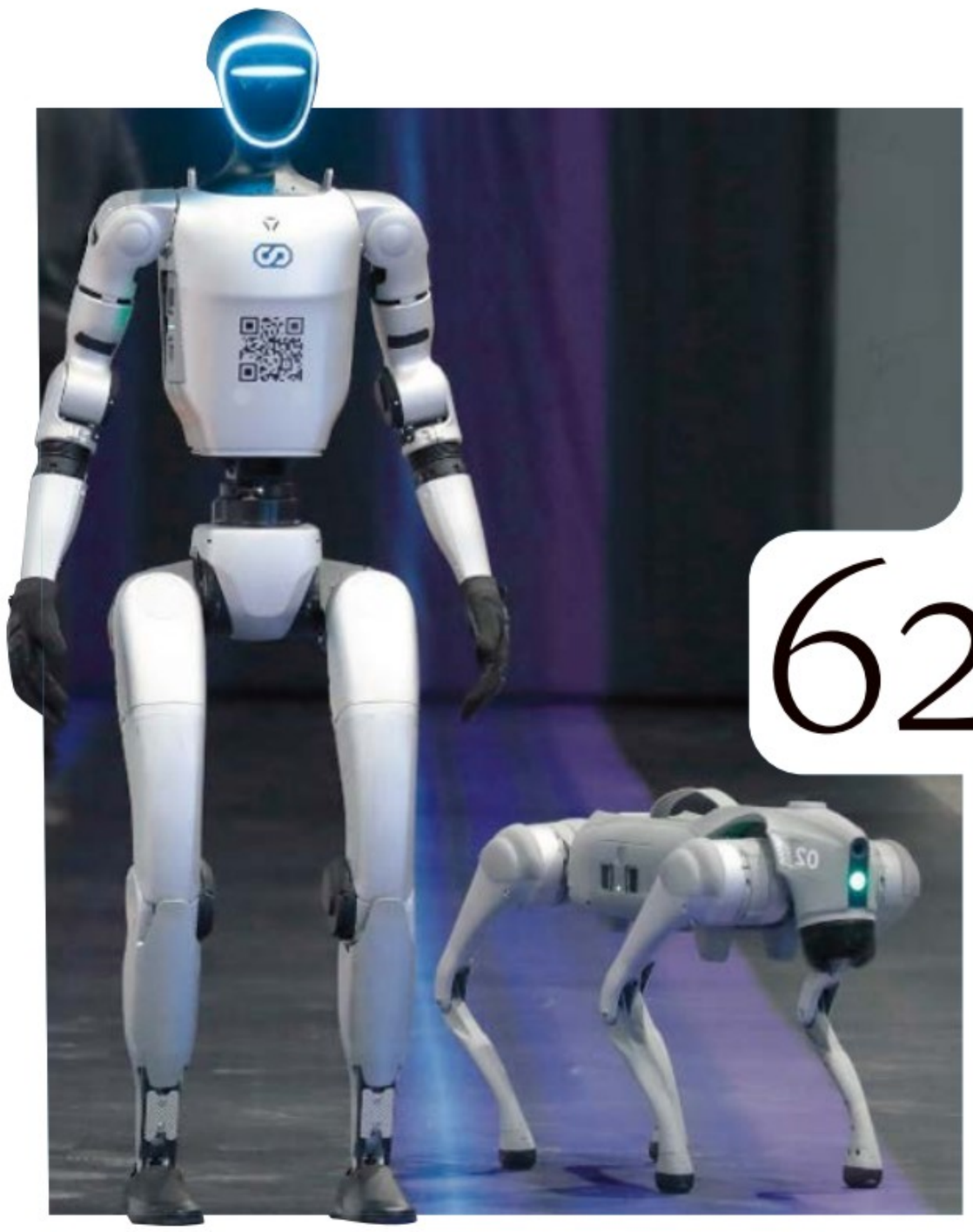
Pour alimenter durablement et en quantité suffisante une future base lunaire, l'énergie solaire pourrait ne pas suffire.

ENVIRONNEMENT

L'habitabilité est la condition de tous nos droits et libertés 54

Entretien avec Baptiste Morizot et Laurent Neyret

La dignité a nommé ce qu'on ne doit jamais faire à un humain. Le «principe habitabilité» nomme ce qu'on ne doit jamais faire à un monde.



Pour la Science.fr

LETTRES D'INFORMATION

Toutes les semaines, l'essentiel de *Pour la Science*

Soyez informé chaque mois des sorties de toutes nos publications

Profitez de nos offres promotionnelles

Et aussi: des newsletters thématisées

Inscrivez-vous ou scannez ce code:
www.pourlascience.fr

À la une



14

ÉPISTÉMOLOGIE

14 Quel avenir pour la physique des particules ?

Jean-Philippe Martinez

Les scientifiques de ce domaine de recherche se trouveraient-ils face au « désert » qu'ils redoutent depuis près d'un demi-siècle ?

PHYSIQUE DES PARTICULES

24 La simulation numérique au secours du muon

Johanna Michaels

Pour élucider les lois de la physique des particules, la simulation démontre désormais tout son intérêt.

ÉTHOLOGIE

32 Des avatars virtuels pour percer le secret des bancs de poissons

G. Theraulaz, S. Sanchez, C. Sire et R. Escobedo

Quand un vrai poisson nage en compagnie d'avatars numériques, la dynamique collective s'éclaire.

–Culture–

70 **Logique & calcul**
Géométrie (contre-)intuitive
Jean-Paul Delahaye
Les petits polygones ont des propriétés géométriques parfois déroutantes, et l'intuition peut suggérer des idées qui se révèlent fausses.

76 **Art & science**
La plus ancienne guerre de l'eau
Loïc Mangin

78 **Les livres du mois**

80 **Chroniques de l'évolution**
Le fossile qui a bousculé l'arbre des chélicérates
Hervé Le Guyader

84 **Idées de physique**
Et j'atténue le son !
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

88 **Science & gastronomie**
Chlorophylles : de la luzerne dans votre assiette
Hervé This

90 **L'équation**
La vraie distance entre l'humain et la banane
Florian Freistetter

En couverture : © Shutterstock AI Generator

Ce numéro comporte un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.



68

–Neurosciences–

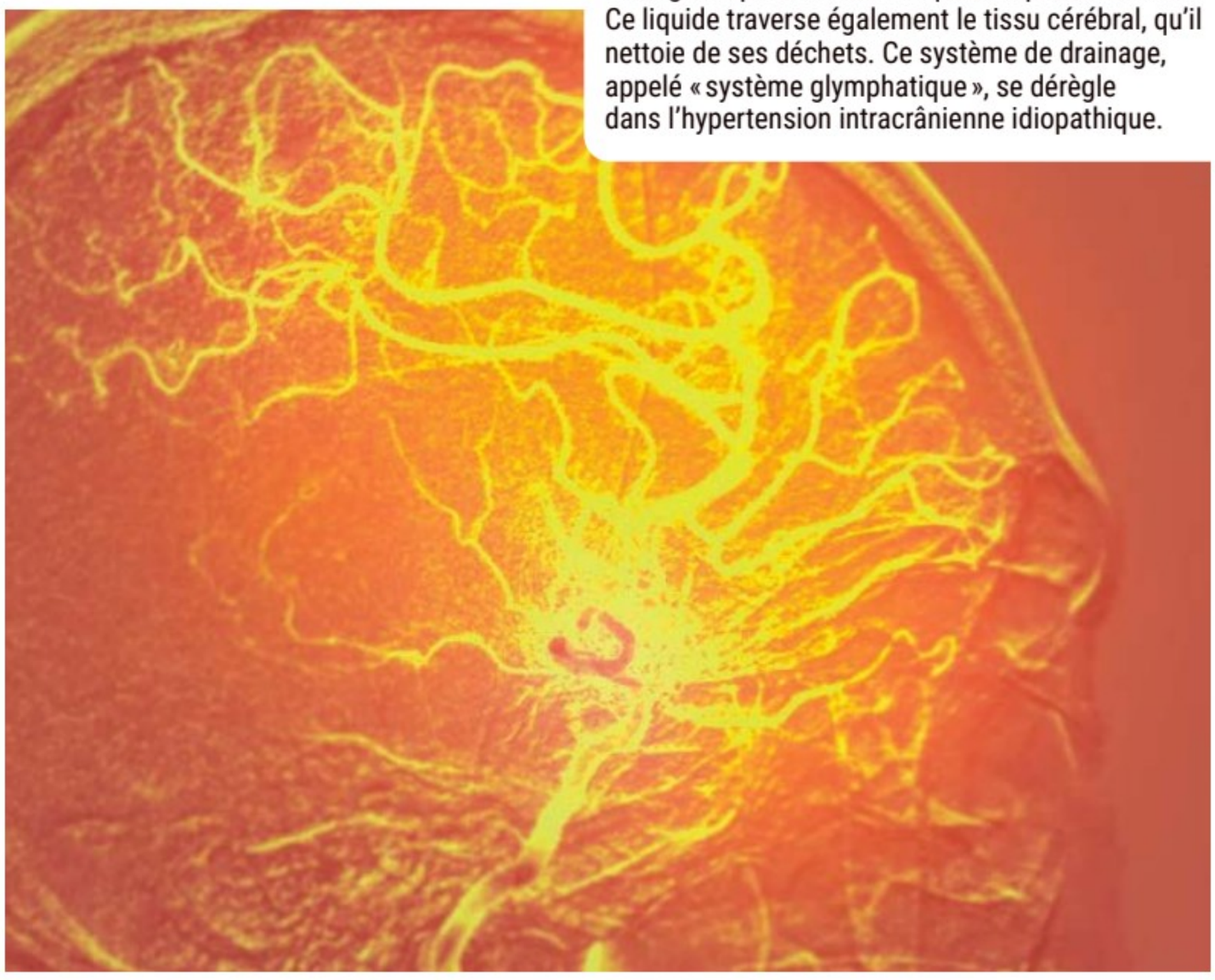
Hypertension intracrânienne idiopathique : le drainage cérébral en cause

Dans ce trouble neurologique rare, la pression augmente à l'intérieur du crâne, provoquant des maux de tête et divers troubles perceptifs et cognitifs. Une nouvelle étude éclaire les mécanismes en jeu.

Maux de tête, acouphènes, troubles visuels, problèmes de sommeil, difficulté à se concentrer… L'hypertension intracrânienne idiopathique (HTICI), un trouble neurologique rare qui touche 1 à 20 personnes sur 100000, est invalidante par bien des aspects. En cause : une surpression dans le liquide céphalorachidien (LCR), dans lequel baigne le cerveau. Grâce à des expériences chez l'humain et chez la souris, l'équipe de Stéphanie Lenck et Jean-Léon Thomas, à l'Institut du cerveau, à Paris, a découvert un mécanisme susceptible de l'expliquer.

À la base du crâne, les patients présentent un rétrécissement des sinus veineux (de grosses veines qui courent autour du cerveau et collectent le sang avant sa sortie de la tête), qui était soupçonné de jouer un rôle clé. En effet, un traitement efficace consiste à élargir ces sinus grâce à un petit ressort inséré à l'intérieur, ce qui fait diminuer la pression et soulage en général rapidement les symptômes. Pourtant, le sang et le LCR ne communiquent qu'en quelques endroits ponctuels. Mais ils courent dans des voies parallèles : le LCR circule au sein d'espaces longeant les artères, puis passe dans le tissu cérébral et en ressort dans d'autres conduits, situés cette fois autour des veines. Ce circuit, qui nettoie le cerveau de ses déchets métaboliques, est qualifié de « système glymphatique ».

Pour confirmer le rôle causal du rétrécissement des voies d'évacuation sanguines, les chercheurs ont partiellement obstrué ces voies chez des souris. Ils ont alors observé l'augmentation de la pression intracrânienne caractéristique de la maladie. Les analyses ont en outre révélé une multiplication du canal ionique mécanosensible Piezo1 dans les parois veineuses, soumises à de fortes contraintes en raison de l'obstruction. Sans doute sous l'action de ces capteurs, une série de modifications biochimiques (notamment une inflammation locale) sont survenues dans l'espace qui entoure ces veines, et qui abrite des vaisseaux collectant le LCR après sa traversée du cerveau (les vaisseaux lymphatiques méningés). Ces vaisseaux, par ailleurs comprimés par le gonflement des veines en amont de l'obstruction, ont alors régressé, voire disparu.



Le cerveau est parcouru de multiples vaisseaux sanguins, le long desquels circule le liquide céphalorachidien. Ce liquide traverse également le tissu cérébral, qu'il nettoie de ses déchets. Ce système de drainage, appelé « système glymphatique », se dérègle dans l'hypertension intracrânienne idiopathique.

© Radiological imaging/Shutterstock

À la suite de cette atteinte d'un maillon essentiel du réseau de circulation du LCR, d'autres perturbations se sont produites en amont de l'obstruction. Le réseau de canaux protéiques aquaporine 4, qui assure l'entrée et la sortie du liquide dans le tissu cérébral, est devenu dysfonctionnel. En conséquence, ce liquide s'est accumulé un peu partout dans le cerveau. Des observations chez des patientes ont confirmé l'existence d'un œdème cérébral (un gonflement du cerveau provoqué par l'accumulation de liquide). C'est cette accumulation qui fait monter la pression, puisque la boîte crânienne ne peut quant à elle augmenter de volume.

Mais qu'est-ce qui provoque le rétrécissement des sinus veineux à l'origine? La maladie touche particulièrement les femmes en situation d'obésité ou de prise de poids rapide, ce qui suggère des facteurs hormonaux. S'y ajoutent sans doute une vulnérabilité génétique et le fait que les vaisseaux lymphatiques méningés sont moins développés chez les femmes. Ces résultats indiquent en tout cas que les réseaux du sang et du LCR sont en étroite interaction, et suggèrent que cette complexe plomberie doit être en bon état à tous les niveaux pour assurer un fonctionnement et un nettoyage efficaces du cerveau. ■

Guillaume Jacquemont

M. R. El Kamouh *et al.*, *Nature Neuroscience*, 2026.

L'usure des pneus comprise à l'échelle moléculaire



Le frottement des pneus sur la route provoque leur usure. Mais le processus à l'échelle moléculaire restait à percer.

Au fil des kilomètres, les pneus des voitures s'usent et projettent au passage des microparticules. Chaque année, cela représente plusieurs millions de tonnes de caoutchouc qui s'envolent, si bien que les pneus sont devenus la première source de pollution aux particules émise par les véhicules. Pour diminuer cette pollution, l'équipe de Jean Comtet, physicien de la matière molle à l'ESPCI et au CNRS, a récemment étudié comment les pneus s'usent à l'échelle moléculaire.

Jusqu'ici, les scientifiques savaient mesurer à quelle vitesse la gomme s'usait, en la faisant frotter contre une surface rugueuse, mais les mécanismes microscopiques n'étaient pas connus. « User un caoutchouc, cela implique de casser les chaînes de polymères qui le composent, explique Jean Comtet. Nous voulions connaître la quantité de chaînes qui rompent avant qu'on observe un détachement macroscopique, et leur répartition spatiale. Pour cela, nous avons introduit dans le matériau des molécules mécanophores, qui deviennent fluorescentes lorsqu'elles cassent. » Afin de capter la lumière produite par ces molécules, les chercheurs ont utilisé une gomme transparente, contrairement au caoutchouc des pneus qui contient du noir de carbone en guise de renfort.

En menant des expériences de frottement, les chercheurs ont été surpris par la localisation des ruptures moléculaires. Elles ne se produisent pas le long de fissures localisées dans la zone de contact, mais en profondeur et de manière diffuse. Un endommagement qui s'accumule au fil du temps, jusqu'à ce que la couche superficielle du matériau finisse par se détacher en microparticules. Ces résultats sont encore très fondamentaux mais, à terme, ils fourniront peut-être des pistes pour limiter les contraintes sur les molécules et l'usure des pneus. ■

Edwyn Guérineau

O. Taisne *et al.*, *Science Advances*, 2026.

© Mayy Contributor/Shutterstock

– Physique –

Quand la supraconductivité renaît

Dans de rares cas, un champ magnétique, qui normalement neutralise le comportement supraconducteur, peut lui redonner vie. On parle de « supraconductivité réentrante ».

La supraconductivité réentrante est un phénomène rare et paradoxal. Sous l'effet d'un champ magnétique, connu pour détruire progressivement le comportement supraconducteur d'un matériau, cette phase, où le courant électrique circule avec une résistance nulle, disparaît un temps… avant de renaître en présence d'un champ plus fort. Une équipe du Riken, au Japon, menée par Denis Maryenko, a observé ce phénomène inhabituel dans un système bidimensionnel constitué d'une fine interface entre deux oxydes isolants.

Dans un supraconducteur classique, les électrons circulent sans résistance en s'associant par paires de spins opposés. Ce comportement est fragile. L'agitation thermique ou un champ magnétique peuvent empêcher la formation de ces paires. Pourtant, dans de rares exceptions, « à mesure que le champ magnétique augmente, la supraconductivité détruite finit par réapparaître », décrit Daniel Braithwaite, physicien au CEA-Grenoble.

Cette supraconductivité réentrante a déjà été observée dans une poignée de matériaux 3D. En deux dimensions, un seul exemple était connu. Aujourd'hui, l'équipe de Denis Maryenko en a découvert un autre. L'atout des systèmes 2D est leur contrôlabilité ; il est possible de modifier leurs caractéristiques pour comprendre avec précision l'origine de la supraconductivité réentrante.

Les chercheurs ont ainsi fabriqué une interface assemblée atome par atome, entre deux couches cristallines d'oxydes isolants, $LaTiO_3$ et $KTaO_3$. À cette frontière, des électrons mobiles sont confinés dans une couche ultrafine et forment un gaz d'électrons bidimensionnel et supraconducteur. Comme attendu, la présence d'un champ magnétique détruit la supraconductivité du système. Mais, en continuant d'augmenter le champ, le comportement supraconducteur finit par réémerger.

L'équipe a analysé les spécificités de cette interface pour expliquer ce comportement « réentrant ». Son orientation par rapport à la structure cristalline donne naissance à une force (un couplage spin-orbite) particulière, qui, en présence d'un champ magnétique, pénalise la formation des paires d'électrons. À l'inverse, la distribution en énergie des électrons (décrite par la théorie des bandes) présente une surdensité, qui en présence d'un champ magnétique, favorise l'appariement. Ces deux effets sont en compétition mais le premier domine à faible champ magnétique puis le second gagne en importance à champ fort, ce qui explique ici l'effet réentrant de la supraconductivité. ■

Évrard-Ouicem Eljaouhari

D. Maryenko *et al.*, *Science Advances*, 2026.



Dans un matériau supraconducteur, les électrons forment des paires qui leur permettent de circuler sans résistance. Un champ magnétique perturbe et détruit ces paires. Mais dans de rares cas, un champ magnétique intense stimule la reconstitution de ces duos d'électrons.

© Kondione/Shutterstock

–Paléoanthropologie–

Homo naledi : un site funéraire réservé aux femmes ?

Les ossements d'*Homo naledi*, une espèce d'homininés anciens, exhumés dans les profondeurs du réseau de cavernes Rising Star, en Afrique du Sud, continuent d'intriguer. Dans une nouvelle étude, Palesa Madupe, de l'institut Max Planck d'anthropologie évolutionnaire, à Leipzig, en Allemagne et ses collègues affirment que tous les individus exhumés seraient des femmes.

Pour en arriver à cette conclusion, les archéologues ont procédé à l'extraction d'infimes quantités de protéines de l'émail dentaire. Ils ont ensuite identifié le sexe biologique des individus en analysant la séquence d'une protéine de leur émail dentaire : l'amélogénine. Celle-ci existe en deux versions, X et Y, selon que le gène associé est porté par le chromosome X ou Y. La version Y est donc propre aux hommes. Or aucune séquence pouvant correspondre à l'amélogénine Y n'a été détectée dans les 23 dents provenant de 20 individus.

Deux explications émergent dès lors, selon l'équipe : *Homo naledi* était dépourvu du gène de l'amélogénine Y ou toutes les dents analysées ont bel et bien appartenu à des individus de sexe féminin. Cependant, pour Louise Le Meillour, chercheuse au Muséum national d'histoire naturel et spécialiste en paléoprotéomique, il existe une autre explication : « Étant donné l'ancienneté des restes d'*Homo naledi*, il est possible que l'amélogénine Y n'ait pas été préservée dans le temps et ne soit donc plus détectable, ou encore que le gène ait été sous-exprimé. »

Le paléoanthropologue Lee Berger, coauteur de l'étude, voit dans cette découverte un comportement culturel chez *Homo naledi* consistant à séparer hommes et femmes lors des rites funéraires. Toutefois, « l'existence de pratiques funéraires chez *Homo naledi* ne fait même pas l'objet d'un consensus, nuance Aurélien Mounier, chargé de recherche au CNRS au sein du musée de l'Homme. Principalement parce que les preuves apportées sont, pour l'instant, trop ténues. » ■

William Rowe-Pirra

P. Madupe *et al.*, *Cell*, 2026.



–Astrophysique–

Une supernova peut en cacher une autre

L'étoile qui a explosé pour donner la nébuleuse de la Méduse appartenait à un système binaire. Et son compagnon aurait aussi explosé en supernova.

La nébuleuse de la Méduse (IC 443) est l'un des vestiges de supernovæ les plus étudiés, car ce nuage de gaz et de poussière éjecté lors de l'explosion d'une étoile en fin de vie, aussi nommé « rémanent », appartient à la famille restreinte de ceux qui émettent un intense rayonnement gamma. Son voisin immédiat, G189.6+3.3, à l'inverse, était plutôt discret. Découvert en 1994, cet objet était lui aussi considéré comme un possible rémanent de supernova, sans qu'il soit possible de le confirmer. Ces dernières années, les indices se sont néanmoins accumulés. Ils ont corroboré sa nature, sans cependant établir de connexion avec IC 443. C'est à présent l'origine commune des deux rémanents dans un système binaire que viennent de mettre en évidence Miltiadis Michailidis, de l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues.

« Nous estimons que près de 80 % des étoiles massives qui produisent les supernovæ qui nous intéressent évoluent dans des systèmes binaires », indique Marianne Lemoine-Goumard, du Laboratoire de physique des deux infinis à Bordeaux, qui a participé à cette étude sur la nébuleuse de la Méduse. « Cependant, détecter deux vestiges de supernovæ associés à ces systèmes binaires est très difficile. Pour deux raisons. Lors de l'explosion de chaque étoile, le système risque de se disloquer. La perte brutale de matière est souvent asymétrique et l'impulsion produite peut donc séparer les deux objets. La deuxième contrainte est temporelle, il faut que le délai entre les deux explosions soit inférieur à 100 000 ans pour que l'émission du rémanent ne soit pas complètement diluée. »

Miltiadis Michailidis et ses collègues ont repris seize années de données du télescope *Fermi* pour mieux cartographier la région. Ils ont montré que le rémanent G189.6+3.3 se décompose en deux parties. Celle au « nord » émet une signature qui indique qu'elle interagit avec un nuage de gaz d'hydrogène, nommé S249. Or IC 443 était déjà connu pour interagir avec ce nuage. Cela place les deux rémanents à une distance similaire de nous, environ 6 000 années-lumière. En croisant ces observations avec des simulations de populations d'étoiles binaires massives, l'équipe propose que ces deux rémanents proviennent de la déflagration en supernova de deux étoiles appartenant à un même système binaire. Les chercheurs évaluent à entre 20 000 et 100 000 ans le délai qui séparerait les deux explosions, IC 443 étant la plus récente, avec un âge probable estimé entre 8 000 et 9 000 ans. ■

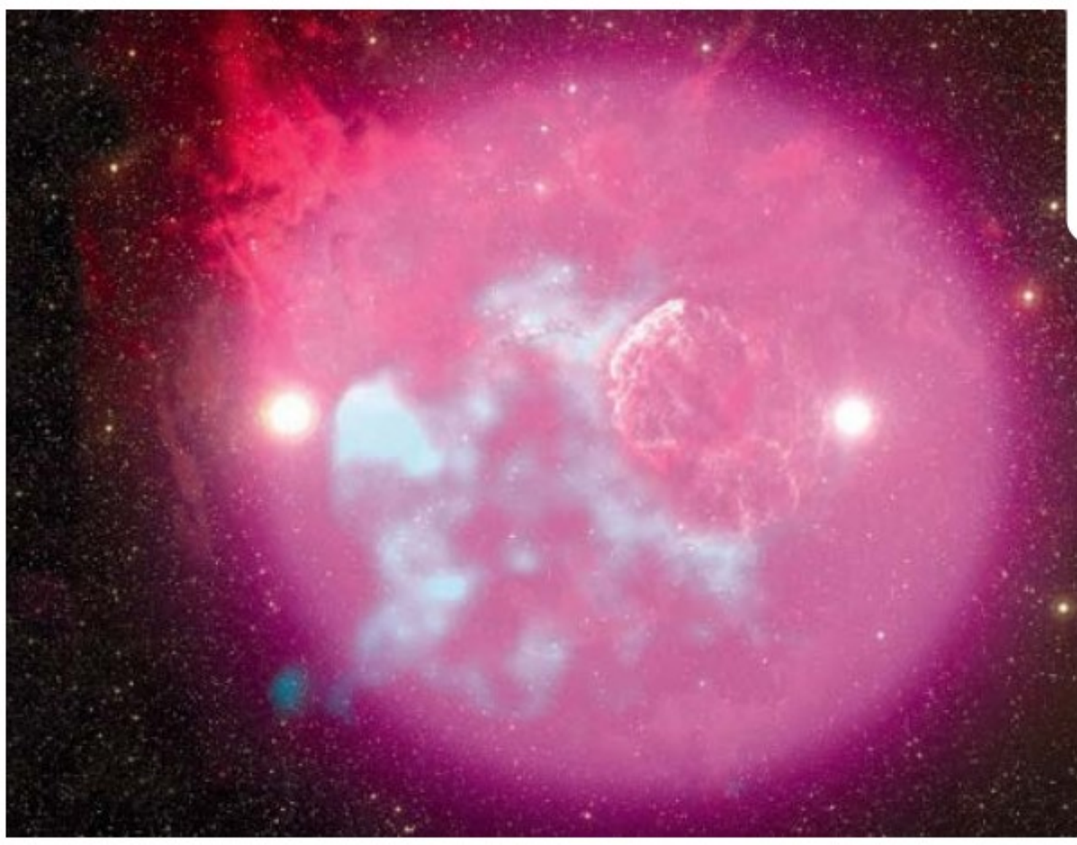


Image composite combinant différentes longueurs d'onde de la région d'IC 443. Les émissions gamma forment une structure étendue qui regroupe IC 443 et G189.6+3.3.

© Centre spatial Goddard de la Nasa, M. Michailidis et al., 2026 ; signal radio : ESA/Planck et MWISP (orange, marron) ; signal optique, DSS (jaune) ; signal infrarouge Nasa/Wise (rouge) ; signal ultraviolet, Nasa/Swift (violet) ; rayons X, SRG/eRosita (vert) ; rayons gamma, Nasa/DOE/Collaboration Fermi LAT (magenta)

Sean Bailly

M. Michailidis *et al.*, *Nature Communications*, 2026.

en bref

L'odeur du père

L'odeur maternelle est connue pour apaiser les nouveau-nés. Et celle du père ? Une équipe de l'université Reichman, en Israël, a montré que lors d'une interaction, le cerveau d'un nourrisson se synchronise davantage avec celui d'un inconnu quand ce dernier porte un T-shirt imprégné de l'odeur paternelle, en particulier à des fréquences caractéristiques de la régulation de l'attention. Plus le père s'occupe de son enfant, plus la synchronisation est forte.

Science Advances, 15 juillet 2026.

L'étoile reine du sprint

Grâce à l'instrument Gravity+ du *VLTI*, au Chili, Karim Abd El Dayem, de l'observatoire de Paris, et ses collègues ont découvert S301, l'étoile la plus proche du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée. Et quand elle passe à une distance équivalente à celle qui sépare le Soleil de Saturne, S301 file à une vitesse record de 25 000 kilomètres par seconde. Avec cette proximité, la trajectoire elliptique de l'astre est sensible aux effets relativistes dus à la rotation du trou noir.

Nature, 19 août 2026.

Les chimpanzés ont des accents

Différents groupes de ces primates présentent des variations dans leurs signatures vocales. Restait à comprendre leur source : génétique, sociale, environnementale ? Kassandra Giragosian, de l'université Queen Mary, à Londres, et deux collègues ont abordé la question en étudiant les sons émis par des jeunes et des adultes. Des différences existent déjà chez les juvéniles, mais elles se renforcent avec l'âge, ce qui suggère une influence importante du lien social et environnemental.

Plos One, 2 septembre 2026.

© Martin Valigursky/Shutterstock

–Environnement–

La biodiversité insulaire menacée



Les îles de l'archipel du Vanuatu, et leur biodiversité, sont particulièrement menacées par la montée du niveau des océans.

Les îles subissent de plein fouet l'intensification des effets du changement climatique, des invasions biologiques et de l'anthropisation des sols. Pour étudier leur vulnérabilité, une équipe de recherche internationale menée par Céline Bellard, biologiste CNRS à l'université Paris-Saclay, et Ana Benítez López, du Conseil supérieur de la recherche scientifique, en Espagne, a cartographié les pressions écosystémiques subies par plus de 16 000 territoires insulaires et modélisé leur évolution jusqu'en 2050. Ces travaux permettent d'identifier des zones critiques où les efforts de protection sont les plus urgents.

Les chercheurs ont pris en compte, d'une part, les écarts entre les conditions climatiques actuelles et les projections de températures et de précipitations à l'horizon de 2050 et la hausse du niveau des océans, d'autre part, l'exposition aux espèces envahissantes et, enfin, le changement d'usage des sols – en répertoriant les terres déjà anthropisées et l'évolution prévue selon des scénarios socioéconomiques. Ils ont ainsi calculé un score compris entre 0 et 3 pour évaluer la menace qui pèse sur la biodiversité locale. Résultat : sur les 16 578 îles étudiées, le changement climatique s'impose comme la menace principale pour 65% d'entre elles, mais aucune île n'y échappe totalement. Viennent ensuite le changement d'usage des sols (22%) puis les invasions biologiques (13%). Toutefois, lorsqu'on isole les 5% d'îles les plus à risque, c'est le changement d'usage des sols qui devient la menace prépondérante.

À l'échelle régionale, la situation est très hétérogène et sur une même zone géographique, l'intensité des menaces varie d'une île à l'autre. Face à ce constat, les scientifiques appellent à renforcer les politiques de conservation des îles les plus en danger, en veillant à adapter les stratégies aux contextes locaux. ■

Sacha Citerne

C. Marino *et al.*, *PNAS*, 2026.

–Immunologie–

L'évolution des polypes colorectaux mieux comprise

Pourquoi certaines de ces lésions précancéreuses situées dans le côlon ou le rectum évoluent-elles en cancer? Des ARN non codants activeraient une surveillance immunitaire qui joue un rôle protecteur dans cette évolution.

À risque héréditaire égal, certains patients voient leurs polypes se multiplier au fil des coloscopies, tandis que d'autres n'en développent qu'un, isolé, sans récidive. Pourquoi? La question n'est pas anodine: plus les polypes sont nombreux, plus le risque de voir l'un d'eux dégénérer en cancer colorectal augmente. D'où l'intérêt du dépistage par coloscopie: repérer et retirer ces lésions précancéreuses avant qu'elles ne franchissent le pas. Or une équipe autour de Jérôme Galon, du centre de recherche des Cordeliers, à Paris, vient de montrer que l'évolution des polypes dépend de leur environnement immunitaire.

Pour arriver à cette conclusion, les scientifiques ont caractérisé 258 lésions colorectales prélevées chez 69 patients en combinant des analyses génomiques et transcriptomiques, et une cartographie cellulaire *in situ*. Ils ont constaté, chez les patients ayant peu de polypes détectés par an, une forte expression d'ARN non codants dans les prélèvements. Ces ARN qui ne sont pas traduits en protéines ne sont pas pour autant de simples molécules passives: certains sont connus pour leurs propriétés de régulation; d'autres, traduits en peptides, contribuent à l'activité immunitaire des lymphocytes T. En explorant cette piste, l'équipe a montré que les lésions riches en ARN non codants étaient environnées de davantage de lymphocytes T et de structures lymphoïdes matures, des sortes de mini-ganglions où s'orchestre une réaction immunitaire. Et davantage de voies de signalisation immunitaire y étaient activées.

L'ensemble converge donc vers une même hypothèse: une expression élevée d'ARN non codants favoriserait le recrutement et l'activation de cellules immunitaires, instaurant une surveillance efficace qui contiendrait la prolifération des polypes. Son appauvrissement laisse, à l'inverse, le champ libre à des profils transcriptomiques plus proches d'un cancer invasif.

Ce résultat, bien que préliminaire, ouvre des perspectives concrètes. Évaluer l'expression des ARN non codants, la maturité des structures lymphoïdes tertiaires ou la densité en lymphocytes T pourrait affiner la détection des personnes les plus à risque. Il ouvre aussi la piste de vaccins immunomodulateurs prophylactiques destinés à renforcer, chez ces patients, une surveillance immunitaire que leur organisme peine à établir spontanément. ■

S. C.

E. Morgand *et al.*, *Science Translational Medicine*, 2026.

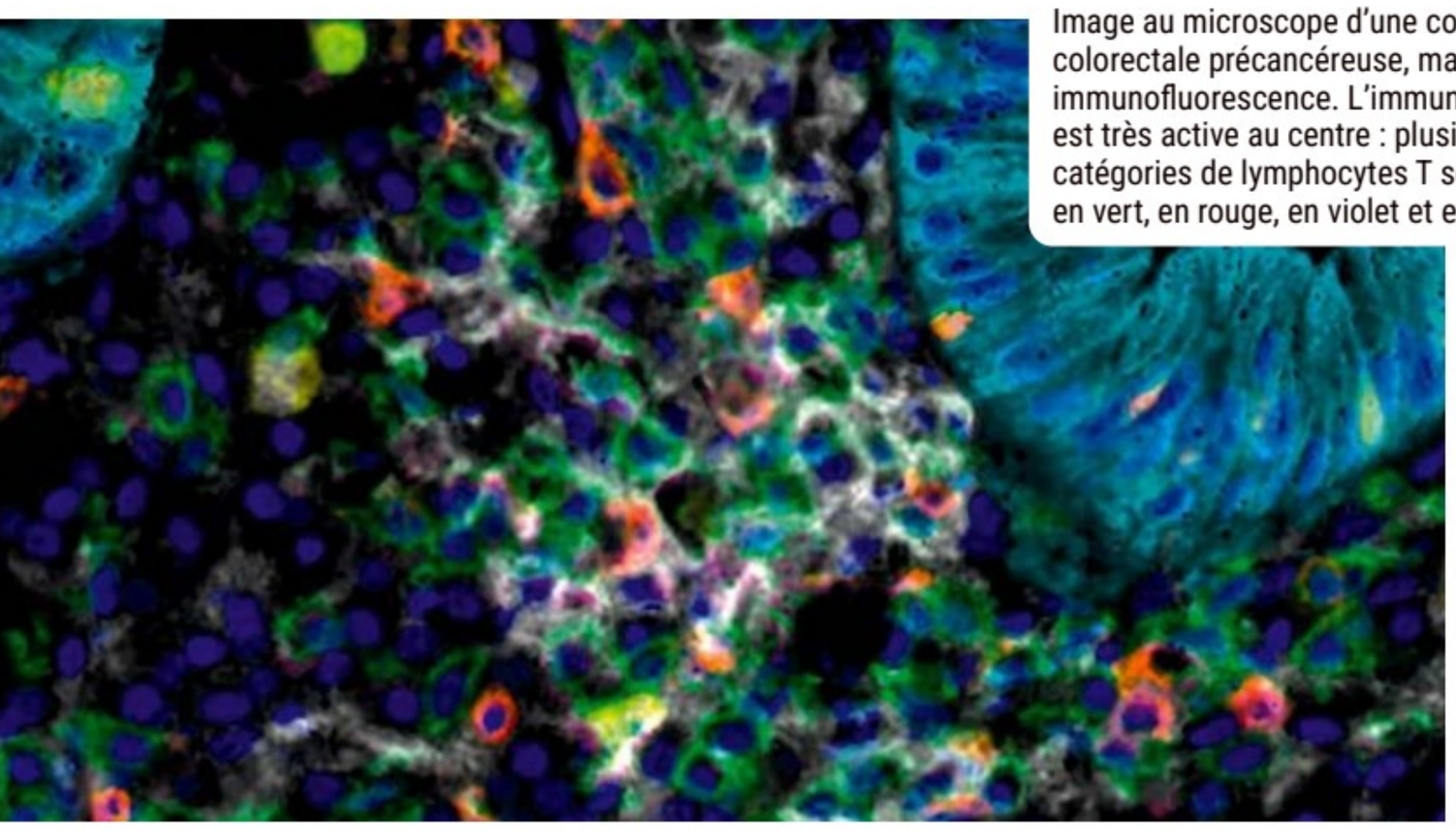
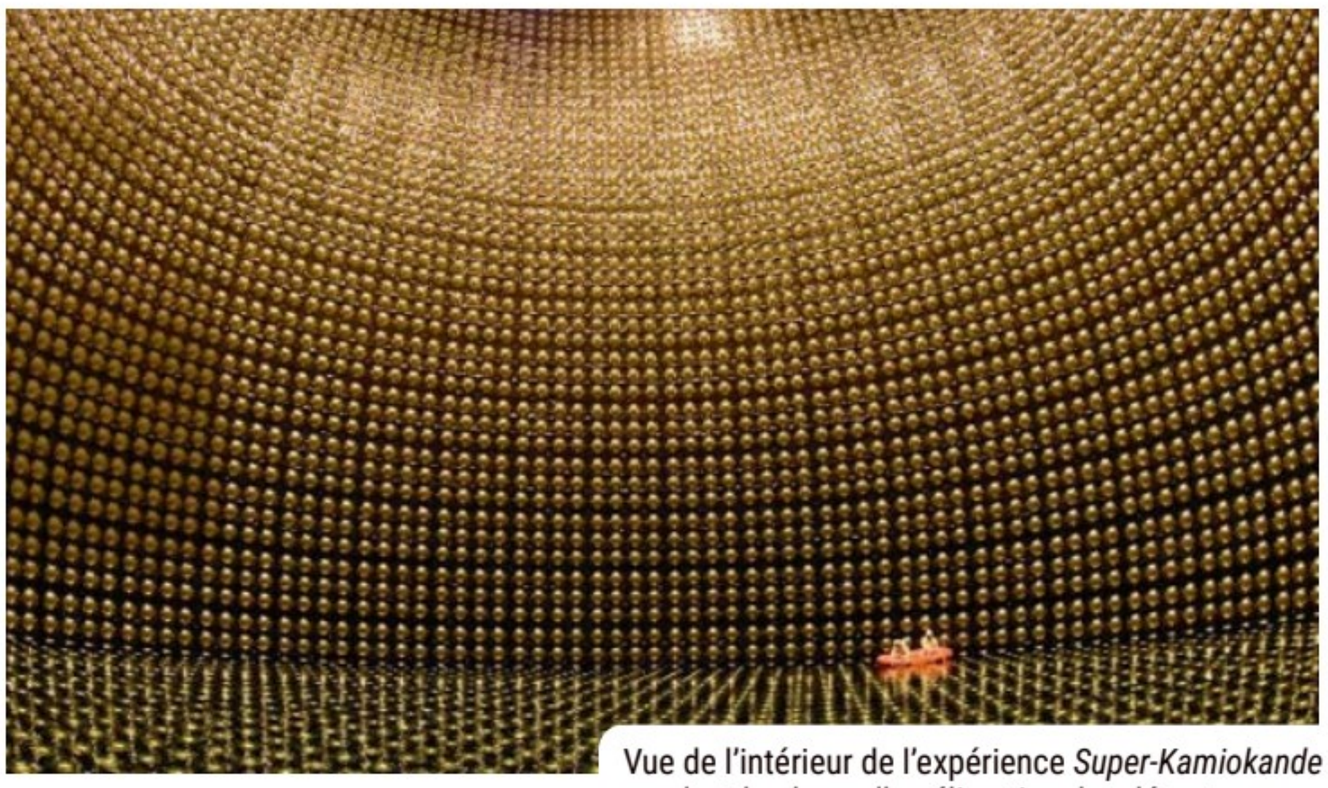


Image au microscope d'une coupe de lésion colorectale précancéreuse, marquée par immunofluorescence. L'immunosurveillance est très active au centre : plusieurs catégories de lymphocytes T se distinguent en vert, en rouge, en violet et en blanc.

© Erwan Morgand et Jérôme Galon/Inserm

–Astrophysique–

Des neutrinos venus de loin



Vue de l'intérieur de l'expérience *Super-Kamiokande* pendant la phase d'amélioration des détecteurs en 2018. L'eau de la cuve a presque été vidée.

À l'échelle de la galaxie, les explosions d'étoiles en supernovæ sont rares: une par siècle environ. Mais à l'échelle de l'Univers observable, ces cataclysmes se produiraient plusieurs fois par seconde. Or, lorsque le cœur d'une étoile massive s'effondre puis explose, plus de 99% de l'énergie est émise sous la forme de neutrinos, des particules ultralégères qui filent à travers tout le cosmos. Nous baignons donc dans un bain composé de ces neutrinos et nommé «fond diffus de neutrinos des supernovæ».

La détection de ce bain n'est pas simple, car les neutrinos sont difficiles à détecter: ils n'interagissent presque pas avec la matière, seulement *via* l'interaction faible. Pour tenter de les observer, l'expérience *Super-Kamiokande* dispose d'une gigantesque cuve de 50000 tonnes d'eau bardée de capteurs, située dans une caverne creusée sous une montagne au Japon.

La difficulté est alors de distinguer ce fond de neutrinos des autres sources (comme la radioactivité naturelle, le Soleil, etc.), pour la plupart plus proches et plus intenses. Les supernovæ ont la particularité d'émettre des neutrinos de toutes les «saveurs» (électronique, muonique et tauique), ainsi que leurs antiparticules respectives. Pour isoler un signal venant du fond diffus des supernovæ, les scientifiques se sont concentrés sur des antineutrinos électroniques d'énergie comprise entre 10 et 100 mégaélectronvolts.

En cumulant les observations prises en quasi continu depuis 2008, les scientifiques estiment le flux du fond diffus de neutrinos de supernovæ à 3,6 particules par seconde et par centimètre carré. Cependant, l'incertitude est encore grande et il est trop tôt pour revendiquer une découverte avec certitude. *Super-Kamiokande* prendra des données jusqu'en 2029. Son successeur, *Hyper-Kamiokande*, encore plus volumineux, est déjà en cours de construction. ■

Sylvain Guilbaud

© Observatoire Kamioka, ICRR (Institut de recherche sur les rayons cosmiques), université de Tokyo

Pour la Science

MENSUEL POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: François Lassagne
Rédacteurs en chef adjoints: Loïc Mangin, Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: Sean Bailly, Guillaume Jacquemont

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

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Directeur marketing et développement: Frédéric-Alexandre Talec
Chef de produit marketing: Ferdinand Moncaut
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Ingrid Leroy, Ingrid Lhande
Réviseuses: Anne-Rozenn Jouble, Maud Bruguière, Marie-Louise Desfray et Sandra Houzé-Petit

Directrice des ressources humaines: Stéphanie Laakmann
Fabrication: Marianne Sigogne et Stéphanie Ho
Directeur de la publication et gérant: Gilles Haéri
Ont également participé à ce numéro: Clémentine Laurens

PUBLICITÉ FRANCE
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
https://www.pourlascience.fr/abonnements/
Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
Du lundi au vendredi de 8h30 à 12h30 et de 13h30 à 16h30
Adresse postale:
Service abonnement Groupe Pour la Science
c/o Opper Services - CS 60003
31242 L'Union

Tarif d'abonnement Formule Intégrale 1 an (12 numéros du magazine + 4 numéros Hors-Série + accès au site): 99 euros
Europe/Reste du monde: consulter https://www.pourlascience.fr/abonnements/

DIFFUSION
Contact réservé aux dépositaires et diffuseurs de presse

Société Opper
01 40 94 22 23 – pdelifer@opper.io

DISTRIBUTION
MLP
ISSN 0 153-4092
Commission paritaire n°0927K82079
Dépôt légal: 5636 – Octobre 2026
N° d'édition: M0770588-01

WWW.POURLASCIENCE.FR
5 allée de la 2e Division Blindée, 75015 Paris
Tél.: 01 55 42 72 00

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Jeanna Bryner
President: Kimberly Lau
2026. Scientific American (Scientific American, Inc.)
Soumis aux lois et traités nationaux et internationaux sur la propriété intellectuelle. Tous droits réservés. Utilisé sous licence. Aucune partie de ce numéro ne peut être reproduite par un procédé mécanique, photographique ou électronique, ou sous la forme d'un enregistrement audio, ni stockée dans un système d'extraction, transmise ou copiée d'une autre manière pour un usage public ou privé sans l'autorisation écrite de l'éditeur. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science SARL».
© Pour la Science SARL – 5 allée de la 2e Division Blindée, 75015 Paris.
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

Imprimé en France
Maury Imprimeur
SA Malesherbes
N° d'imprimeur: 292 681

IMPRIM'VERT®



Vue d'artiste d'un tronçon de l'accélérateur du futur collisionneur de particules au Cern, le FCC. La configuration n'a pas encore été arrêtée, différents scénarios sont à l'étude. Si le projet est financé, la construction pourrait débuter au cours des années 2030 pour un démarrage vers le milieu des années 2040.

Quel avenir pour la physique des particules ?

Jean-Philippe Martinez

Les scientifiques de ce domaine de recherche se trouveraient-ils face au « désert » qu'ils redoutent depuis près d'un demi-siècle ? L'idée fascine autant qu'elle inquiète : après une série de découvertes culminant avec le boson de Higgs en 2012, il se pourrait que, dans la gamme d'énergie accessible expérimentalement, aucune nouvelle particule ne se manifeste. Ce désert, s'il existe, n'est pas forcément muet. Pour le faire parler, il faudra probablement repenser certaines notions, comme celle de « particule ».

L'essentiel

Le modèle standard de la physique des particules décrit les interactions élémentaires jusqu'à une échelle d'énergie de l'ordre de la centaine de gigaélectronvolts.

De nombreuses limites à ce modèle suggèrent qu'il cache une théorie plus fondamentale à plus haute énergie.

Or le collisionneur du Cern, le LHC, n'en a décelé aucun indice sous la forme de nouvelles particules.

Il n'est pas certain que la recherche de nouvelle physique doive se résumer à une logique d'accélérateurs toujours plus puissants. Les scientifiques étudient d'autres approches.

© 2024-2026 Cern/Polar Media

Une vaste étendue stérile entre les énergies du modèle standard de la physique des particules et celles de la grande unification. C'est ainsi que, depuis la fin des années 1970, les physiciens entrevoient le «désert» énergétique susceptible de séparer deux régimes majeurs de la physique des interactions fondamentales. D'un côté, le modèle standard décrit avec une remarquable précision trois des quatre interactions connues – l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte – et rend compte de leur unification partielle au sein de la théorie électrofaible, élaborée dans les années 1960 par Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg, puis confirmée expérimentalement. Cette unification montre que l'électromagnétisme et l'interaction faible, deux forces apparemment distinctes à basse énergie, ne sont en réalité que deux manifestations d'une même interaction fondamentale au-delà d'une énergie caractéristique de l'ordre de 10^2 gigaélectronvolts (GeV).

D'un autre côté, l'ambition d'une unification plus profonde, intégrant également l'interaction forte, conduit à envisager des échelles d'énergie bien plus élevées. Les premières estimations de cette grande unification – de l'ordre de 10^{14} GeV, réévaluées depuis autour de 10^{16} GeV – suggèrent ainsi l'existence d'une vaste plage d'énergies, comprise entre l'échelle électrofaible et celle de la grande unification, où aucune nouvelle physique ne viendrait nécessairement se manifester. Dans le scénario le plus pessimiste, ce désert pourrait même s'étendre jusqu'à l'échelle de Planck, autour de 10^{19} GeV, où sont attendus les effets quantiques de la gravitation et l'intégration de cette dernière interaction fondamentale.

Mais la nature n'a-t-elle pas horreur du vide? Longtemps, l'*horror vacui* aristotélicienne – formulée en opposition à l'atomisme de Démocrite – a dominé la pensée physique, au détriment d'une conception discrète de la matière. Or, alors même que l'atomisme a fini par s'imposer, nombre de physiciens peinent aujourd'hui, par un retournement quelque peu ironique, à accepter l'idée d'un vide énergétique entre l'échelle électrofaible et celle de la grande unification. Dès 1980, Sheldon Glashow appelait ainsi à «faire fleurir le désert» (*«Let the desert bloom!»*), une formule qui ne relève pas d'un simple optimisme poétique. Elle traduit une inquiétude profonde, liée au problème de la hiérarchie: pourquoi, si les échelles de la grande unification ou de Planck sont si éloignées de celles de l'interaction électrofaible, les paramètres fondamentaux restent-ils confinés dans une plage aussi étroite, autour de 10^2 GeV? La théorie quantique des champs suggère en effet que les contributions venant des hautes énergies devraient entraîner ces paramètres vers des valeurs plus élevées (*voir l'encadré page 21*). Le principe de naturalité propose alors une manière d'interpréter ce constat: un tel équilibre, qui suppose une compensation extrêmement fine entre différentes contributions, apparaît difficile à considérer comme «naturel». Il suggère plutôt l'existence de mécanismes encore invisibles, opérant à des énergies intermédiaires, capables de stabiliser l'échelle électrofaible.

La masse du boson de Higgs d'environ 125 GeV laisse peu de marge à l'émergence d'une nouvelle physique dans une gamme d'énergies directement accessible aux expériences

Parmi les pistes explorées, la supersymétrie s'est rapidement imposée comme une solution élégante et prometteuse. Elle postule que chaque particule connue possède un «superpartenaire» d'un type différent (à tout «fermion», de spin demi-entier, comme l'électron, correspond un «boson», de spin entier, et inversement). Ce cadre répond précisément au problème de la naturalité en introduisant de nouvelles structures susceptibles de peupler le désert et

L'AUTEUR



Jean-Philippe Martinez
historien et philosophe de la physique à l'institut Max-Planck de physique gravitationnelle, à Potsdam, en Allemagne

de limiter la sensibilité aux échelles plus élevées. Elle améliore de plus la convergence des constantes de couplage à très haute énergie, renforçant la cohérence des scénarios de grande unification.

Pour autant, la découverte du boson de Higgs au Cern en 2012, avec une masse d'environ 125 GeV, a ébranlé ces espoirs. Si elle a achevé la confirmation expérimentale du modèle standard, elle a aussi concrétisé ce que certains théoriciens redoutaient comme un scénario cauchemar. Une masse du boson de Higgs comprise entre 120 et 140 GeV laisse en effet peu de marge à l'émergence d'une nouvelle physique dans une gamme d'énergies directement accessible aux expériences. Elle impose en particulier des contraintes sévères sur les paramètres de la supersymétrie, rendant ses versions les plus simples de moins en moins plausibles. Plus inquiétant encore, depuis plus d'une décennie, les expériences menées au Cern n'ont livré aucun indice de nouvelle physique, excluant progressivement un éventail toujours plus large de modèles et ravivant le spectre d'un positionnement à l'orée du désert…

Que reste-t-il à cueillir dans le désert?

La mise à l'épreuve de la naturalité et l'affaiblissement des promesses de la supersymétrie ne signifient évidemment pas que le modèle standard offre, à lui seul, une description pleinement satisfaisante de l'Univers. Au-delà de sa limite la plus manifeste, l'absence de la gravité, qui motive depuis des décennies la recherche d'une théorie unifiant relativité générale et mécanique quantique, il subsiste un ensemble plus large de tensions théoriques et empiriques : le modèle standard ne rend compte ni de la matière noire ni de l'énergie noire (qui représentent 95 % du contenu de l'Univers) ; il n'explique qu'imparfaitement la domination de la matière sur l'antimatière, et pas davantage l'origine de la masse des neutrinos pourtant établie expérimentalement ; il n'éclaire pas non plus la valeur du taux d'expansion actuel de l'Univers, dont les mesures divergent selon la méthode employée. Enfin, il repose sur un nombre important de paramètres libres introduits sans justification plus profonde : pourquoi ces masses plutôt que d'autres, pourquoi trois générations de particules, pourquoi

© Pour la Science

Diagrammes de Feynman, une représentation efficace

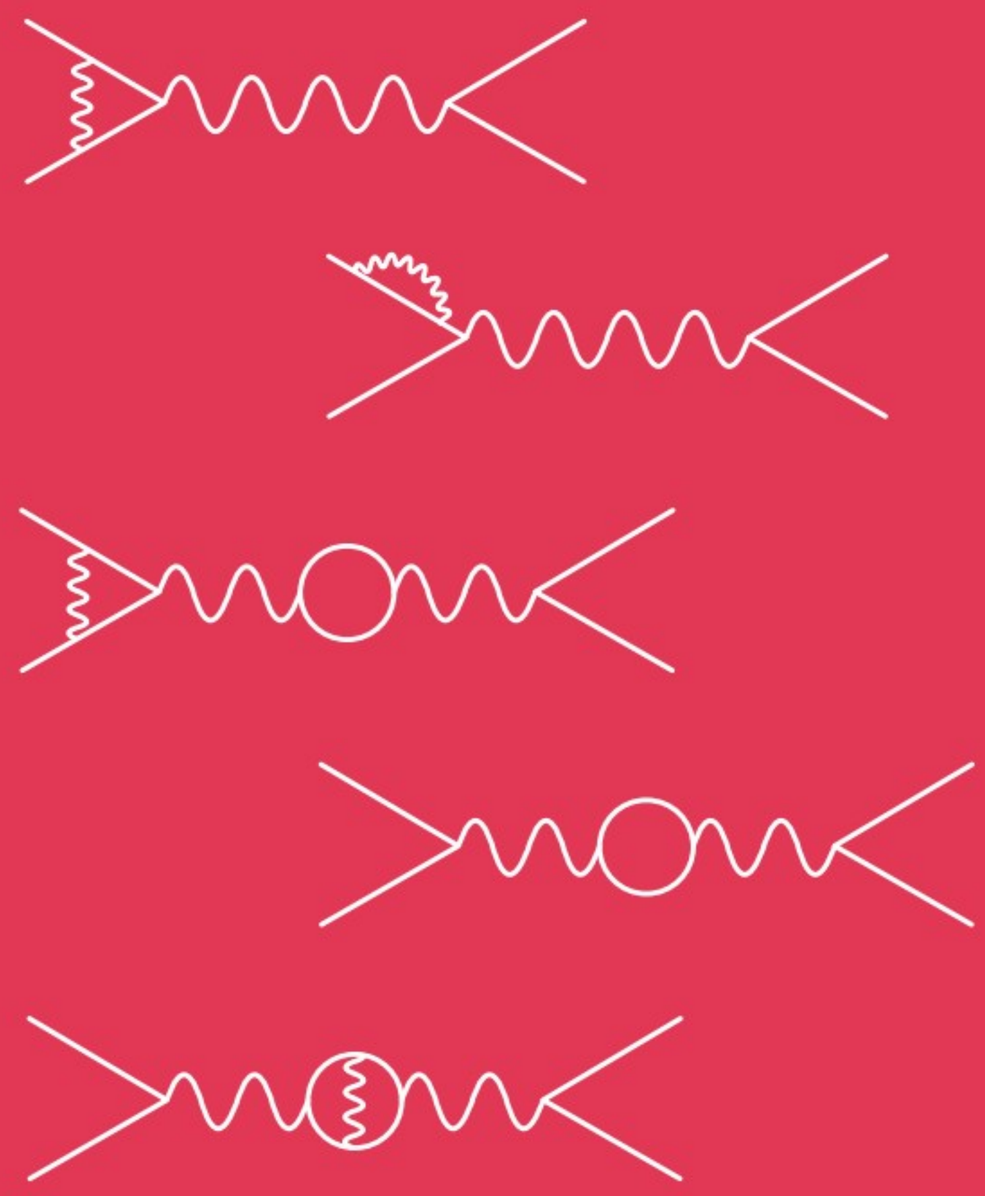
Pour décrire un processus en physique des particules, les scientifiques utilisent notamment des diagrammes de Feynman. Par exemple, l'annihilation d'un électron et d'un positron en un muon et un antimuon via un photon est représentée par le diagramme suivant :



Les lignes externes représentent les états initiaux et finaux du processus, tandis que les lignes internes correspondent à des particules virtuelles, en d'autres termes les processus intermédiaires. Les fermions, de spin 1/2, comme l'électron et le positron, sont représentés par des traits pleins. Le photon, un boson de spin 1, est matérialisé par une vague. Des bosons scalaires, de spin 0, comme le boson de Higgs sont symbolisés par des lignes en pointillé.

Ces diagrammes n'ont pas seulement un rôle représentatif, ils sont avant tout un outil de calcul : chaque ligne et chaque vertex (les points de rencontre entre plusieurs lignes) sont associés à des expressions mathématiques que l'on combine pour obtenir une amplitude, à partir de laquelle on calcule des grandeurs physiques comme la section efficace, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence du processus.

Pour obtenir le résultat complet, cependant, il ne suffit pas de calculer le diagramme le plus simple, comme ci-dessus : il faut additionner les contributions d'un nombre croissant de diagrammes – appelés « corrections radiatives » – de plus en plus complexes, faisant intervenir davantage de particules virtuelles formant des structures en boucles.



Dans les théories où la constante de couplage est petite, comme dans le cas de l'interaction électromagnétique, les contributions des diagrammes comportant plusieurs boucles sont généralement fortement réduites. Il est alors possible d'avoir une bonne estimation du résultat en ne calculant que les diagrammes les plus simples. En revanche dans le cas de l'interaction forte, lorsque le couplage est grand, les contributions des diagrammes à plusieurs boucles ne peuvent plus être négligées, ce qui nécessite le recours à d'autres techniques de calcul.

Ce qui pourrait être perçu comme une impasse de la physique des particules s'inscrit, en réalité, dans une dynamique historique récurrente de réorganisation conceptuelle majeure

cette architecture mathématique, reposant sur certaines symétries spécifiques ?

Ces lacunes sont depuis longtemps perçues comme autant de promesses d'une physique au-delà du modèle standard. Une stratégie s'est alors imposée : traquer les signes d'une nouvelle physique non seulement par la découverte directe de nouvelles particules, mais aussi par des tests de cohérence interne fondés sur des mesures de haute précision. Cette approche a déjà fait ses preuves. Dans les années 1970 et 1980, de subtils écarts dans les paramètres électrofaibles laissaient entrevoir l'existence du quark top et du boson Z avant leur observation directe. Dans les années 1990, le grand collisionneur électron-positron (LEP, pour *Large Electron-Positron collider*) du Cern poussa cette logique à un degré inédit, au point de contraindre indirectement la masse du boson de Higgs. Puis, dans les années 2000, les « usines à B », *Belle* (du KEK, au Japon) et *BaBar* (du Slac, aux États-Unis), explorèrent avec une précision remarquable les désintégrations des mésons B, confirmant le mécanisme de violation de la symétrie charge-parité (CP) au cœur du modèle standard.

Aujourd'hui, le LHC (pour *Large Hadron Collider*) et les expériences du Fermilab prolongent cette dynamique : chaque déviation aux prédictions théoriques du modèle standard est scrutée comme l'indice d'une possible germination sous le sable. Mais la récolte se fait attendre. Les tests de précision confirment, avec une fidélité impressionnante, la cohérence interne du modèle standard. Certaines désintégrations rares de mésons B ont un temps semblé remettre en cause un principe de la théorie, l'universalité leptonique, mais des analyses récentes ont largement atténué cette tension. Même la question de la stabilité du vide, longtemps invoquée comme un signal d'alerte, paraît moins pressante qu'on ne l'imaginait : les calculs indiquent une durée de vie de l'Univers, selon les dernières estimations, largement supérieure à l'âge actuel du cosmos. Quant au moment magnétique anomal du muon, longtemps présenté comme une déviation possible, les calculs les plus récents tendent désormais à une compatibilité bien plus étroite (*voir l'article page 24*) ; la tension pourrait provenir non d'une nouvelle physique, mais d'incertitudes affectant les évaluations antérieures. Au fil du temps, les signaux existants finissent par ne former qu'une suite d'indices faibles et dispersés, sans cohérence théorique solide. En somme, les instruments gagnent en sensibilité, les mesures en précision – mais le paysage, lui, demeure obstinément familier.

C'est peut-être là le véritable retournement. L'espoir initial était que l'espace séparant les échelles connues de celle de la grande unification se révélerait fertile, propice à l'émergence de nouvelles symétries et structures. Aujourd'hui, la perspective s'inverse : le désert pourrait bien être réel. Les fleurs théoriques ne manquent pas, mais elles ressemblent parfois à des fleurs de papier, élégantes et sophistiquées, privées de racines expérimentales. Et si elles sont vivantes, elles pourraient croître au-delà de l'horizon énergétique accessible, hors de portée des instruments actuels et futurs. Le projet de Futur collisionneur circulaire (FCC), au Cern, ambitionne d'atteindre des énergies de l'ordre de 10^5 GeV, ce qui reste très inférieur aux échelles envisagées pour la grande unification.

Le paradigme de la physique des hautes énergies, qui consiste à fournir assez d'énergie dans des collisions pour produire de nouvelles particules, se trouverait alors à l'arrêt : non seulement les signes directs de nouvelle physique se font rares, mais les limites technologiques pourraient restreindre notre capacité à explorer des énergies toujours plus élevées. Nous pourrions ainsi nous trouver au bord du désert, non plus comme à l'aube d'une nouvelle

abondance, mais face à une véritable fin de piste. Devant cette possibilité inédite, un retour réflexif s'impose : sur les stratégies de la physique théorique, sur l'articulation entre théorie et expérience, et sur les critères mêmes qui définissent les idées de découverte et de progrès en physique fondamentale.

Une question, trois regards

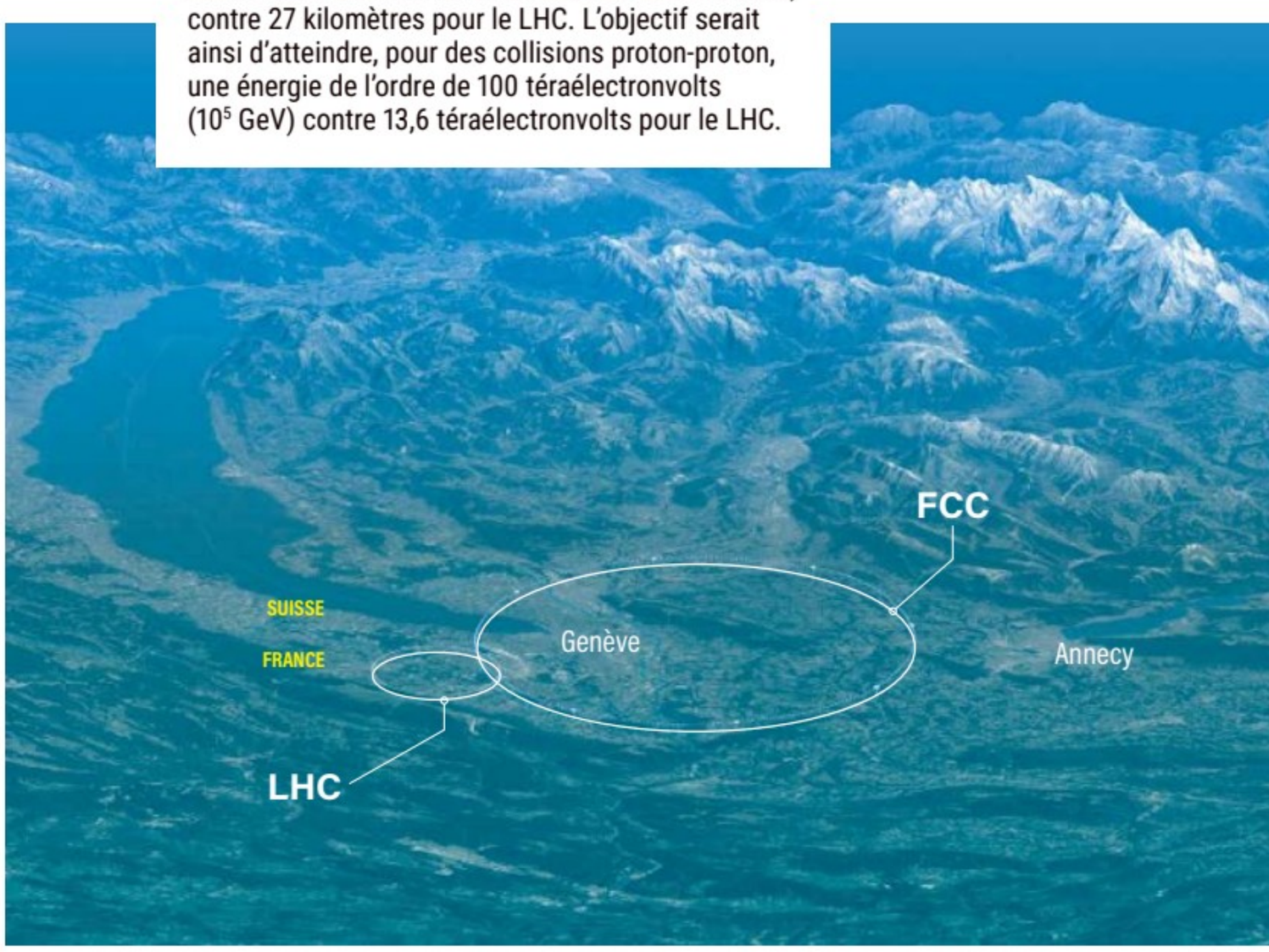
Cette nouvelle démarche s'est cristallisée au sein de l'unité de recherche « L'épistémologie du LHC ». Née d'échanges interdisciplinaires entre physiciens, philosophes et historiens, engagés dès les années 2000, à l'université de Wuppertal, en Allemagne, puis structurée en 2016 grâce à un financement conjoint des agences allemande et autrichienne pour la recherche, cette unité a réuni, jusqu'en 2025, des chercheurs en sciences physiques et en humanités de différents instituts afin d'examiner les implications philosophiques, historiques et sociologiques du LHC.

Lorsque je la rejoins en août 2020 comme postdoctorant, fort d'une formation en histoire et philosophie de la physique moderne, je ne m'attends pas à interroger l'avenir de la physique des particules. Mon travail porte alors, aux côtés d'Adrian Wüthrich et de Friedrich Steinle, de l'université technique de Berlin, sur la genèse dans les années 1920-1930 et le développement dans l'après-guerre du concept de particule virtuelle, qui désigne une entité théorique – dont les propriétés sont proches de celle d'une particule ordinaire – non observable directement, et qui intervient de manière transitoire dans les processus d'interaction entre particules et d'auto-interaction. Conformément à la vocation interdisciplinaire du projet, nous travaillons en étroite interaction avec Robert Harlander, physicien théoricien à l'université RWTH, à Aix-la-Chapelle, en Allemagne, et mon voisin de bureau, dont l'influence oriente progressivement mes recherches vers des questions plus contemporaines.

C'est en réalité à l'occasion d'une présentation de ce dernier, lors d'une rencontre de l'unité, que s'amorce une réflexion plus large sur le statut actuel de la physique des hautes énergies. Il y défend l'idée que la discipline pourrait entrer dans une phase où la production directe de nouvelles particules deviendrait impossible. Intrigué, Gregor Schiemann, philosophe à l'université de Wuppertal, l'encourage à approfondir cette hypothèse dans un cadre interdisciplinaire. Je les rejoins alors pour une réflexion tricéphale, croisant histoire, philosophie et physique.

Mais pourquoi associer un philosophe, et surtout un historien, à une enquête portant sur le futur d'une discipline confrontée à ses limites techniques ? Parce que leur regard aide à réfléchir à une question essentielle : que devient une science lorsque ses objets centraux deviennent inaccessibles ? La philosophie des sciences offre ainsi des outils pour interroger les critères mêmes de validité et de preuve : qu'implique une confirmation fondée sur des effets indirects, des anomalies statistiques ou la cohérence interne des modèles, lorsque l'accès expérimental direct disparaît ? Comment repenser la notion de scientificité et la définition du progrès dans un contexte où les contraintes technologiques croissent ? Plus fondamentalement encore, elle invite à redéfinir certaines des notions les plus centrales d'une science.

Un des scénarios les plus discutés pour le futur collisionneur FCC consiste en un anneau accélérateur d'environ 91 kilomètres de circonférence, contre 27 kilomètres pour le LHC. L'objectif serait ainsi d'atteindre, pour des collisions proton-proton, une énergie de l'ordre de 100 téraélectronvolts (10^5 GeV) contre 13,6 téraélectronvolts pour le LHC.



Par ailleurs, l'histoire des sciences place ces interrogations dans une perspective de longue durée. D'autres disciplines ont déjà connu des transformations profondes, comme l'astronomie, passée de l'observation directe à des formes de détection indirectes et instrumentées. Les travaux d'Alexandre Koyré, de Gaston Bachelard ou de Thomas Kuhn ont montré que ces périodes de transformation s'accompagnent souvent de réorganisations conceptuelles majeures, où les critères de validité et d'observation sont

© 2024-2026 Cern/Polar Media

Particule

Corpuscule, excitation quantique d'un champ, résonance… l'histoire des sciences montre que la définition de cet objet a changé au cours du temps au gré des avancées théoriques et expérimentales

redéfinis. Cette analyse s'enrichit également des approches contextualistes – de Boris Hessen à Peter Galison, Ian Hacking ou encore Lorraine Daston – qui soulignent l'imbrication des transformations théoriques, instrumentales et socioéconomiques.

Ainsi, ce qui pourrait être perçu comme une impasse de la physique des particules s'inscrit, en réalité, dans une dynamique historique récurrente de déplacement et de recomposition des objets scientifiques, révélatrice non pas d'un affaiblissement, mais de la plasticité et de la résilience du savoir scientifique.

Un concept aux multiples visages

Cette dynamique de réinvention et de recomposition se lit clairement dans un concept central de la physique des hautes énergies: celui de «particule». Depuis l'Antiquité, la philosophie naturelle oscille entre une approche discrète, centrée sur les particules, et une approche continue, fondée sur les ondes, et plus spécifiquement sur les champs. Mais à l'aube de l'éclosion de la physique moderne, le concept de particule s'est imposé comme indispensable, structurant notre compréhension de la matière.

Non parce que ces entités ont été directement observées – ni par John Dalton, Joseph J. Thomson, Max Planck ou Albert Einstein – mais parce que certaines propriétés (masse, charge, quantification de l'énergie) se manifestent comme si elles ne pouvaient appartenir qu'à des entités discrètes. Ces signatures ont permis de formuler puis de confirmer de nouvelles hypothèses: l'électron de Thomson (1897), la quantification de l'énergie par Planck (1900) ou l'effet photoélectrique d'Einstein (1905) illustrent ce pouvoir heuristique.

Même avec l'avènement de la dualité onde-corpuscule proposée par Louis de Broglie (1924) et l'interprétation probabiliste de Max Born (1926), le concept de particule reste fondamental. Il permet non seulement de représenter des structures complexes, comme l'atome de Bohr, mais relie surtout théorie et expérience de manière unique: la fonction d'onde décrit la probabilité de détecter des entités discrètes à un endroit donné. Ainsi, bien que la théorie mobilise des champs et des fonctions d'onde continues, ce sont toujours des particules qui se manifestent localement, les dispositifs expérimentaux traduisant les probabilités théoriques en signaux mesurables et consolidant leur rôle central dans la physique moderne naissante.

Solidement ancré dans son rôle opérationnel, le concept de particule n'en demeure pas moins en pleine mutation. À la fin des années 1920, beaucoup de physiciens pensent encore que trois entités seulement – électron, proton et photon – suffisent à décrire le monde, mais la conciliation de la mécanique quantique avec la relativité restreinte et les théories des champs bouleversent cette image. Les travaux de Paul Dirac (1927-1928) introduisent ainsi l'idée d'antimatière, de création et d'annihilation de particules,

et posent les fondations du concept de particule virtuelle. La théorie de la radioactivité β formulée par Enrico Fermi (1933) révèle que des particules tenues pour élémentaires peuvent en réalité se désintégrer et se transformer les unes en les autres.

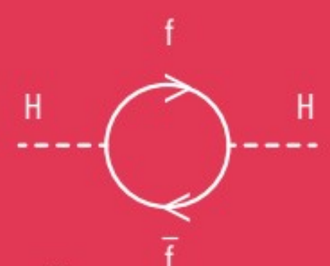
Ainsi, la particule cesse progressivement d'être un simple bloc mécanique; elle devient une entité fondamentale, définie par son rôle dans la structure et les interactions de la matière. La théorie de l'interaction nucléaire forte de Hideki Yukawa (1935) parachève ce tournant: une force peut être médiée par une particule massive, dont la masse fixe la portée, soulignant la nécessité d'atteindre des énergies toujours plus élevées pour explorer des échelles plus petites.

Avant même l'ère des accélérateurs, les expérimentations en physique nucléaire et sur les rayons cosmiques confirment ce rôle élargi: neutron (1932), positron (1932), muon (1936) sont mis en évidence, et l'analyse des traces laissées dans les chambres à brouillard et les plaques d'émulsion transforme les pratiques. Soumises à création, annihilation et désintégration, les particules ne sont plus observées directement, mais souvent inférées: la découverte du pion neutre (1947), identifiée *via* ses produits de désintégration, en est un exemple emblématique.

Après-guerre, l'essor des accélérateurs et le perfectionnement des détecteurs – chambre à bulles de Donald Glaser (1952), chambre proportionnelle multifilaire de Georges Charpak (1968) – inaugurent une nouvelle transformation radicale. Les particules ne sont plus simplement identifiées de manière directe à partir de leurs traces individuelles: on calcule des sections efficaces de diffusion, c'est-à-dire des probabilités d'occurrence de certains processus.

La masse du boson de Higgs et la supersymétrie

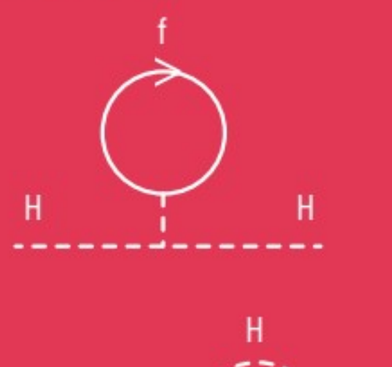
Le boson de Higgs joue un rôle clé dans le mécanisme qui donne leur masse aux particules du modèle standard. Une façon de se représenter ce mécanisme consiste à imaginer que les particules évoluent dans un espace qui est partout baigné dans le champ de Higgs. Plus une particule interagit avec ce dernier – autrement dit, plus elle est fortement couplée avec lui –, plus son mouvement est freiné et plus sa masse est importante.



Le champ de Higgs peut être comparé à un miel plus ou moins visqueux selon le type de particule qui le traverse.

Le calcul de la masse

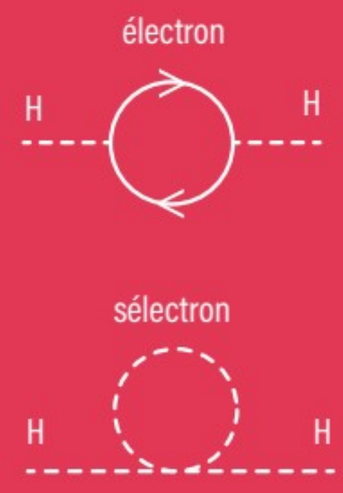
Le boson de Higgs tire également sa masse des propriétés de son propre champ. Celle-ci résulte à la fois d'un terme initial – dit « de masse nue » – et de corrections radiatives que l'on représente à l'aide de diagrammes de Feynman, dont voici quelques exemples, ci-dessous.



Ces corrections sont très sensibles aux échelles d'énergie élevées. Ainsi, si de nouvelles particules existent à l'échelle de grande unification, elles contribuent elles aussi à ces corrections. Comme ces particules seraient très massives, leurs effets devraient tendre à accroître fortement la masse du Higgs. Or, d'après les observations, celle-ci n'est que de 125 gigaélectronvolts, ce qui demeure une énigme pour les physiciens.

La piste supersymétrique

Les théoriciens ont proposé une solution élégante : la supersymétrie. Cette hypothèse introduit une symétrie entre fermions et bosons, dans laquelle chaque particule du modèle standard possède un superpartenaire de spin différent. Par exemple, l'électron, de spin 1/2, est associé au sélectron, un boson scalaire de spin 0 ; le photon, de spin 1, est associé au photino de spin 1/2. Dans ce cadre, les contributions à la masse du Higgs d'une particule et de son superpartenaire peuvent se compenser en grande partie. Les corrections radiatives sont alors fortement réduites, ce qui permet de stabiliser la masse du boson de Higgs à l'échelle électrofaible. Ci-dessous, l'exemple des corrections les plus simples de l'électron et de son superpartenaire, le sélectron.



Problème, à ce jour, aucun superpartenaire n'a été observé, ce qui pose la question de l'existence de la supersymétrie à des énergies accessibles expérimentalement, notamment au LHC, ou même à des échelles plus élevées.

H : boson de Higgs
f, f̄ : fermion, antifermion
W, Z : boson W ou Z

© Pour la Science

Des pics, ou résonances, dans ces sections efficaces sont la signature de la production fugace de particules intermédiaires (*voir l'encadré ci-dessous*). Leur recherche devient la méthode standard pour identifier de nouvelles particules, tandis que les diagrammes de Feynman s'imposent comme le langage calculatoire reliant modèles théoriques et phénomènes observés.

Vers un changement d'ère?

Ainsi, au fil du XXe siècle, la particule a changé de visage à mesure que théorie et expérience se transformaient. La dynamique est simple: les cadres conceptuels suggèrent des signatures – traces, désintégrations, résonances – que les instruments apprennent à capter; en retour, les données expérimentales contraignent et redessinent les théories. La particule apparaît dès lors moins comme un objet donné une fois pour toutes que comme le résultat d'un ajustement continu entre calculs, dispositifs et phénomènes.

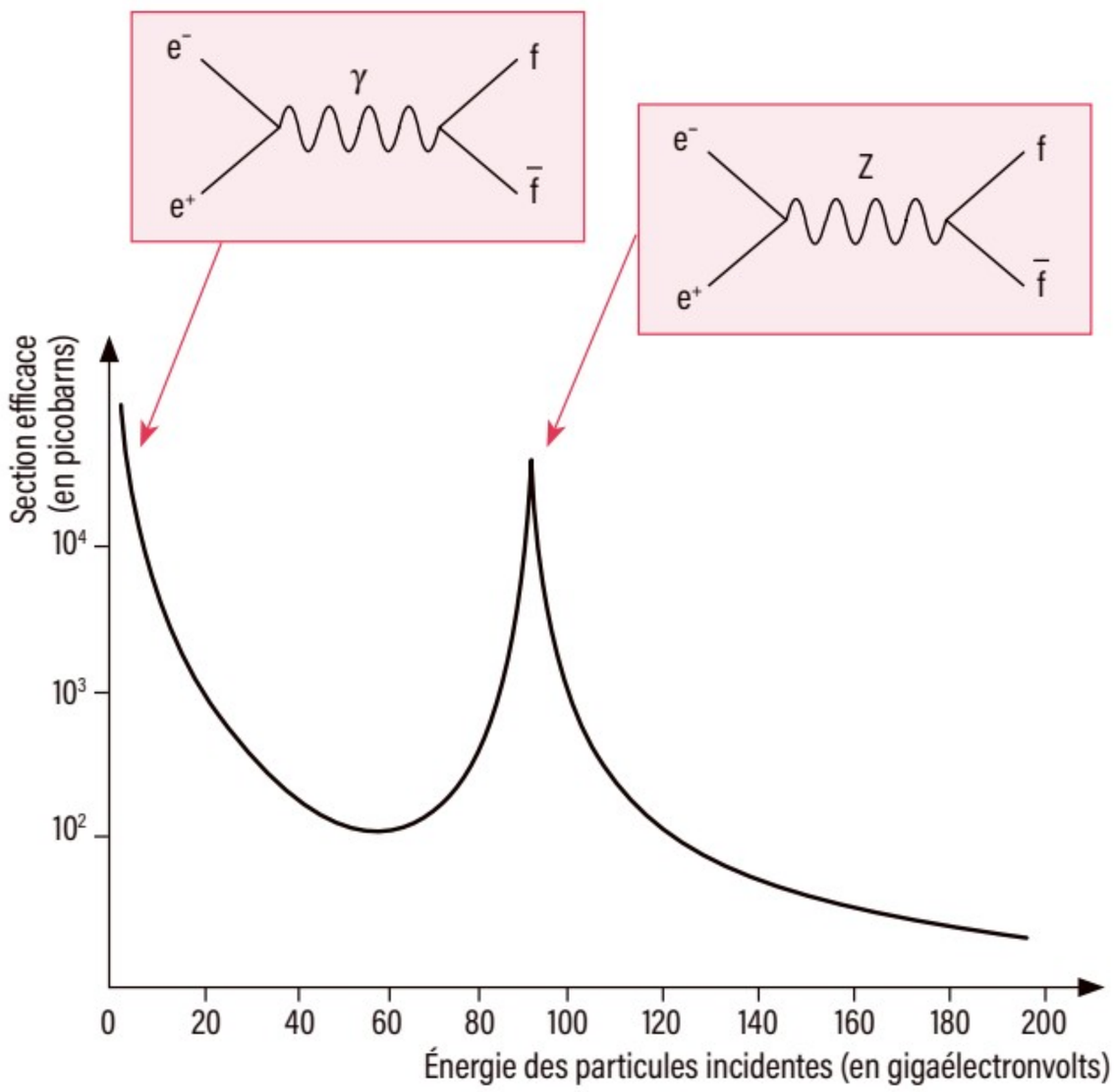
Reste à savoir si cette dynamique est toujours à l'œuvre aujourd'hui. Après les découvertes des bosons W et Z dans les années 1980, du quark top dans les années 1990, puis du boson de Higgs en 2012, aucune trace de nouvelles particules n'a émergé des collisions du LHC. Le lien presque mécanique entre montée en énergie et découverte semble s'être distendu. Faut-il y voir une impasse à l'orée du désert – ou l'aube d'une nouvelle transition, comme l'histoire de la discipline le suggère?

Il semble en réalité que la physique des particules se prépare, implicitement mais méthodiquement, au second scénario. Par exemple, une façon parmi d'autres de repenser la notion de découverte consiste à rechercher des particules lourdes à travers leurs empreintes sur les fluctuations cosmologiques primordiales, une approche qui s'éloigne radicalement des accélérateurs et collisionneurs construits sur Terre. Mais, surtout, alors qu'une large part de la communauté ne vise plus prioritairement la production de nouvelles particules au sens des interprétations mentionnées plus haut, la solution pourrait se trouver dans l'attention portée aux écarts, même infimes, qu'une physique plus profonde pourrait laisser dans les interactions connues.

Si les pics de résonance ont longtemps servi de signatures privilégiées, les champs quantiques laissent d'autres empreintes sur les observables, généralement désignées sous le nom d'« effets virtuels ». Il s'agit des corrections subtiles

La traque des résonances

Une des stratégies mises en œuvre dans les accélérateurs de particules pour détecter des traces de nouvelle physique consiste à étudier un processus de collision donné et à mesurer la section efficace associée, qui varie avec l'énergie des deux particules incidentes.
Le cas de l'annihilation d'un électron et d'un positron a notamment été étudié au LEP, le prédécesseur du LHC, au Cern, qui a opéré de 1989 à 2000. Différents « canaux » contribuent au processus. À basse énergie, c'est essentiellement le canal dominé par l'échange d'un photon virtuel, donnant naissance à une paire de fermions – électron-positron, muon-antimuon ou paire de quarks – qui domine. Lorsque l'énergie augmente, la contribution du boson Z devient de plus en plus importante, jusqu'à dominer lorsque l'énergie approche sa masse. On observe alors un pic de résonance, signature de la production du boson Z. La position de ce pic permet de déterminer la masse de la particule et sa forme fournit des informations supplémentaires sur ses propriétés. Au-delà du pic de résonance, la section efficace diminue et d'autres canaux contribuent, notamment la production de paires de bosons W.
Cette même approche a été utilisée pour découvrir le boson de Higgs, avec un pic aux alentours de 125 GeV. Elle implique ainsi de fournir une énergie de collision au moins comparable à la masse des particules recherchées, ce qui la rend difficile à mettre en œuvre pour des particules hypothétiques situées au-delà des échelles accessibles expérimentalement, notamment de l'ordre de 10^5 GeV, l'objectif du FCC.



© Pour la Science, d'après LEP/CERN

Dans l'approche effective, la découverte pourrait, en principe, s'affranchir de l'apparition spectaculaire d'un nouveau pic de résonance

qu'introduisent des particules trop massives pour être produites directement, mais dont l'existence modifie néanmoins les probabilités de diffusion ou les taux de désintégration. Ces effets ne sont pas nouveaux : la masse du quark top, puis celle du boson de Higgs, avaient été anticipées grâce à de telles corrections avant leur observation directe. Ce qui change aujourd'hui, c'est que ces déviations pourraient constituer la découverte elle-même.

C'est dans cet esprit que s'inscrit, par exemple, le développement du Smeft (pour *Standard Model Effective Field Theory*), qui propose une paramétrisation systématique des déformations possibles du modèle standard. Chaque mesure de précision contraint alors ces coefficients effectifs – dits « coefficients de Wilson » – dont la cohérence globale peut, à terme, orienter vers une théorie sous-jacente. L'image est celle du soulier de Cendrillon revisité : il s'agit de vérifier si l'ensemble des données épouse, sans tension, la forme prédite par une extension donnée. Si plusieurs mesures indépendantes pointent dans la même direction, le « soulier » théorique se précise – et la découverte pourrait, en principe, s'affranchir de l'apparition spectaculaire d'un nouveau pic de résonance.

Traverser le désert

Si une partie de la physique des hautes énergies se pense aujourd'hui au bord du désert, c'est sans doute parce que ses attentes ont longtemps été façonnées par une image particulière du progrès : celle de la découverte de nouvelles particules, surgissant comme des oasis dans le paysage énergétique. Or ce schéma paraît aujourd'hui suspendu. Les grandes fleurs promises tardent à éclore, et l'horizon semble s'éloigner à mesure que les instruments gagnent en précision sans révéler de rupture manifeste.

Mais le désert n'est une impasse qu'au regard de cette représentation. Il pourrait être franchi – à condition de déplacer le regard. La mesure de précision elle-même pourrait devenir ressource : les écarts infimes, les déformations systématiques, les tensions statistiques qui affectent les interactions connues esquissent peut-être – comme l'illustre déjà le Smeft – une nouvelle direction. La recherche ne s'organiserait plus prioritairement autour de la chasse à des entités nouvelles, mais autour de la cohérence globale d'un édifice expérimental et théorique d'une précision sans précédent.

Mais placé dans une perspective historique, ce changement n'est pas seulement méthodologique. Il touche au statut même de la particule. Longtemps guide heuristique central, elle pourrait perdre une part de sa valeur opératoire au cours de cette nouvelle transition : non qu'elle disparaisse, mais parce que la nouveauté se loge désormais dans des structures effectives, des corrélations globales, des déviations cumulatives plutôt que dans l'apparition d'un nouveau pic de résonance. La découverte deviendrait moins un événement entitaire qu'un diagnostic d'ensemble.

Dans cette perspective, les débats contemporains autour de futurs accélérateurs comme le FCC engagent plus que des choix technologiques, environnementaux ou budgétaires. Ils cristallisent une certaine conception du progrès en physique fondamentale : faut-il persévérer dans la montée en énergie, approfondir la voie de la mesure de précision ou articuler autrement ces deux régimes d'exploration ? Le « désert » n'est alors ni un verdict ni une prophétie, mais le nom d'un moment réflexif dans l'histoire de la discipline.

Loin d'annoncer la fin de la physique des particules, cette situation pourrait en marquer une transformation profonde : le passage d'une science largement événementielle à un régime plus structurel et inférentiel, attentif aux détails qui souvent nous échappent. Une autre manière d'avancer – plus patiente, plus diffuse peut-être, mais non moins ambitieuse. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Isidori *et al.*, The standard model effective field theory at work, *Reviews of Modern Physics*, 2024.

R. Harlander *et al.*, The end of the particle era ?, *The European Physical Journal H*, 2023.

S. L. Glashow, The future of elementary particle physics, *in* M. Lévy *et al.* (dir.), *Quarks and Leptons : Cargèse 1979*, Springer Science, 1980.

L'essentiel

- Dans le cadre du moment magnétique du muon, mesures expérimentales et calcul théorique obtenaient des valeurs incompatibles.
- Une nouvelle approche, la QCD sur réseau, a montré un accord parfait avec l'expérience, mettant fin à l'idée de trouver un indice d'une nouvelle physique.
- La simulation, à l'instar de la QCD sur réseau, offre une façon inédite et complémentaire à l'expérience et à la théorie d'explorer les lois de la nature.

La chromodynamique quantique (QCD), qui décrit l'interaction forte, peut être simulée de façon exacte avec la QCD sur réseau, qui discrétise l'espace-temps.

La simulation numérique au secours du muon

Johanna Michaels

Parfois les observations des expérimentateurs et les calculs des théoriciens ne suffisent pas pour élucider les lois de la physique des particules. Une nouvelle approche a récemment démontré toute sa puissance: la simulation numérique.

En 2021, dans le laboratoire Fermilab, près de Chicago, une annonce a surpris toute la communauté des chercheurs: des mesures de précision préliminaires sur le muon (une version plus lourde de l'électron) indiquaient qu'une de ses propriétés, son moment magnétique, était nettement plus grande que ce que les calculs théoriques avaient prédit. Était-ce un indice révélateur d'une physique inconnue se manifestant au-delà des limites du modèle standard, la meilleure théorie à ce jour décrivant les particules et leurs interactions? Il était encore un peu tôt pour le conclure, mais ce genre de résultat est typiquement ce que traquent les physiciens pour mettre à l'épreuve la théorie. En passant au peigne fin les mesures toujours plus précises sur les particules, ils espèrent trouver des anomalies les guidant vers une description plus fondamentale du monde (*voir l'article page 14*).

Quatre ans plus tard, grâce à l'accumulation de données supplémentaires, les membres de l'expérience *Muon g−2* ont publié leurs résultats définitifs. Les titres qui en ont fait l'écho ont cependant été bien plus mesurés qu'en 2021. Finis les espoirs de mettre en défaut le modèle standard. Cette fois-ci, c'est la précision extraordinaire avec laquelle les spécialistes ont mesuré le moment magnétique qui a été mise en avant: le résultat est exact jusqu'à la neuvième décimale, une réussite expérimentale incontestable.

Comment expliquer ce revirement? Les nouvelles mesures ne se sont pourtant pas gentiment alignées avec les prédictions théoriques. Au contraire, elles ont confirmé les conclusions des données préliminaires de 2021! En revanche, pendant ces quatre années, la prédiction théorique de référence a changé. Et ses conclusions ont rejoint celles de l'expérience. Si l'on peut se féliciter de cette convergence, cela n'a pas été une mince affaire.

Afin de comprendre pourquoi, il faut plonger dans les méthodes de calcul du moment magnétique du muon. Pour commencer, il n'existe pas de formule simple permettant un calcul exact de cette grandeur. Pour évaluer ce moment, les physiciens utilisent une approche de la théorie quantique des champs, le calcul perturbatif, qui produit une somme infinie de termes. Plus ils évaluent un grand nombre de ces termes et plus la précision du résultat augmente. Cette technique a fait ses preuves et permet d'obtenir de nombreux résultats

© Ople Witsanu/Shutterstock

en physique des particules. Cependant, certains termes importants dans l'évaluation du moment magnétique du muon sont trop complexes pour être calculés de cette façon. Ils sont alors estimés en utilisant des données expérimentales.

Malgré ces difficultés, les théoriciens espéraient avoir obtenu une prédiction robuste. Et celle-ci différant fortement de la valeur expérimentale provisoire de 2021, de nombreux spécialistes interprétaient cet écart par le fait que le calcul théorique est restreint aux contributions des particules du modèle standard. La différence viendrait-elle de contributions manquantes, de particules inconnues? Les chercheurs y voyaient une possible percée dans la recherche d'une physique au-delà du modèle standard.

Mais, un autre résultat théorique avait été publié durant la même période… et celui-ci concordait avec l'expérience. Les auteurs de cette prédiction concurrente avaient opté pour une méthode de calcul intégralement numérique, et indépendante de données expérimentales. D'autres équipes leur ont alors emboîté le pas. Elles ont amélioré la précision de cette approche et ont confirmé l'accord avec le résultat expérimental définitif obtenu au Fermilab.

Grâce à la puissance croissante des ordinateurs, les simulations offrent une nouvelle voie d'exploration, parallèle aux approches de recherche traditionnelles. Mais que signifie pour la science le fait que les ordinateurs prennent le relais là où les spécialistes eux-mêmes ne peuvent plus avancer? Dans quelle mesure comprend-on encore la physique lorsqu'on ne s'appuie plus que sur des chiffres que nous livrent des machines?

Une anomalie surprenante

L'étude du moment magnétique du muon illustre parfaitement cette nouvelle possibilité pour interroger le monde. Les simulations numériques ont ainsi apporté une réponse convaincante à un sujet pour lequel une seule approche théorique avait été considérée.

Le muon est une particule élémentaire instable qui se désintègre en quelques microsecondes seulement. Il est qualifié de «version lourde» de l'électron, car il possède la même charge négative et le même moment cinétique intrinsèque (spin), mais une masse deux cents fois supérieure. Le spin, notamment, confère à l'électron et au muon une propriété magnétique: le moment magnétique, que l'on peut assimiler à la version quantique de l'aiguille d'une boussole. Aussi bien pour l'électron que pour le muon, l'équation de Dirac, une équation de la mécanique quantique relativiste, donne un moment magnétique égal à 2. Mais la mécanique quantique prévoit aussi que l'espace, et notamment au voisinage de l'électron et du muon, fourmille de nombreuses paires de particule-antiparticule, qui apparaissent et disparaissent de façon fugace. On parle de particules virtuelles. Leur présence influe sur la valeur du moment magnétique, expérimentalement parce qu'on ne peut pas faire de mesure sans cette nuée de particules, et théoriquement car l'électron et le muon conceptuellement n'existent pas sans cet essaim.

Ces paires virtuelles engendrent une «anomalie», un écart par rapport à la valeur 2. Pour l'électron, elle a été mesurée expérimentalement dès la fin des années 1940 et expliquée théoriquement peu après. Pour le muon, les spécialistes se sont longtemps cassé les dents: la mesure comme le calcul sont bien plus complexes. Le problème est devenu en quelques décennies l'un des plus importants de la physique des particules. L'amplitude de l'écart de la valeur réelle par rapport à 2 renseigne en effet sur la nature des particules virtuelles qui s'agitent autour du muon. En comparant la mesure expérimentale avec un calcul théorique incluant toutes les particules connues, les chercheurs seraient alors capables de déterminer s'il y a une contribution de particules inconnues dans le cadre du modèle standard.

«Nous savons que le modèle standard est incomplet», commente la physicienne théoricienne Aida El-Khadra, de l'université de l'Illinois, à Urbana-Champaign, aux États-Unis. «Il n'explique ni la matière noire, ni l'énergie noire, et de façon insatisfaisante la masse des neutrinos ou l'asymétrie observée entre matière et antimatière. L'anomalie du moment magnétique a le potentiel de mettre au jour des preuves indirectes d'une nouvelle physique.»

Dès le départ, les physiciens ont eu du mal à s'accorder sur une valeur théorique. «Lorsque l'expérience *Muon g−2* au Fermilab a démarré en 2017, chaque équipe peaufinait encore sa propre prédiction», rappelle Aida El-Khadra. Avec des collègues, elle a donc fondé l'«Initiative théorique pour *Muon g −2*», dont l'objectif était de rassembler les efforts théoriques sous un dénominateur commun pour calculer la contribution de chaque particule virtuelle.

L'AUTRICE



Johanna Michaels
journaliste scientifique basée à Berlin, a fait des études de physique et de philosophie

Les simulations ne remplacent pas la théorie, elles élargissent les méthodes par lesquelles nous pouvons étudier la théorie

–Aida El-Khadra, physicienne à l'université de l'Illinois–

La contribution la plus délicate à évaluer est celle qui correspond aux particules virtuelles sensibles à l'interaction forte, en l'occurrence les quarks et les gluons. Les premiers n'apparaissent jamais isolément et se regroupent par trois pour former les protons et les neutrons des noyaux atomiques. Les gluons sont les particules véhiculant l'interaction forte, qui est très différente de l'interaction électromagnétique. «Et c'est là que réside toute la difficulté», souligne Aida El-Khadra.

D'une part, la force nucléaire forte comporte, à la différence de la force électromagnétique, non pas une, mais trois charges: les «charges de couleur», que l'on note par habitude «rouge», «vert» et «bleu» (mais qui n'ont rien à voir avec les couleurs optiques). D'autre part, non seulement les quarks sont chargés, mais c'est aussi le cas des gluons, qui transmettent l'interaction forte. C'est une différence fondamentale avec l'électromagnétisme où le photon ne porte pas lui-même de charge électrique. Et pour couronner le tout, l'interaction forte est, comme son nom l'indique, très intense. Nombre de méthodes de calcul développées pour les autres interactions, dont l'approche perturbative, se révèlent, dans ce cas, inopérantes.

Concrètement, les équations de l'interaction forte se traduisent en un enchevêtrement insoluble de particules virtuelles autour du muon. Plutôt que de s'acharner en vain sur ce nœud gordien, les physiciens ont développé la méthode qui consiste à combiner les calculs de la théorie quantique des champs avec des données expérimentales. Elle remplace certaines des parties théoriquement insolubles du problème par des données collectées lors d'autres expériences. Au début, selon le jeu de données choisi, les chercheurs parvenaient à des résultats différents. L'Initiative théorique a contribué à homogénéiser les approches, en introduisant des normes communes pour les méthodes de calcul et les valeurs de référence; et la communauté a finalement réussi à s'accorder en 2020 sur une valeur théorique.

Cet article est une traduction de « Sind Computer bald die besseren Physiker ? », publié le 6 novembre 2025 sur Spektrum.de

Le succès de la simulation informatique

Un an plus tard, le Fermilab a annoncé ses premiers résultats, qui différaient d'environ deux millionièmes de la prédiction théorique. Cette différence paraît dérisoire, pourtant, elle a été comme un coup de tonnerre pour les spécialistes. Même si l'on prend en compte les incertitudes expérimentales et théoriques, on ne peut combler, et donc expliquer, cet écart. À ce stade, quelque chose semblait échapper soit aux expérimentateurs dans l'analyse de leurs données soit aux théoriciens dans leur calcul, comme la non prise en compte de particules inconnues. Tandis que tous les regards de la physique des particules se tournaient vers cet écart prometteur, le groupe de chercheurs originellement de Budapest (en Hongrie), de Marseille (en France) et de Wuppertal (en Allemagne), surnommé «BMW» a proposé une autre analyse de la situation.

Le groupe BMW avait calculé la contribution de l'interaction forte au moyen d'une simulation exécutée, sans données expérimentales supplémentaires, sur les supercalculateurs de plusieurs

centres de calcul à haute performance européens. L'ordinateur avait résolu pas à pas des équations mathématiques décrivant la contribution de cette interaction au moment magnétique du muon. Ce n'était pas le premier calcul de ce type, mais le premier capable de rivaliser, en termes de précision, avec la méthode utilisée par l'Initiative théorique. Or, contrairement au résultat de cette dernière, la valeur obtenue par simulation informatique concordait avec les mesures expérimentales.

« Les gens n'y croyaient pas au début. Notre méthode a, de manière inattendue, confirmé l'expérience *Muong−2* », raconte le physicien Zoltán Fodor, de l'université d'État de Pennsylvanie et de l'université de Wuppertal, porte-parole du groupe BMW. Leur résultat était ainsi le seul à contredire le consensus qui prévalait alors parmi les théoriciens.

Au cours des années suivantes, d'autres équipes ont développé leurs propres simulations informatiques. Non seulement elles ont permis de conforter le premier résultat du groupe BMW, mais elles en ont aussi réduit les incertitudes au point que le scepticisme envers la nouvelle méthode s'est dissipé. « Ces calculs devaient désormais être pris au sérieux », affirme Hartmut Wittig, de l'université Johannes-Gutenberg, à Mayence, en Allemagne. « Et s'ils donnent une valeur différente de la méthode traditionnelle, on peut raisonnablement se demander maintenant : qu'est-ce qui ne va peut-être pas dans la méthode traditionnelle ? »

La collaboration « Muon g−2 » a présenté son résultat expérimental définitif avec une incertitude plus petite qu'escompté : elle n'est que de 1 sur 127 milliards

Par ailleurs, la méthode traditionnelle, s'appuyant sur des mesures expérimentales, se trouvait aussi soumise à une pression croissante venant de l'intérieur. Un nouveau jeu de données obtenu par un laboratoire de Novossibirsk, en Russie, a conduit en 2023, avec la stratégie conventionnelle, à une valeur théorique qui, après vérification approfondie, contredisait tous les autres résultats. L'Initiative théorique se retrouvait soudain dans l'impossibilité de parvenir à un résultat cohérent. « Il est clair que cette approche ne peut pas nous fournir de prédiction quantitative pour l'instant », résume Aida El-Khadra. « Pour quelle raison les résultats se contredisent, je l'ignore. Aucun d'entre nous ne le sait. »

La collaboration *Muong−2*, quant à elle, a finalement présenté son résultat expérimental définitif avec une incertitude encore plus petite qu'escompté : elle n'est que de 1 sur 127 milliards. Les théoriciens n'ont pas encore atteint une telle précision. Si l'Initiative théorique s'appuie désormais, elle aussi, sur les résultats des simulations numériques pour sa dernière prédiction théorique, on ne peut pas exclure qu'une discordance émergera entre la théorie et l'expérience. Les résultats préliminaires semblent toutefois indiquer que la théorie ne contredit pas la valeur mesurée. Le modèle standard est toujours bien vivant.

Au cours des quatre années écoulées entre la première et la dernière mesure au Fermilab, les simulations numériques ont accompli des progrès sans précédents. Cela a donné aux chercheurs une certaine assurance. « Tout le monde savait que c'était en réalité la meilleure méthode », déclare Zoltán Fodor avec le recul. Car, contrairement à la méthode traditionnelle, elle se passe de données expérimentales. « Lorsqu'on souhaite effectuer un calcul théorique, c'est un peu sous-optimal d'être simultanément dépendant de milliers de mesures expérimentales », souligne le physicien. Pour pouvoir véritablement vérifier une théorie, on a besoin d'une prédiction indépendante de toute mesure. « Sinon, on brouille le concept de théorie et d'expérience », abonde Hartmut Wittig.

Mais comment les supercalculateurs résolvent-ils exactement les équations en principe insolubles de l'interaction forte ? Et comment les physiciens peuvent-ils faire confiance au résultat ?

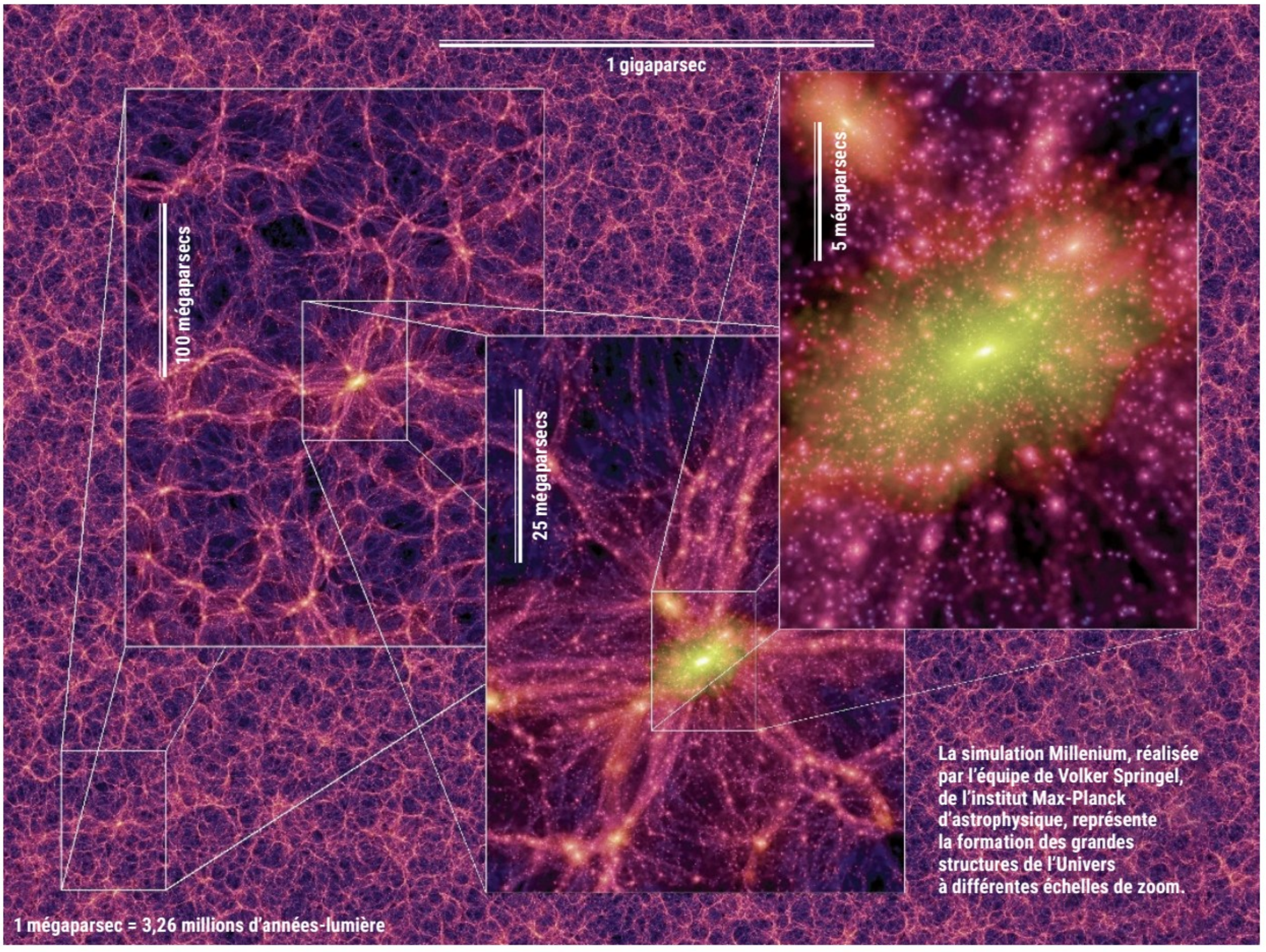
Pour son calcul, le groupe BMW a utilisé des modèles fondés sur la chromodynamique quantique (QCD) sur réseau : une version simplifiée de la théorie quantique des champs de l'interaction forte. Le physicien Kenneth Wilson a posé les bases de cette approche dans les années 1970. L'idée consiste à remplacer l'espace-temps continu par un espace-temps discret, une sorte de grille de points régulièrement disposés, ou réseau, ce qui simplifie les équations. Un avantage de cette démarche est qu'elle élimine bon nombre de divergences qui infestent autrement les calculs quantiques et donnent des valeurs infinies, qu'il faut supprimer dans l'approche traditionnelle au terme d'un grand labeur.

Malgré cette simplification, il est pratiquement impossible d'obtenir des solutions en utilisant seulement un crayon et du papier. Les ordinateurs ont représenté dès le départ un outil indispensable pour la QCD sur réseau. Pendant longtemps cependant,

Simulation : un mot, plusieurs réalités

En physique, le mot « simulation » recouvre des pratiques très différentes, qu'il est utile de distinguer. Dans le cas du calcul BMW pour le moment magnétique du muon, la « simulation » désigne la résolution numérique, sur un réseau discret d'espace-temps, des équations exactes de la chromodynamique quantique (QCD). Aucune approximation n'est introduite dans la théorie elle-même : c'est la puissance de calcul qui permet de discrétiser un problème autrement insoluble analytiquement. La QCD sur réseau est ainsi une méthode de résolution rigoureuse d'une théorie fondamentale, au même titre qu'une démonstration mathématique ou une mesure expérimentale.
Le terme de simulation s'applique aussi à des modèles qui, eux, simplifient délibérément la réalité pour la rendre calculable. C'est le cas de nombreuses simulations en astrophysique (par exemple sur la formation des galaxies), en climatologie ou en biologie : on choisit des équations approchées, des lois empiriques ou des règles simplifiées, en acceptant de perdre en exactitude ce qu'on gagne en faisabilité.
Le LHC, le grand collisionneur de particules, au Cern, illustre une troisième famille de simulations. Cette machine coûte extrêmement cher et est d'une complexité élevée. Pour s'assurer du succès des expériences, les physiciens simulent chaque étape d'une collision, de la production des particules au comportement des détecteurs en passant par l'analyse des données. Le logiciel Geant4 simule le passage des particules dans la matière des détecteurs (interactions, pertes d'énergie, gerbes secondaires) afin de comprendre comment un événement physique se traduit en signal électronique. Cette simulation-là ne cherche pas à résoudre une théorie, mais à modéliser un appareil de mesure pour interpréter correctement les données qu'il produit.
En invitant l'ordinateur à devenir un nouveau collègue, les scientifiques lui cèdent dans une certaine mesure le contrôle. « Les théories peuvent être fausses, les expériences peuvent être mal interprétées, et les simulations peuvent tout autant comporter des sources d'erreur », explique Florian Boge, philosophe des sciences à l'université technique de Dortmund. « Mais les chercheurs en sont conscients. » Il existe donc des mécanismes permettant de vérifier la robustesse des résultats des simulations.

Sean Bailly
journaliste à Pour la Science



La simulation Millenium, réalisée par l'équipe de Volker Springel, de l'institut Max-Planck d'astrophysique, représente la formation des grandes structures de l'Univers à différentes échelles de zoom.

© Millenium Run, V. Springel et al., 2005

les capacités matérielles limitaient ce qui était réalisable. Puis, les ordinateurs sont devenus assez puissants pour effectuer les premières simulations pertinentes, par exemple pour calculer les masses de toutes les particules composées de quarks et de gluons, jusqu'alors uniquement connues par des mesures expérimentales.

Cette approche pose cependant une question fondamentale. Dans le calcul traditionnel, qui est réalisé un terme après l'autre, on a l'impression de pouvoir isoler et analyser la contribution de chaque élément dans le résultat final. Dans la QCD sur réseau, on connaît la théorie sous-jacente mais les étapes de la simulation numérique échappent en grande partie aux physiciens. « La simulation acquiert ainsi un certain statut expérimental, parce qu'on a une valeur finale. Pourquoi cette valeur? Je ne le sais pas », relève le philosophe des sciences Florian Boge, de l'université technique de Dortmund, en Allemagne. Mais tandis que les observations fournissent des connaissances généralisables en une théorie, le processus fonctionne à rebours dans les simulations informatiques: les programmes informatiques explorent la théorie à un niveau abstrait et parviennent ainsi à des résultats que l'on peut ensuite comparer à des mesures expérimentales.

Pour le moment magnétique du muon, les spécialistes peuvent néanmoins suivre en partie ce que

La QCD sur réseau: quand les simulations éclairent la théorie

La frontière que l'on trace entre le « lisible » de l'approche sur papier et l'« opacité » de la simulation n'existe pas vraiment. Au contraire, ces deux approches travaillent main dans la main et la QCD sur réseau éclaire en détail la physique en jeu.

Imaginez que vous souhaitez calculer l'effet d'une nuée invisible de quarks et de gluons sur le moment magnétique d'un muon. Les équations existent : ce sont celles de la chromodynamique quantique (QCD), assorties de corrections de l'électrodynamique quantique (QED). Mais ces équations sont tellement complexes que les méthodes usuelles de la théorie quantique des champs, si efficaces pour la QED ou l'interaction faible, échouent à les résoudre.

C'est ici qu'intervient l'approche due au physicien Kenneth Wilson. Calculer, dans le cadre de la QCD, revient à effectuer une somme, selon le formalisme de l'intégrale de chemins de Feynman, pondérée sur toutes les configurations possibles des champs de quarks et de gluons. Cette somme est mal définie mathématiquement : pour lui donner un sens, il faut éliminer les excitations d'énergie ou d'impulsion infinies, une opération appelée « régularisation ».

Une approche adaptée pour le calcul numérique

La théorie de jauge sur réseau offre une telle régularisation, taillée pour le calcul numérique. On remplace alors notre espace-temps continu par un réseau régulier de points, sur lequel on discrétise les équations de la QCD. La maille finie écarte les excitations trop énergétiques. En bornant les dimensions du réseau, on ramène le problème à une intégrale de dimension finie, quoique colossale : une centaine de milliards de variables, d'où le recours à certains des supercalculateurs les plus puissants au monde. Le calcul devient alors formellement celui d'un système de physique statistique, que l'on traite à l'aide de méthodes stochastiques.

« LA QCD SUR RÉSEAU N'EST NI UNE APPROXIMATION NI UNE MODIFICATION DE LA QCD »

Pour revenir à notre espace-temps continu, on répète le calcul sur des mailles de plus en plus fines et on extrapole vers une maille nulle. À chaque étape, on ajuste (« renormalise ») les paramètres de la QCD discrétisée pour que certaines quantités retrouvent leurs valeurs mesurées. Cette « limite du continu » n'est pas garantie ; la QCD la possède parce qu'elle est « asymptotiquement libre » : à très courte distance, quarks et gluons interagissent de plus en plus faiblement, ce qui permet de maîtriser la convergence.

La QCD sur réseau n'est ni une approximation ni une modification de la QCD : c'est simplement une manière de calculer là où les méthodes usuelles, comme la théorie des perturbations, échouent. Ses prédictions sont celles de la théorie fondamentale de l'interaction forte, qui fait partie du modèle standard que l'on souhaite justement mettre à l'épreuve.

Surtout, ce genre de calcul n'est pas une boîte noire qui renvoie un simple nombre à confronter à la mesure. La simulation offre de nombreux leviers pour sonder la physique sous-jacente, avec les mêmes instruments que ceux des approches traditionnelles : des fonctions de corrélation qui, bien choisies, isolent la contribution de telle ou telle physique. C'est ainsi que le réseau a contribué à identifier la région d'énergie où l'approche fondée sur les données expérimentales était en défaut. Il autorise même ce qu'aucune expérience ne permet : faire varier la masse des quarks, prendre en compte ou non les corrections électromagnétiques, isoler la contribution d'une saveur de quark. Autant de moyens pour comprendre en détail les mécanismes physiques en jeu.

Beaucoup espéraient que la mesure du g-2 du muon de Fermilab révélerait une faille dans le modèle standard, signe d'une physique encore inconnue. Les simulations de QCD sur réseau prédisent au contraire un accord entre théorie et mesure : l'ampleur du désaccord initialement observé peut s'expliquer par une sous-estimation des incertitudes de la prédiction fondée sur les données, elle-même encore en évolution. Selon le réseau, la nuée de quarks et de gluons aimante le muon un peu plus qu'on ne le pensait, juste assez pour combler l'écart. Loin d'obscurcir la physique, la simulation l'a éclairée.

Laurent Lellouch
directeur de recherche CNRS au Centre de physique théorique du CNRS et d'Aix-Marseille Université, et spécialiste de la QCD sur réseau

fait leur algorithme et indiquer de manière transparente les incertitudes correspondantes (*voir l'encadré page ci-contre*). L'Initiative théorique n'a d'ailleurs adopté les résultats de cette approche qu'une fois qu'un nombre suffisant de groupes étaient capables de fournir des calculs assez fiables, compatibles et indépendants les uns des autres. «Nous voulons être paranoïaques pour nous assurer que nous comprenons vraiment les erreurs dans l'estimation théorique», explique Aida El-Khadra.

Quel est le gain de connaissance?

Cela ne suffit pas à produire des connaissances scientifiques, estime Florian Boge. «À la fin, la question demeure toujours: dans quelle mesure est-ce que je génère une compréhension du monde en ayant compris le code?» Si l'approche est généralisée, ce n'est pas seulement le contrôle des étapes de calcul qui peut être perdu. Lorsque l'ordinateur prend le relais là où les humains ne savent plus avancer, c'est aussi la compréhension profonde qui risque de s'évaporer. Les philosophes parlent d'«opacité épistémique» dans les cas où l'on n'est plus capable de retracer entièrement toutes les étapes du raisonnement qui conduisent au résultat. Et les simulations informatiques sont vulnérables à cette obscurité. Elles ne peuvent pas, par leurs calculs, se substituer à la compréhension scientifique que les chercheurs tentent d'atteindre dans leur travail théorique.

Cette difficulté, Zoltán Fodor s'y est déjà confronté. En 2008, il avait confirmé avec son équipe une conjecture d'une importance capitale par une simulation: le problème du «gap de masse» dans la théorie de Yang-Mills, qui décrit l'interaction forte et implique, sans que cela ait été prouvé formellement, qu'il y a un écart d'énergie non nul entre l'état fondamental et le premier état excité de la théorie (afin de rendre compte des propriétés de la QCD). Ce problème de physique mathématique fait partie des sept «problèmes du millénaire» pour lesquels l'institut Clay a proposé, en 2000, une récompense de 1 million de dollars pour la preuve de l'un d'eux. Le physicien et ses collègues ont certes confirmé la conjecture par leur calcul numérique: «Mais nous n'avons pas eu la récompense, parce que d'un point de vue mathématique, ce n'est pas une démonstration.»

Faire un calcul numériquement ne signifie pas qu'on l'a aussi appréhendé analytiquement et donc démontré mathématiquement. Et c'est uniquement pour une telle démonstration rigoureuse que le million de dollars est promis. «Pour le moment magnétique du muon, c'est pareil: d'un point de vue mathématique, ce n'est pas une preuve rigoureuse, mais c'est un calcul juste, avec une probabilité frôlant la certitude», souligne le physicien. Et le monde n'attendait pas une démonstration mathématique, mais une prédiction pour la comparer à la valeur expérimentale.

«Il y a des gens en physique des particules qui disent: ce qui m'importe, ce n'est pas tant d'obtenir un nombre, mais de comprendre pourquoi les choses sont ce qu'elles sont», explique Hartmut Wittig. Pour le muon, ce nombre représente néanmoins une avancée considérable, puisqu'on peut désormais largement exclure que des particules inconnues s'y dissimulent. Les simulations informatiques constituent donc un outil nouveau et important, juge Aida El-Khadra. Mais elles ne changent pas fondamentalement la façon dont se fait la physique théorique. «Les simulations ne remplacent pas la théorie, elles élargissent les méthodes par lesquelles nous pouvons étudier la théorie.»

C'est précisément là que Florian Boge voit la force des simulations numériques. Elles permettent de combler des zones d'ombre dans une théorie et de créer des connexions propices à une nouvelle compréhension. «Il existe une méthode fiable pour parvenir à un résultat, et même si je ne comprends peut-être pas dans le détail ce qui se passe, je comprends que cette connexion existe, développe le philosophe des sciences, et cela m'aide aussi à comprendre quelque chose de nouveau.» Les simulations numériques constituent dès lors un troisième pilier important aux côtés de la théorie et de l'expérience, à condition qu'elles ne remplacent pas cette curiosité qui est au commencement de toute idée scientifique. «Il y a maintenant la possibilité de dire: peu m'importe comment fonctionne le monde, l'essentiel est que je puisse le calculer. On pourrait alors laisser faire l'ordinateur, il me donne un résultat et je suis satisfait. Mais la plupart des chercheurs se sont lancés dans ce domaine parce qu'ils voulaient comprendre comment le monde fonctionne.» ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Boccaletti *et al.*, Hybrid calculation of hadronic vacuum polarization in muon g − 2 to 0.48 %, *Nature*, 2026.

Collaboration Muon g − 2, Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 127 ppb, *Physical Review Letters*, 2025.

R. Aliberti *et al.*, The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model: an update, *Physics Reports*, 2025.

Sz. Borsanyi *et al.*, Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD, *Nature*, 2021.



Les tétras à nez rouge *(ci-dessous, montage photographique d'un banc et de l'avatar numérique – en gris, en bas – utilisé en laboratoire)* font preuve de remarquables capacités de coordination collective. Ils forment spontanément des bancs très cohésifs.

L'essentiel

La coordination d'un banc de poissons émerge de règles locales d'attraction, d'alignement et de répulsion, qui varient selon la distance, l'orientation et la position des voisins.

Un dispositif de réalité virtuelle fait interagir poissons vivants et avatars numériques réalistes.

Il montre qu'un poisson ajuste surtout sa nage à celle d'un seul voisin, dont la vitesse a une influence particulièrement importante.

Ces résultats ouvrent des perspectives nouvelles pour l'étude du comportement animal et la conception d'essaims de drones autonomes.



© Mircea Costina/Shutterstock ; avatar : © CRCA, CBI, CNRS, Toulouse

Des avatars virtuels pour percer le secret des bancs de poissons

Guy Theraulaz, Stéphane Sanchez, Clément Sire et Ramón Escobedo

La dynamique collective et les mécanismes de synchronisation des bancs de poissons s'éclairent grâce à un dispositif de réalité virtuelle où poissons réels et avatars numériques interagissent dans un aquarium.

Observer un banc de poissons provoque souvent l'impression d'une intelligence collective presque mystérieuse. Les individus tournent simultanément, accélèrent ou se dispersent avec une précision remarquable, comme s'ils partageaient une intention commune. Pourtant, aucun poisson ne dirige les autres et aucune communication explicite ne coordonne leurs décisions. La cohérence du groupe émerge uniquement d'interactions locales d'individus.

Depuis plusieurs décennies, les scientifiques cherchent à comprendre les règles comportementales capables de produire cette complexité. Les principaux modèles théoriques de déplacements collectifs reposent sur quelques principes fondamentaux. Les individus s'attirent pour se rassembler et maintenir la cohésion du groupe, se repoussent à très courte distance pour éviter les collisions, et tendent à s'aligner afin de synchroniser leurs déplacements. Dans les simulations, ces règles simples suffisent à reproduire une grande variété de comportements collectifs effectivement observés dans les bancs de poissons.

Une difficulté majeure demeure toutefois. Le fait de reproduire les statistiques caractérisant un mouvement collectif ou de restituer son apparence ne signifie pas nécessairement que les règles utilisées dans un modèle correspondent aux mécanismes réellement employés par les animaux pour coordonner leurs déplacements. En effet, plusieurs mécanismes différents peuvent produire des dynamiques et des formes de déplacement similaires. Pour lever cette ambiguïté, nous avons cherché un moyen de manipuler directement les interactions sociales tout en conservant le réalisme des comportements naturels.

Grâce à un système combinant un suivi tridimensionnel en temps réel du déplacement d'un poisson et la projection anamorphique sur les parois d'un aquarium hémisphérique de poissons virtuels commandés par un modèle comportemental, nous pouvons créer des poissons virtuels réalistes capables d'interagir en temps réel avec un individu vivant. La projection anamorphique consiste à déformer les images des poissons virtuels afin qu'elles soient

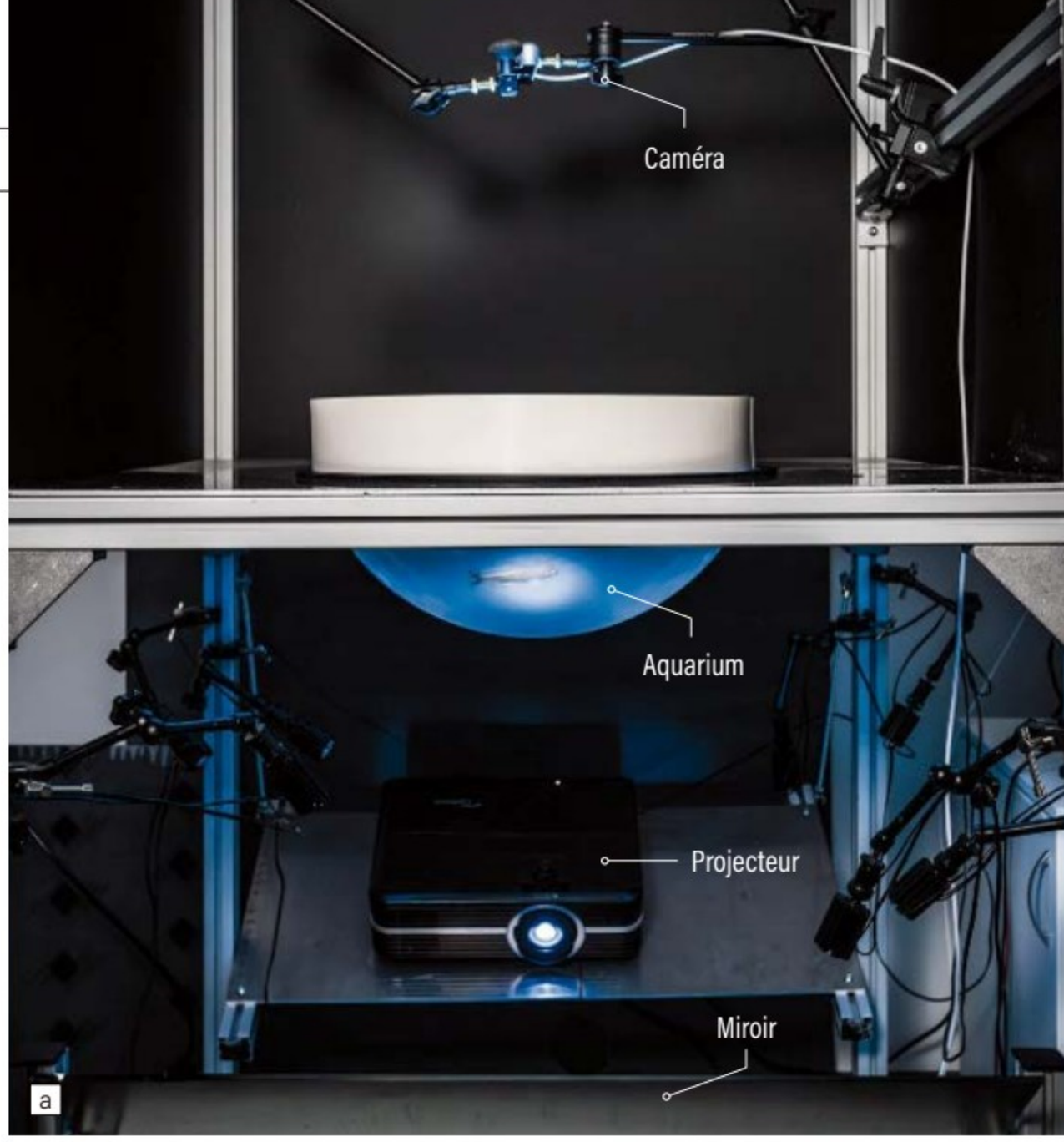
perçues correctement depuis le point de vue du poisson. Nous avons notamment vérifié que l'illusion est suffisamment crédible pour que le poisson réel ajuste sa nage comme s'il se trouvait en présence de véritables congénères.

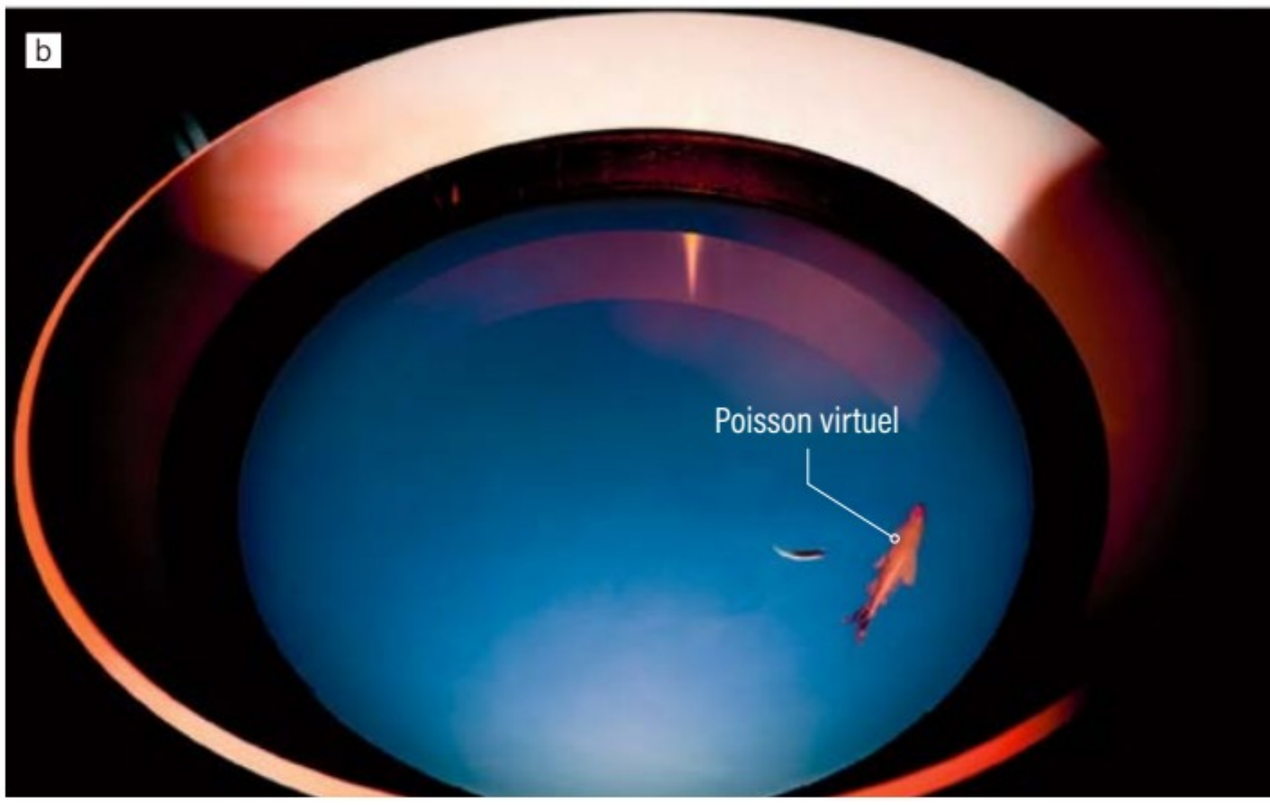
Manipuler la réalité sociale

Ces nouveaux outils transforment l'étude des comportements collectifs. Ils nous permettent de modifier expérimentalement la structure sociale d'un groupe – sa taille, le nombre de voisins avec lesquels les poissons virtuels interagissent, leur vitesse de nage ou la nature de leur réaction aux mouvements du poisson réel – puis d'observer le comportement qui en résulte chez ce dernier. Autrement dit, la réalité virtuelle ne sert plus seulement à observer ou simuler, mais à manipuler la réalité sociale elle-même et à tester la validité des règles implémentées dans un modèle.

Au cœur de nos expériences, on trouve un petit poisson d'eau douce dont les capacités de coordination collective sont remarquables. Il s'agit du tétra à nez rouge (*Hemigrammus rhodostomus*), originaire du bassin amazonien et largement connu des aquariophiles. Cette espèce présente des propriétés particulièrement adaptées à l'étude des mouvements collectifs, car elle forme spontanément des bancs très cohésifs. Les poissons nagent selon un mode intermittent alternant de brèves accélérations et des phases de glisse et manifestent une forte sensibilité visuelle aux comportements de leurs congénères. La coloration rouge caractéristique de leur tête et les motifs contrastés de la nageoire caudale facilitent également le suivi précis de leur orientation et des interactions sociales.

Quand on observe les tétras à nez rouge, il apparaît que les mouvements collectifs résultent d'un jeu subtil d'interactions sociales dont l'intensité dépend à la fois de la distance, de la position relative et de l'orientation des individus. Deux composantes dominent : l'attraction, qui tend à rapprocher





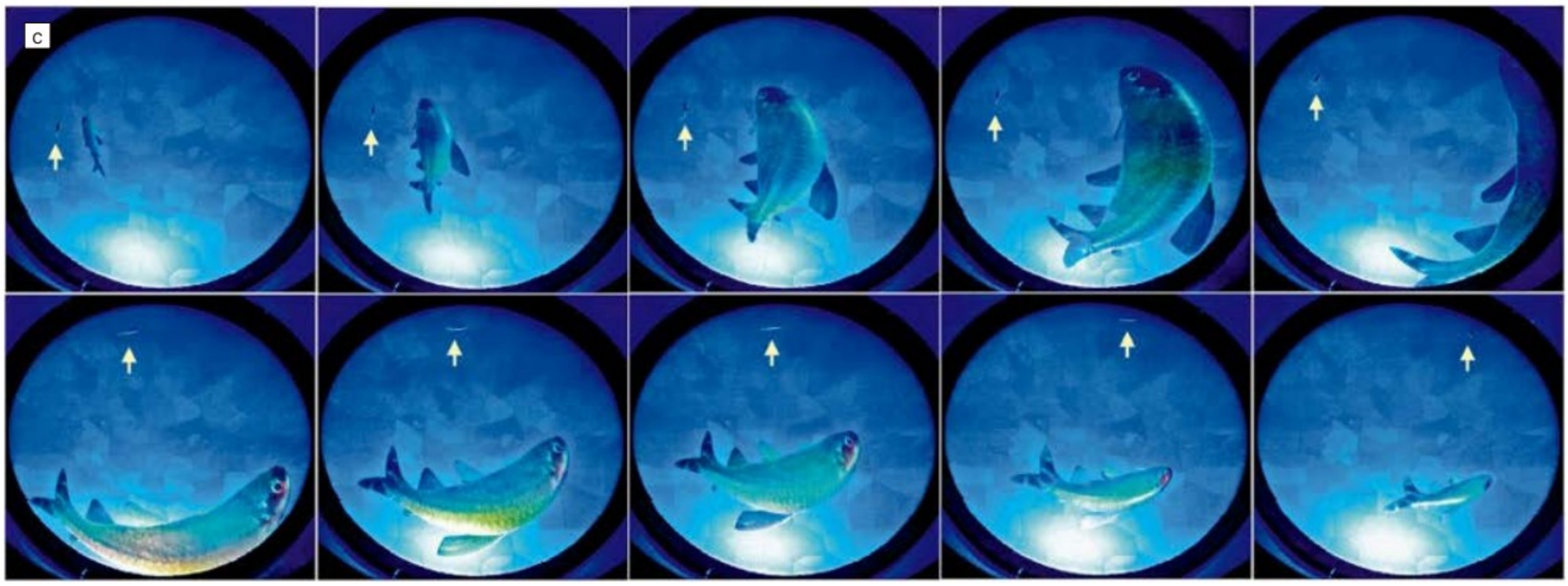
les congénères, et l'alignement, qui permet de synchroniser les directions de nage. L'attraction augmente lorsque les poissons s'éloignent, puis atteint un maximum à quelques longueurs de corps, typiquement entre 7 et 9 centimètres, avant de décroître progressivement. L'intensité de l'alignement domine celle de l'attraction quand les poissons sont relativement proches l'un de l'autre. Enfin, lorsque la distance qui les sépare augmente, l'attraction redevient dominante.

Les interactions des poissons vis-à-vis de leurs congénères sont également très fortement modulées par la perception de leur environnement, qui n'est pas du tout isotrope. L'intensité avec laquelle un poisson s'aligne sur la direction de son voisin est maximale quand celui-ci se trouve devant lui ou sur les côtés. En revanche, le poisson ne s'aligne

LES AUTEURS

Guy Theraulaz est directeur de recherche au CNRS, chercheur au Centre de recherches sur la cognition animale, à l'Université de Toulouse • **Stéphane Sanchez** est maître de conférences à l'université Toulouse-Capitole, chercheur à l'Institut de recherches en informatique de Toulouse • **Clément Sire** est directeur de recherche au CNRS, laboratoire de physique théorique de Toulouse • **Ramón Escobedo** est chercheur postdoctoral au Centre de recherches sur la cognition animale, à Toulouse

David Villa, ScienceImage, CNRS CBI, Toulouse



Le poisson réel évolue dans un aquarium hémisphérique dont les parois servent d'écran de projection [a]. Un système de suivi tridimensionnel mesure en temps réel la position et l'orientation de l'animal [b]. Ces informations alimentent ensuite un modèle mathématique qui calcule la trajectoire du ou des poissons virtuels, dont l'image anamorphique est projetée avec une correction géométrique permettant de préserver les indices de profondeur [c]. Le résultat est une interaction en boucle fermée entre le poisson réel et les poissons virtuels projetés en vue anamorphique afin qu'ils soient perçus correctement depuis le point de vue du poisson. L'image projetée sur la paroi est donc volontairement déformée et n'a de sens visuel que lorsqu'elle est observée depuis la position du poisson réel. En générant une illusion tridimensionnelle cohérente, le comportement du poisson réel *(flèche blanche)* influence celui des avatars, qui influencent à leur tour le poisson réel. Cette réciprocité est essentielle pour susciter des réponses naturelles et également valider le modèle. Ces dispositifs transforment la réalité virtuelle en un véritable environnement social programmable.

plus du tout avec son voisin lorsque celui-ci se situe derrière lui. De plus, un poisson est beaucoup plus attiré par un voisin situé sur les côtés que par un voisin situé devant lui. L'influence sociale dépend aussi de l'angle entre les directions de nage des poissons. Plus deux poissons sont désalignés, plus l'attraction latérale s'intensifie, favorisant leur rapprochement, tandis que l'alignement devient moins efficace. À très courte distance, une répulsion évite les collisions et stabilise l'espacement minimal. Ainsi, il existe une très forte asymétrie dans les interactions entre les poissons qui s'influencent très fortement avec ceux situés à l'avant et sur les côtés et très faiblement avec ceux situés à l'arrière.

Dans le modèle comportemental tridimensionnel que nous avons reconstruit à partir de données d'observation *in vivo*, les interactions d'attraction et d'alignement sont pondérées par des coefficients réglant leur intensité relative. La combinaison dynamique de ces interactions suffit à reproduire les principales propriétés statistiques des bancs observés : des distances interindividuelles stables, une orientation collective cohérente et des transitions rapides lors des changements de direction. Ces propriétés sont reproduites malgré l'environnement contraignant imposé par notre dispositif expérimental. La proximité des parois déclenche en effet chez un tétra qui y évolue une répulsion marquée à moins de quelques centimètres, modulée par l'orientation de l'animal. Ces poissons tendent par ailleurs à limiter leurs excursions vers la surface, en se maintenant autour d'une profondeur préférentielle de 4 à 5 centimètres.

Le voisin le plus influent

Une question centrale dans l'étude des bancs de poissons concerne le nombre de voisins réellement pris en compte par un individu pour ajuster son déplacement. Dans un groupe dense, chaque poisson est entouré de multiples partenaires potentiels. L'hypothèse intuitive voudrait qu'il intègre l'ensemble de ces informations pour coordonner ses mouvements. Mais les expériences dans lesquelles des poissons nagent et interagissent avec leurs doubles numériques ont révélé une réalité bien différente. Lorsqu'on place un poisson réel en présence de plusieurs congénères virtuels dont on contrôle précisément les règles d'interaction, on observe qu'il se comporte comme s'il répondait principalement à un seul de ses voisins à la fois. C'est cette relation avec le « voisin le plus influent » qui produit la plus

David Villa, ScienceImage, CNRS CBI, Toulouse

forte modification de sa vitesse ou de sa direction de nage. L'identité de ce voisin n'est pas fixe et évolue en permanence au gré des déplacements relatifs et de la réorganisation du groupe. La coordination repose ainsi sur une focalisation dynamique sur les signaux sociaux les plus saillants, plutôt que sur une intégration exhaustive de toutes les informations disponibles à un instant donné.

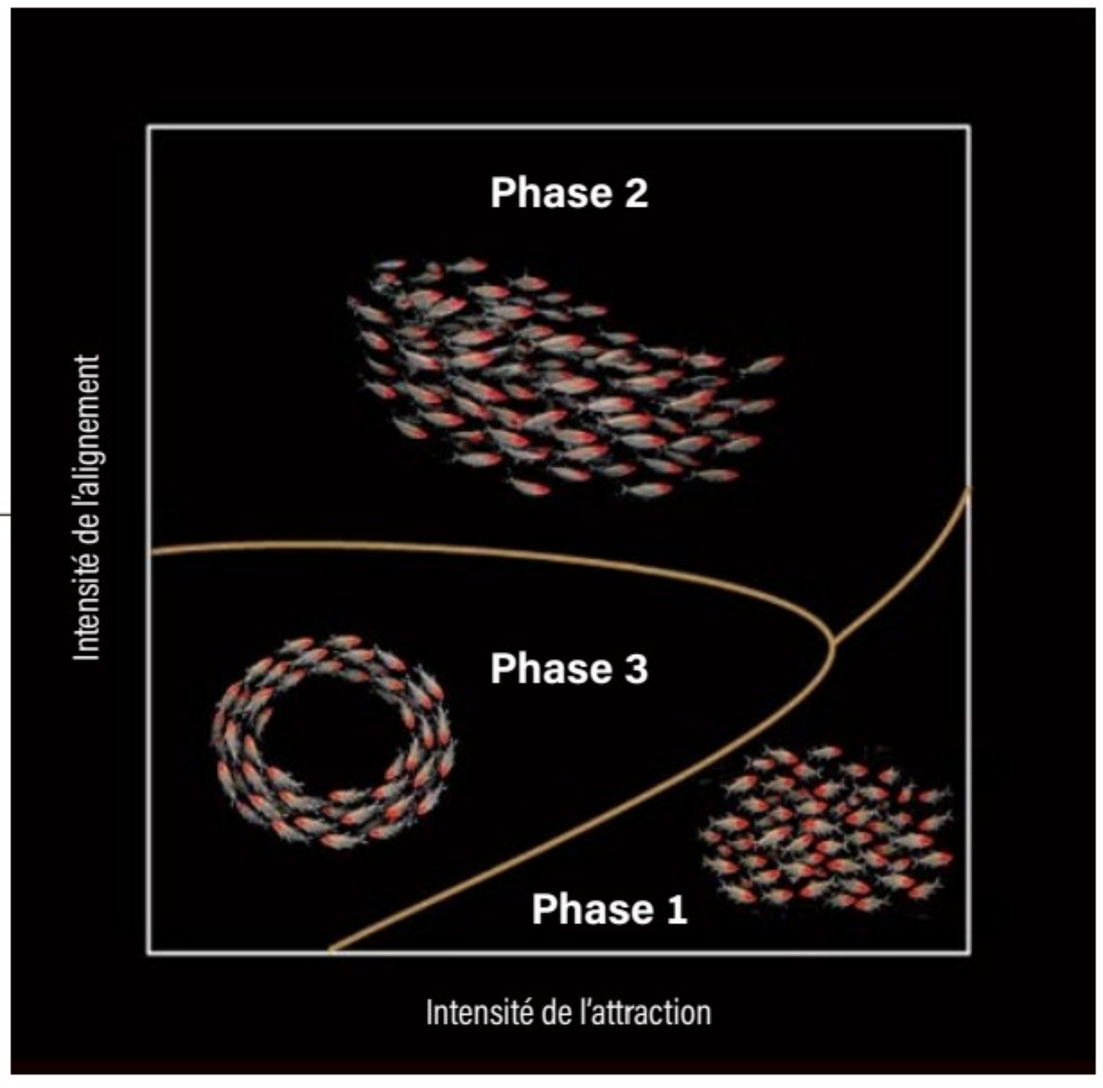
Réseau d'attention

Cette stratégie présente plusieurs avantages. Elle réduit la charge cognitive tout en maintenant une coordination efficace. Elle favorise également une propagation rapide de l'information à travers le groupe, chaque individu relayant l'effet de son voisin le plus influent vers un autre. L'image qui en résulte est celle d'un réseau d'attention mobile où l'influence circule de proche en proche. La coordination collective des nages apparaît alors comme le produit d'un filtrage social adaptatif plutôt que d'une accumulation d'information. Cette découverte rejoint des observations faites dans d'autres systèmes biologiques, y compris chez les humains, selon lesquelles l'efficacité collective dépend souvent moins de la quantité d'information disponible que de la capacité à sélectionner les signaux pertinents.

La réalité virtuelle nous permet également d'isoler des variables difficiles à manipuler dans des groupes réels. Parmi elles, la vitesse de nage occupe une place particulière. Dans la nature, elle est étroitement couplée à la densité des bancs de poissons et aux interactions sociales, ce qui rend difficile l'identification du rôle causal de la vitesse. En exposant un poisson réel à un partenaire virtuel nageant à différentes vitesses constantes mais suivant la même trajectoire, nous avons montré que cette vitesse de nage modifie profondément l'intensité des interactions sociales. Lorsque le voisin virtuel nage rapidement, l'alignement du poisson réel avec celui-ci devient dominant tandis que l'attraction diminue. Le poisson réel privilégie alors la synchronisation des orientations plutôt que la proximité, de sorte que la vitesse de nage agit comme un paramètre de contrôle des états collectifs des bancs. La vitesse de nage peut favoriser la cohésion dans certaines conditions ou, au contraire, renforcer la réactivité et la propagation rapide de l'information lors de situations de stress ou de fuite. Ce mécanisme offre une explication plausible des transitions de phase observées dans les bancs naturels et souligne leur caractère adaptatif.

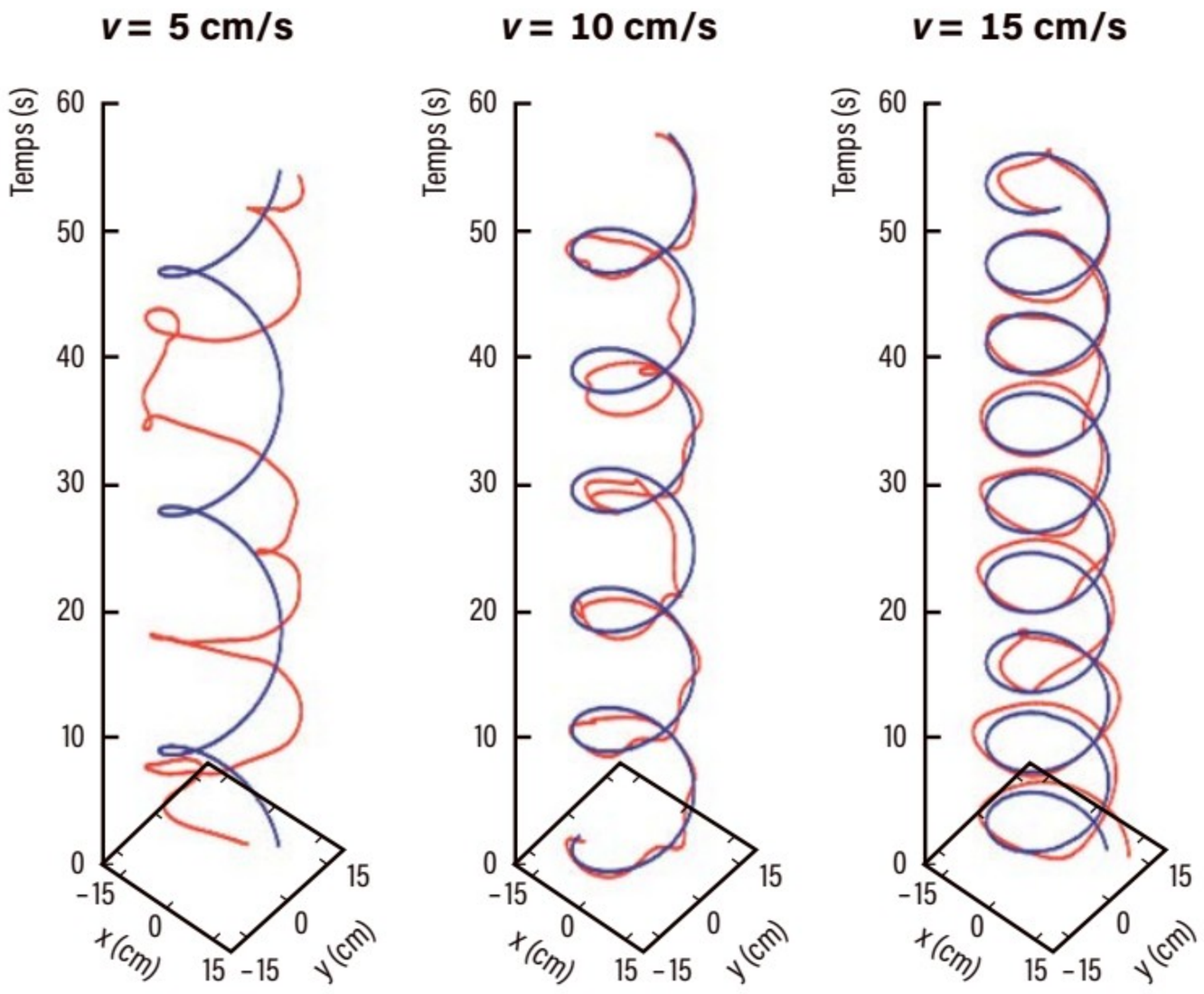
Comment fonctionne un banc de poissons?

Un banc de poissons est bien plus qu'un simple regroupement d'individus. Il s'agit d'un système auto-organisé dans lequel les interactions locales de voisins produisent une coordination globale. Chez de nombreuses espèces, chaque individu ajuste en permanence sa trajectoire en fonction de quelques règles simples : se rapprocher des voisins pour maintenir la cohésion, éviter les collisions et aligner sa direction sur celle des partenaires proches. Ces mécanismes suffisent à engendrer une grande variété d'états collectifs, tels que des groupes dispersés, des bancs compacts et hautement polarisés, dans lesquels la plupart des poissons sont orientés et nagent dans la même direction, ou encore des formations circulaires en forme de vortex. La caractéristique remarquable de ces systèmes réside dans leur robustesse. Le groupe reste cohérent malgré le bruit sensoriel, la variabilité individuelle et les perturbations externes. Cette robustesse explique l'intérêt des scientifiques pour les bancs de poissons, qui constituent un modèle biologique privilégié pour étudier les processus de coordination collective dans les systèmes vivants.



Dans les bancs de tétras à nez rouge, les interactions d'attraction et d'alignement des poissons produisent différentes formes de mouvements collectifs. Selon leur intensité respective, les bancs peuvent être désordonnés *(phase 1)* ou fortement polarisés *(phase 2)*, ou créer des structures en « moulin » *(phase 3)*.

© CRCA, CBI, CNRS, Toulouse



Effet de la vitesse *v* de nage sur les interactions sociales. La vitesse des individus modifie la synchronisation des nages et l'intensité des interactions sociales. À faible vitesse, l'attraction spatiale domine et favorise la cohésion. À vitesse élevée, l'alignement devient prépondérant, produisant des structures collectives plus polarisées et réactives.

En révélant comment les poissons filtrent l'information, choisissent leurs voisins influents et ajustent leurs interactions en fonction du contexte, la réalité virtuelle offre une fenêtre unique sur les lois fondamentales des phénomènes de coordination collective chez les poissons. Elle ouvre la possibilité d'en étudier des dimensions encore peu explorées, telles que la structure temporelle des interactions, la dynamique du leadership ou la transmission directionnelle de l'information.

Au-delà de l'étude spécifique des bancs de poissons, nos résultats illustrent la puissance croissante des environnements virtuels pour l'analyse du comportement animal. Manipuler de manière causale la structure des interactions sociales complète les approches observationnelles classiques, souvent limitées par la complexité et la variabilité des situations naturelles. Des dispositifs comparables ont été utilisés pour analyser la perception visuelle et la navigation chez la drosophile, la prise de décision spatiale chez la souris ou encore les mécanismes de coordination sociale chez le poisson-zèbre.

Ces approches annoncent une évolution profonde dans l'étude des comportements collectifs. En permettant de créer des partenaires artificiels crédibles, elles rendent possible l'exploration expérimentale d'hypothèses jusque-là inaccessibles, la comparaison directe entre comportements naturels et modèles théoriques, ainsi que le transfert de principes biologiques vers la robotique en essaim et les systèmes autonomes. Ces principes, fondés sur des interactions locales simples avec un nombre limité de voisins parmi les plus influents, inspirent déjà le contrôle d'essaims de drones capables de s'organiser sans coordination centrale, en conciliant robustesse et capacité d'adaptation, dans le cadre de travaux menés en collaboration avec l'équipe de Gautier Hattenberger, à l'École nationale de l'aviation civile, à Toulouse.

La réalité virtuelle ne constitue donc pas seulement un nouvel outil technique, mais un véritable changement de paradigme expérimental. Elle transforme l'étude des comportements collectifs de groupes d'animaux en une science interventionnelle capable de manipuler les interactions elles-mêmes, et non plus seulement leurs conséquences. ■

© CRCA, CBI, CNRS, Toulouse

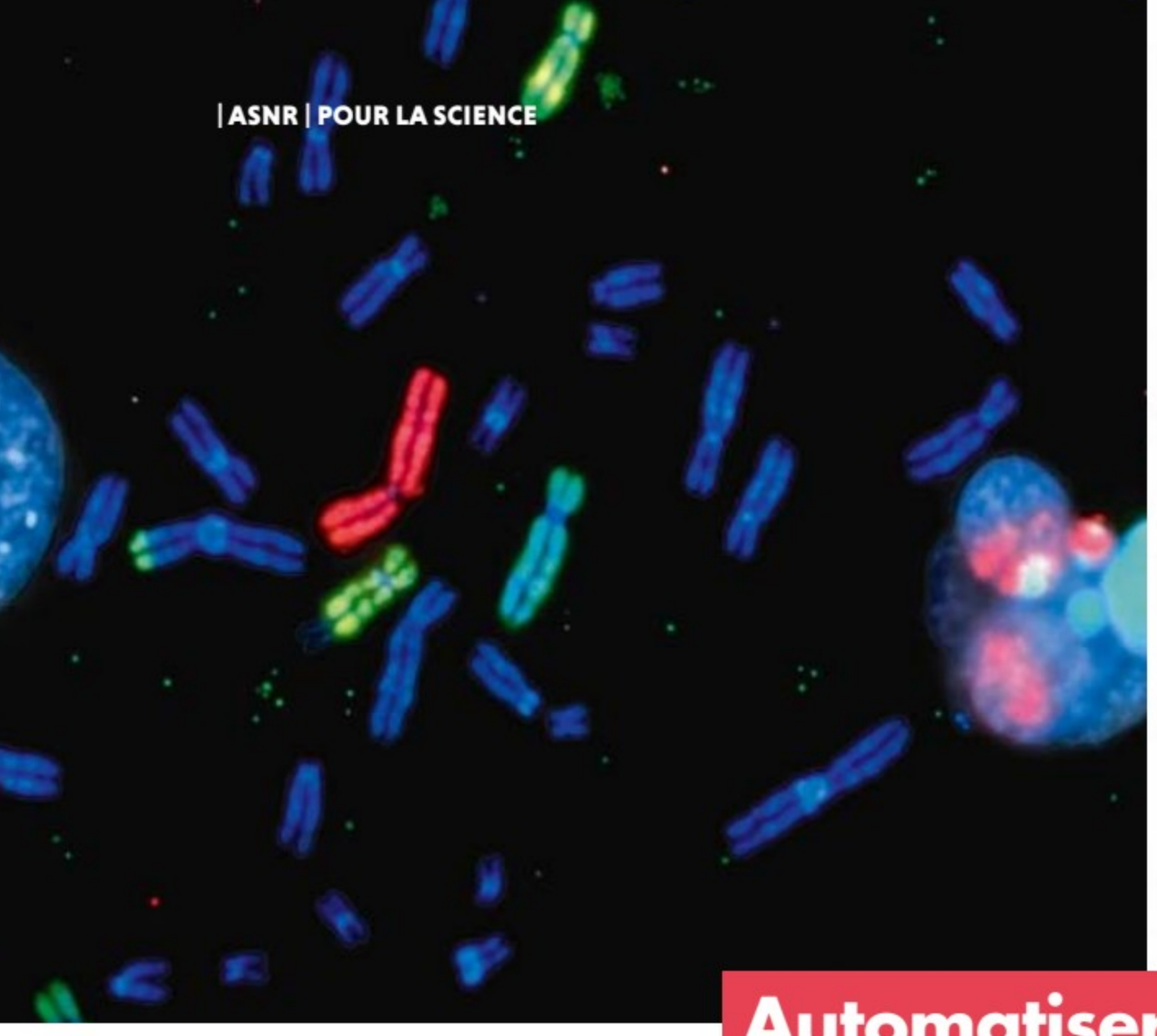
BIBLIOGRAPHIE

S. Sanchez *et al.*, An open-source closed-loop virtual reality system to investigate social interactions and collective behavior in fish, *Plos One*, 2026.

R. Escobedo *et al.*, Swimming speed of schooling fish controls social interaction strength in open-loop immersive virtual reality, *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 2026.

Z. Kang *et al.*, Decoding social integration in schooling fish using real-virtual interactions, *PRX Life* (sous presse).

R. Escobedo *et al.*, Closed-loop real-virtual interactions validate 3D model of social coordination in fish, *Plos Computational Biology*, 2026.





Ces deux techniques d'imagerie révèlent des aberrations chromosomiques.

Automatiser la dosimétrie biologique individuelle grâce à l'IA

Deux méthodes complémentaires permettent d'évaluer l'exposition aux rayonnements ionisants : la dosimétrie physique et la dosimétrie biologique cytogénétique. L'ASNR est un des référents mondiaux pour cette dernière, qui consiste à dénombrer certaines aberrations chromosomiques sur des images. Mais ce comptage, manuel, est inapproprié en cas de crise à grande échelle. En France, un comptage semi-automatisé est déjà opérationnel. Peut-il être automatisé grâce aux récents progrès de l'intelligence artificielle (IA) ?

[CONTEXTE]

Est-on en mesure d'évaluer rapidement et de manière fiable les doses reçues par chacun en situation de crise radiologique ou nucléaire majeure, impliquant un grand nombre de personnes irradiées ? Cette information individuelle est indispensable pour anticiper les effets cliniques tant immédiats qu'à long terme, et prévoir une prise en charge personnalisée adéquate.

Que se passerait-il en cas d'exposition aux rayonnements ionisants de centaines ou milliers de personnes en France ? Même si ce scénario, accidentel ou malveillant, est inédit, l'ASNR s'y prépare. Dans un premier temps, des médecins identifieraient les patients les plus exposés selon leurs signes cliniques. Ensuite, en évaluant les doses individuelles reçues, les experts de l'ASNR détermineraient quelles victimes asymptomatiques seraient à suivre car significativement exposées, risquant donc de développer des effets radio-induits. De quoi définir les stratégies de prise en charge médicale personnalisées et rassurer les personnes non exposées.

L'ASNR est intervenue pour évaluer les doses reçues lors d'accidents affectant, entre autres, des ouvriers de l'industrie nucléaire et radiologique, du personnel hospitalier ou de tout autre individu suspecté d'avoir été exposé aux radiations. Car, fort heureusement, aucune irradiation majeure de grande envergure n'a eu lieu en France. Quelle est la procédure ? À partir du scénario de l'accident (nature du rayonnement ionisant, durée d'exposition, zones touchées), des algorithmes basés sur des modèles physiques très précis permettent d'établir une cartographie détaillée de l'exposition, pour chaque organe. C'est une des approches de ce qu'on appelle la « dosimétrie physique ». Depuis les années 1960, une autre méthode a fait ses preuves : la dosimétrie biologique par cytogénétique.

En comptant certaines aberrations chromosomiques induites par les radiations dans un certain type de globules blancs, les lymphocytes, on peut alors remonter à une dose moyenne reçue sans avoir besoin de connaître les circonstances exactes de l'accident. Ces doses moyennes « corps entier » donnent aussi la possibilité de calibrer les distributions de doses prédites par dosimétrie physique lorsque le scénario d'exposition est inconnu ou incertain.

Deux types d'aberrations sont dénombrés : les dicentriques, instables – qui commencent à disparaître dès six mois après l'exposition – sont les plus fiables pour estimer l'exposition à court terme ; les translocations, stables et persistantes, permettent de suivre l'exposition des victimes à long terme, comme c'est le cas pour celles de Hiroshima, Nagasaki ou Tchernobyl. C'est également ainsi que sont surveillés les astronautes de la Station spatiale internationale.

Un fastidieux comptage manuel

En observant ces cellules au microscope optique avec une méthode de coloration dite Giemsa, qui révèle la morphologie des chromosomes, des biologistes formés dénombrent les dicentriques. Il leur faut huit heures par victime. L'analyse, menée en général par deux experts, est fastidieuse, car ces aberrations sont rares et difficiles à distinguer (environ un dicentrique pour 1 000 lymphocytes, hors irradiation). Les chromosomes transloqués, quant à eux, sont en

© ASNR

général de plusieurs couleurs en raison de l'échange de matériel génétique, ce que met en évidence l'imagerie FISH (*Fluorescence in situ hybridization*). La sensibilité de ces méthodes est respectivement d'environ 0,15 gray (Gy, unité de mesure de la dose absorbée) pour l'imagerie Giemsa et 0,3 Gy pour l'imagerie FISH. Pour comparaison, une personne sur deux succombe après une irradiation corps entier de 4,5 Gy, en l'absence de traitement.

Comme pour l'analyse manuelle, la détection automatique de ces aberrations est compliquée en raison de leur rareté. Grâce aux premières techniques d'analyses d'images, une entreprise, MetaSystems, a conçu un logiciel de comptage des dicentriques. Utilisé par de nombreux laboratoires dans le monde, dont ceux de l'ASNR, il est environ trente fois plus rapide que le comptage manuel. Mais il produit de nombreux faux positifs, des aberrations proposées qui n'en sont pas, ce qui nécessite une vérification par un expert. Le dispositif de crise mis en place en 2022 à l'ASNR est fondé sur ce logiciel. Il permet, à cinq binômes d'experts, de fournir une classification de 300 personnes en dix jours selon leur niveau d'exposition.

Avec l'arrivée, en 2012, de puissants modèles d'apprentissage automatique à base de réseaux de neurones artificiels, particulièrement performants dans des tâches d'analyse d'images, l'idée d'améliorer l'organisation par une automatisation complète, rapide et robuste, a émergé. Plusieurs travaux ont porté sur l'analyse des dicentriques à partir d'images Giemsa, aucun sur le comptage des translocations, car l'imagerie FISH est plus coûteuse, chronophage et moins d'experts sont qualifiés.

Le nerf de la guerre pour ces modèles, ce sont les données. Si elles sont annotées – ici en spécifiant l'étiquetage des aberrations chromosomiques et leur localisation spatiale – il est possible d'entraîner des algorithmes par « apprentissage supervisé ». À condition d'avoir suffisamment de données annotées, idéalement plusieurs centaines de milliers. L'algorithme reconnaît alors les formes associées à chaque aberration. Il peut ensuite faire des prédictions sur de nouvelles données.

Depuis une trentaine d'années, l'IRSN a archivé environ 100 000 images Giemsa (dont 6 % avec des dicentriques localisés par les experts), issues à 55 % d'expertises d'accidents, 30 % d'essais de calibration et 15 % de comparaisons inter-laboratoires. Autant d'images FISH sont disponibles (dont 3 % avec des translocations). En 2020, naît l'idée d'exploiter les possibilités de l'IA sur ces bases de données : l'ASNR lance un projet de recherche avec l'Institut de recherche biomédicale des armées (Irba) et l'équipe Sairpico, de l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria) spécialisée en analyse d'images biomédicales.

« Nous avons d'abord créé deux bases de données annotées spatialement, raconte Amine Benadjaoud, biomathématicien, chef du Laboratoire de radiobiologie des expositions accidentelles à l'ASNR. *C'était une première en Europe pour les images Giemsa – d'autres laboratoires s'y sont mis depuis – et sans équivalent dans le monde en imagerie FISH. »* Pour l'imagerie Giemsa, les chercheurs ont ensuite entraîné un modèle de détection d'objets adapté aux images cytogénétiques, très bruitées, peu contrastées et peu nombreuses : *« Au lieu de créer un rectangle autour de l'objet d'intérêt, notre doctorant, Antonin Deschemps, a utilisé des modèles de segmentation où chaque pixel est annoté,* explique Charles Kervrann, chef de l'équipe Sairpico d'Inria. *Nous générons ainsi des cartes de probabilité de présence des aberrations dans chaque image. Après avoir entraîné notre modèle sur nos données ASNR, nous l'avons validé sur celles de l'Irba. »*

Le prototype développé analyse 20 000 images en un quart d'heure, soit un échantillon en trente secondes, avec une sensibilité comparable à l'expertise humaine. Testé sur des images issues de sang humain irradié à dose connue, l'outil a donné les estimations et les intervalles de confiance pour des doses délivrées supérieures à 0,3 Gy.

Une IA générative et explicable

Quentin Tallon, un autre doctorant ASNR/Inria, a développé une solution originale pour accroître la base de données d'imagerie FISH qui n'en comptait que 3 000 annotées. Grâce à une IA générative, il a d'abord créé 30 000 images synthétiques contenant des translocations. Puis, grâce à un filtre mathématique basé sur la proximité avec les vraies images, il a sélectionné les 20 000 les plus réalistes. Cela a permis d'atteindre une performance de 84 % de détections correctes. La prochaine étape sera de développer un prototype exploitable pour des suivis de populations ou pour des dosimétries d'expositions anciennes.

Le déploiement de ces différents outils sous forme de logiciels est en cours. Cela permettra, à terme, une utilisation au-delà du périmètre restreint de laboratoires d'experts, par exemple dans des laboratoires d'analyse médicale. De quoi constituer une réserve de capacité opérationnelle cruciale en cas de crise d'envergure. Et récemment, une quinzaine de laboratoires européens de dosimétrie biologique se sont joints à l'ASNR pour créer une grande base de données européennes d'images Giemsa annotées spatialement.

En parallèle, les deux bases de données actuelles peuvent, par ailleurs, servir à entraîner de

Cahier partenaire réalisé avec

ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

Depuis le 1er janvier 2025, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) se sont réunis pour devenir l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

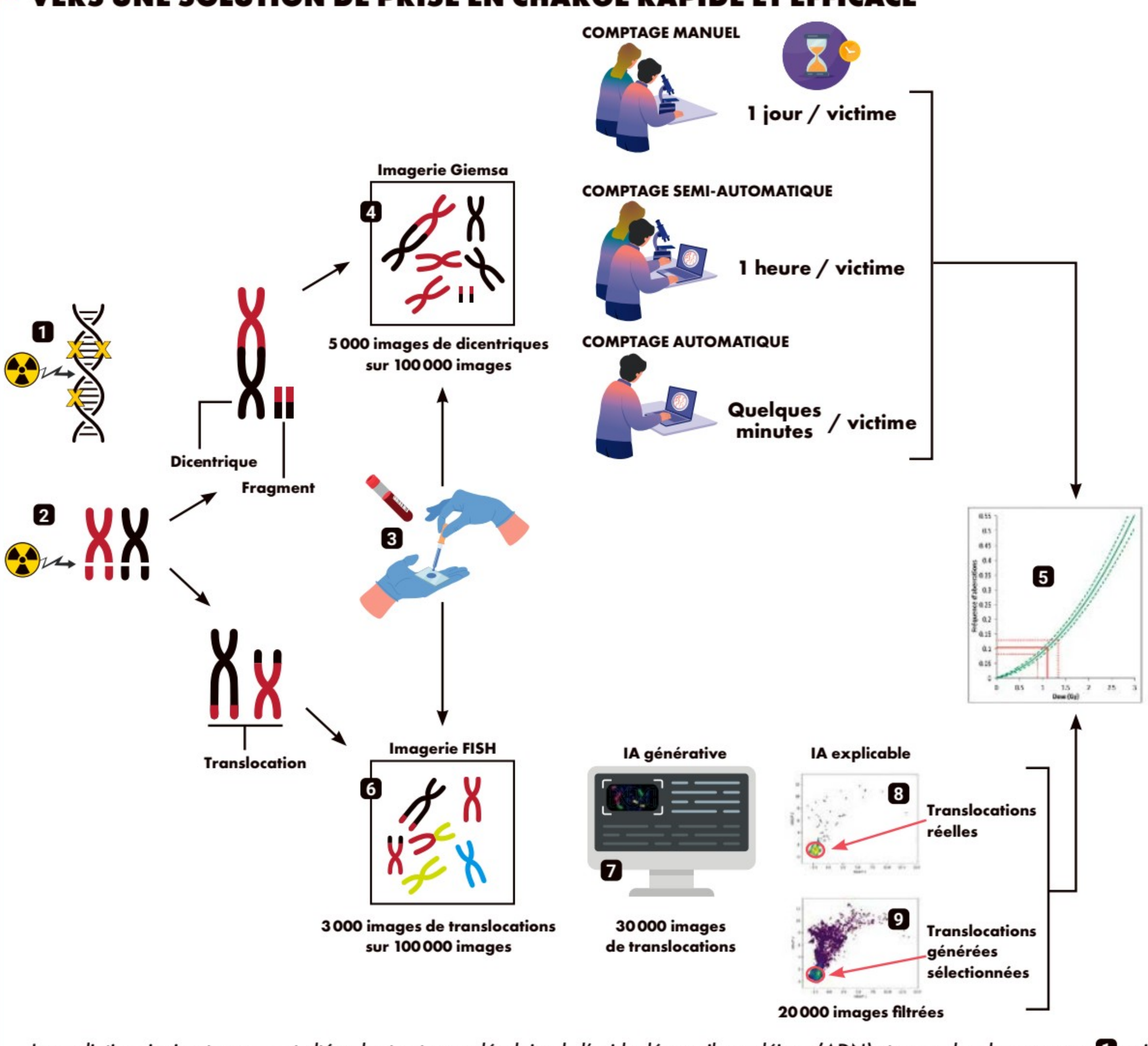
RÉFÉRENCES

- K.J.S. Martinez *et al.*, Development of an enhanced operational capacity for a laboratory using triage-mode based biodosimetry, *International Journal of Radiation Biology*, 2026.
- A. Deschemps *et al.*, Ensembling unets for rare chromosomal aberration detection in metaphase images, uncertainty quantification, and ionizing radiation dose estimation, *Cytometry Part A*, 2026.
- A. Deschemps *et al.*, in Fourteenth International Conference on Image Processing, Theory, Tools & Applications (IPTA), *IEEE*, 2025.
- Q. Tallon *et al.*, Diffusion model uniform manifold filtering for classification of small datasets with underrepresented classes: application to chromosomal aberration microscopy detection, *Proc. International Conference on Machine Vision, SPIE*, 2025.

nouvelles générations d'IA. Les méthodologies développées pourraient aussi être appliquées à des domaines autres que des accidents : par exemple, en oncologie, pour mieux adapter les doses de radiothérapie en évaluant leur impact sur le système immunitaire du patient. Un travail est en cours à ce sujet avec l'institut Gustave-Roussy.

Enfin, le couplage IA générative et IA explicable pourrait inspirer d'autres domaines dans lesquels les données en présence sont limitées. ■

VERS UNE SOLUTION DE PRISE EN CHARGE RAPIDE ET EFFICACE



Les radiations ionisantes peuvent altérer la structure moléculaire de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et casser les chromosomes 1 *qui se recombinent alors incorrectement* 2*. Certains dommages peuvent persister et produire des aberrations chromosomiques visibles dans les lymphocytes : notamment des dicentriques (avec deux points d'ancrage au lieu d'un), des fragments et des translocations (où du matériel génétique est échangé entre chromosomes). La dosimétrie biologique par cytogénétique est une méthode d'évaluation robuste, notamment lorsque les conditions d'exposition sont mal connues. Dans un contexte d'accident, les lymphocytes, issus d'une prise de sang, sont mis en culture durant 48 heures afin d'engager la division cellulaire* 3*. Ils sont ensuite analysés au stade de la métaphase, quand l'ADN est condensé en chromosomes, pour bien distinguer les deux chromatides sœurs. La coloration Giemsa permet de révéler les chromosomes* 4*. L'analyse des dicentriques est effectuée soit par un binôme d'experts, soit par un logiciel de détection semi-automatique avec validation du résultat par un opérateur humain. Grâce à l'IA, il est aujourd'hui possible d'automatiser l'analyse. Des courbes de référence dose/effets préétablies, à partir de l'irradiation* in vitro *d'échantillons sanguins, permettent d'évaluer la dose a posteriori, par régression inverse* 5*. En général, les chromosomes transloqués, observables en imagerie FISH (Fluorescence in situ hybridization), apparaissent multicolores* 6*. Pour étoffer la base de données, l'IA développée par l'ASNR associe une première étape de génération d'images synthétiques de translocations* 7 *suivie d'une sélection des plus réalistes. Comment ? En isolant une couche spécifique du réseau de neurones artificiels grâce à une technique de réduction de dimension pour la visualiser en 2D (*8 *où chaque point est une image) et identifier la zone où se concentrent les images de translocations réelles. En projetant ensuite dans cet espace les images synthétiques générées, l'IA ne retient que les plus « proches » des images réelles* 9*.*

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

MAGAZINE / HORS-SÉRIE / DIGITAL / 25+ ANS D'ARCHIVES



Choisissez votre formule d'abonnement

pourlascience.fr/abonnements

Édition française de Scientific American

* du 29/06/26 au 30/08/26



L'essentiel

- Sous une enluminure du XXe siècle et des prières médiévales se cache un texte d'Archimède.
- Le feuillet qui vient de réapparaître à Blois n'a encore jamais été soumis à l'imagerie.
- Or, en vingt-cinq ans, les instruments capables de le lire ont beaucoup progressé.

Faire parler le palimpseste d'Archimède

Victor Gysembergh

Un feuillet conservé à Blois s'est révélé appartenir à une copie millénaire d'un traité du mathématicien grec. Il devrait bientôt livrer ses secrets grâce à l'imagerie de dernière génération.



Ce feuillet conservé au musée des Beaux-Arts de Blois est un palimpseste : sur le verso *(à gauche)*, on distingue un texte effacé perpendiculaire aux prières en grec qui le recouvrent ainsi qu'une figure géométrique. Le recto *(à droite)*, ne porte presque plus d'écrits visibles à l'œil nu. Mais il ne fait aucun doute qu'il s'agit bien d'un feuillet disparu d'une copie du x^e^ siècle du traité d'Archimède intitulé *De la sphère et du cylindre*.

Sur l'une de ses faces, une enluminure : le prophète Daniel entouré de deux lions, peint au XX^e^ siècle à la manière byzantine. Sur l'autre, des prières grecques, copiées sept siècles plus tôt. Entre les deux, invisible ou presque, le texte d'un traité de mathématiques vieux de plus de deux mille ans. Ce feuillet conservé au musée des Beaux-Arts de Blois, installé dans le château royal, provient du palimpseste d'Archimède, l'un des manuscrits les plus précieux pour l'histoire des sciences en Grèce antique. Il y est entré au début des années 1970 par un legs d'André Frank, chef du service des émissions dramatiques de télévision à l'ORTF, sans que personne, alors, soupçonne ce qu'il dissimulait.

Je l'ai identifié en 2025, mais cette étape n'était qu'un début. La vraie question est ailleurs : que peut-on aujourd'hui en faire ressortir ? Car ce feuillet n'a jamais été soumis à l'imagerie scientifique – et les outils dont nous disposons désormais n'ont plus grand-chose à voir avec ceux qui ont servi, il y a un quart de siècle, à lire le reste du manuscrit.

Un feuillet passé inaperçu

C'est un peu par hasard que je suis tombé sur ce curieux feuillet. À la suite d'une conférence à laquelle nous avions assisté à la Bibliothèque nationale de France (BNF), nous discutions avec mes collègues Nicola Zito et Csaba Láda du fait que la bibliothèque royale (qui deviendrait la BNF) avait été un temps conservée au château de Blois, sous le règne de François I^er^. Il est bien connu qu'il n'en reste aucun vestige à Blois aujourd'hui, mais de fil en aiguille, je me suis amusé à chercher dans la merveilleuse bibliothèque numérique de manuscrits médiévaux Arca si cette ville recelait actuellement des palimpsestes – sans m'attendre à en trouver. Notre équipe est toujours à l'affût de ces parchemins dont le texte en masque un autre, car une partie de nos travaux consiste à retrouver leurs écrits disparus avec les techniques d'imagerie les plus récentes.

Ce feuillet a immédiatement retenu mon attention : on y distinguait du texte effacé – il s'agissait donc bien d'un palimpseste – et des vestiges de diagrammes, signe qu'il s'agissait probablement

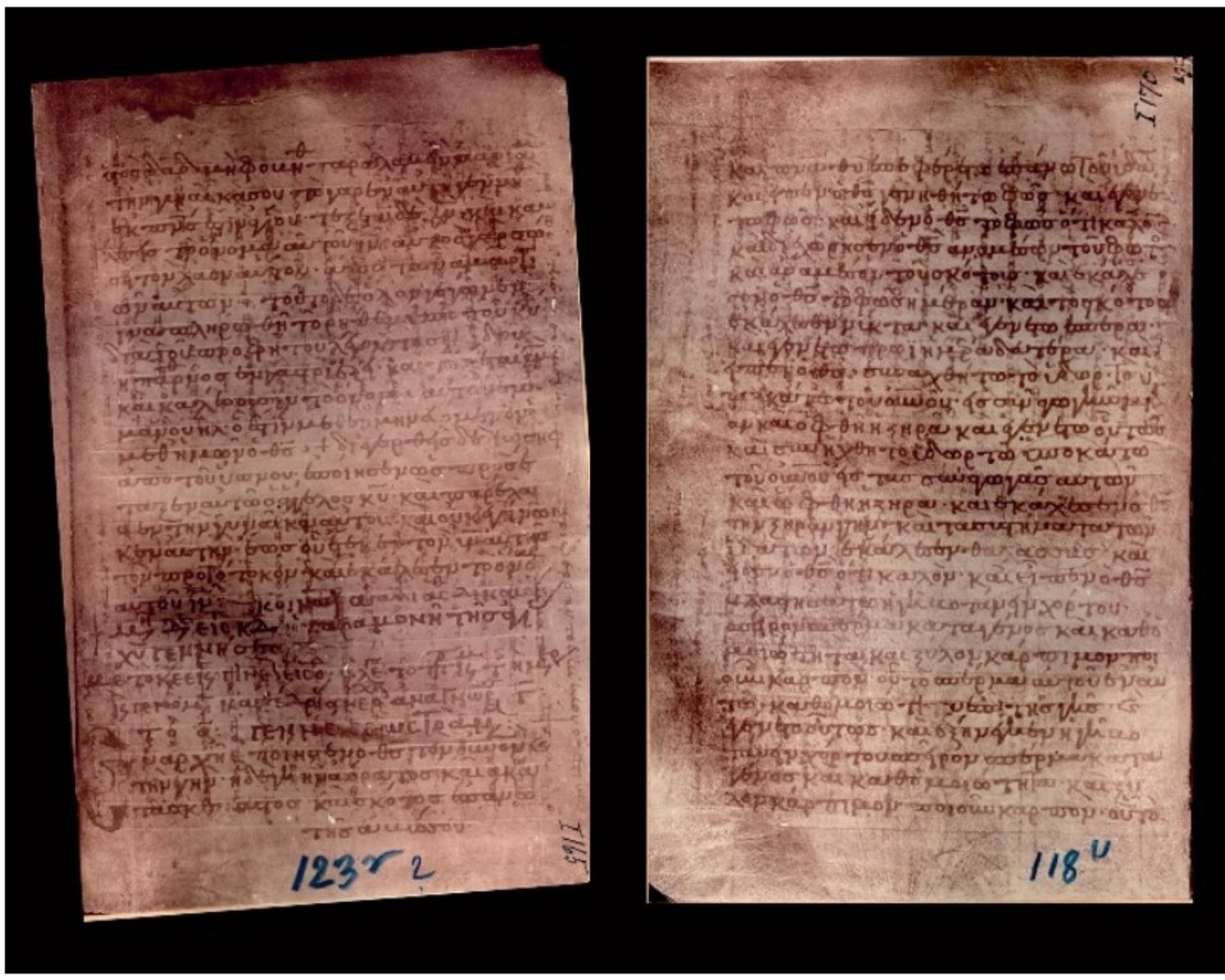
Fond : © wirakorn deelert/Shutterstock ; manuscrit : © Blois, Musée des Beaux-Arts, Inv. 73.7.52. Photographie IRHT-CNRS

d'un texte scientifique, un de mes principaux centres d'intérêt. Nicola Zito y a d'ailleurs remarqué le mot κέντρον, qui peut avoir le sens géométrique de «point». De plus, l'enluminure m'a tout de suite rappelé le cas du palimpseste d'Archimède: ce manuscrit identifié au début du XXe siècle comporte plusieurs fausses enluminures ajoutées après son identification.

Il a lui-même une histoire singulière. Au Xe siècle, à Constantinople (aujourd'hui Istanbul), un copiste réunit dans un même volume plusieurs traités d'Archimède, que le grand mathématicien de l'Antiquité grecque avait rédigés quelque 1 300 ans plus tôt. Au XIIIe siècle, un moine en quête de parchemin gratta ces pages, les découpa et les recomposa en un livre de prières. Mais le texte d'Archimède ne fut pas détruit: il subsistait, pâle, sous la liturgie. C'est cette superposition que désigne le mot «palimpseste».

S'il existe des manuscrits médiévaux plus récents de certains traités de ce volume, il est en revanche notre seule source pour deux œuvres d'Archimède, dont *La Méthode*, où le savant dévoile sa manière de découvrir les théorèmes avant même de les démontrer; il est aussi le seul témoin en grec de son traité *Des corps flottants*, fondateur de l'hydrostatique. Sous les prières, on a également retrouvé des textes d'autres auteurs, notamment un commentaire d'un philosophe anonyme portant sur le traité d'Aristote intitulé *Les Catégories* et un discours inédit de l'orateur Hypéride.

C'est le philologue danois Johan Ludvig Heiberg qui a repéré le palimpseste au début du XXe siècle. Le document se trouvait à Constantinople, dans la bibliothèque du Métochion du Saint-Sépulcre (une dépendance du patriarcat de Jérusalem). En 1899, l'historien grec Athanase Papadopoulos-Kérameus avait publié un catalogue des manuscrits de cette bibliothèque, dans lequel il avait transcrit un court passage du texte effacé sans reconnaître qu'il s'agissait d'Archimède. Ce passage avait suffi à Heiberg pour l'identifier. Le philologue s'était ensuite rendu à Constantinople en 1906, puis en 1908. Il avait ainsi pu étudier le manuscrit à loisir et, en 1908, en commander des photographies en couleur et en ultraviolet, qu'il avait continué d'analyser les années suivantes.



Ces photos prises en 1908 à l'initiative du philologue danois Johan Ludvig Heiberg sont celles du feuillet de Blois avant son grattage et l'ajout de l'enluminure. Le recto *(à gauche)* est couvert de prières comme le verso *(à droite)*, où on retrouve les mêmes textes que sur la page de Blois. Le texte et les figures effacés d'Archimède sont visibles par endroits.

Le début du XXe siècle avait en effet connu des progrès importants dans la production de lumière ultraviolette, en particulier avec l'invention en 1903, par le physicien américain Robert Wood, d'un filtre qui bloque la lumière visible et laisse passer les rayons ultraviolets (le verre de Wood), et d'une lampe à vapeur de mercure faite en verre de Wood (la lampe de Wood). Cette invention s'était diffusée rapidement dans de nombreux domaines scientifiques, dont l'étude des manuscrits.

Une traversée houleuse des guerres

L'histoire du palimpseste ne s'arrête pas là. Il disparut dans la tourmente de la Première Guerre mondiale, refit surface à Paris en 1932 dans les mains du collectionneur et antiquaire Salomon Guerson – chez qui il séjourna dans une cave, exposé à l'humidité et aux moisissures –, puis fut vendu aux enchères en 1998. Déposé un temps au Walters Art Museum, à Baltimore, aux États-Unis, où il fut étudié, il se trouve aujourd'hui de nouveau dans une collection privée.

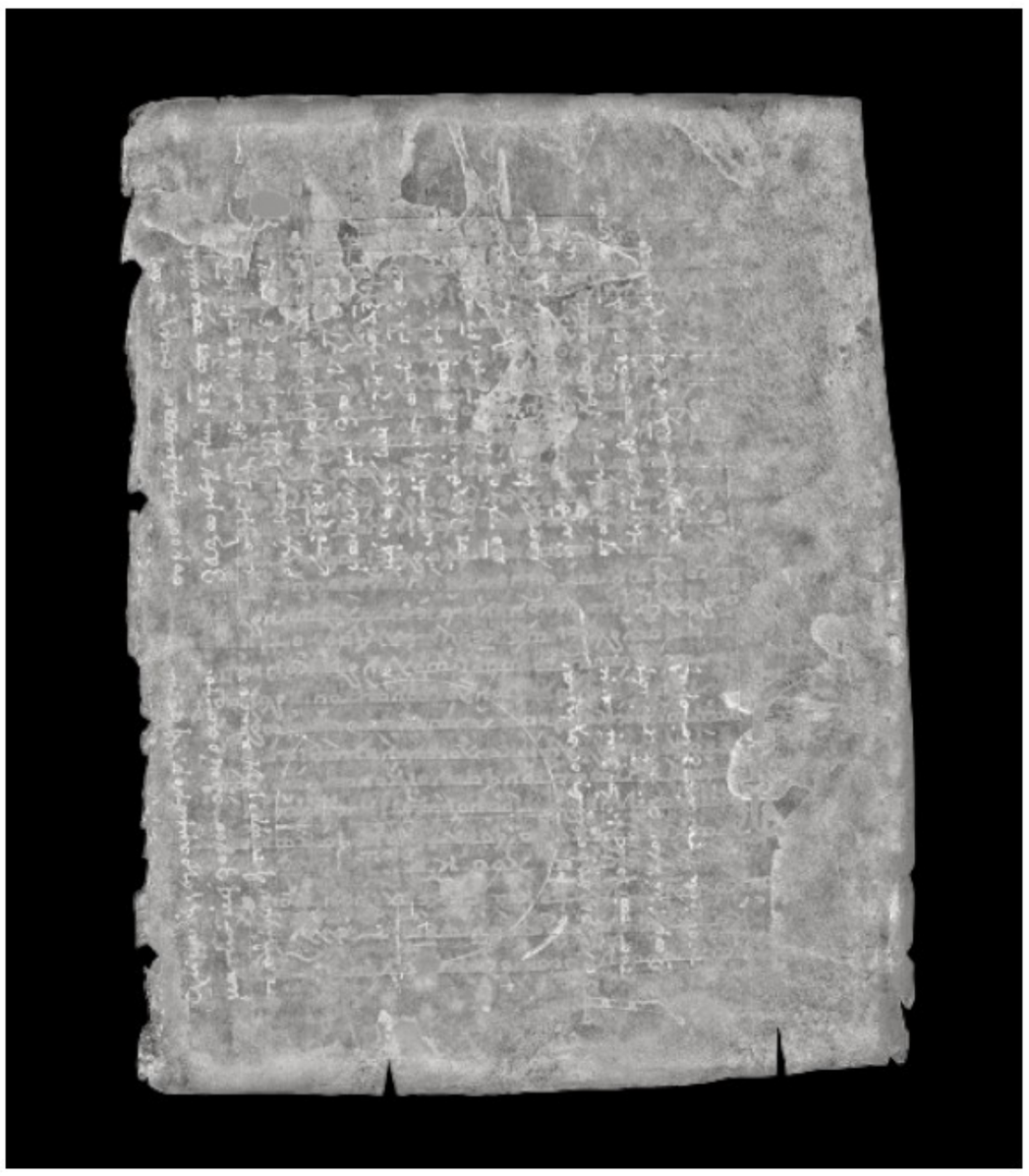
Entre les photographies prises à l'initiative de Heiberg et la vente aux enchères de 1998, plusieurs

L'AUTEUR



Victor Gysembergh
directeur de recherche du CNRS
au centre Léon-Robin, à Sorbonne Université, à Paris

© The Archimedes Palimpsest, folios 123r-118v-Arch61r et 123v-118r-Arch61v (CC BY 3.0)



Cette image obtenue en 2007 par soustraction d'une photo couleur et d'une photo prise aux rayons ultraviolets est celle d'une autre page du palimpseste d'Archimède. Cette technique met déjà considérablement en avant le texte et la figure du mathématicien, au détriment des prières qui les recouvrent.

feuillets ont disparu. On ne sait pas exactement quand ils ont été découpés, mais le plus probable est que ce soit dans les dernières années du régime de Vichy, dans un contexte où les persécutions antisémites menaçaient la vie de Guerson. Divers indices suggèrent que l'antiquaire aurait peint l'enluminure du feuillet de Blois et d'autres du manuscrit vers 1942, sans doute pour rendre le parchemin plus vendable.

C'est avec toute cette histoire en tête que j'ai déchiffré quelques lignes de ce feuillet, celles qui n'étaient pas recouvertes. Puis en entrant le texte déchiffré dans la base de données *Thesaurus Linguae Graecae*, qui rassemble tous les textes écrits en grec de l'Antiquité au XIX^{e} siècle, j'ai vu qu'il s'agissait du texte d'Archimède. Cela ne prouvait pas encore qu'il provenait du fameux palimpseste, même si c'était déjà très probable, car l'écriture était semblable.

J'ai ensuite comparé les pages avec les photos prises à l'initiative de Heiberg. Celles-ci documentent l'intégralité du manuscrit tel qu'il était conservé en 1908, y compris le feuillet de Blois. On y voit le texte supérieur (le livre de prières) et, plus ou moins bien, les textes inférieurs sur les différents feuillets. Il n'y a pas encore les enluminures. Plus de doute possible, c'était la preuve définitive de l'identité du feuillet.

À présent, nous avons hâte de l'étudier par imagerie multispectrale. C'est à Baltimore, entre 1999 et 2008, que la communauté a mesuré, sur le palimpseste d'Archimède, ce dont cette technique était capable. Son principe est simple: on photographie le parchemin sous une succession de longueurs d'onde, de l'ultraviolet à l'infrarouge, puis on combine ces clichés pour faire ressortir le contraste entre l'encre antique et le parchemin là où l'œil ne distingue plus rien.

Des progrès considérables en imagerie

Dans les années 1990, deux chercheurs, Keith Knox et Roger Easton, avaient déjà obtenu, avec des caméras bricolées, des résultats sur les manuscrits de la mer Morte – un ensemble de parchemins trouvés en 1947 dans des grottes à Qumrân, dans l'actuelle Cisjordanie. Le projet du palimpseste d'Archimède a marqué un énorme progrès en donnant à ces mêmes chercheurs et à d'autres les moyens de développer sérieusement cette technique.

Sur les pages les plus rétives, ils ont complété ce travail en utilisant la fluorescence des rayons X produits par un synchrotron, celui de l'université Stanford: en excitant aux rayons X les atomes de fer ou d'autres éléments métalliques contenus dans l'encre ancienne, on obtient une carte de leur répartition, et donc des traces supplémentaires du texte effacé.

Les résultats furent considérables: des passages entiers d'Archimède redevenus lisibles, des textes que l'on n'avait plus lus depuis des siècles. Sur de nombreuses pages, la lecture est malgré tout restée partielle. Depuis, chacune des deux techniques a connu des progrès qui changent radicalement ce que l'on peut espérer tirer d'une page comme celle de Blois.

L'imagerie multispectrale s'est dotée de capteurs bien plus sensibles. Photographier un texte effacé, c'est essayer de saisir un signal infime – une trace d'encre presque évanouie – sur un fond bruité. Tout le jeu consiste à augmenter le rapport entre ce signal et le bruit. Or, sur ce terrain, les détecteurs ont fait un bond dans les années 2010, et plus encore depuis 2022.

D'abord, leur dynamique a augmenté. Un détecteur moderne distingue un nombre bien plus grand de niveaux d'intensité entre le noir et le blanc: les nuances très ténues qui, autrefois, se noyaient dans le fond se détachent désormais nettement. Ensuite, le bruit a chuté, grâce notamment à la réfrigération des détecteurs. Pour détecter un signal aussi faible, il faut de longues poses; mais plus la pose est longue, plus le détecteur produit son propre bruit

© The Archimedes Palimpsest, folio 123r-118v-Arch61r (CC BY 3.0)

thermique, qui vient brouiller l'image. En le refroidissant, on étouffe ce bruit de fond : les longues poses livrent enfin des images propres, où l'encre antique se sépare du parchemin.

Enfin, on a ajouté l'éclairage par transmission. Dans les années 2000, on éclairait surtout le parchemin par-devant, et on recueillait la lumière réfléchie ou réémise. On sait désormais qu'il faut aussi l'éclairer par-derrière en laissant la lumière le traverser : l'encre se révèle alors différemment et l'on parvient mieux à démêler les couches superposées – le texte gratté de l'Antiquité, la liturgie médiévale, voire ce qui se cache sous une tache ou une peinture.

La fluorescence X sur synchrotron a, elle aussi, beaucoup mûri. Dans les années 2000, l'analyse d'un manuscrit se faisait sur une ligne de lumière conçue pour de tout autres usages. Depuis, des lignes ont été spécialement aménagées pour les objets du patrimoine : optique adaptée aux grandes surfaces planes, balayage plus rapide, conditions de manipulation pensées pour des pièces fragiles.

Surtout, on a tiré les leçons des premières campagnes. On sait mieux choisir l'énergie du faisceau pour maximiser le signal de l'encre. Et les détecteurs (à dérive en silicium) ont changé de génération : désormais assemblés en matrices de plusieurs éléments, ils recueillent le signal beaucoup plus vite et couvrent une plus grande surface, de sorte que l'on obtient une cartographie plus fine, en moins de temps, et avec moins de rayonnement sur la page.

Au fil des ans, les améliorations ont permis d'étudier de plus en plus de manuscrits comme les palimpsestes du monastère Sainte-Catherine, au mont Sinaï, dans les années 2010, ou encore d'autres conservés à la Biblioteca capitolare, à Vérone, gravement endommagés par des traitements chimiques, que nous avons pu déchiffrer en 2022 alors qu'ils étaient auparavant considérés comme illisibles, même avec l'imagerie multispectrale. Sans oublier les fragments du plus ancien catalogue d'étoiles connu, composé au IIe siècle avant notre ère par l'astronome Hipparque, que nous avons retrouvé en 2022 dans un palimpseste également originaire du monastère Sainte-Catherine.

D'autres feuillets disparus

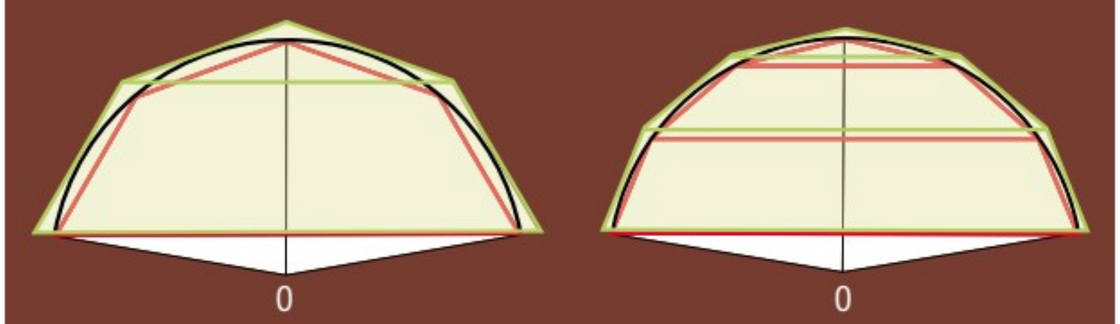
Voilà pourquoi nous sommes si excités à l'idée d'utiliser cette approche pour le feuillet de Blois. Sur la face couverte de prières, on devine déjà, à l'œil, des figures géométriques et un passage identifiable du traité *De la sphère et du cylindre* : les propositions 39 à 41 du livre I. Une imagerie multispectrale de dernière génération devrait permettre de relire ce passage bien au-delà de ce que Heiberg a déchiffré et d'en reconstituer les figures.

L'autre face est plus difficile encore : sous l'enluminure de Daniel, le texte d'Archimède est invisible. C'est là que la fluorescence X prend tout son sens. La peinture du XXe siècle et l'encre antique n'ont pas la même composition : en cartographiant spécifiquement le fer de l'encre, nous espérons faire apparaître le tracé d'Archimède sous la couche qui le recouvre.

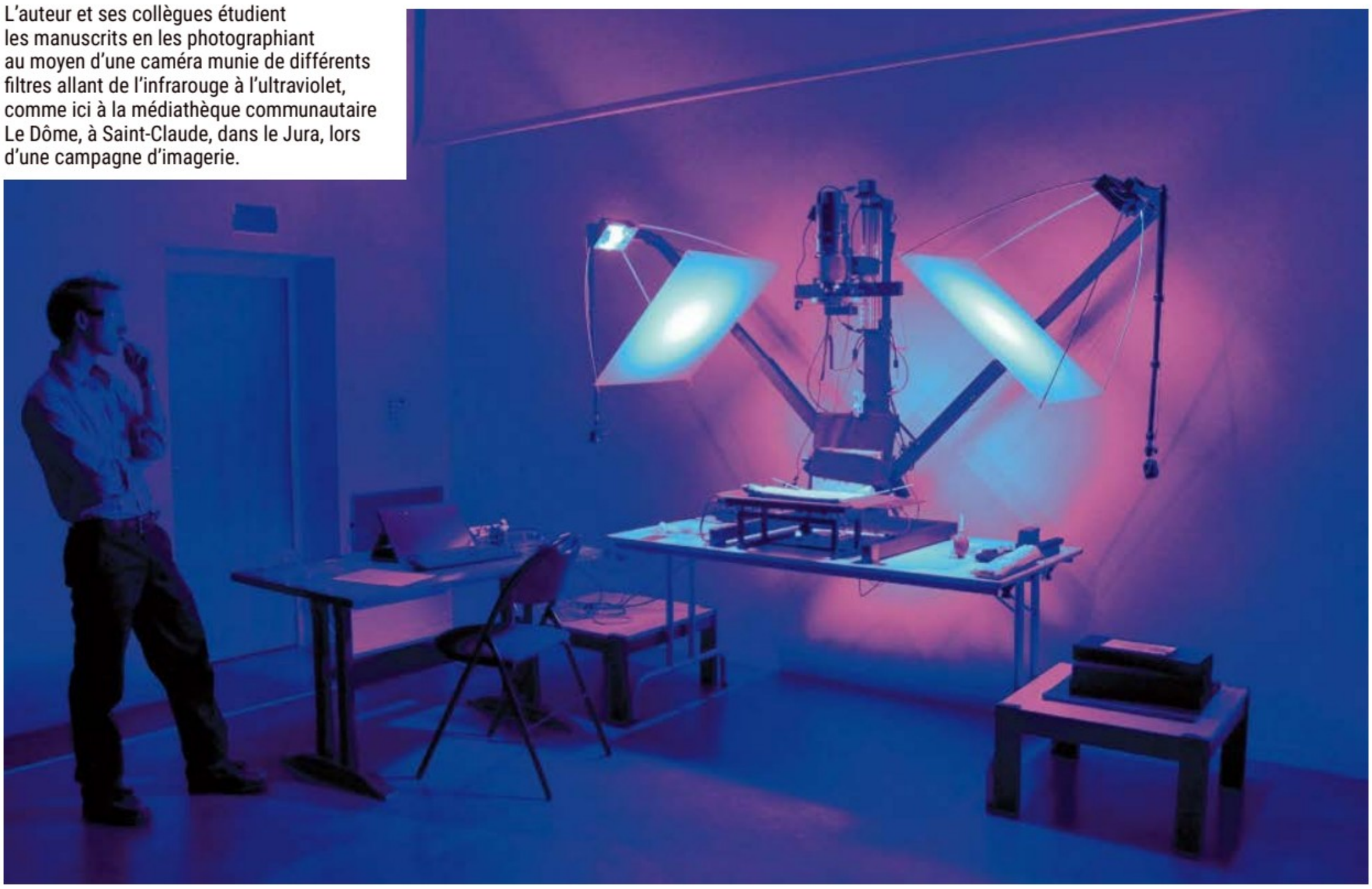
Le feuillet de Blois n'est pas le seul à voyager loin du corps du manuscrit. Au fil des siècles, le volume a perdu des feuilles, dispersées au gré des collectionneurs et des voyageurs. L'une d'elles est aujourd'hui conservée à la bibliothèque universitaire de Cambridge. Le philologue allemand Constantin von Tischendorf l'a découpée lors de l'un de ses voyages à Constantinople dans les années 1840 pour garder un échantillon du vieux palimpseste sans savoir que le texte gratté contenait les traités d'Archimède.

De quoi parle Archimède dans ce manuscrit ?

Le traité *De la sphère et du cylindre*, dont provient le feuillet de Blois, s'attaque à un problème qui résistait depuis des générations : mesurer les surfaces et les volumes courbes, alors que la géométrie grecque ne maîtrisait que les figures rectilignes. Archimède y obtient son résultat le plus célèbre : si l'on enferme une sphère dans le plus petit cylindre qui la contient, la sphère en occupe exactement les deux tiers, aussi bien en volume qu'en surface. Un rapport simple là où on n'attendait que des courbes rétives à tout calcul. Archimède en était si fier qu'il demanda, dit-on, que ce dessin fût gravé sur sa tombe.
Le passage conservé à Blois – les propositions 39 à 41 du livre I – relève d'une autre partie du traité, où Archimède prolonge sa méthode pour mesurer la surface d'un segment de sphère, c'est-à-dire d'une calotte. Pour y parvenir, il l'encadre entre deux solides de révolution, l'un inscrit, l'autre circonscrit, engendrés par une ligne brisée que l'on fait tourner autour d'un axe *(voir ci-dessous)*. En multipliant les côtés de la ligne brisée, il resserre l'encadrement jusqu'à ne plus laisser place au doute : la grandeur cherchée ne peut être ni supérieure ni inférieure au résultat annoncé.
Cette « méthode d'exhaustion » n'est pas de lui : elle remonte à Eudoxe de Cnide, un siècle et demi plus tôt, à qui Archimède rend d'ailleurs hommage dans la préface de ce traité. L'œuvre d'Eudoxe est elle-même perdue aujourd'hui, et ne se reconstitue qu'à travers des fragments dispersés chez d'autres auteurs. Là où Eudoxe avait ouvert la voie, Archimède construit l'un des ancêtres du calcul intégral, que Newton et Leibniz ne formaliseront que près de deux mille ans plus tard.



© Pour la Science



L'auteur et ses collègues étudient les manuscrits en les photographiant au moyen d'une caméra munie de différents filtres allant de l'infrarouge à l'ultraviolet, comme ici à la médiathèque communautaire Le Dôme, à Saint-Claude, dans le Jura, lors d'une campagne d'imagerie.

Deux feuillets, en revanche, manquent toujours à l'appel : ces pages figurent sur les clichés de Heiberg, mais n'ont jamais réintégré le manuscrit. Or elles contiennent des passages clés de démonstrations du mathématicien qui restent obscures dans les autres formulations qui nous sont parvenues. Les retrouver et les étudier serait donc formidable. On peut espérer qu'elles aient connu un sort comparable à celui de la page de Blois – vendues à la découpe, puis acquises quelque part, en France peut-être, par des collectionneurs privés. Si tel est le cas, elles dorment aujourd'hui, méconnaissables, dans une réserve ou une collection, attendant qu'on les rapproche des photographies anciennes.

Voilà donc un manuscrit dont l'essentiel est en mains privées, une feuille à Cambridge, une à Blois, et deux autres encore introuvables. Chacune porte, sous la liturgie ou la peinture, une parcelle d'Archimède ou d'autres textes antiques, dont certains restent à identifier. Et chacune pourrait être lue de manière plus complète avec les instruments d'aujourd'hui.

C'est là que tient l'enjeu réel. Ce qui manque aujourd'hui n'est plus la méthode, mais de réunir ces pages sous les instruments. Reprendre le manuscrit principal et les feuillets dispersés avec l'imagerie de 2026, page après page, ferait sans doute réapparaître ce qui était resté hors de portée il y a vingt-cinq ans – non parce que le texte a changé, mais parce que nos instruments ont gagné en finesse. Une part importante du palimpseste reste à lire ; les moyens, désormais, existent. En attendant, les conditions seront bientôt réunies pour que nous puissions étudier le feuillet de Blois. À suivre… ■

© Victor Gysembergh

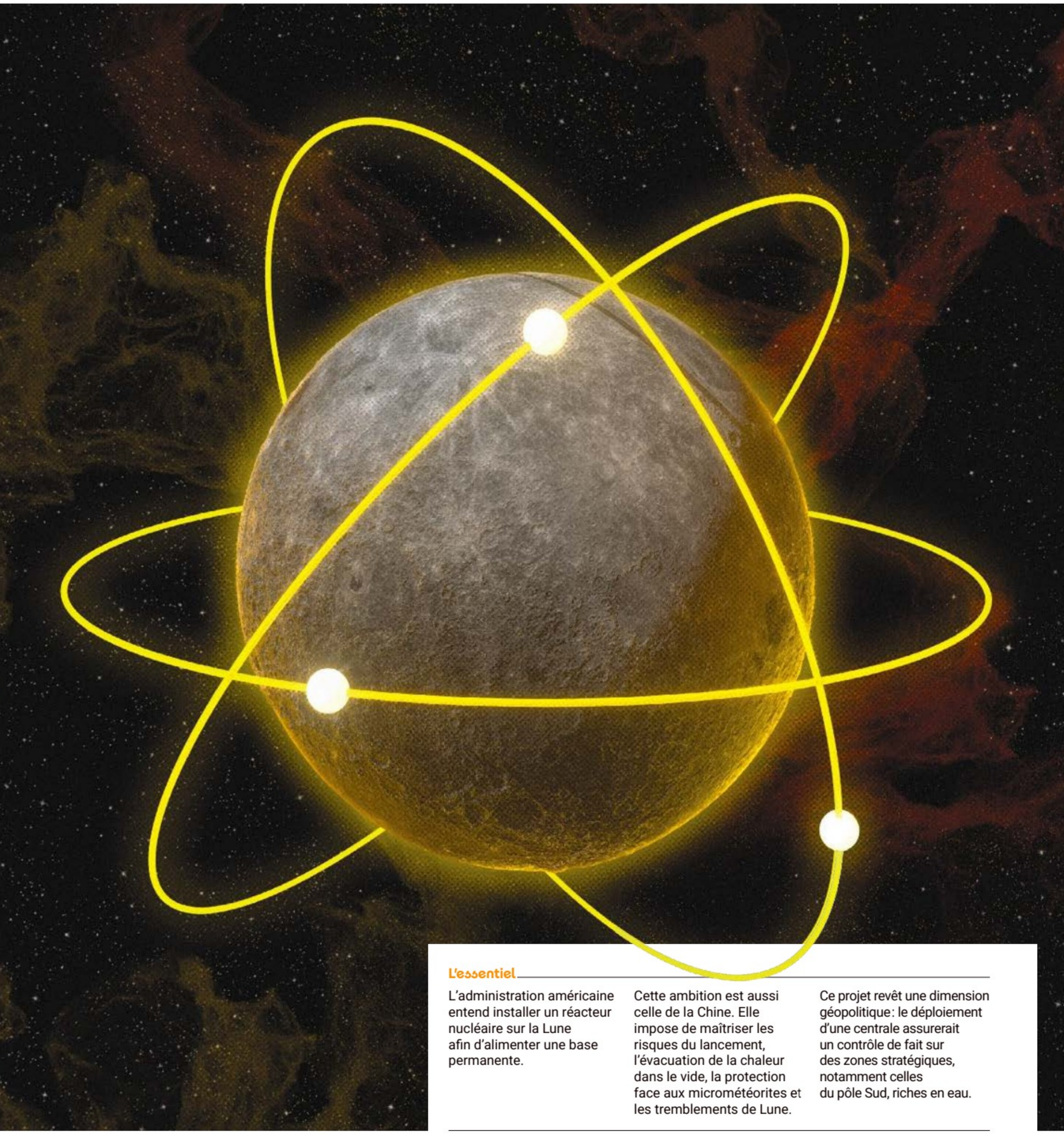
BIBLIOGRAPHIE

V. Gysembergh, A leaf from the Archimedes palimpsest rediscovered in Blois, *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik*, 2026.

E. de Cnide, *Témoignages et fragments*, rassemblés et traduits par V. Gysembergh, Les Belles Lettres, 2024.

E. Zingg et V. Gysembergh, Le palimpseste où dormait le ciel grec, *Pour la Science*, n° 543, 2022.

V. Gysembergh *et al.*, New evidence for Hipparchus'star catalogue revealed by multispectral imaging, *Journal of the History of Astronomy*, 2022.



L'essentiel

L'administration américaine entend installer un réacteur nucléaire sur la Lune afin d'alimenter une base permanente.

Cette ambition est aussi celle de la Chine. Elle impose de maîtriser les risques du lancement, l'évacuation de la chaleur dans le vide, la protection face aux micrométéorites et les tremblements de Lune.

Ce projet revêt une dimension géopolitique : le déploiement d'une centrale assurerait un contrôle de fait sur des zones stratégiques, notamment celles du pôle Sud, riches en eau.



© Tavis Coburn

Une centrale nucléaire sur la Lune ?

Robin George Andrews

Pour alimenter durablement et en quantité suffisante une future base lunaire, l'énergie solaire pourrait ne pas suffire. Les États-Unis misent donc sur un réacteur nucléaire, au risque de transformer ce défi technologique en nouvel enjeu de rivalité avec la Chine.

En 2025, moins d'un mois après avoir été nommé administrateur par intérim de la Nasa, le secrétaire américain aux Transports, Sean Duffy, a annoncé que l'agence spatiale américaine allait installer un réacteur nucléaire sur la Lune. Dans le cadre du renforcement de la sécurité nationale dans l'espace, a-t-il précisé, ce réacteur serait conçu, construit, transporté par vaisseau spatial et installé sur la surface lunaire d'ici à 2030. Pour de nombreux observateurs, cette déclaration a paru farfelue. Pourquoi vouloir installer un réacteur nucléaire sur la Lune ?

Le fait est que si les États-Unis (ou n'importe quelle nation spatiale) souhaitent établir une présence permanente sur la Lune – une station habitée capable de fonctionner pendant la longue et glaciale nuit lunaire –, l'énergie solaire ne suffira pas. À travers son programme *Artemis*, dans le cadre duquel quatre astronautes ont orbité autour de la Lune en avril dernier, la Nasa envisage de transformer le compagnon argenté de notre planète en avant-poste scientifique, en site minier et en rampe de lancement de fusées pointée vers Mars. Or le nucléaire est « la seule façon d'assurer correctement la viabilité d'une base lunaire à long terme », affirme Simon Middleburgh, codirecteur de l'Institut des futurs nucléaires de l'université de Bangor, au pays de Galles. Il n'est donc pas étonnant que la Chine et la Russie se soient associées pour installer leur propre réacteur nucléaire sur la Lune d'ici à 2035, afin d'alimenter en électricité ce qu'elles appellent la « Station internationale de recherche lunaire » – leur projet de base prévue au pôle Sud lunaire.

Si ces projets réussissent, une base lunaire alimentée par l'énergie nucléaire serait un point d'ancrage pour l'exploration du Système solaire. Mais le défi est de taille.

Katy Huff, ingénieure nucléaire à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, ancienne secrétaire adjointe chargée de l'énergie nucléaire au sein de l'administration Biden, tient à clarifier un point : l'uranium, qui alimente les centrales nucléaires sur Terre, est certes radioactif et toxique, mais il est relativement facile de s'en protéger. Il devient cependant particulièrement dangereux (et utile) lorsqu'on le bombarde de neutrons au sein d'un réacteur. L'impact provoque la désintégration de ses noyaux atomiques instables, qui émettent alors davantage de neutrons, ce qui entraîne la rupture d'autres noyaux. Tant que la réaction est contrôlée, la chaleur qu'elle produit permet de transformer un fluide (souvent de l'eau) en vapeur. Sur Terre,

cette vapeur fait tourner une turbine, qui produit de l'électricité.

Au cours de cette réaction en chaîne, une partie de l'uranium «se désintègre et se transforme en produits de fission hautement radioactifs, ce qui explique pourquoi les déchets nucléaires sont dangereux», complète l'ingénieure. Mais comme cette cascade nucléaire peut se poursuivre pendant très longtemps, c'est une source d'énergie particulièrement intéressante, susceptible d'alimenter une base sans ravitaillement pendant des années.

Les RTG, des précédents insuffisants

Le concept de l'énergie nucléaire dans l'espace n'est pas nouveau. Dès les années 1960, les États-Unis et l'Union soviétique ont envoyé dans l'espace de nombreux générateurs thermoélectriques à radio-isotopes (RTG) pour alimenter toutes sortes d'appareils, des satellites en orbite terrestre aux expériences scientifiques de l'ère *Apollo* sur la Lune, en passant par les *rovers* martiens et les sondes spatiales lointaines. Le plutonium, cousin chimique redoutable de l'uranium, était souvent utilisé dans ces dispositifs. Les RTG ne sont toutefois pas des réacteurs nucléaires: nulle réaction de fission à mettre en œuvre, la radioactivité des isotopes fournit spontanément de la chaleur, ensuite convertie en électricité.

Mais un RTG ne conviendrait pas aux besoins d'une base lunaire, où il est nécessaire de disposer d'une source de chaleur constante pendant la nuit et d'un moyen d'évacuer cette chaleur lorsque le mercure grimpe en flèche pendant la journée lunaire. Quant à extraire la précieuse eau du sol lunaire – destinée à hydrater les astronautes et les cultures et, surtout, à être séparée par électrolyse en hydrogène et en oxygène gazeux pour fabriquer du carburant de fusée –, cela demande de très grandes quantités d'électricité.

Voilà qui explique que, tant sous la première administration Trump que sous celle de Biden, la Nasa et ses partenaires industriels ont travaillé sur les plans d'un réacteur lunaire de 40 kilowatts. Une telle puissance suffirait à alimenter un immeuble de bureaux, ce qui correspondrait à peu près à une base lunaire prototype, selon les experts.



En janvier 2026, l'actuel administrateur de la Nasa, Jared Isaacman, a réaffirmé l'intention de déployer une centrale à fission nucléaire sur la Lune. Et, en mars, il a annoncé que la Nasa lancerait vers Mars, d'ici à la fin 2028, le premier vaisseau spatial interplanétaire équipé d'une propulsion électrique nucléaire: le *Space Reactor-1 Freedom*. Cette mission a pour but de tester la technologie de la fission nucléaire dans l'espace lointain avant que les États-Unis n'installent une centrale nucléaire à la surface de la Lune.

Pour envoyer un réacteur nucléaire sur notre satellite naturel, il faut d'abord l'embarquer à bord d'une fusée. «Assurer sa sécurité lors du lancement est l'un des enjeux majeurs», souligne Lindsey Holmes, experte en technologie nucléaire spatiale et vice-présidente des projets avancés chez Analytical Mechanics Associates, une entreprise aérospatiale basée en Virginie.

Les États-Unis ont lancé le premier réacteur nucléaire dans l'espace, le réacteur expérimental Systems for Nuclear Auxiliary Power 10A, en 1965. Ce boîtier de 600 watts, de la taille d'une corbeille à papier, n'a produit de l'électricité que pendant 43 jours

L'AUTEUR



Robin George Andrews
volcanologue et journaliste scientifique, basé à Londres; il a notamment publié *How to Kill an Asteroid* (W. W. Norton, 2024)

© George Rinhart/Corbis Historical/Getty Images



Le « System for Nuclear Auxiliary Power » (Snap) 10A, lancé en 1965, fut le premier réacteur nucléaire envoyé dans l'espace. La chaleur produite par le réacteur *(en haut)* était transformée en électricité grâce à la structure conique.

Cet article est une adaptation de « A Nuclear Moon », paru dans *Scientific American* en juin 2026.

avant qu'un régulateur de tension ne tombe en panne. Il est toujours en orbite autour de la Terre aujourd'hui et reste la seule tentative américaine d'exploitation d'un réacteur nucléaire hors de la planète.

L'Union soviétique, en revanche, a propulsé plus d'une vingtaine de réacteurs nucléaires au-delà de l'atmosphère terrestre. La plupart, souvent utilisés pour alimenter des satellites espions, ont été lancés sans incident. L'un d'entre eux, cependant, « a répandu des matières radioactives partout au Canada », rappelle Lindsey Holmes, offrant ainsi une leçon magistrale et brutale sur ce qu'il ne faut pas faire.

Le vaisseau transportant ce réacteur, le *Cosmos 954*, a commencé à s'écarter de sa trajectoire environ trois mois après son lancement en septembre 1977. Opérateurs soviétiques comme responsables américains ont remarqué cette anomalie, mais les Soviétiques ont d'abord gardé le silence. Leurs ingénieurs ont, en vain, tenté d'éjecter le réacteur nucléaire actif du satellite dans l'espace avant que l'engin ne retombe sur Terre. Finalement, les Soviétiques ont avoué la vérité à leurs homologues américains – tout en affirmant que le *Cosmos 954* serait incinéré sans conséquence lors de sa rentrée atmosphérique, désormais inévitable.

Les autorités américaines se sont ouvertement demandé comment réagir face à un réacteur nucléaire en activité retombant sur Terre. Gus Weiss, alors assistant spécial du secrétaire à la Défense, a déclaré à l'époque qu'« une rapide consultation de la littérature ne révélait aucune réponse-type, ni même aucune question de ce genre ». Finalement, en janvier 1978, *Cosmos 954* a répandu ses débris mortels sur une zone de presque 40 000 kilomètres carrés des Territoires du Nord canadiens, relativement peu peuplés.

Crash radioactif

Au cours d'une opération conjointe canado-américaine baptisée *Morning Light*, des agents vêtus de combinaisons de protection ont ratissé ce royaume glacé à la recherche de l'épave brisée du vaisseau. Certaines parties du satellite n'étaient pas très radioactives, mais d'autres fragments ont fait sonner les dosimètres individuels des agents comme « un champ de grillons », selon un membre de l'équipe. Miraculeusement, ce crash radioactif n'a coûté la vie à personne – et l'Union soviétique a versé au Canada 3 millions de dollars canadiens en guise d'excuses. Une leçon claire s'est dégagée de cette pagaille autour de *Cosmos 954* : ne pas mettre en marche un réacteur nucléaire lunaire avant qu'il n'ait atterri sur la Lune. « Tant qu'on ne l'a pas mis en marche, il n'y a pas de déchets nucléaires à l'intérieur », insiste Katy Huff.

Idéalement, un réacteur lunaire devrait être lancé au-dessus de l'océan, car un amerrissage serait une issue bien plus favorable que de voir un réacteur nucléaire en perdition s'écraser sur une zone densément peuplée. Cet épisode a également révélé qu'il est judicieux d'opter pour un type de combustible limitant le risque de dispersion. C'est le cas du « Triso », un assemblage de pastilles, composées d'une masse d'uranium, de carbone et d'oxygène, emprisonnée dans une enveloppe ultrarésistante en carbone et en céramique. Non seulement elles peuvent endurer des impacts à grande vitesse sans subir le moindre dommage, mais on pourrait les recouvrir de lave sans que cela n'ait le moindre effet.

Une catastrophe nucléaire n'en resterait pas moins possible… sur la Lune. Imaginons qu'un réacteur nucléaire surchauffe et provoque la toute première fusion du cœur d'un réacteur sur la Lune. La majeure partie du combustible fondu resterait confinée sur le site. Mais le rayonnement émis par le réacteur endommagé ne constituerait pas une préoccupation majeure (en réalité, le rayonnement solaire et cosmique sur la Lune est bien plus préoccupant pour la santé des astronautes). La défaillance de la centrale serait le problème le plus grave, d'autant plus si elle se produit durant les deux semaines où la surface lunaire est en tout point dans l'obscurité. Dans des conditions aussi froides, les systèmes de batteries ne pourraient stocker qu'une quantité minime d'énergie avant de s'épuiser. Les astronautes se retrouveraient alors dans une situation très critique « car l'ensemble de leur système de survie tomberait en panne », explique Nicholas Schmerr, sismologue planétaire et géophysicien à l'université du Maryland, à College Park.

Les experts s'attendent cependant moins à un « Tchernobyl lunaire » qu'à l'action destructrice de l'environnement lunaire, capable de mettre le réacteur hors d'état d'usage.

Un réacteur lunaire devra fonctionner différemment de ceux qu'on a installés sur Terre. Il ne pourra probablement pas utiliser l'eau, ni comme fluide de refroidissement, ni pour produire de la vapeur entraînant une turbine afin de produire de l'électricité. « L'eau pose beaucoup de problèmes dans l'espace », explique Katy Huff. Elle ne s'écoule pas correctement en conditions de faible gravité, et les variations de température extrêmes sur la Lune pourraient provoquer une expansion violente de la vapeur ou le gel de l'eau, au risque de briser les conduites. Il serait plus judicieux d'utiliser de l'air,

acheminé depuis la Terre, pour absorber la chaleur et la transférer vers la turbine. La conception serait plus délicate, mais reste envisageable.

Une centrale enterrée

Trouver une alternative à l'eau pour refroidir un réacteur nucléaire – un impératif, la chaleur étant produite en excès – est beaucoup plus problématique, du fait de l'absence d'atmosphère. Comment empêcher la surchauffe dans le vide ? Pour Katy Huff comme pour Simon Middleburgh, la solution passe par des sortes de voiles – des structures portant des ailettes sur une très large surface, rayonnant la chaleur dans l'espace.

L'idée semble bonne, à ceci près que des micrométéorites (des fragments rocheux de la taille d'un caillou) percutent notre satellite naturel à la vitesse de balles hypersoniques. « La Lune est constamment bombardée par des matériaux extraterrestres », rappelle Nicholas Schmerr, et aucun bouclier atmosphérique ne les arrête. Si plusieurs de ces météorites perforent les ailettes du radiateur, la centrale ne pourra plus se refroidir correctement.

Toute centrale nucléaire installée pourrait être utilisée comme une sorte de drapeau radioactif, permettant de revendiquer des terrains jugés précieux, en particulier d'éventuelles étendues riches en eau

Les astronautes en mission sur la Lune pourraient néanmoins atténuer cette menace en enfouissant le réacteur nucléaire et ses dépendances sous terre. Sachant qu'il ne serait pas impératif de creuser : ils pourraient simplement utiliser l'un des nombreux anciens tubes de lave parcourant le proche sous-sol de la Lune.

Cela ne suffira pas, cependant, à éviter l'ultime défi posé par l'environnement lunaire : les tremblements de Lune. Ils sont loin d'être aussi puissants que les secousses tectoniques terrestres : les plus importants détectés par les sismomètres installés à l'époque des missions *Apollo* affichaient une magnitude comprise entre 3 et 4. Néanmoins, une centrale nucléaire ne devrait pas être implantée à proximité immédiate d'une faille potentiellement active, car même une secousse modérée pourrait renverser des structures de grande hauteur et causer des dégâts. La composition géologique de la Lune confère par ailleurs aux tremblements lunaires une persistance surprenante par rapport aux séismes terrestres ; les secousses durent jusqu'à plusieurs heures. « Ce n'est pas un aspect auquel on pense habituellement lors de la construction de structures sur Terre », souligne Nicholas Schmerr.

Si l'infrastructure n'est pas correctement renforcée contre les risques sismiques lunaires, trois scénarios sont possibles : le réacteur pourrait se briser et cesser de fonctionner ; le combustible pourrait être secoué et se retrouver dans une configuration inhabituelle, qui ralentirait la réaction de fission ; ou bien cette nouvelle configuration accélérerait la réaction – jusqu'à provoquer une surchauffe de la centrale, imposant son arrêt avant qu'elle ne se transforme en une dangereuse lave incandescente.

Malgré l'expérience de la Nasa et de ses partenaires industriels, il est impossible de recréer parfaitement l'environnement lunaire sur Terre pour garantir qu'un réacteur y résisterait sans faille. Reproduire la gravité lunaire en laboratoire relèverait de la sorcellerie, et bien que les chambres à vide puissent simuler les températures extrêmes de la Lune et l'absence d'atmosphère, « les États-Unis ne disposent pas d'une installation permettant de faire fonctionner un réacteur à l'intérieur d'une chambre à vide », détaille Sebastian Corbisiero, directeur technique du programme de réacteur spatial au sein du département américain de l'Énergie.

Malgré les nombreux obstacles à surmonter, de nombreux experts se disent favorables à l'installation d'un réacteur nucléaire sur la Lune. C'est le cas de Bhavya Lal, professeuse de politique spatiale à l'école de politique publique du Rand, et ancienne responsable technologique par intérim et administratrice adjointe chargée de la technologie, de la politique et de la stratégie à la Nasa. Mais si elle est enthousiaste à l'idée que les États-Unis aient une chance d'être les premiers à y parvenir, elle assure aussi passer beaucoup de temps à réfléchir à « tout ce que la Nasa pourrait mal faire » au cours de ce processus. Parmi ces écueils figurent ses relations avec la Chine, une nation spatiale également désireuse d'établir une présence soutenue par l'énergie nucléaire au pôle Sud lunaire.

Zones interdites

On peut imaginer que la Chine et les États-Unis disposent un jour chacun de vastes zones au pôle Sud lunaire. Les deux pays coordonneraient certaines opérations et partageraient une multitude de découvertes scientifiques, tout en gardant une

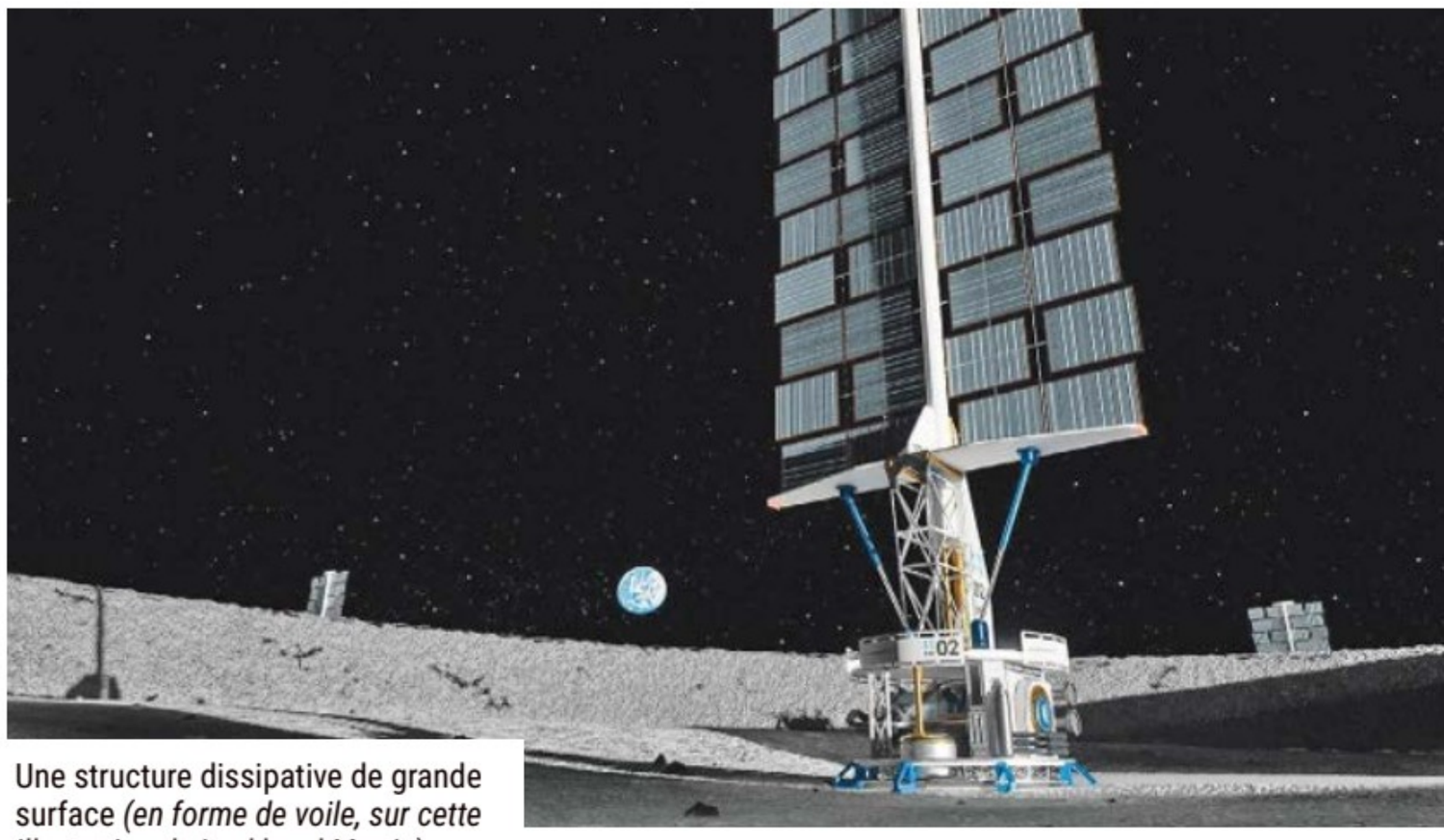
distance respectueuse l'un par rapport à l'autre. « C'est le scénario le plus favorable », selon Bhavya. Mais ce n'est pas le plus réaliste. La Chine et les États-Unis sont des rivaux géopolitiques et des concurrents dans cette nouvelle course à la Lune. « Il y a un nouveau territoire, et il n'appartient à personne, explique l'experte. Celui qui y arrive le premier dicte les règles. »

Le traité des Nations unies sur l'espace extra-atmosphérique, signé en 1967, stipule que celui-ci « ne peut faire l'objet d'une appropriation nationale par revendication de souveraineté, par voie d'utilisation ou d'occupation, ou par tout autre moyen ». Personne n'a à ce jour le droit de posséder légalement de territoire sur la Lune. Mais dans sa déclaration d'août 2025, Sean Duffy a fait remarquer que des centrales nucléaires pourraient servir à définir une « zone interdite » aux autres parties : « Attention, équipements sensibles et dangereux – ne vous approchez pas ! »

L'établissement d'une base conférerait un contrôle *de facto* sur une partie précise de la Lune. Mais les centrales nucléaires sont susceptibles d'être installées n'importe où, et à n'importe quelle fin, loin de tout astronaute ; la Chine et les États-Unis auraient donc toute latitude pour les déployer comme autant de drapeaux radioactifs, et par là revendiquer, en marge des lois existantes, tout terrain jugé précieux – en particulier toute étendue riche en eau.

C'est pourquoi « nous ne voulons pas manquer d'être les premiers à installer un réacteur nucléaire sur la Lune », justifie Bhavya Lal, avant d'ajouter que « les États-Unis devraient être les premiers à s'y poser, afin d'établir les normes. » Idéalement, celles-ci imposeraient une installation pacifique de réacteurs nucléaires conçus pour être sûrs. Le déploiement de chaque réacteur devrait également être clairement communiqué à l'avance aux voisins présents sur la surface lunaire. « Nous devons être capables de dialoguer avec nos amis comme avec nos adversaires », complète la spécialiste.

Dans le climat politique actuel, il est possible toutefois que les agissements clandestins l'emportent. Or la méfiance est un terreau fertile pour les erreurs évitables. Et si la situation dégénère en confrontation, les centrales nucléaires ne seront peut-être pas les seuls marqueurs territoriaux à disposition des nations spatiales. Le déploiement d'armes nucléaires dans l'espace est illégal en vertu du traité sur l'espace extra-atmosphérique. Néanmoins, certains analystes estiment que la Russie y travaille. Hélas le traité n'est pas juridiquement contraignant ; il s'apparente



Une structure dissipative de grande surface *(en forme de voile, sur cette illustration de Lockheed Martin)* serait indispensable, pour évacuer la chaleur de la centrale.

© Lockheed Martin

davantage à une ligne directrice. « Si quelqu'un veut agir de manière malveillante, il n'y a aucun moyen de l'en empêcher », souffle Bhavya Lal.

Imaginons toutefois un avenir dans lequel quelqu'un établirait une base lunaire alimentée en toute sécurité par le tout premier réacteur nucléaire sur la Lune. Voilà qui ouvrirait la possibilité de créer et d'entretenir un petit village pour les astronautes qui marcheront à nouveau à la surface de notre satellite. Avec le temps, cette base deviendrait un pôle d'ingénierie et un dépôt de carburant – un tremplin pour atteindre la planète aux teintes ocre située un peu plus loin.

Les États-Unis entendent être les premiers à réaliser ce rêve. La Chine aussi. Espérons que, dans leur course à la victoire, ils œuvreront à leurs ambitions nucléaires avec prudence. Mais quels que soient l'attrait de cette perspective et ce qu'elle laisse entrevoir dans le futur, une question devrait rester présente à l'esprit de tous : « Que se passera-t-il si cela tourne mal ? » ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Lal et R. M. Myers, A Strategy for Building Space Nuclear Systems That Fly, *Issues in Science and Technology*, 2025.

L'habitabilité est la condition de tous nos droits et libertés

La dignité a nommé ce qu'on ne doit jamais faire à un humain, le «principe habitabilité» nomme ce qu'on ne doit jamais faire à un monde.



Avec notre questionnement sur l'écocide, nous avons compris qu'il n'y a pas de grand crime sans valeur protégée

BAPTISTE MORIZOT
est philosophe, enseignant-chercheur à l'université d'Aix-Marseille.



> La protection de l'habitabilité est un enjeu absolu, car la postérité, la prospérité de l'humanité en dépendent

LAURENT NEYRET
est professeur de droit à Sciences Po, où il enseigne « Le droit face à l'urgence écologique », après avoir été directeur de cabinet du président du Conseil constitutionnel Laurent Fabius de 2018 à 2025.

Comment vous, un philosophe, et vous, un juriste, vous êtes-vous rencontrés?

Laurent Neyret: En 2016, nous étions invités à la pré-COP22, à Marrakech, pour préparer la transition avec la COP21, qui s'était tenue en France l'année précédente. En tant que représentants de nos sciences respectives, il s'agissait d'exprimer nos points de vue. Nous ne nous connaissions pas, mais en entendant Baptiste, bien qu'il soit philosophe et que je sois juriste, j'ai senti une communauté d'esprit, une fraternité intellectuelle, sur les enjeux du vivant.

À la suite de l'accord de Paris, nous vivions un grand moment d'optimisme, mais en tant que juriste, je percevais un décalage profond entre les besoins de la réalité et le droit existant. La pensée de Baptiste résonnait avec ce sentiment d'injustice et j'ai pressenti qu'elle portait en elle les moyens d'y répondre.

Baptiste Morizot: Laurent m'a tout de suite demandé de réfléchir avec lui aux moyens de résoudre ces problèmes de droit, alors que j'étais relativement profane sur ces questions. Se sont ensuivis dix ans de dialogue intense, de tâtonnements, d'impasses… et enfin, il y a un an et demi, la percée théorique a eu lieu. Nous avons eu le sentiment de trouver la réponse à l'énigme qui nous animait; pourquoi le droit plafonne-t-il dans la protection des conditions de la vie au moment où ces enjeux deviennent existentiels?

Quel était justement votre constat?

L. N.: Pour l'illustrer, revenons sur l'histoire du concept d'écocide. À la fin des années 2010, j'ai été l'un des initiateurs en France de la démarche visant à faire reconnaître ce crime dans le droit. Je m'appuyais sur le précédent du préjudice écologique dont j'avais pu accompagner la reconnaissance dans l'affaire du naufrage de l'*Erika*. Mais si l'écocide a connu un certain succès citoyen et médiatique, il n'a pas reçu la consécration juridique que la puissance du mot laissait espérer. Avec Baptiste, nous avons cherché à comprendre pourquoi… et nous avons buté longtemps.

Jusqu'à la solution que vous proposez, une « valeur protégée ». De quoi s'agit-il et comment y êtes-vous parvenus?

B. M.: Avec ce questionnement sur l'écocide – un crime pensé par analogie avec le génocide – nous avons compris qu'il n'y a pas de grand crime sans valeur protégée, une valeur cardinale de très haute importance dans la hiérarchie des normes.

© Renaud Monfourny (à gauche); © L. Neyret (à droite)



Par exemple, le crime contre l'humanité protège la dignité. Et l'écocide, que protège-t-il ? L'environnement ? Ça n'est pas suffisamment fort. Ça ne fonctionne pas. Et nos tentatives, avec le lexique à disposition, se soldaient par des échecs. C'est là qu'a émergé la prise de conscience : le droit n'a pas nommé la valeur protégée qui serait à la hauteur des enjeux écologiques et climatiques de notre siècle. L'écocide n'est pas le seul en cause : c'est tout le droit de l'environnement, et plus encore le droit tout entier.

L. N. : Les textes qui réglementent les activités en lien avec l'environnement fonctionnent en silos. Ils fixent des taux d'émissions, des seuils de pollution, mais ils ne prennent pas en compte la complexité des écosystèmes, le tissu fin des interdépendances. C'est une faiblesse intrinsèque quand, par exemple, un juge doit statuer sur une autorisation de pesticides : dans la balance, il a d'un côté, la propriété liée à la liberté d'entreprendre et, de l'autre, la protection de l'environnement, qui s'appuie sur un droit dont nous venons de souligner les failles. Il y a une dissonance naturelle, alors que, clairement, au regard du droit international et de la Constitution, les deux intérêts sont d'égale valeur.

B. M. : Avec un tel droit en silos – sans même parler des effets cocktail mis en évidence par l'écotoxicologie, qui ne sont pas pris en compte par la loi – un juge peut avoir la conscience morale très claire qu'une atteinte gravissime a été commise, mais il n'a aucun texte à lui opposer. Un magistrat nous confiait récemment que, dans ces affaires, il lui manquait un socle théorique pour établir que la valeur en jeu pesait au moins autant que celles des dossiers de droit commun.

L. N. : En lisant le Code pénal, on découvre en négatif les valeurs que notre société tient pour cardinales : la propriété, derrière l'incrimination du vol ; la vie, derrière celle de l'homicide ; la dignité, derrière le crime contre l'humanité…

Rétrospectivement, toutes les grandes branches du droit ont été façonnées en partant de la valeur pour aller vers les textes. Alors que pour l'environnement, nous n'avons qu'un catalogue de règles pléthoriques, des milliers de textes répartis dans des dizaines de codes… sans valeur boussole. Il y a là un problème sur lequel nous avons voulu travailler, et que l'on propose de résoudre avec le concept d'habitabilité.

C'est en effet le nom que vous donnez à cette valeur protégée, le « principe habitabilité ». Comment la définir ?

B. M. : Dans notre livre, nous la définissions ainsi : « La propriété de tout milieu à toute échelle spatiotemporelle dans lequel les conditions d'existence et de développement de chacune des formes de vie sont produites par l'activité interdépendante de la diversité de la vie. » Dans une version moins technique, on peut dire que l'habitabilité, c'est tout ce que fait la vie pour que la vie puisse continuer.

Cette idée d'habitabilité met donc l'accent sur l'interdépendance. Comment le droit, que l'on imagine souvent fonctionner sur des liens simples de cause à effet, est-il armé pour l'appréhender ?

L. N. : Cela pose d'abord la question de la certitude. On imagine volontiers que le droit, pour être juste, devrait reposer sur des certitudes absolues. Mais c'est une erreur. Il existe un droit de l'incertain né avec la révolution industrielle, amplifié par la révolution biotechnologique. Plus récemment, un droit du complexe a émergé. On le voit quand le Code civil définit le « préjudice écologique » comme « une atteinte non négligeable aux éléments ou aux fonctions des écosystèmes ou aux bénéfices collectifs tirés par l'homme de l'environnement » ; ou lorsque le préambule de la Charte de l'environnement énonce que « l'avenir et l'existence même de l'humanité sont indissociables de son milieu naturel ». Dans les deux cas, le droit nomme déjà l'interdépendance.

© Stephane Marc / Marine Nationale / AFP



Le naufrage du pétrolier *Erika* en décembre 1999, au large de Penmarc'h, en Bretagne, a conduit à la reconnaissance du préjudice écologique par la justice française.

Des décisions récentes vont également dans ce sens. Ainsi, dans son avis du 3 juillet 2025, la Cour interaméricaine des droits de l'homme (l'équivalent pour les Amériques de la Cour européenne des droits de l'homme) décide que «du point de vue le plus éminent du droit, les comportements qui nuisent de manière irréversible à l'équilibre vital des écosystèmes interdépendants qui rendent viable la survie des générations présentes sur une planète habitable sont interdits». La Cour internationale de justice, dans un avis historique du 23 juillet 2025 rendu à l'unanimité de ses quinze juges, affirme quant à elle que tous les États ont le devoir de prévenir les dommages significatifs causés au système climatique et, le cas échéant, d'en réparer les conséquences. Ici, un pas considérable est franchi, au plus haut niveau du droit.

Qu'est-ce que cela dit? En un mot: la protection de l'habitabilité est un enjeu absolu, car la postérité, la prospérité de l'humanité dépendent des interdépendances entre toutes les formes de vie. L'habitabilité est la condition de tous nos droits et libertés.

Il est intéressant de voir que les juges qui ont adopté des décisions à l'unanimité sont issus de différentes traditions et d'autant de droits distincts. Au-delà de cette diversité, il y a une sorte d'alliance, d'alignement autour de cette notion partagée, l'habitabilité, appelée à devenir une valeur cardinale du droit.

Un mouvement dans le sens que vous appelez de vos vœux semble donc enclenché, c'est plutôt une bonne nouvelle, non?

L. N.: Oui absolument, mais nous ne sommes pas naïfs: le mouvement que vous évoquez, souterrain, est certes fort et empreint d'une effervescence inconsciente, mais il reste dispersé, éclaté... Il faut donc passer à la vitesse supérieure.

B. M.: Pour compléter, il est intéressant de souligner que la très grande difficulté des enjeux écologiques et climatiques tient au fait que le droit est construit *a priori* pour faire justice dans des affaires qui obéissent aux règles du théâtre classique; unité de lieu, unité de temps, unité d'action. Un criminel commet une atteinte ici, sur cette personne, à ce moment-là.

En vérité, l'une des originalités du «capitalocène» est qu'il a bouleversé le régime causal de nos effets sur le monde. Aujourd'hui, les effets de nos activités sont diffus, les causalités sont transitives, et la possibilité d'articuler un acte, une intention à un effet devient beaucoup plus difficile.

L'un des immenses enjeux est justement d'armer le droit pour qu'il soit capable de prendre en charge ce genre de causalité. Et aujourd'hui, des avancées extraordinaires ont lieu dans ce domaine.

Comme le font en climatologie les sciences de l'attribution?

B. M.: C'est exactement le même problème, mais avec une solution différente. Nous prenons un autre chemin, complémentaire, qui consiste à aller mobiliser un objet juridique qui a pour vocation de traiter de la complexité, précisément parce qu'il ne relève pas du droit réglementaire en silos.

Et c'est là que s'exprime la puissance d'une valeur protégée. L'habitabilité, comme la dignité, n'a pas besoin d'une définition quantifiée pour être reconnue. Elle donne au juge une marge de manœuvre pour prendre en charge des atteintes qui n'ont pas la forme d'évidence causale simpliste; celle-là même sur laquelle s'appuient aujourd'hui les lobbies de la destruction pour échapper à leurs responsabilités.

Parce qu'eux, de leur côté, ont tendance à profiter de la complexité, de la multitude de causes, de l'imbrication des faits... pour y trouver autant de failles à leur mise en cause?

L. N.: Absolument. C'est bien que l'état actuel du droit ne fait pas justice aux intérêts en jeu. Et à cet égard, je préciserais deux choses. D'abord,

nous avons beaucoup échangé avec des juges de cours suprêmes… L'un d'eux nous a fait part de son insatisfaction : lorsqu'il doit se prononcer sur une affaire locale et de court terme – par exemple un projet immobilier qui risque de détruire l'habitat d'une espèce endémique – il déplore de ne pas pouvoir regarder les choses sur un espace plus grand, sur une temporalité plus longue. Pour lui, le « principe habitabilité », en tout cas une vision intégrant les interdépendances dans le droit, permettrait de faire davantage œuvre de justice.

Deuxième élément : longtemps, dans les affaires climatiques ou de pollutions diffuses qui mettent en jeu des effets cocktail, deux types d'arguments étaient avancés. Le premier consistait à se cacher derrière le paravent des autorisations administratives pour exiger l'immunité. Le second prenait la forme de la « goutte d'eau dans l'océan » : « Je ne suis qu'un parmi d'autres, vous ne pouvez donc pas m'imputer de responsabilité. » Après un moment d'hésitation, les juges ont perçu que ces logiques menaient à des injustices. J'ai été très marqué par exemple par l'arrêt de la Cour européenne des droits de l'homme du 9 avril 2024. Dans cette affaire, les juges ont condamné la Suisse pour manque d'ambition climatique en rejetant l'argument de la goutte d'eau : dilution de responsabilité ne vaut donc pas immunité !

De même – puisque nous parlions des sciences de l'attribution – le 28 mai 2025 la Cour d'appel de Hamm, en Allemagne, a reconnu le principe d'une responsabilité climatique mondiale des entreprises énergétiques proportionnée à leurs émissions. Pour les juges, la contribution de chaque émetteur peut être quantifiée et il est possible de lui imputer une quote-part de responsabilité sans qu'il soit besoin d'établir une causalité exclusive.

Dans cette affaire, un agriculteur péruvien avait agi contre l'énergéticien allemand RWE pour obtenir une prise en charge des mesures de protection de sa propriété menacée d'inondation par la fonte d'un glacier. Le demandeur n'a pas obtenu gain de cause parce qu'en l'espèce le risque d'inondation a été jugé insuffisant. À l'université d'Oxford, des juristes travaillent au quotidien avec des spécialistes de l'attribution. C'est le signe que des scientifiques, des juges, des avocats… sont en train d'adopter une grammaire commune pour répondre aux enjeux écologiques et climatiques auxquels nous devons faire face.

À nouveau, j'entends que la justice et beaucoup de ses représentants se sont emparés de cette question. En fin de compte, avec cette valeur protégée, vous leur apportez une clé pour guider et asseoir leurs décisions.

L. N. : Citoyens, juges, avocats, diplomates, élus, dirigeants d'entreprises, professeurs, activistes… doivent en effet s'approprier la notion d'habitabilité.

À Sciences Po, nous avons créé une *task force* internationale qui réunit ces parties prenantes issues de toutes les régions du monde avec deux objectifs : premièrement, cartographier la manière dont les enjeux d'interdépendances du vivant sont pris en compte par le droit ; deuxièmement, élaborer des outils juridiques de transformation – évaluations, rapports d'expertise, projets de loi, plans locaux d'habitabilité, clauses contractuelles adaptées…

Avec l'espoir de susciter un « moment Nuremberg ». Le 8 août 1945, la Charte instituant le tribunal de Nuremberg a consacré une nouvelle catégorie de crimes – les crimes contre l'humanité – reconnaissant du même coup la dignité comme valeur cardinale du droit. Depuis, la dignité a prospéré dans toutes les branches du droit : bioéthique, droit du travail, droit médical, procédure pénale, droit des personnes détenues, droit des étrangers… C'est à ce même mouvement d'ensemencement pluriel que nous appelons avec l'habitabilité pour hisser le droit à la hauteur des enjeux.



L'agriculteur péruvien Saul Luciano Lliuya (ici devant le lac Palcacocha, à 4 650 mètres d'altitude) avait poursuivi en justice l'énergéticien allemand RWE pour qu'il prenne en charge la protection de sa propriété menacée d'inondation par la fonte d'un glacier.

© Luka GONZALES / AFP

Ne retrouve-t-on pas l'appel de Naomi Klein dans *Tout peut changer* à fédérer l'ensemble des initiatives qui ont éclos de par le monde pour lutter plus efficacement contre la dégradation de l'environnement?

B. M.: Oui, à une nuance près. Ici, il y a une force de la nomination en droit qui permet, paradoxalement, d'être très ouvert à l'inventivité plurielle. Pas besoin de créer un front, une sorte de coalition où chacun s'alignerait sur un programme, un agenda. Cette clé conceptuelle, et surtout ce statut juridique particulier – la valeur protégée – permettent, et c'est fascinant, une appropriation par les différentes cultures juridiques, par les droits coutumiers et les droits autochtones les plus divers. On touche à quelque chose d'universalisable, où la dégradation des conditions de la vie porte atteinte à toutes les valeurs, quelle que soit la culture dont elles sont le socle.

L. N.: On peut aussi utiliser ton expression, «l'humanisme relationnel». Comme la dignité, même si certains la foulent aux pieds, l'habitabilité doit être protégée, partagée, partout et par tous. Et c'est pour ça qu'on parle de «valeur universalisable». Ce terreau commun est un amplificateur de force. Cette valeur permet de régler les dissonances. À la COP de Belém, les représentants des pays du Sud à qui nous avions présenté notre proposition nous ont répondu: «On vous suit!»

Comment s'articulent votre réflexion et le «principe habitabilité» avec le mouvement dit «des droits de la nature»?

B. M.: En un sens, on pourrait dire qu'il y a un constat partagé: le droit plafonne; mais nous avons un autre diagnostic pour l'expliquer. Selon nous, la cause majeure de ce plafonnement est l'absence de valeur protégée. Après, notre proposition peut servir les droits de la nature dans les contextes où c'est culturellement possible et significatif. Plus largement, le principe habitabilité pourrait nourrir l'inventivité juridique aussi bien sur la question des droits de la nature que sur celles des communs, du patrimoine… et même celle plus traditionnelle des milieux, des habitats, des espèces.

L. N.: Il y a en effet un point de départ commun, ce sentiment d'injustice, qui donne naissance à un foisonnement de tentatives pour s'en sortir, et le mouvement des droits de la nature participe de cette mobilisation. Mais il serait simpliste de penser que le statut de personne résout tout. La reconnaissance de la qualité de sujet de droit, à la nature dans la Constitution de l'Équateur, à la lagune Mar Menor en Espagne, au fleuve Whanganui en Nouvelle-Zélande, au Gange et à la Yamuna en Inde n'a pas permis de transformer radicalement l'état général de l'environnement. À l'inverse, des leviers peuvent être mobilisés à droit constant. Je pense à la forêt de Białowieża, en Pologne, que Baptiste connaît bien. En 2016, le gouvernement polonais avait engagé des coupes d'arbres dans cette forêt primaire au nom d'une prétendue lutte contre un coléoptère parasite. Le 20 novembre 2017 la Cour de justice de l'Union européenne s'est fondée sur le droit existant de la protection des habitats pour lui ordonner d'y mettre un terme immédiatement en raison d'un risque de dommages graves et irréversibles.

> La Cour européenne des droits de l'homme a condamné la Suisse pour manque d'ambition climatique en rejetant l'argument de la goutte d'eau: dilution de responsabilité ne vaut pas immunité
>
> – Laurent Neyret –

B. M.: J'ajouterais que faire reposer le raisonnement sur une extension du statut de personne à des entités naturelles, paradoxalement, dans certains contextes, fait courir le risque d'intensifier la mise en concurrence juridique entre les intérêts humains et d'autres non humains.

Or, dans les contextes qui sont les nôtres, il faut être… profondément réaliste. Dans une telle confrontation, les intérêts humains l'emporteront toujours, en particulier dans les contextes d'insécurité, d'instabilité, qui vont s'accentuer avec le changement climatique. Et donc, l'habitabilité s'écarte de cette logique d'exclusion et contourne le risque de la mise en concurrence des intérêts en proposant une vision inclusive fondée sur une logique cette fois d'interdépendance.

À la lecture de votre livre, on a l'impression que le droit et l'arsenal juridique se comportent comme un organisme vivant en train d'évoluer.

L. N.: Oui, c'est ce qu'on appelle justement la «théorie du droit vivant»! Et ici, du droit vivant du vivant: le droit, pour être juste et ressenti comme tel, doit être adapté aux exigences de l'époque. Mais

une doctrine inverse, inquiétante – dite «originaliste» –, émerge devant la Cour suprême américaine, et enferme le droit dans un monde d'un autre temps.

C'est-à-dire?

L. N.: L'idée est la suivante: à l'origine, au moment de la Constitution des États-Unis de 1787, les Pères fondateurs n'avaient pas prévu que les femmes pourraient revendiquer l'avortement, que deux hommes ou deux femmes pouvaient fonder une famille, que l'habitabilité de notre monde serait menacée. Après des années de jurisprudences progressistes, la Cour suprême américaine, désormais à majorité conservatrice à la suite des nominations de Donald Trump, a défait le droit à l'avortement, menace les droits des personnes homosexuelles et sape la protection de l'environnement. Une époque de régressions voit le jour, au nom du droit d'un autre temps et au prix de profondes injustices.

Quelle relation entretient l'habitabilité avec les autres valeurs cardinales?

B. M.: Il y a trois dimensions à cette question très importante. La première est que la raison même du plafonnement du droit environnemental n'est pas seulement le manque d'une valeur protégée, mais celui d'une valeur protégée d'ampleur analogue, dans la hiérarchie des normes, à la liberté, la dignité et l'égalité. C'est d'autant plus vrai concernant celle avec laquelle l'habitabilité risque de rentrer le plus souvent en opposition, à savoir la liberté d'entreprendre. Donc, à cet égard, la première caractéristique de l'habitabilité est d'avoir une importance normative suffisante pour peser dans la balance en cas de conflit.

> Autant la liberté et la dignité sont des attributs d'un individu, autant l'habitabilité est un phénomène relationnel, comme l'égalité
>
> – Baptiste Morizot –

Le deuxième niveau soulève un paradoxe fascinant. Si l'habitabilité protège les conditions de la vie, et que les conditions de la vie sont nécessaires à l'expression de tous les droits et de toutes les libertés, alors l'habitabilité, et sa protection, deviennent une condition de la défense de toutes les autres valeurs. C'est décisif, parce que finalement, s'intéresser à la protection des conditions de la vie n'est pas un anti-humanisme, mais bien le fondement de tout humanisme: il n'y a pas de vie digne, ni de liberté, sur une terre inhabitable.

Le troisième point concerne la proximité conceptuelle entre l'habitabilité et l'égalité. Parce qu'autant la liberté et la dignité sont des attributs d'un individu, autant l'habitabilité est un phénomène relationnel, comme l'égalité. Quand on réclame l'égalité, on ne la réclame pas juste pour soi. Il en est de même pour l'habitabilité: elle vaut pour tous ou pour personne.

Quelle est votre prochaine étape?

L. N.: Pour notre livre, nous avons fait très tôt le choix – et merci aux éditions Gallimard d'avoir accepté – d'un format court, accessible, qui puisse être diffusé largement. Nous sommes des passeurs d'idées. En droit, on distingue la découverte de l'invention. La première a pour objet quelque chose qui préexiste, disponible pour tous, elle n'est pas brevetable. La seconde relève de l'ingéniosité humaine et peut faire l'objet d'un brevet.

Je dirais que notre affaire relève de la découverte. Aussi sommes-nous dans la première étape, fondamentale, de diffusion, d'explicitation... Nous sommes très heureux des premiers retours et de la portée concrète que certains voient dans l'habitabilité.

Pour faire prospérer ce «principe habitabilité», vous définissez trois voies juridiques supérieures (constitutionnalisation, criminalisation et internationalisation). Qu'est-ce que cela veut dire?

L. N.: D'abord, insistons, ces trois voies ne sont surtout pas exhaustives. Premièrement la Constitution. Ce qu'on appelle aussi la «loi des lois» est en quelque sorte l'ADN d'une nation pour les enjeux les plus fondamentaux. L'habitabilité y a donc toute sa place. En faisant à nouveau le parallèle avec la dignité, nous nous sommes rendu compte que celle-ci n'est pas inscrite dans la Constitution française ni dans la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen. Et pourtant, le Conseil constitutionnel, présidé par Robert Badinter, dans sa décision du 27 juillet 1994, a pu statuer ainsi: «La sauvegarde de la dignité de la personne humaine contre toute forme d'asservissement et de dégradation est un principe à valeur



Le 20 novembre 2017, la Cour de justice de l'Union européenne a ordonné au gouvernement polonais d'arrêter les coupes dans la forêt de Białowieża.

© Aleksander/iStock

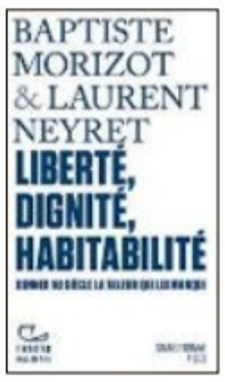
constitutionnelle.» On connaît la suite: la dignité irrigue désormais des pans entiers du droit.

De même, aujourd'hui, le Conseil constitutionnel, et au-delà une Cour suprême, la Cour européenne des droits de l'homme, la Cour internationale de justice… pourraient parfaitement faire revivre le mouvement d'ensemencement juridique qu'a connu la dignité, mais cette fois avec l'habitabilité.

Deuxièmement la criminalisation: le Code pénal est l'outil par excellence de la représentation de ce qu'une société se donne comme valeur essentielle à protéger. C'est vrai à l'échelle des nations, et il existe plusieurs codes pénaux qui consacrent l'écocide, par exemple, mais nous pensons qu'il faut voir plus large, à l'échelle mondiale. À cet égard, dans un rapport publié en décembre 2025, la Cour pénale internationale préconise de désormais poursuivre les crimes qualifiés d'environnementaux au même niveau que les crimes contre l'humanité. C'est absolument incroyable!

Cela mène à l'autre étape que nous évoquons: troisièmement, l'internationalisation. Parce que l'habitabilité est une valeur à protéger de façon partagée et qu'elle a toute sa place dans les traités internationaux, l'organisation des COP, une décision de la Cour internationale de justice, les institutions comme la FAO… et dans tout ce qui a trait au dialogue des peuples. Voilà comment nous pouvons, espérons, accompagner cette étape de concrétisation.

À LIRE



B. Morizot et L. Neyret, *Liberté, dignité, habitabilité. Donner au siècle la valeur qui lui manque*, Gallimard, 2026.

Quels obstacles imaginez-vous voir se dresser devant vous?

B. M.: Un usage affaibli est probable, mais ça ne peut pas toucher le cœur du concept. Après, bien évidemment, on a toutes les raisons d'attendre qu'un pan du monde économique se sente en danger. Mais le choix conceptuel que nous avons fait, celui de rentrer par la valeur, et non par le crime, a une vertu majeure: il est très difficile d'être contre une valeur. Qui s'opposerait à la protection des conditions qui rendent le monde vivable? Par définition, aucune entreprise n'est indépendante de l'habitabilité, et donc de sa protection. La totalité de l'économie réelle dépend de la protection de l'habitabilité. Bien évidemment, elle n'a pas l'air d'être au courant… En tout cas, des obstacles théoriques semblent difficiles à mettre en place. Nous verrons comment les rapports de force se construiront.

L. N.: On peut aussi imaginer que certains fassent une lecture incomplète de l'habitabilité et la réduisent à une valeur anthropocentrée, destinée aux seuls humains. Donc, je crois que c'est vraiment important de faire passer le message que l'habitabilité dont on parle vaut pour la vie sous toutes ses formes.

B. M.: Ajoutons que nous sommes au courant que l'idée d'habitabilité ne sauvera pas le monde. En revanche, nous sommes persuadés qu'elle mérite d'être portée avec toute la force imaginable, parce que le potentiel de ses effets transformatifs rendrait le monde un peu moins sombre. Dans cet espace du possible réaliste, nous pensons avoir trouvé une brèche pour agir, et que s'y engouffrer peut avoir des répercussions significatives, voire décisives.

Pour finir, dans votre livre, vous proposez de réécrire la première phrase de la Déclaration des droits de l'homme de 1789…

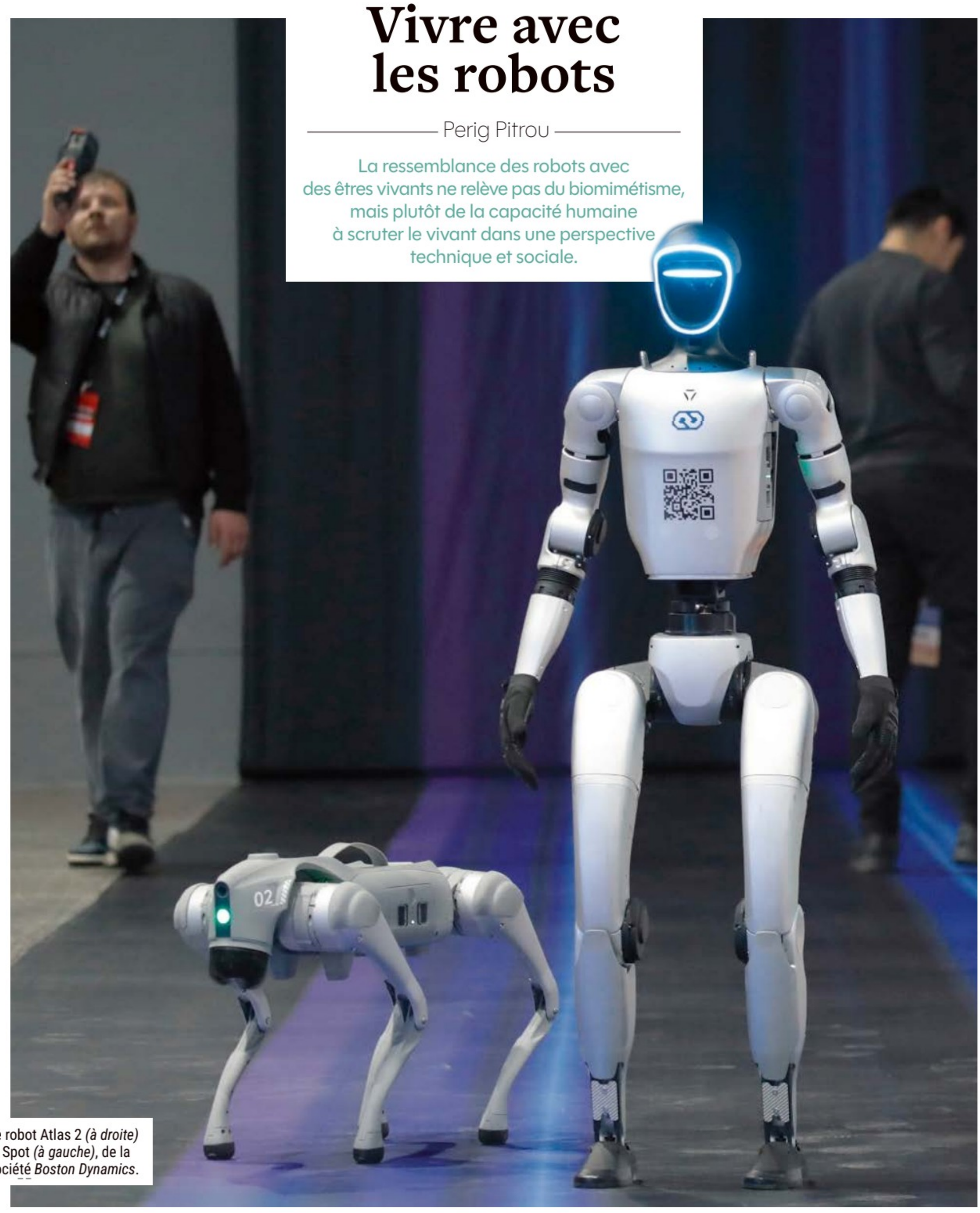
B. M.: Elle est en effet intrigante, car elle affirme que «Les hommes naissent et demeurent libres et égaux en droit…», sans dire où! Or toute notre existence dépend de l'endroit où on vit. Donc symboliquement, on essaie de combler cette lacune, avec un peu d'humour, en reformulant l'article premier de la déclaration de 1789: «Tous les êtres humains naissent et demeurent sur une terre rendue *habitable* par la vie, libres et égaux, en dignité et en droits.»

Propos recueillis par Loïc Mangin

Vivre avec les robots

Perig Pitrou

La ressemblance des robots avec des êtres vivants ne relève pas du biomimétisme, mais plutôt de la capacité humaine à scruter le vivant dans une perspective technique et sociale.



Le robot Atlas 2 *(à droite)* et Spot *(à gauche)*, de la société *Boston Dynamics*.

© Pawel Mikheyev/Shutterstock

Au fil des années, le laboratoire Boston Dynamics révèle en vidéo les prouesses toujours plus étonnantes de ses robots reproduisant des mouvements similaires à ceux d'êtres vivants. Comment ne pas être saisi en regardant *Do you love me?* (2020), la chorégraphie pleine de grâce et d'humour de quatre robots, anthropo- et zoomorphes, qui semblent s'amuser comme des danseurs? Les barrières vitrées qui entourent le *dance floor* rappellent toutefois les difficultés à transporter ces objets techniques hors du cadre expérimental. D'autres images, filmées au salon VivaTech 2026 sur le stand de RebuilderAI, start-up sud-coréenne spécialisée en intelligence artificielle pour la création et la numérisation 3D, en sont un bon exemple: elles montrent deux robots, comme désorientés, détruisant des écrans placés derrière eux.

Ces performances, autant que ces incidents, suggèrent quelques commentaires sur la vie robotique, c'est-à-dire celle d'objets fabriqués dont les mouvements donnent l'impression de reproduire ceux qu'on peut observer chez des organismes biologiques.

Soulignons d'abord le contresens couramment fait, par les roboticiens eux-mêmes, consistant à décrire la robotique comme une illustration du biomimétisme. Ce terme renvoie à une démarche où les humains seraient invités à regarder les êtres vivants pour s'inspirer de leurs fonctionnements ou de leurs comportements, comme si la nature avait procédé à la manière d'un ingénieur. En vérité, d'un point de vue anthropologique, il est plus juste de voir dans la robotique une activité profondément humaine, qui s'appuie sur des expériences techniques pour isoler des fonctions et des mécanismes dans l'environnement naturel. Vouloir imiter la nature est tout sauf un phénomène naturel: c'est le résultat d'un rapport social établi avec le vivant.

Quand on porte un tel regard technique et fonctionnaliste sur l'environnement naturel, ce n'est pas seulement la ressemblance avec des organismes qui est visée. Les ingénieurs modélisent et construisent des milieux qui fixent un indispensable cadre pour des interactions programmées. Un corps robotique est en effet inséparable d'un environnement, naturel ou contrôlé, où il doit évoluer. Alors que les robots anthropomorphes sont en général prévus pour marcher, courir, sauter sur différents types de sols, la ressemblance avec d'autres êtres vivants que les humains (pieuvre, homard, poisson, pigeon, goéland...) s'explique souvent par la volonté de les faire intervenir dans différents milieux (aériens, aquatiques, terrestres...). Des microrobots sont même conçus pour être envoyés à l'intérieur du corps.

Dans tous ces cas, la forme de ces êtres, mi-techniques, mi-animaux, correspond toujours, peu ou prou, à un projet humain qui leur assigne des tâches. Les capacités des robots sont mises au service de projets sociaux: comme des travailleurs, ils remplissent un rôle, dont les limites restent à définir, dans les organisations sociales. Des bras robotiques de l'industrie automobile aux développements de systèmes automatisés, il est courant de s'interroger sur la façon dont les machines travaillent à la place des humains, faisant même courir le risque de prendre leur place.



Un corps robotique est inséparable d'un environnement, naturel ou contrôlé, où il doit évoluer

Mais les robots peuvent aussi être conçus pour prendre soin. En juillet 2026, lors d'une conférence en robotique sociale, une équipe de chercheurs de l'université Paris Cergy, dont l'anthropologue Joffrey Becker, a présenté des expérimentations visant à aider des enfants souffrant d'un trouble du spectre de l'autisme. Les scientifiques tentent de réduire leur anxiété en fabriquant des robots prenant la forme de petits ballons animés par des vibrations, des variations lumineuses et des mouvements évoquant une respiration. Même s'ils ne sont pas anthropomorphes, leurs réactions lorsque les enfants les manipulent semblent être source de réconfort.

Autant que les difficultés techniques rencontrées pour reproduire des processus biologiques, le défi est toujours de déterminer comment vivre avec les robots. ■



Perig Pitrou
directeur de recherche au CNRS, au laboratoire d'anthropologie sociale du Collège de France, où il dirige l'équipe Anthropologie de la vie

BIBLIOGRAPHIE

M. Gaulard *et al.*, Participatory design in CRI for the well-being of ASD children, 18th International Conference on Social Robotics (ICSR + ART 2026), Londres, 2026.

L. Kamili *et al.*, Biomimétismes. Imitation des êtres vivants et modélisation de la vie, *Techniques & Culture*, 2020.

Do you love me, youtu.be/fn3KWM1kuAw

© Dyn Studio/Shutterstock

La censure inattendue de Max Planck

Yves Gingras

Ou comment la numérisation des revues scientifiques confère aux éditeurs un pouvoir inédit : effacer des articles du passé au nom de critères anachroniques.

En septembre 2017, le *Financial Times* nous apprenait qu'un historien américain de la Chine moderne, Glenn Tiffert, avait découvert une vaste opération de censure opérée par les autorités du pays lors de la numérisation de ses archives. En numérisant les anciens numéros de revues chinoises sur l'histoire politique et légale de ce pays, les responsables des nouvelles plateformes numériques avaient fait disparaître des articles publiés dans deux revues durant les années 1950. Ces articles étaient critiques de politiques qui, aujourd'hui, sont promues par le président Xi Jinping. Les versions imprimées de revues anciennes étant souvent rares et difficiles d'accès, Glenn Tiffert en déduisait que les chercheurs ayant tendance à ne visiter que les versions numériques sont plus vulnérables à la manipulation de l'histoire, car il est alors difficile de savoir si le contenu a été totalement numérisé ou non. Surtout, les deux bases de données chinoises contenant ces revues omettent curieusement les 63 mêmes articles publiés entre 1956 et 1959 identifiés par l'historien.

« Qui contrôle le passé contrôle le futur et qui contrôle le présent contrôle le passé », disait l'écrivain George Orwell dans son célèbre et toujours actuel roman *1984*. Comme Glenn Tiffert, Orwell pensait que ce contrôle est nécessairement le fait d'un État non démocratique. Cependant, l'histoire récente des revues scientifiques nous apprend qu'il peut aussi être le fait des groupes éditoriaux privés propriétaires de grandes plateformes de revues numériques, comme Springer Nature, qui détient des milliers de revues.

Deux articles du physicien Max Planck parus en 1940 et 1942 dans la revue « Die Naturwissenschaften » étaient déclarés « rétractés »

Au cours des années 2000-2010, ayant compris que la numérisation des anciens numéros permettrait de les monétiser à nouveau (alors même que les versions imprimées dorment dans les bibliothèques depuis des décennies, voire des siècles), les grands éditeurs ont lancé de vastes programmes de numérisation rétroactive. À première vue, ces numérisations sont précieuses, c'est indiscutable, car elles rendent possibles des recherches impensables autrement. Qui lirait tous les articles parus dans les *Transactions* et *Proceedings* de la Société royale de Londres depuis 1665 ? J'ai moi-même largement profité de ces numérisations dès 2008 pour analyser les usages des notions d'« analogie » sur plusieurs siècles et de « conflit d'intérêts » sur plus d'un siècle.

Il n'est probablement venu à l'esprit de personne qu'une telle numérisation massive d'articles scientifiques du passé, qui bien sûr contiennent, du point de vue de la science actuelle, quantité de faussetés, d'idées saugrenues et même offensantes aux yeux de certaines personnes modernes (et même postmodernes), ait pu conduire à l'effacement, et donc à la rétractation, de certaines publications. Ce fut donc une grande surprise de découvrir par hasard que le géant des revues savantes de Springer Nature en profitait bel et bien pour en quelque sorte nettoyer le passé scientifique à l'aune de normes morales contemporaines – des normes anachroniques, donc.

De temps à autre, je consulte le très informatif site américain

Retraction Watch. Un bref article intitulé «Articles rétractés par des Prix Nobel» a attisé ma curiosité. Alors que je parcourais la liste, quelle ne fut pas ma surprise d'y voir que deux articles du physicien Max Planck parus en 1940 et 1942 dans la revue *Die Naturwissenschaften* (publiée par Springer depuis sa création en 1913) y étaient déclarés «rétractés». Immédiatement, cela m'a paru absurde et j'ai aussitôt décidé d'enquêter plus à fond, y voyant un cas exemplaire pour une sociologie historique des sciences.

Connaissant l'obsession actuelle des revues scientifiques pour la moralisation de l'activité scientifique, j'étais convaincu que ces rétractations ne pouvaient être que le fruit de leur republication sous forme numérique au cours des années 2000-2020. Mon collègue Mahdi Khelfaoui étant plus efficace que moi pour ce genre de recherche numérique, nous avons retracé ensemble leur histoire. Le plus étrange était que contrairement à la pratique habituelle qui consiste à surimposer le mot *retracted* sur les pages numérisées du texte, qui reste lisible, celles des deux articles de Planck étaient blanches! Seuls demeuraient le titre et le nom de l'auteur. Et comme pour démontrer encore mieux l'absurdité de ces décisions, probablement prises par des algorithmes, les deux fichiers de ces articles sans contenu étaient en vente à 39,95 dollars!

L'enquête terminée, nous avons publié nos résultats sur la plateforme de prépublication en ligne *Arxiv* le 20 mai dernier sous le titre «The curious case of Max Planck retracted papers. When past scientific practices meet contemporary publishing norms» («L'étrange cas des papiers rétractés de Max Planck. Quand les pratiques scientifiques du passé se heurtent aux normes contemporaines d'édition»). À notre grande surprise, la revue *Science* a couvert notre enquête le 26 juin, ce qui a déclenché une vague mondiale d'articles scandalisés par ces censures. Cette indignation générale a forcé la plateforme de la revue à réactiver, quelques semaines plus tard, les deux articles en prétextant une erreur humaine. Mais qui peut croire qu'une personne ait relu des milliers d'articles pour décider s'il fallait, pour une raison ou une autre (en l'occurrence une «violation d'article», sans doute liée au fait qu'un des papiers était paru sous diverses formes et que l'autre portait le même titre qu'un article d'un autre savant), les rétracter?



> De nos jours, ce sont les propriétaires des plateformes des revues scientifiques numérisées qui décident de ce qui peut être lu ou non dans les archives de ces revues

Si cette curieuse histoire s'est bien terminée pour la postérité de Planck, il est toutefois certain que d'autres articles du passé ont subi le même sort. Mahdi Khelfaoui en a d'ailleurs déjà trouvé datant de 1922 et de 1951, et la recherche continue... J'ignore si Orwell serait surpris d'apprendre que, de nos jours, ce sont les propriétaires des plateformes des revues scientifiques numérisées qui décident de ce qui peut être lu ou non dans les archives de ces revues, mais il est certain que les historiens doivent être vigilants face à ces réécritures de l'histoire. ■



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

L'auteur a publié
Les Sciences sous ma loupe (Éditions Matériologiques, 2026).

Les «transformers» ou l'attention robotisée

Thomas Gerbaud

Un humain reconnaît un éléphant à sa trompe et ses oreilles plutôt qu'à sa peau grise ou à la savane qui l'entoure. Nous savons trier les informations et concentrer notre attention sur certains points, tout en ignorant le reste. Les outils créés il y a près de dix ans pour le programmer restent les meilleurs.

Les grands modèles de langages (LLM) sont partout: ils permettent désormais de s'attaquer à de difficiles conjectures mathématiques sans réel bagage scientifique, ils engendrent du code génétique et assistent les biologistes dans la création de virus de synthèse. Dans une récente chronique, nous évoquions l'usage remarquable de la puissance de calcul dans les outils d'apprentissage automatique, dont font partie les LLM. Étonnamment, la recette reste la même que celle énoncée en 2017: il suffit d'un peu d'*attention*. Prêtons-nous au jeu des explications.

À partir des années 1980, scientifiques et ingénieurs ont tenté de reproduire ce comportement, d'abord autour de la vision par ordinateur, puis dans le cadre du traitement du langage, notamment pour la traduction automatique. S'il est difficile de construire un programme qui comprenne le sens des textes qui lui sont présentés, on peut leur appliquer un traitement statistique qui exploite les motifs présents comme les cooccurrences des mots ou leurs relations.

Avant d'être analysé, le texte va être transformé en une matrice de nombres réels, bien plus pratique pour calculer. Une phrase est transformée en une suite d'unités, mots entiers ou fragments, que nous regrouperons ici sous le nom de *tokens*. L'ensemble des *tokens* que le modèle est capable de reconnaître constitue son vocabulaire. Le choix de ce découpage est un compromis. Il doit être assez fin pour capturer l'information, mais assez compact pour ne pas la diluer inutilement ou alourdir les calculs. Chaque *token* est ensuite représenté par un vecteur de nombres, dans un espace vectoriel de grande dimension (ex: 1000); on parle de «plongement». Des *tokens* proches pour un lecteur humain sont susceptibles d'être éloignés dans cet espace.

> Les «transformers» dominent les tâches de traitement de séquences, notamment dans le domaine de la modélisation du langage
>
> A. M. Fichtl *et al.*, *arXiv* (preprint), 2025

Les systèmes de traduction par apprentissage profond (*neural machine translation*) sont principalement basés sur une architecture appelée «encodeur-décodeur». Un premier réseau de neurones (l'encodeur) lit la phrase source et la compresse dans un vecteur unique, de taille fixe. Un second réseau (le décodeur) génère la traduction à partir de ce vecteur. L'ensemble est entraîné sur des tombereaux de textes.

Ce type de programme est performant mais coince sur les phrases longues. Le programme RNNSearch résout ce problème en «alignant» la traduction et la phrase source. Au lieu de résumer la phrase d'un coup, en un seul vecteur de taille fixe, l'encodeur construit une suite de vecteurs mot après mot, ajoutant et compressant progressivement l'information. Cette méthode, plus souple, autorise le décodeur à choisir les parties de la phrase les plus intéressantes pour la traduction. Il s'agit là d'un premier mécanisme d'attention, qui prend la forme d'un module greffé sur une architecture

Quand j'ai lu l'article de 2017 sur les «transformers», j'ai tout de suite dit à mes collègues du laboratoire que les réseaux de neurones récurrents étaient morts

–Dzmitry Bahdanau, *Hacker News*, YCombinator.com, 2022

deep learning, en général un réseau de neurones récurrent (RNN).

L'architecture *transformer* prolonge les idées de RNNSearch et recentre le mécanisme d'attention au cœur du modèle en supprimant la récurrence. Au lieu de traiter les *tokens* un par un, ils sont traités simultanément. Si RNNSearch utilisait l'attention entre l'encodeur et le décodeur, le *transformer* l'applique à l'intérieur même d'une séquence, ou suite de *tokens* (*self-attention*). Chaque *token* se contextualise donc directement par rapport aux autres en prenant en compte leurs positions relatives. Afin de capter les différentes structures d'une phrase (ex: grammaire, sens, sujet/verbe, etc.) différents mécanismes d'attention (*multi-head attention*) sont branchés en parallèle. L'enchaînement de blocs de *transformers* donne la possibilité d'enrichir les traitements.

Point important, les calculs se parallélisent très bien! Le *transformer* exploite efficacement la puissance de calcul proposée par les processeurs graphiques (GPU). Les résultats sont excellents.

Le fonctionnement de l'attention est souvent expliqué par une analogie empruntée aux bases de données. La base est une liste de couples (clé, valeur) qu'on interroge par une requête identique à une clé. L'attention reprend ce principe, mais l'assouplit: chaque *token* produit sa propre requête, qu'il rapproche par similarité des clés produites par tous les *tokens* de la phrase, puis construit sa nouvelle représentation par pondération des valeurs correspondantes. On peut aussi le représenter par des projections dans des espaces vectoriels définis lors de l'apprentissage, puis une succession d'opérations d'algèbre linéaire et de normalisations *ad hoc*.

Il est frappant de constater à quel point la formule mathématique de l'attention reste simple. On peut se rappeler la leçon amère de Richard Sutton dont il était question dans une précédente chronique: les méthodes générales qui exploitent la puissance de calcul peuvent être redoutablement efficaces.

Les grands modèles de langages actuels utilisent des architectures dérivées du *transformer* de 2017. Le mécanisme d'attention continue de faire l'objet de recherches actives, en particulier pour en réduire le coût de calcul, qui croît rapidement avec la longueur des séquences traitées. Des travaux récents ont montré que, dans certains modèles, les matrices d'attention obtenues après entraînement présentent souvent une structure parcimonieuse, ou une structure qu'il est possible d'approximer par des matrices de plus faible rang, sans perte importante de performance. D'autres phénomènes suggèrent qu'il existe, dans le fonctionnement de l'attention au sein des LMM, une structure sous-jacente encore incomplètement comprise.

Ce sujet reste important si l'on souhaite comprendre l'efficacité des modèles. Merci de votre attention. ■

L'AUTEUR



Thomas Gerbaud
physicien, ingénieur centralien
et expert en science des données

La longue tradition des vues d'artiste

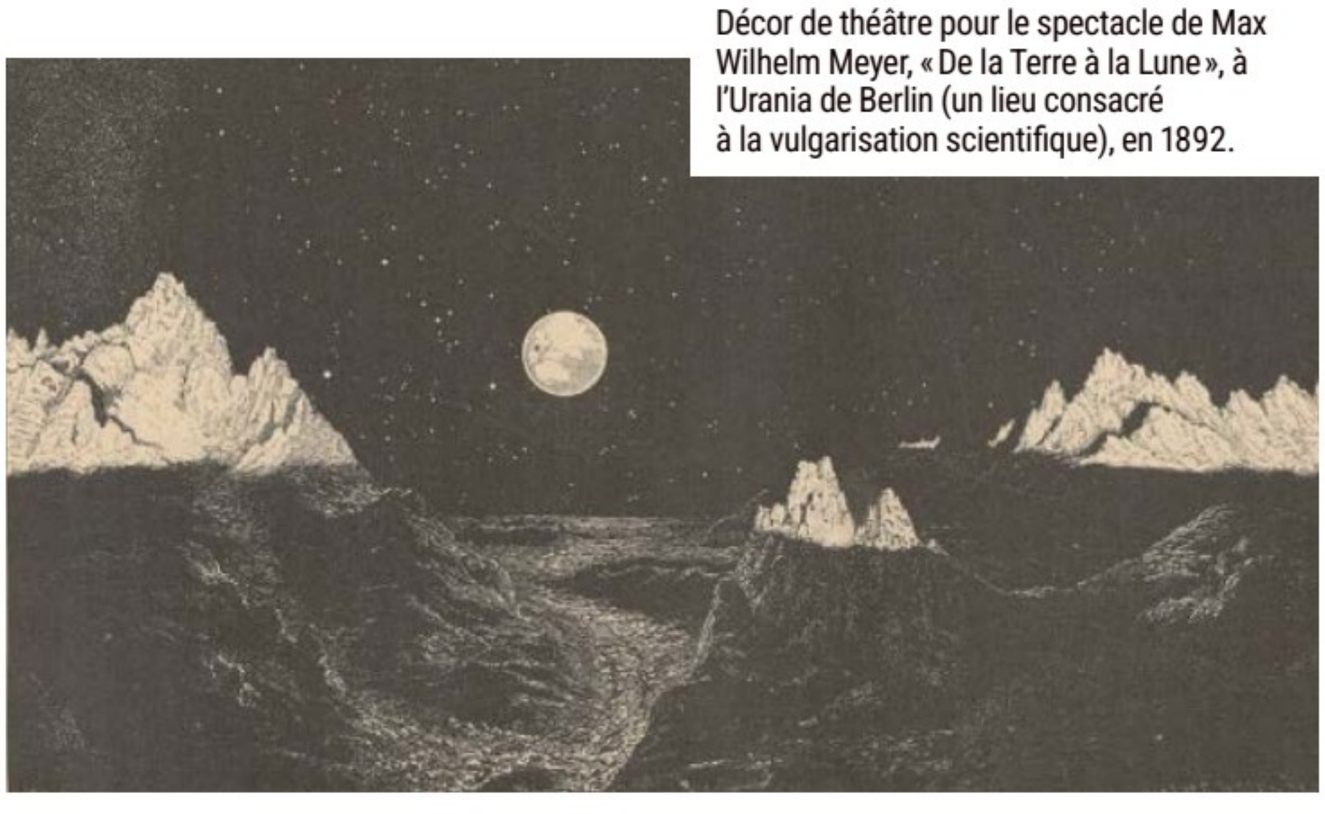
Charlotte Bigg

Bien avant que l'humanité dispose d'instruments pour observer des mondes lointains, artistes et scientifiques imaginaient déjà leurs paysages.

En 1995, Didier Queloz et Michel Mayor découvrent la première exoplanète orbitant autour d'une étoile semblable au Soleil. Depuis, des milliers d'autres ont été détectées, suscitant un foisonnement d'illustrations telles que cette vue (*page ci-contre*) depuis la surface d'une des sept planètes en orbite autour d'une étoile naine extrêmement froide, découvertes à l'aide du télescope *Trappist*, à l'observatoire de La Silla, un des sites, tous implantés au Chili, de l'Observatoire Européen Austral (ESO). On voit l'une des planètes internes en transit devant le disque de leur étoile petite et peu lumineuse.

Rendant fidèlement compte des données scientifiques, complétées par l'imagination de ses créateurs, ces vues d'artistes ambitionnent de proposer une représentation plausible de paysages extraterrestres. Elles sont souvent réalisées en étroite collaboration avec des astrophysiciens, ici par Martin Kornmesser, designer graphique travaillant pour l'ESO. Leur style caractéristique doit beaucoup à Chesley Bonestell, pionnier états-unien du *space art*, qui a marqué l'âge d'or des missions *Apollo* et de la science-fiction des décennies d'après-guerre.

Mais ce type de vue remonte encore plus loin dans l'histoire. Comme l'historienne de l'art Elsa De Smet l'a montré, on trouve des vues imaginaires de la Terre depuis la Lune dès le milieu du XIX^e^ siècle dans des ouvrages de vulgarisation astronomique. Nommées «vues idéales», elles sont apparentées aux paysages fabriqués par les peintres dans leurs ateliers depuis la Renaissance. Représentés à l'aide des lois de la perspective, les paysages qu'elles montrent sont pourtant destinés à être observés comme si notre œil était présent sur place. Nous sommes transportés dans cette scène imaginaire d'un lieu bien réel, une expérience littéraire qui s'est aussi prêtée à de nombreuses mises en scène théâtrales. Mélange de familier et d'étrange, d'observation et d'imagination, les vues d'artistes font voyager notre regard jusqu'aux confins de l'Univers. ■



Décor de théâtre pour le spectacle de Max Wilhelm Meyer, « De la Terre à la Lune », à l'Urania de Berlin (un lieu consacré à la vulgarisation scientifique), en 1892.

© Bibliothèque d'État de Berlin (gravure d'après un dessin de Wilhelm Kranz, parue dans M. W. Meyer, « Illustrirter Leitfaden der Astronomie, Physik und Mikroskopie in Form eines Führers durch die Urania zu Berlin », Hermann Paetel, 1892)

L'AUTRICE



Charlotte Bigg
directrice de recherche au centre Alexandre-Koyré, autrice notamment de *Imaging the Universe. Photography and Astronomy* (Reaktion books, 2026).

>>> 2016

Vue d'artiste de la surface d'une des planètes rocheuses en orbite autour de l'étoile naine Trappist-1 (l'une des planètes apparaît ici en transit).



© ESO/M. Kornmesser

Géométrie (contre-)intuitive

Jean-Paul Delahaye

Les petits polygones ont des propriétés géométriques parfois déroutantes, et l'intuition peut suggérer des idées qui se révèlent fausses. Seul un examen rigoureux permet d'établir des théorèmes solides.

L'intuition géométrique, nourrie par notre expérience quotidienne, est un outil puissant pour pressentir certains résultats mathématiques pourtant difficiles à démontrer. Cependant, tout mathématicien le sait : il faut se méfier des évidences, car certains énoncés intuitifs se révèlent faux, et cette fausseté n'apparaît qu'au prisme d'une étude rigoureuse. Les questions isopérimétriques, où l'on recherche la figure d'aire maximale pour un périmètre donné, illustrent parfaitement cette périlleuse valse avec l'intuition. En particulier, les petits polygones tendent des pièges, et seul un examen rigoureux de la situation permet d'éviter de s'égarer. Les problèmes autour des petits polygones sont d'ailleurs toujours l'objet de recherches, et l'on semble encore loin d'avoir fait le tour de leurs étonnantes propriétés.

On sait que pour un périmètre donné, le cercle est la forme du plan qui possède la plus grande aire, et que c'est la seule à atteindre ce maximum. De même, la sphère est la forme de l'espace de volume maximal pour une surface fixée, et cette forme de volume maximal est unique. Bien que cela semble assez naturel, ce n'est pas facile à démontrer. L'histoire de ces théorèmes isopérimétriques est d'ailleurs celle d'une série de tentatives imparfaites et de démonstrations incomplètes.



Le premier vrai résultat de ce type concerne les polygones, et s'appuie uniquement sur la géométrie du triangle. Ce théorème assure que, pour un périmètre donné et un entier $n \geq 3$ fixé, le polygone régulier à n côtés (qui possède n côtés égaux et n angles égaux entre côtés liés) est l'unique polygone de surface maximale. Par conséquent, parmi tous les triangles de même périmètre, le triangle équilatéral est celui de plus grande surface et aucun

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)

© Icon Innovator/Shutterstock

autre ne fait aussi bien. De même, parmi les quadrilatères de même périmètre, le carré est celui de plus grande surface, et aucun autre ne fait aussi bien, etc.

Pour les polygones, les démonstrations proposées au IIe siècle avant notre ère par le mathématicien grec Zénodore sont correctes, et l'on considère qu'il est le premier à avoir démontré ces résultats. En revanche, les preuves qu'il proposa pour les disques et les sphères sont aujourd'hui estimées insuffisantes. Il est en effet difficile de démontrer proprement le résultat indiquant que, parmi toutes les formes du plan ayant pour frontière une courbe régulière de longueur donnée, le disque est la seule de surface maximale, car la théorie mathématique associée à la notion de longueur de courbe est délicate. Après une première avancée due au mathématicien suisse Jakob Steiner (1796-1863), qui montre que si une solution existe, c'est le disque et qu'elle est nécessairement unique, le mathématicien allemand Karl Weierstrass (1815-1897) obtient la première démonstration jugée complète du fait que le disque est la solution unique au problème. Dans l'espace, la première démonstration du théorème indiquant que la sphère est la forme de plus grand volume contenue dans une surface d'aire fixée est due au mathématicien allemand Hermann Schwarz en 1884. Depuis, des généralisations en dimension $n \geq 4$ ont été formulées et démontrées – non sans peine.

Les problèmes autour des petits polygones sont toujours l'objet de recherches, et l'on semble encore loin d'avoir fait le tour de leurs étonnantes propriétés

Petits polygones

En revanche pour les petits polygones, il vaut mieux ne pas trop se fier à ce qui semble aller de soi. Un polygone P est dit «petit» quand son diamètre est fixé, par exemple à une unité. Par définition cela signifie que la distance entre deux points de P ne dépasse jamais une unité et qu'il existe deux sommets distants d'une unité.

1. Les pseudo-carrés

Le diamètre d'un ensemble E de points du plan est, par définition, le plus petit nombre réel D, s'il existe, tel que la distance entre deux points de E est toujours inférieure ou égale à D. On se demande quels sont, pour un diamètre D donné, les polygones de plus grande surface. Le cas des quadrilatères réserve une première surprise car, contrairement à ce que souffle l'intuition, le carré n'est pas le seul quadrilatère optimal.

La surface d'un quadrilatère est donnée par la formule $S = 1/2 \times ab \times sin(A)$, où a et b sont les longueurs des diagonales du quadrilatère et A est l'angle qu'elles forment l'une avec l'autre. On recherche, parmi les quadrilatères de diamètre 1, ceux dont la surface est maximale. Pour que la distance entre deux points du quadrilatère soit au plus égale à 1, a et b doivent eux-mêmes être au plus égaux à 1. Or le produit $ab \times sin(A)$ prend une valeur maximale quand chacun des facteurs prend, parmi les valeurs possibles, la valeur maximale. Ici, c'est le cas lorsque $a = 1$, $b = 1$ et $sin(A) = 1$ (donc $A = 90°$).

Un tel quadrilatère est dit «équidiagonal» (ses diagonales ont la même longueur), et «orthodiagonal» (elles se croisent à angle droit). Lorsqu'une figure vérifie ces deux propriétés, on dit qu'il s'agit d'un «pseudo-carré».

Le carré de côté $\sqrt{2}/2$, dont les diagonales ont pour longueur 1 et dont la surface est 1/2, est donc l'une des solutions cherchées, mais il n'est pas le seul, car une infinité de pseudo-carrés avec les mêmes diagonales sont aussi solutions du problème !

Les quatre pseudo-carrés de diamètre unité représentés ci-dessous possèdent, comme le carré tout à gauche, la surface maximale pour un quadrilatère de diamètre unité.



© Sauf mention contraire, tous les schémas sont de Bruno Vacaro

Il n'est toujours pas établi que pour chaque entier pair *n*, le petit polygone à *n* côtés de plus grande surface est unique ni qu'il a nécessairement un axe de symétrie

Une question difficile est: pour un entier $n \geq 3$ fixé, quel est le polygone à n côtés de diamètre 1 de surface maximale? Une réponse tentante, pour des raisons de symétrie ou par analogie avec les polygones dont le périmètre est fixé, est que le polygone régulier de diamètre 1 serait la réponse. Il se trouve que c'est faux en général.

Commençons par les cas particuliers dans lesquels cette intuition est bonne. Si n est un nombre impair, le polygone régulier à n côtés de diamètre 1 a effectivement une plus grande surface que tous les autres polygones à n côtés de diamètre 1. Le triangle équilatéral de côté 1 est donc, parmi tous les triangles de diamètre 1, celui qui possède la plus grande surface. On le démontre directement en établissant d'abord que pour égaler ou dépasser la surface de tous les triangles de diamètre 1, il faut être isocèle. Puis en considérant tous les triangles isocèles de diamètre 1, on établit sans trop de mal que le triangle équilatéral a une plus grande surface que tous les autres.

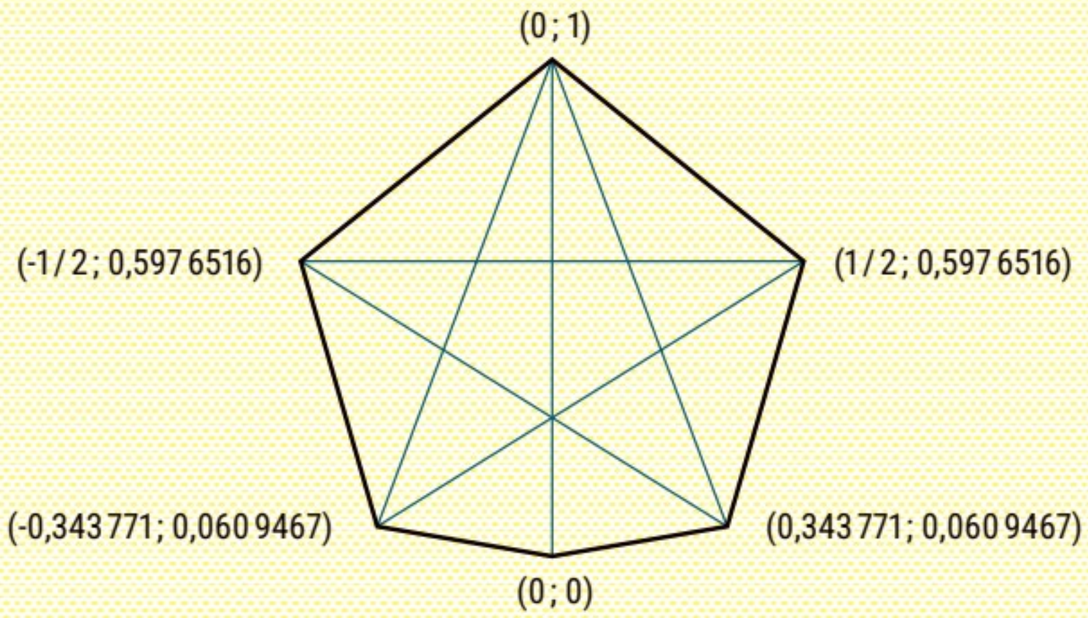
Ce qui est vrai pour $n=3$ l'est également pour tous les entiers n impairs. Ce résultat difficile a été établi en 1922 par le mathématicien allemand Karl Reinhardt: parmi les polygones de diamètre 1 à n côtés, avec n impair, le polygone régulier est celui dont la surface est la plus grande, et il n'est égalé par aucun autre.

Contre-intuitif

Lorsque n est pair, en revanche, l'intuition est trompeuse. Pour $n=4$, le carré de diamètre 1 est bien un quadrilatère de diamètre 1 de surface maximale, mais il n'est pas unique: les quadrilatères dont les diagonales ont la même longueur et sont orthogonales, appelés «pseudo-carrés», égalent en surface les carrés de même diamètre (*voir l'encadré 1*).

La perte de l'unicité de la solution dans le cas $n=4$ est un peu étonnante, mais pour $n=6$, la situation est encore pire: l'hexagone régulier n'est même pas de surface maximale, parmi les hexagones de diamètre 1. Ce résultat n'a été démontré qu'en 1961 par Hanspeter Bieri, de l'université de Bern, en Suisse, qui a identifié l'hexagone de surface maximale parmi les hexagones ayant un axe de symétrie (*voir la figure 1*). Cet hexagone fut retrouvé indépendamment en 1975 par le mathématicien américain Ronald Graham, qui montra cette fois qu'il était de surface maximale parmi tous les hexagones de diamètre fixé, qu'ils aient un axe de symétrie ou non. Il est remarquable que le résultat intuitif soit valable pour tous les n impairs mais soit impossible à étendre aux n pairs!

Il faut noter que le pentagone étoilé équilatéral, qui donne les cinq premiers points de l'hexagone de Bieri-Graham, n'est pas régulier (ses angles ne sont pas tous égaux). Le gain en surface par rapport à l'hexagone régulier est de 3,92%.



1. Hexagone de Bieri-Graham. C'est l'hexagone de diamètre 1 qui a la surface maximale. Il comporte les sommets d'un pentagone étoilé équilatéral possédant un axe de symétrie, auquel il faut ajouter un autre sommet sur l'axe de symétrie. Chaque segment en bleu sur le dessin est de longueur 1.

La démonstration du fait que cet hexagone est optimal, qui s'est fait attendre pendant quatre décennies, a permis d'établir que son aire est la solution de l'équation de degré 10 suivante:

$$4\,096x^{10} + 8\,192x^9 - 3\,008x^8 - 30\,848x^7 + 21\,056x^6 + 146\,496x^5 - 221\,360x^4 + 1\,232x^3 + 144\,464x^2 - 78\,488x + 11\,993 = 0$$

2. Largeur constante

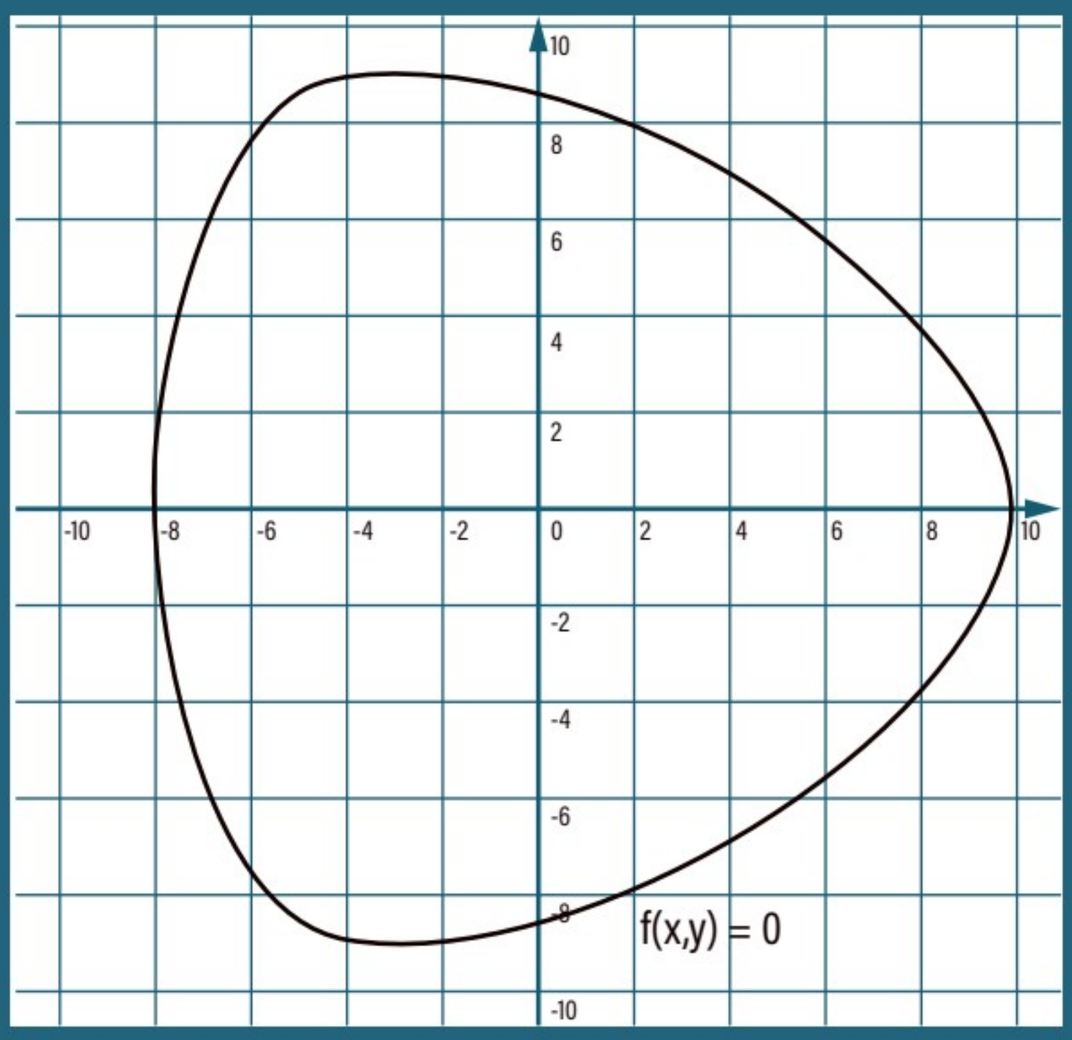
Un ensemble *E* de points du plan est dit « de largeur constante *L* » si et seulement si, quelle que soit la direction choisie, deux droites parallèles les plus rapprochées possibles ayant cette direction et délimitant un ruban du plan contenant *E* sont distantes exactement de *L*. Autrement dit quelle que soit la rotation qu'on applique à *E*, on peut le faire glisser dans un ruban de largeur *L*, et on ne peut pas le faire glisser dans un ruban plus étroit.

Bien sûr un cercle de diamètre *L* est de largeur constante *L*, mais il existe d'autres courbes fermées délimitant des ensembles de largeur constante. Il y a en particulier tous les polygones réguliers de Franz Reuleaux, obtenus en prenant un polygone régulier ayant un nombre impair de côtés et en remplaçant chaque côté AB par un arc de cercle de rayon égal à la distance entre A et le sommet opposé à AB du polygone.

Pour une largeur *L* fixée, toute courbe de largeur constante *L* a pour longueur πL – c'est un théorème dû à Joseph-Émile Barbier. Parmi les courbes de largeur constante *L*, le cercle de diamètre *L* est la courbe à largeur constante délimitant la plus grande surface ; et le triangle de Reuleaux construit sur le triangle équilatéral de côté *L*, la courbe à largeur constante délimitant la plus petite surface.

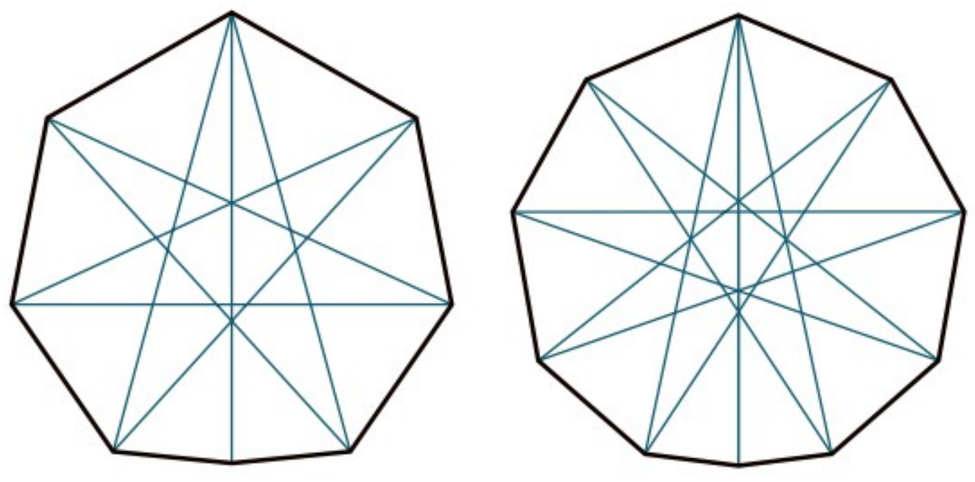
Il existe une courbe à largeur constante possédant une équation polynomiale. Découverte en 1997 par Stanley Rabinowitz, cette courbe est définie comme l'ensemble de couples (x, y) vérifiant $f(x, y) = 0$ pour :

$$\begin{aligned} f(x,y) = {} & (x^2+y^2)^4 - 45\,(x^2+y^2)^3 \\ & - 41\,283\,(x^2+y^2)^2 \\ & + 7950960\,(x^2+y^2) \\ & + 16\,(x^2-3y^2)^3 \\ & + 48\,(x^2+y^2)(x^2-3y^2)^2 \\ & + (x^2-3y^2)\,x\,[16\,(x^2+y^2)^2 \\ & - 5544\,(x^2+y^2) + 266\,382] - 720^3. \end{aligned}$$



D'après P. Potiron/Wikimedia commons (CC BY-SA 4.0)

En étudiant la solution pour $n=6$, Ronald Graham a conjecturé que pour un nombre $n=2m$ pair et supérieur à 6, le polygone optimal s'obtient de la même façon : on part d'un polygone équilatéral étoilé à $2m-1$ côtés de diamètre unité, et on lui ajoute un sommet supplémentaire à distance 1 d'un des sommets du polygone équilatéral de base (*voir la figure 2*). Cette conjecture de 1975 n'a été démontrée qu'en 2002 pour l'octogone et en 2007 pour le cas général.

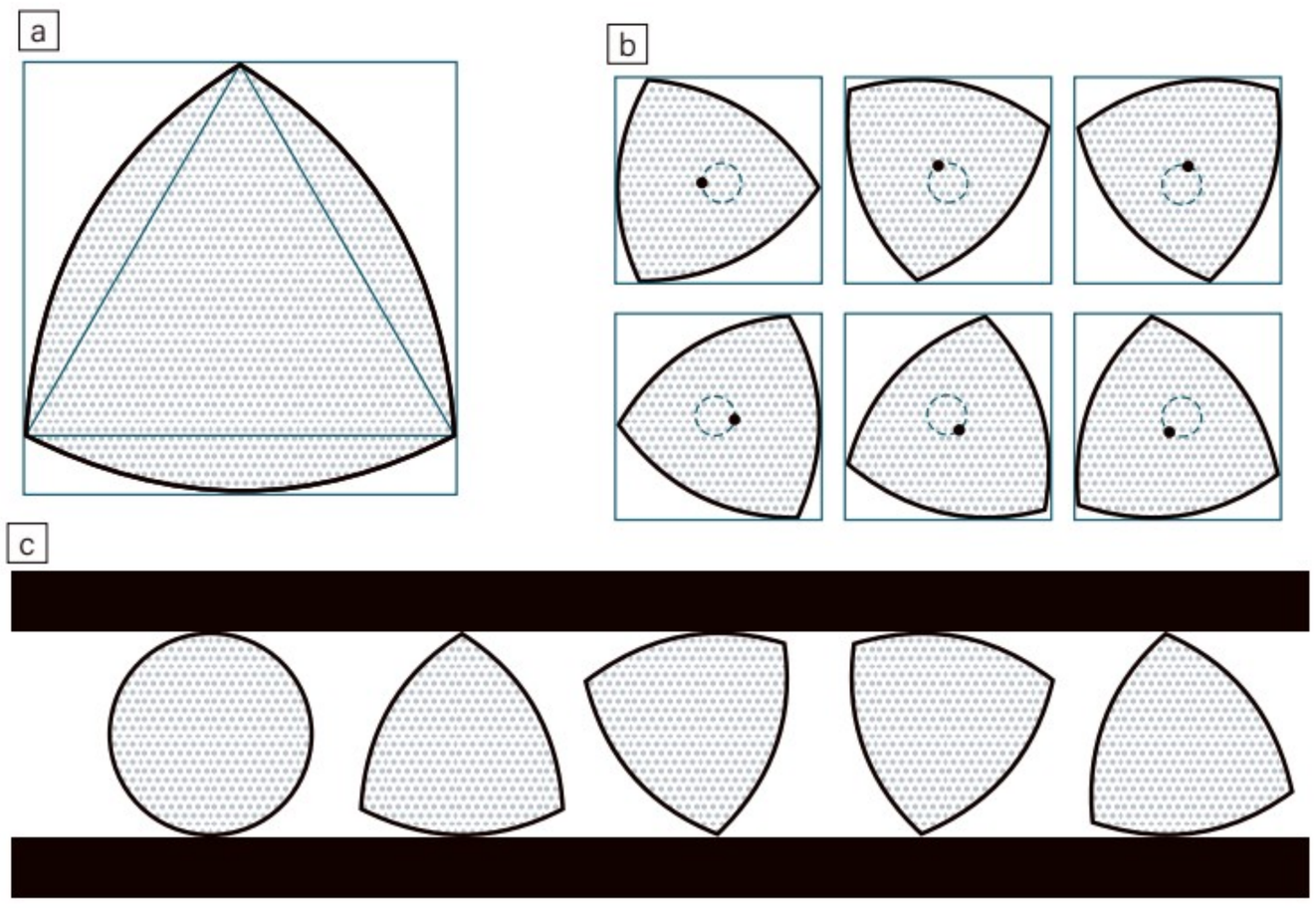


2. Polygones optimaux à 8 et 10 côtés.

Dans le cas général, pour n pair, ce que l'on sait de la forme des solutions ne permet d'obtenir les coordonnées du polygone record que moyennant l'utilisation de méthodes d'optimisation numérique délicates.

L'octogone record ($n=8$) a une surface plus grande de 2,79% que celle de l'octogone régulier de diamètre 1. Elle se calcule en résolvant une équation de degré 42.

Les derniers progrès concernant cet étonnant problème ont été apportés en 2024 par Christian Bingane et Michael Mossinghoff, du département de mathématiques et de génie industriel (Magi) de l'université polytechnique de Montréal. Complétant les résultats pour $n=8$ de Charles Audet, Pierre Hansen et Frédéric Messine obtenus en 2002, et ceux pour $n=10$ et $n=12$ de Didier Henrion et Frédéric Messine obtenus en 2022, les chercheurs ont obtenu de nouvelles précisions sur tous les cas jusqu'au nombre pair 120, en se restreignant aux polygones présentant un axe de symétrie. On le voit : malgré des efforts considérables et de difficiles développements impliquant des calculs qui n'ont pu être menés qu'à l'aide de puissants logiciels et de machines rapides, nous sommes aujourd'hui loin de tout savoir sur les polygones



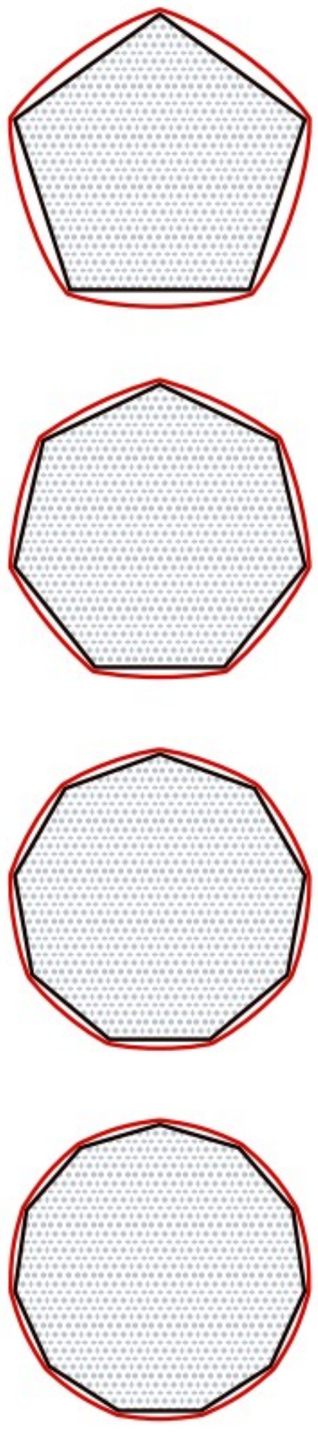
3. a Le triangle de Reuleaux. Cette figure a une largeur constante : quelle que soit leur direction, deux droites parallèles tangentes au triangle de Reuleaux sont écartées l'une de l'autre de la même distance, sa largeur. b Cette figure peut tourner dans un carré en touchant à chaque instant chacun des quatre côtés du carré. c Elle peut aussi se déplacer en roulant dans un couloir étroit en touchant les deux bords du couloir à chaque instant.

de diamètre 1 et d'aire maximale. En particulier il n'est toujours pas établi que pour chaque entier pair n, le petit polygone de plus grande surface est unique ni qu'il a nécessairement un axe de symétrie – même si les explorations numériques suggèrent que c'est le cas.

Largeur constante

D'autres polygones possèdent d'extraordinaires et inattendues propriétés d'optimalité. On peut en particulier citer les polygones de Reinhardt, qu'on déduit des polygones de Reuleaux.

Par construction, les polygones de Reuleaux ont une largeur constante: en les prenant pour former des roues de bicyclette, on n'est pas secoué en avançant!



4. Polygones de Reuleaux réguliers à 5, 7, 9 et 11 côtés.

Les polygones de Reuleaux sont utilisés en mécanique. Ce ne sont pas au sens strict des polygones, car leurs côtés sont des arcs de cercle et non pas des segments de droite. Le premier de ces polygones est le triangle de Reuleaux, nommé après l'ingénieur allemand Franz Reuleaux (1829-1905). Pour le construire, on part d'un triangle équilatéral de côté L, et on remplace chaque côté par un arc de cercle de rayon L et de centre le sommet opposé au côté (*voir la figure 3*).

Chaque polygone régulier ayant un nombre impair de côtés donne, de la même façon que le triangle, un polygone de Reuleaux régulier ayant une largeur constante (*voir la figure 4*).

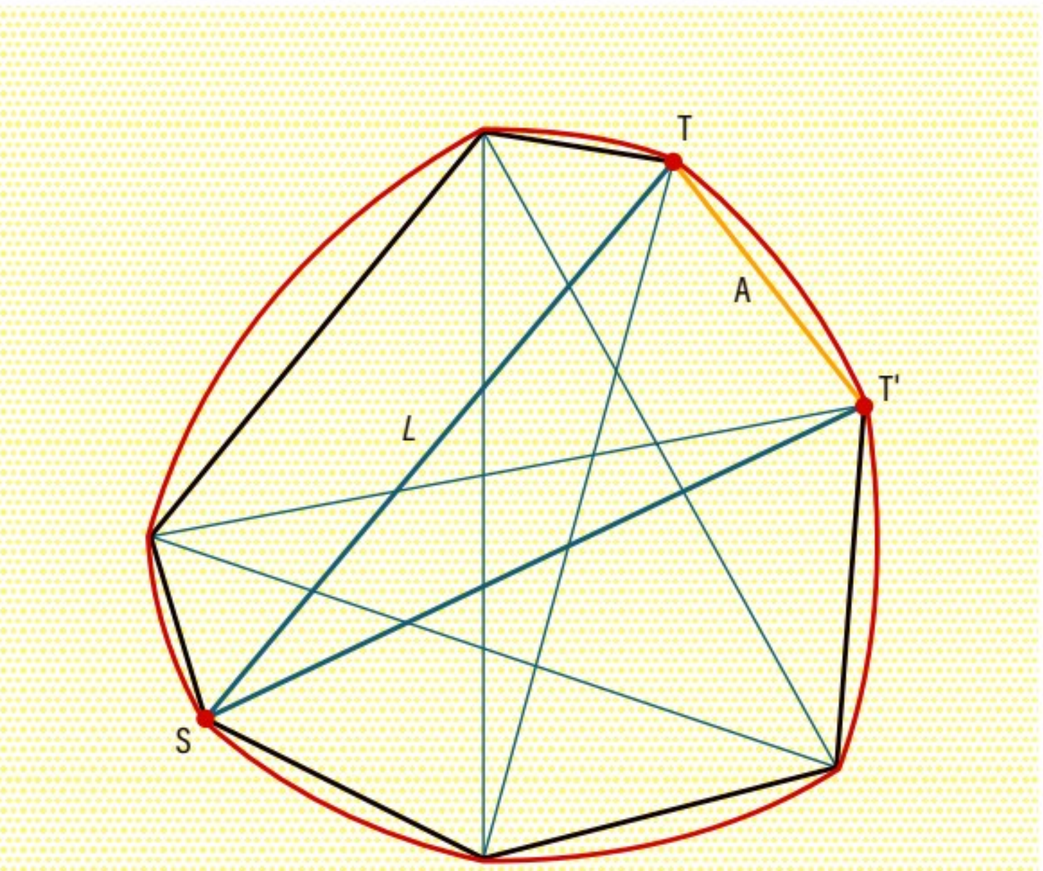
La propriété de largeur constante, que possèdent les polygones de Reuleaux réguliers, peut être obtenue bien plus généralement en procédant de la manière suivante. On considère un polygone convexe P ayant un nombre impair de côtés, dans lequel chaque sommet S est distant d'une longueur fixée L de deux sommets opposés T et T', et tel que les deux sommets opposés à S sont plus éloignés de S que tous les autres sommets (*voir le polygone en noir sur la figure 5*).

Cette disposition permet, pour chaque arête A, de tracer un arc de cercle de rayon constant L (*en rouge sur la figure 5*) dont le centre est situé sur le sommet S opposé à l'arête A et qui passe par les deux extrémités T et T' de l'arête. La figure ainsi obtenue est un polygone de Reuleaux général. Par construction, ces polygones ont une largeur constante: en les prenant pour former des roues de bicyclettes, on n'est pas secoué en avançant (moyennant de faire tourner le centre de la roue), ce qui est un peu étonnant!

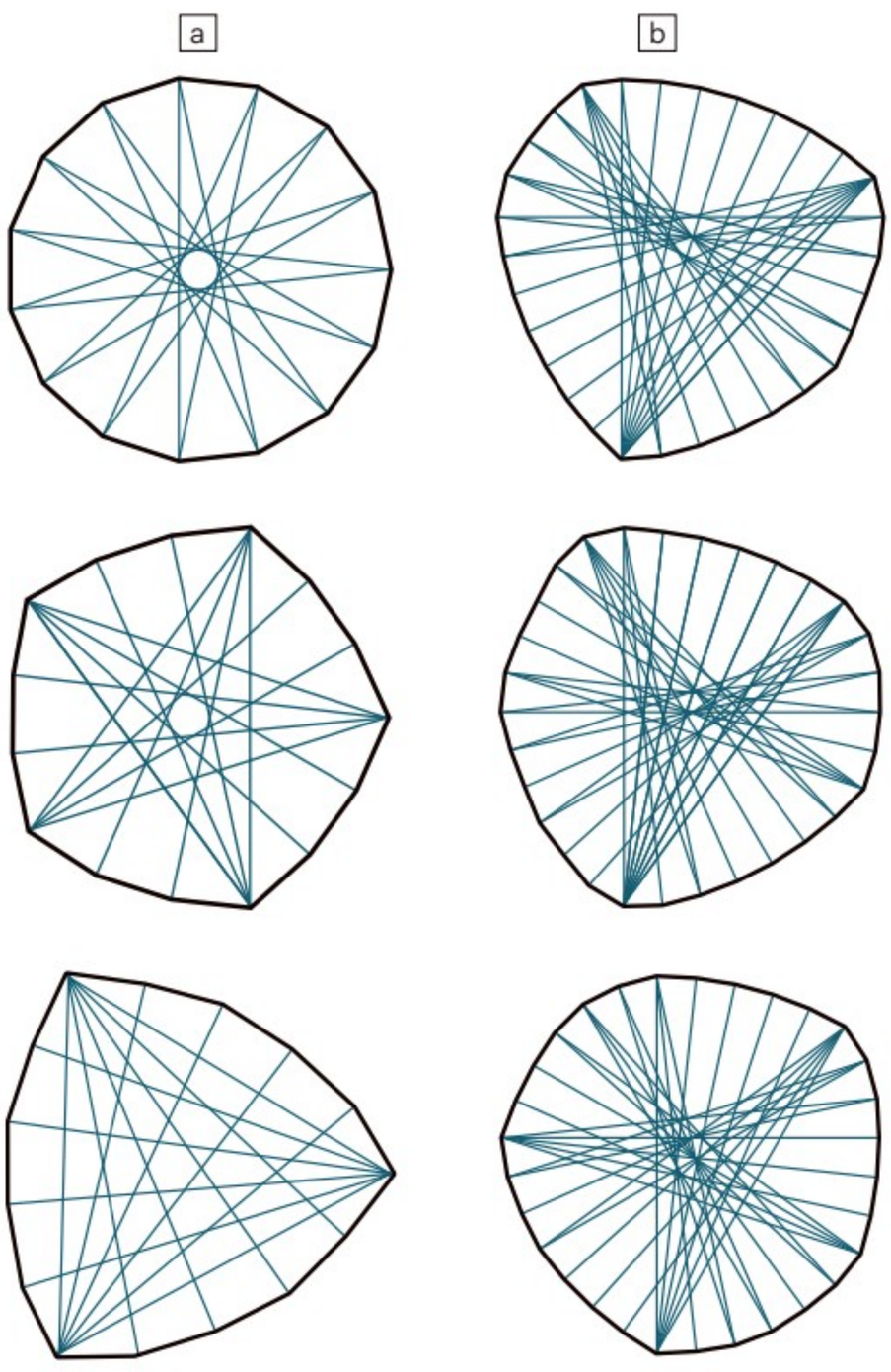
Signalons que le mathématicien français Joseph-Émile Barbier a démontré que toutes les courbes de largeur constante égale à 1 ont pour périmètre π. Concernant leurs surfaces, Wilhelm Blaschke et Henri-Léon Lebesgue ont tous deux démontré, de manière indépendante, que parmi toutes les formes du plan délimité par une courbe fermée et ayant la largeur constante 1, le disque de rayon 1/2 possède l'aire maximale, $\pi/4$, et le triangle de Reuleaux l'aire minimale, $(\pi/2-\sqrt{3}/2)$.

Polygones de Reinhardt

Nous pouvons à présent définir les polygones de Reinhardt: ce sont les figures qui servent de support aux polygones de Reuleaux généraux (autrement dit, leurs sommets sont les extrémités des arcs de cercle d'un polygone de Reuleaux), à la condition d'avoir tous leurs côtés de même longueur. Ce sont,



5. Polygone de Reuleaux général.



6. Polygones de Reinhardt périodiques [a] et sporadiques (c'est-à-dire non périodiques) [b]. Par définition, un polygone de Reinhardt est dit « périodique » si et seulement si, quand on suit son périmètre, les angles rencontrés constituent une suite périodique.

D'après M. Mossinghoff, Enumerating isodiametric and isoperimetric polygons, Journal of Combinatorial Theory, 2011

cette fois, des polygones au sens habituel, avec des segments de droites pour côté. Par définition ils sont équilatéraux (*voir la figure 6*).

Kevin Hare et Michael Mossinghoff ont démontré en 2019 que, pour un entier n donné et sauf pour certains cas dont la proportion tend vers 0, les polygones de Reinhardt sporadiques (c'est-à-dire non périodiques) sont plus nombreux que les polygones de Reinhardt périodiques (c'est-à-dire tels que, quand on suit leur périmètre, les angles rencontrés constituent une suite périodique). Les chercheurs ont aussi identifié une formule permettant de les compter quand n est de la forme $n = 2pq$, avec p et q deux nombres premiers différents. Dans le cas général, on ignore encore aujourd'hui comment compter ces polygones.

On sait construire des polygones de Reinhardt à n côtés pour tous les entiers n qui ne sont pas des puissances de 2. Malgré leur définition un peu compliquée, il y en a beaucoup, et ils recèlent tous des propriétés d'optimalité remarquables. Karl Reinhardt et ses successeurs ont en effet établi qu'un polygone de Reinhardt à n côtés possède :

- le plus grand périmètre possible parmi les polygones à n côtés ayant un diamètre fixé ;
- la plus grande largeur possible parmi les polygones à n côtés ayant un diamètre fixé ;
- la plus grande largeur possible parmi les polygones à n côtés ayant un périmètre fixé.

Cela contredit, une fois de plus, une idée naturelle, mais fausse : les polygones réguliers ne sont pas les seuls optimaux pour le périmètre quand le diamètre est fixé, pour la largeur quand le diamètre est fixé, et pour la largeur quand le périmètre est fixé. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Mulansky et A. Potschka, A zonogon approach for computing small convex polygons of maximum perimeter, *Mathematical Programming*, 2025.

C. Bingane et M. Mossinghoff, Small polygons with large area, *Journal of Global Optimization*, 2024.

K. Hare et M. Mossinghoff, Most Reinhardt polygons are sporadic, *Geometriae Dedicata*, 2019.

M. Mossinghoff, Enumerating isodiametric and isoperimetric polygons, *Journal of Combinatorial Theory*, 2011.

C. Audet *et al.*, Extremal problems for convex polygons, *Journal of Global Optimization*, 2007.

J. Foster et T. Szabo, Diameter graphs of polygons and the proof of a conjecture of Graham, *Journal of Combinatorial Theory*, 2007.

C. Audet *et al.*, The largest small octagon, *Journal of Combinatorial Theory*, 2002.

R. Graham, The largest small hexagon, *Journal of Combinatorial Theory*, 1975.

La plus ancienne guerre de l'eau

Loïc Mangin

Les témoignages archéologiques d'un conflit opposant il y a plus de 4500 ans deux cités-États mésopotamiennes pour des ressources hydriques sont au cœur d'une exposition au musée du Louvre.

Cet été 2026, du fait de la sécheresse, le Danube a atteint des niveaux historiquement bas. Pour enrayer ce phénomène, le gouvernement hongrois a décidé de construire un barrage afin de retenir l'eau et pouvoir refroidir les réacteurs de la seule centrale nucléaire du pays. Problème, le Danube arrose une dizaine de pays dont plusieurs, comme la Roumanie et la Serbie, l'utilisent de la même façon. Alors au nom de la souveraineté énergétique, le spectre d'une guerre de l'eau fait-il son apparition en Europe ?

De tels conflits, encore nombreux dans le monde, ne datent pas d'hier. Ainsi les archéologues ont-ils retrouvé la trace des plus anciennes guerres de l'eau dans une région qui, *a priori*, n'en manquait pas, la Mésopotamie, le « pays entre les deux fleuves ». Et il y a peut-être des enseignements à en tirer pour gérer les crises actuelles ; c'est le pari du musée du Louvre, avec son exposition « L'eau primordiale. Leçons de Mésopotamie ».

Le parcours révèle comment l'eau a été vénérée ou crainte dans les royaumes qui se sont succédé entre les deux fleuves nourriciers – le Tigre et l'Euphrate – coutumiers à l'époque de crues soudaines et destructrices.

Pendant longtemps, la région était particulièrement humide, la mer s'avançait bien plus au nord qu'aujourd'hui. Ce n'est qu'à partir de la fin du IV^e^ millénaire que le climat devint plus aride et contraignant pour l'agriculture. Cependant, les populations avaient inventé différentes méthodes d'irrigation et l'on vit se développer un dense réseau de canaux, entretenus avec soin. Les premières cités-États ont fait leur apparition dans la seconde moitié du III^e^ millénaire, largement organisées autour des accès aux ressources et notamment aux voies d'eau. Certaines, notamment Lagash, à 150 kilomètres au nord-est de l'actuelle Bassorah, étaient même de véritables Venise antiques.

Du fait de son importance et de ses caprices, l'eau était au cœur des relations aux dieux, et ce faisant des prérogatives des souverains dont les grands travaux, comme la construction et l'entretien des canaux, garantissaient la prospérité du pays, matérialisaient leur piété et asseyaient leur pouvoir. Pour preuve, dans beaucoup de représentations de divinités, celles-ci portent un vase d'où jaillit de l'eau en deux flots symétriques renvoyant aux deux fleuves tutélaires. Et l'on retrouve cette iconographie, d'ordinaire réservée au registre divin, dans une statue de Gudea, prince (ou *ensí*) de Lagash vers 2120 avant notre ère (*voir page ci-contre, à droite*).

Cette cité-État fut longtemps opposée à Umma pour le contrôle de Gu-edina, un territoire frontalier particulièrement fertile. En bordure de cette zone se trouve le site de Tello (l'antique cité de Girsu, appartenant au royaume de Lagash) où l'on a mis au jour les restes du plus ancien pont connu, qui enjambait un canal et fut en usage de 2800 à 2000.

C'est au même endroit que fut découverte à la fin du XIX^e^ siècle la stèle dite « des vautours » (*voir page ci-contre, à gauche*) qui fait état de la victoire vers 2450 avant notre ère du roi de Lagash, Eannatum, sur Enakalli, souverain d'Umma. L'objet comporte deux faces, l'une dite « historique », l'autre « mythologique ». Sur la première, Eannatum marche à la tête de son armée, dont les soldats, dans la partie supérieure, piétinent les vaincus, leurs restes étant emportés par les vautours.

Côté mythologique, les dieux sont au premier plan, dont Ninhursag, la déesse des montagnes et épouse d'Enki, dieu des eaux. On distingue aussi Ningirsu, protecteur de Lagash, associé à l'orage et donc aux eaux bienfaitrices pour l'agriculture. L'épisode ici gravé n'est que l'un d'une longue série qui a opposé les deux cités pendant près de 150 ans et durant laquelle chacune des deux rivales gagna plusieurs fois. Espérons que l'on n'en viendra pas à de telles extrémités entre Budapest, Bucarest, Zagreb... ■



Loïc Mangin
rédacteur en chef adjoint à *Pour la Science*

À VOIR

L'Eau primordiale. Leçons de Mésopotamie, au musée du Louvre, à Paris, jusqu'au 15 mars 2027. www.louvre.fr



© Musée du Louvre / © RMN Grand Palais

Entretien avec Simon Galas

Biologie animale

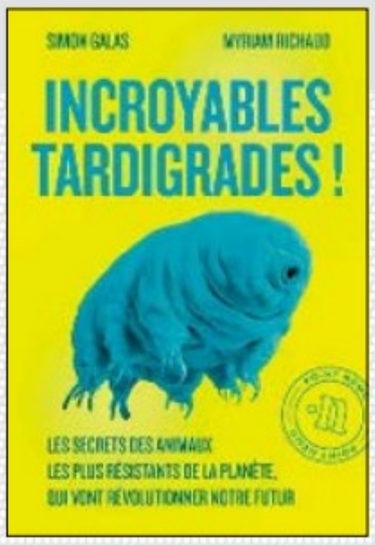
L'incroyable résistance des tardigrades

Qui sont les tardigrades et en quoi sont-ils extraordinaires?

Les tardigrades sont des organismes microscopiques de 0,05 à 1,2 millimètre de long, qui existent depuis plus de 500 millions d'années. Ils ont commencé leur périple dans les fonds marins, puis ont conquis le milieu terrestre il y a 400 millions d'années. Ils se sont alors diversifiés et adaptés, si bien qu'on en compte aujourd'hui près de 1500 espèces distinctes, qui peuplent tous les continents. En traversant les époques et les changements climatiques – qui ont notamment entraîné une alternance de périodes sèches et humides –, ils ont acquis une résistance exceptionnelle. Ils ont d'ailleurs survécu à toutes les extinctions de masse qui ont secoué la planète.

Pourriez-vous décrire plus précisément cette résistance extrême?

Les tardigrades sont capables de survivre sous une forme dormante extrêmement déshydratée, qualifiée de cryptobiose. Dans cet état, ils résistent à des rayonnements mille fois plus puissants que ceux qui tueraient un être humain (y compris ceux qui règnent dans l'espace, où des tardigrades ont survécu sans protection lors d'une expérience). Ils supportent également une pression de 7,5 gigapascals, soit celle qui règne dans le manteau terrestre à une profondeur de 180 kilomètres. Avec mon collègue Fumihisa Ono, de l'université d'Okayama, nous avons reproduit cette pression grâce à des presses spéciales et montré que les tardigrades ne subissent aucune altération de leur structure. Les biophysiciens peinent à l'expliquer: toutes les espèces connues, y compris les bactéries, se désintègrent à une telle pression – très supérieure à celle qui est nécessaire pour produire du diamant!



Incroyables Tardigrades!
Simon Galas et Myriam Richaud
Point Nemo, 2026
160 pages, 16,90 euros

Et pour la résistance à la déshydratation et au rayonnement, a-t-on des explications?

De façon générale, plus la taille d'un organisme est petite, plus il est facile de limiter les dommages liés à la perte d'eau. Mais si cette résistance atteint un tel degré chez le tardigrade, c'est en raison de son génome particulier: ce dernier comporte 40% de gènes inconnus, selon un séquençage effectué par l'équipe de Takekazu Kunieda, de l'université de Tokyo. Ces gènes viendraient d'espèces qui ont disparu et auraient été acquis par les tardigrades grâce à leur extrême porosité à l'ADN environnemental – issu de bactéries, de plantes, de poils d'animaux emportés par le vent... La déshydratation endommage en effet notablement les chromosomes et quand de l'eau arrive, souvent par une simple goutte de pluie, elle apporte cet ADN avec elle. Celui-ci s'infiltre jusque dans le noyau des cellules, de sorte que le tardigrade l'intègre parfois à ses propres chromosomes lorsqu'il les répare.

Comment ces gènes aident-ils les tardigrades à survivre?

L'un d'eux, appelé *Dsup* (pour *Damage suppressor*), code une protéine qui se colle à l'ADN et protège les chromosomes du stress oxydant – que ce dernier soit provoqué par la déshydratation ou par un rayonnement nocif. D'autres protéines, nommées CAHS, jouent un rôle important: lorsqu'un tardigrade se déshydrate, ces protéines en forme d'haltères s'accrochent progressivement les unes aux autres et constituent une sorte de grillage, qui préserve la forme de la cellule et maintient toutes les structures cellulaires. L'animal reste ainsi figé, préservé dans son entier, grâce à ce squelette moléculaire.

Pour le reste, c'est *terra incognita*. Les génomes de tardigrade séquencés jusqu'ici comptent de 13000 à 18000 gènes (contre 21000 pour l'être humain), dont nous ignorons presque tout. Leur étude a seulement commencé en 2016 et nous peinons à obtenir des financements, ces animaux étant très petits et inoffensifs pour l'humain. C'est dommage, car ces recherches ont de multiples applications potentielles...

Quelles sont ces applications?

Une étude publiée en 2025 par l'équipe de Giovanni Traverso, à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), suggère par exemple que la protéine Dsup pourrait aider à améliorer les radiothérapies, dans le traitement des tumeurs cancéreuses. Le plus souvent, on utilise des rayons X



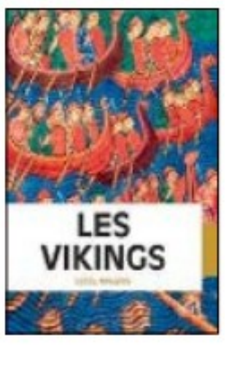
Simon Galas
généticien, biologiste moléculaire et cellulaire, professeur à l'université de Montpellier

pour casser les molécules d'eau des cellules tumorales, mais le problème est que cela abîme aussi les cellules environnantes, provoquant parfois des cancers «radio-induits» dans les dix ou quinze ans qui suivent. Les chercheurs ont alors injecté de l'ARN messager de tardigrade dans ces cellules, afin de déclencher la fabrication de protéines Dsup chez des souris atteintes d'un cancer de la gorge, puis ont irradié la tumeur. Les dommages aux chromosomes des cellules environnantes ont été réduits de 60%. L'utilisation de ces protéines pourrait donc permettre d'augmenter les doses de rayons X tout en diminuant le risque de cancers radio-induits.

Autre application potentielle: la greffe d'organes. Avec mon équipe, nous avons montré qu'insérer le gène *Dsup* dans le génome de nématodes ralentit le métabolisme et prolonge la durée de vie de ces petits vers. D'autres chercheurs ont obtenu des résultats voisins avec des cellules humaines. Perfuser les organes à transplanter avec ces protéines de tardigrade permettrait alors peut-être de les préserver, par exemple lorsqu'il faut les transférer d'un hôpital à un autre.
Plus généralement, ces découvertes pourraient un jour aider à lutter contre le vieillissement. ■

Propos recueillis par Guillaume Jacquemont

Le choix de la rédaction



Archéologie

Les Vikings

Lucie Malbos Puf, 2026, 256 pages, 16 euros

Le mot «Viking» évoque bien souvent l'image d'un guerrier coiffé d'un casque à cornes et buvant dans le crâne de ses ennemis. Hélas, aucun casque de ce type n'a jamais été découvert dans les vestiges de cette civilisation et les récipients forgés dans «le bois courbe des crânes» que décrivent les textes anciens étaient plus probablement… des cornes de bovins!
En convoquant les sources historiques et archéologiques, cet ouvrage donne ainsi à voir, par-delà les fantasmes, la réalité de cette figure omniprésente dans la culture populaire.



Neurosciences

Explorer le cerveau grâce à l'IRM

A. Attyé, E. Barbier, C. Delon-Martin, M. Dojat et J. Warnking
UGA Éditions, 2026, 200 pages, 25 euros

La physique de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), qui a valu deux prix Nobel à ses concepteurs, est pour le moins complexe. Cinq spécialistes du sujet l'expliquent ici avec clarté et pédagogie, tout en présentant les déclinaisons, potentialités et limites de cette technologie emblématique. Plutôt destiné aux professionnels, leur ouvrage reste accessible à un public plus large et ravira tous les curieux de sciences.



Santé

Le Sommeil de l'enfant et de l'adolescent

Pierre Desvergnes Ellipses, 2026, 162 pages, 16 euros

Un tiers des adolescents déclarent très mal dormir, selon les chiffres de Santé publique France. D'où l'importance à la fois d'en comprendre les impacts – et ils sont nombreux, par exemple sur la santé, l'humeur ou les apprentissages – et de les aider à retrouver un meilleur sommeil. Écrit par un médecin spécialiste du sujet et structuré en une centaine de questions très concrètes, ce petit livre donne toutes les clés pour remplir ces deux objectifs.

Et aussi

Médecine

Un cœur, un destin

Iradj Gandjbakhch
Odile Jacob, 2026,
192 pages, 20,90 euros





Biologie végétale

Racines

Philippe Hinsinger et Christophe Jourdan
Quæ, 2026,
120 pages, 20 euros

Le fossile qui a bousculé l'arbre des chélicérates

Hervé Le Guyader

Un fossile vieux de quelque 500 millions d'années précise l'origine des arthropodes terrestres et aquatiques dotés de chélicères – de puissants appendices à l'avant de la tête comme les crochets venimeux des araignées.

Araignées, scorpions, acariens… tout le monde connaît des chélicérates terrestres. Mais pour un zoologiste, ce taxon est bien plus diversifié. Aux trois susmentionnés, il faut rajouter dix autres groupes dont les limules – des arthropodes marins en forme de fer à cheval – et les pycnogonides ou araignées d'eau. Ces deux groupes, qui émergent les premiers dans les phylogénies, témoignent de l'origine marine des chélicérates. Au sein de ce taxon, la diversité des plans d'organisation (la disposition relative des organes d'un groupe à un autre) est étonnante. Parmi les quelques caractères anatomiques que tous ces animaux partagent, le plus important est la chélicère, le (souvent) puissant appendice buccal antérieur qui donne des crochets comme celui, venimeux, des araignées et une grande variété de pinces.

L'AUTEUR



Hervé Le Guyader
professeur honoraire de biologie évolutive à Sorbonne Université, à Paris

Avec les mandibulates (millepattes, crustacés, insectes…), les chélicérates forment les euarthropodes. Intéressant qu'ils soient associés à un autre groupe également caractérisé par un appendice buccal, la mandibule. Et que dire du fait qu'on appelait auparavant « antennates » les mandibulates ? De fait, les chélicérates ne portent pas d'antennes, et l'anatomie comparée a montré que la paire de chélicères est l'homologue de la deuxième paire d'antennes des mandibulates. Ainsi, trouver l'origine de la chélicère, c'est trouver celle des chélicérates. Sur ce point précis, le fossile récemment découvert et étudié par Rudy Lerosey-Aubril et Javier Ortega-Hernández, de l'université Harvard, aux États-Unis, apporte une contribution majeure. Car jusqu'alors, les fossiles exhumés de présumés chélicérates étaient plutôt déconcertants…

Un casse-tête fossile

Dans une revue très soignée parue en 2022, Cédric Aria, alors à l'université du Nord-Ouest, à Xi'an, en Chine, récapitule ce que l'on sait sur l'origine des arthropodes et les débuts de leur évolution. En particulier, il commente avec précision la situation de fossiles dans divers gisements allant du Cambrien moyen à l'Ordovicien (entre 500 et 440 millions d'années) appelés « mégacheiriens », dont le nom, qui signifie « grand appendice », en désigne la paire la plus antérieure de ces animaux. Or, selon les fossiles, ce grand appendice se présente comme une pince raptrice ou comme une structure allongée rappelant une antenne. Les paléontologues ont proposé deux interprétations. Tout d'abord, la pince a fait penser à une chélicère, si bien qu'on a envisagé les mégacheiriens comme les premiers chélicérates. Mais le fait que certains de ces appendices prennent la forme d'une antenne suggérait aussi que ces animaux existaient avant la divergence entre chélicérates et mandibulates…

Pour compliquer encore les choses, un de ces gisements, les schistes de Burgess, dans les Rocheuses canadiennes, en Colombie-Britannique, semble contenir des fossiles de chélicérates cambriens… mais assez curieux. Suivant Cédric Aria, la communauté reconnaît ces fossiles – *Mollisonia*, *Habelia*, *Sanctacaris* – comme des euchélicérates, sous-groupe qui rassemble les chélicérates sans les

Fossile : © Rudy Lerosey-Aubril ; illustration : reconstruction artistique par Masato Hattori © Université Harvard ; silhouette : © Junnn11/Wikimedia commons (CC BY-SA 4.0)



Sur cette contre-empreinte du fossile de *Megachelicerax cousteaui* récemment décrit, c'est-à-dire la face de la roche qui porte les restes de la partie ventrale du spécimen *(à gauche)*, on distingue notamment en haut les chélicères et, en noir le long de l'animal, des branchies.

La conservation remarquable du fossile mis au jour a permis une reconstitution précise des morphologies dorsale et ventrale de l'arthropode *(ci-dessous)*. Outre les chélicères, cet animal marin arbore cinq autres paires d'appendices céphaliques biramés qui lui servaient à se nourrir et à explorer son environnement.



Megachelicerax cousteaui
Longueur : env. 10 cm



* * *

120000

On estime que le nombre d'espèces décrites de chélicérates s'élève à plus de 120 000. Certaines branches, comme les araignées et les acariens, en comptent plusieurs dizaines de milliers. Les limules, seulement quatre encore vivantes.

500

Le plus ancien chélicérate connu, *Megachelicerax cousteaui*, vivait il y a environ 500 millions d'années dans un environnement marin.

* * *

486

On estime que les arachnides (araignées, scorpions, faucheux…), les chélicérates terrestres actuels, ont commencé à coloniser la terre ferme à la limite entre le Cambrien et l'Ordovicien, il y a 486 millions d'années.

* * *

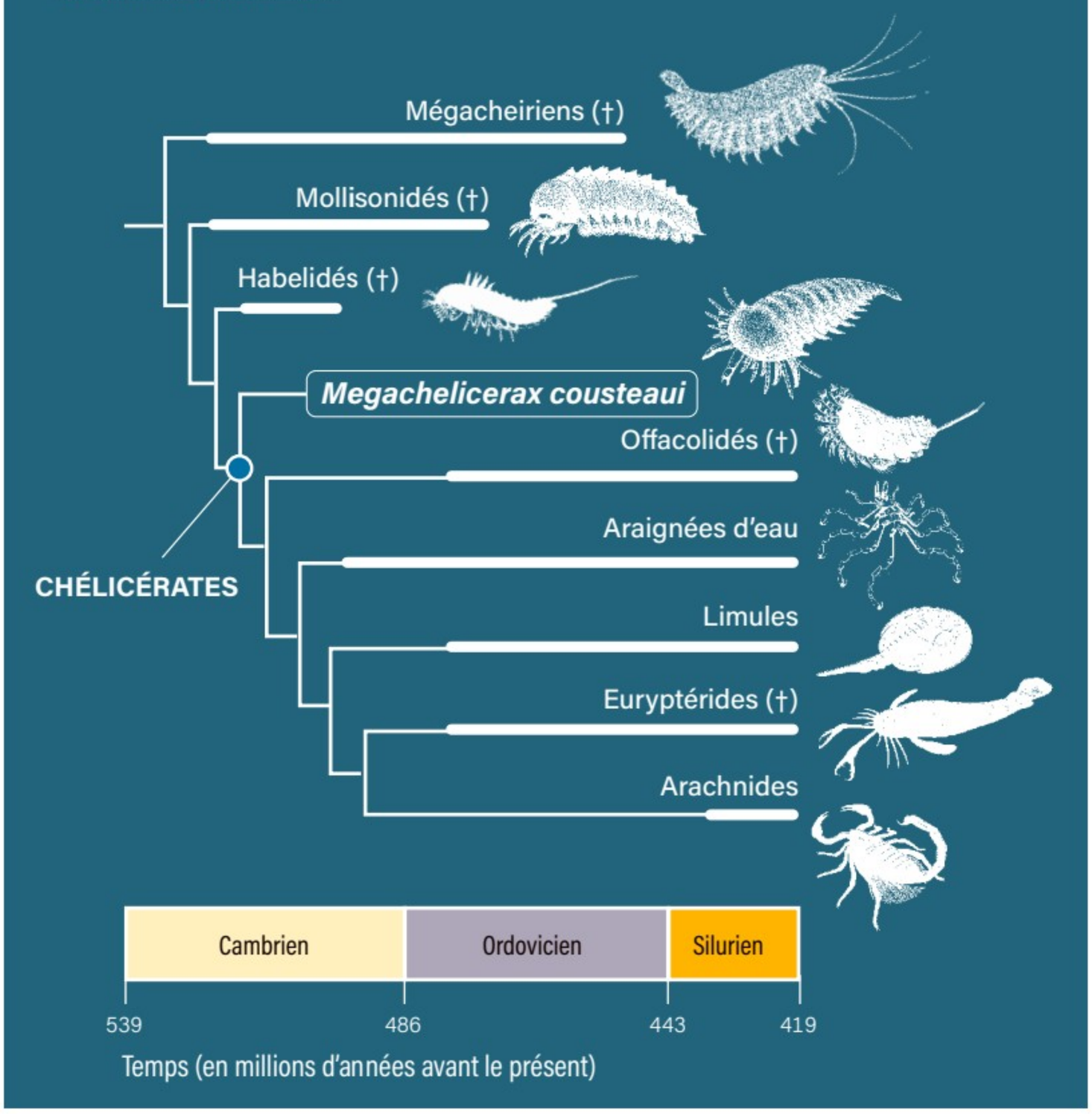
pycnogonides. Effectivement, ils possèdent de nombreux caractères des chélicérates, que l'on retrouve par exemple chez les limules. Toutefois, il leur manque l'essentiel : ils n'ont pas de chélicères, y compris le plus célèbre d'entre eux, *Sanctacaris*. Les appendices céphaliques de l'animal se terminent par de puissantes griffes qui, d'un point de vue anatomique, ne sont ni des antennes ni des chélicères (on l'a d'ailleurs baptisé sur le terrain *santa claws* – « griffes saintes »).

Ainsi, d'un côté on a des fossiles avec des appendices à la bonne place, mais qui ne sont pas toujours des chélicères et, de l'autre, des chélicérates avérés, mais sans chélicères… Impossible, donc, de savoir avec ces seuls spécimens à quoi les premiers chélicérates ressemblaient et quand ils sont apparus. Mais la biologie du développement apporte un indice important.

Ce sont Prashant Sharma et ses collègues, à l'université Harvard, qui l'ont mis au jour en étudiant en 2012 l'évolution de la chélicère au sein des arthropodes. Chez les chélicérates, les taxons qui apparaissent comme les plus anciens de la phylogénie (pycnogonides, limules, scorpions et faucheux) possèdent des chélicères à trois segments, alors qu'on n'en trouve plus que deux chez les taxons plus récents, comme les araignées. Il est alors naturel de considérer l'état à trois articles comme ancestral. L'équipe a voulu voir si la biologie du développement corroborait cette intuition.

Le nouvel arbre des chélicérates

Le fossile découvert récemment aux États-Unis, *Megachelicerax cousteaui*, s'avère le plus ancien chélicérate confirmé connu, le seul à présenter sans conteste tous les attributs de ce groupe, notamment des chélicères (des sortes de pinces à l'avant de la tête). L'arbre de parenté que ses découvreurs ont reconstitué en comparant son anatomie à celle de divers chélicérates actuels (arachnides, limules, araignées d'eau) ou disparus (euryptérides, offacolidés), et à celle de fossiles qui en présentaient certains attributs (mégacheiriens, mollisonidés comme *Mollisonia*, habelidés comme *Habelia* et *Sanctacaris*), révèle que tous ces derniers ne sont finalement pas des chélicérates. Sur cette version simplifiée, les traits plus épais signalent les dates à partir desquelles on a trouvé des fossiles des branches concernées.



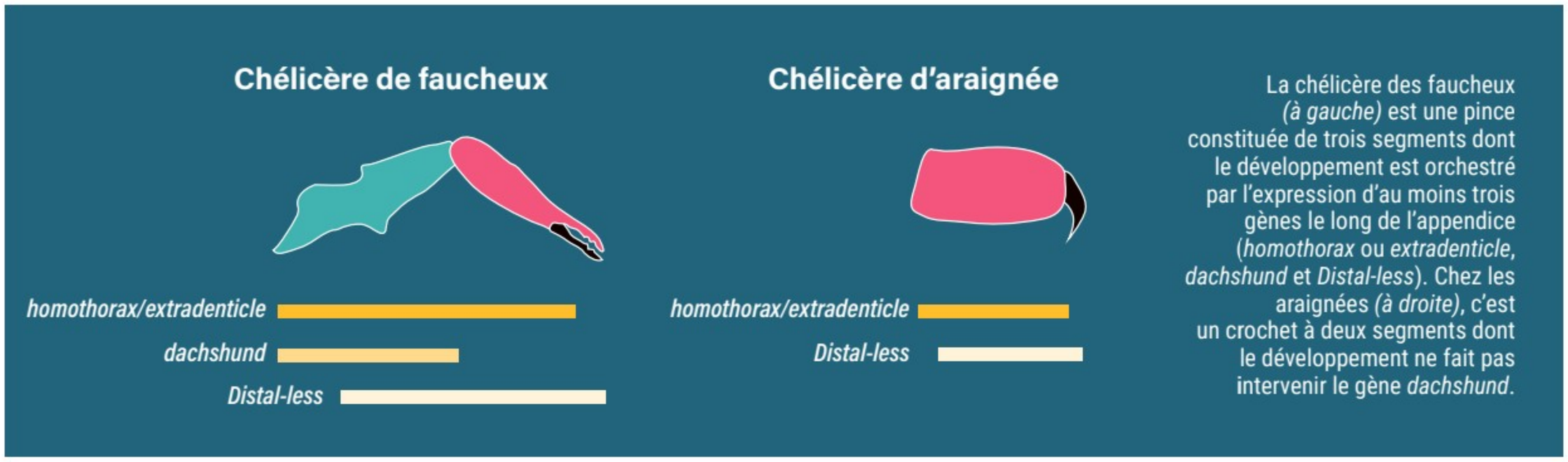
Le segment perdu des araignées

Pour ce faire, elle s'est intéressée aux gènes qui structurent les pattes des arthropodes le long de leur axe proximodistal (du centre du corps vers l'extrémité des membres). En effet, tous les appendices ventraux des arthropodes sont homologues : ils se forment tous selon le même schéma, orchestré dans les grandes lignes par l'expression des mêmes gènes. En d'autres termes, les chélicères, mandibules et antennes ne sont autres que des pattes qui se sont spécialisées lors du développement.

Les pattes des arthropodes sont constituées de trois parties : proximale, médiane et distale. Les gènes qui les structurent sont au nombre de quatre : *extradenticle*, *homothorax*, *dachshund* et *Distal-less*. Au moins trois d'entre eux s'expriment dans une patte. Leurs domaines d'expression sont répartis le long du membre, chacun intervenant dans le développement d'une partie : *extradenticle* ou *homothorax* pour la partie proximale, *dachshund* pour la médiane, et *Distal-less* pour la distale.

Dans les antennes des mandibulates, les domaines d'expression de ces gènes se chevauchent, mais

Arbre : © Pour la Science, d'après J. C. Lamsdell, Fossil reveals the origins of chelicerates arthropods, Nature, 2026 ; arthropodes : © Junnn11/Wikimedia commons (CC BY-SA 4.0)



cela n'empêche pas trois d'entre eux – *extradenticle*, *homothorax* et *Distal-less* – d'intervenir dans la spécialisation des parties de ces appendices (ce que plusieurs équipes ont montré en supprimant un ou plusieurs gènes). En revanche, le domaine d'expression de *dachshund* est souvent absent et, quand il est présent, il n'intervient pas dans la segmentation.

Dans les chélicères, l'organisation des domaines d'expression des gènes est similaire à celle qu'on a observée dans les antennes, à une exception: celui de *dachshund* est totalement absent des chélicères des araignées. Cette absence serait-elle liée à la disparition d'un segment dans ces appendices?

Pour le savoir, l'équipe de Prashant Sharma a choisi un faucheux (ou opilion) comme matériel – un animal dont les chélicères ont trois segments. Or celles-ci présentent un domaine d'expression de *dachshund* qui recouvre le segment proximal (*voir la figure ci-dessus*). Il apparaît donc qu'ancestralement quatre gènes s'exprimaient bien pour structurer une chélicère à trois segments, et que secondairement le domaine *dachshund* a disparu dans certains groupes, comme les araignées, en corrélation avec la perte du segment proximal. L'intuition était bonne!

Bien évidemment, cette donnée essentielle ne dit rien sur ce qui a pu se passer avant l'apparition des chélicérates. Mais la découverte de *Megachelicerax cousteaui* dans les schistes de Wheeler, dans l'Utah – un site cambrien daté d'environ 500 millions d'années connu depuis le début du XXe siècle par sa diversité en trilobites –, aide à assembler les pièces du puzzle. Le nom même du fossile indique son originalité: *Megachelicerax*, «grande chélicère». Et cette grande chélicère est à trois segments!

L'aube des chélicérates

Grâce à ce fossile, qui devient le plus ancien chélicérate avéré connu, la paléontologie, l'anatomie comparée et la biologie du développement disent maintenant la même chose: les premiers chélicérates arboraient des chélicères à trois segments. La phylogénie positionne *M. cousteaui* à la base des chélicérates, tous les autres fossiles susnommés étant antérieurs: des mégacheiriens (avec pinces ou antennes) existaient avant la séparation des chélicérates, et les hypothétiques chélicérates des schistes de Burgess sans chélicères sont plutôt des proches cousins des premiers chélicérates…

De plus, le corps de *M. cousteaui* est divisé en deux parties (prosome et opisthosome, la partie proéminente de l'abdomen chez les araignées) et ressemble ainsi à ce que l'on trouve chez les limules, mais aussi chez les fossiles sans chélicères des schistes de Burgess, avec lesquels il a cohabité. Il s'agirait donc du plan d'organisation ancestral. Celui des pycnogonides, à l'opisthosome vestigial, paraît très dérivé.

Qu'aurait dit le commandant Cousteau de cette dédicace? Assurément, il en aurait été ravi, d'autant plus que les fonds colonisés par tous ces arthropodes se situaient à une profondeur compatible avec une plongée en scaphandre autonome. ■

© Pour la Science, d'après P. P. Sharma et al., Evol. Dev., 2012

BIBLIOGRAPHIE

R. Lerosey-Aubril et J. Ortega-Hernández, A chelicera-bearing arthropod reveals the Cambrian origin of chelicerates, *Nature*, 2026.

C. Aria, The origin and early evolution of arthropods, *Biological Reviews*, 2022.

D. A. Legg, *Sanctacaris uncata*: The oldest chelicerate (Arthropoda), *Naturwissenschaften*, 2014.

P. P. Sharma *et al.*, Evolution of the chelicera: A *dachshund* domain is retained in the deutocerebral appendage of Opiliones (Arthropoda, Chelicerata), *Evolution & Development*, 2012.

Et j'atténue le son !

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Quand un son s'éloigne, son intensité diminue, mais de façon plus prononcée pour les aigus que pour les graves. Plusieurs effets se combinent pour l'expliquer.

Soudain, un éclair déchire le ciel. Le claquement sec et intense d'un coup de tonnerre proche se transforme progressivement en un grondement sourd et presque discret lorsque l'orage s'en va plus loin. Cela n'a pas empêché une fanfare de passer. Et là encore, le son net et cuivré de la formation s'atténue et s'assourdit progressivement avec la distance. Dans les deux cas, et nous l'avons tous constaté, quand une source sonore s'éloigne de nous, l'intensité sonore que nous percevons diminue. Mais avez-vous remarqué que cette atténuation est plus importante pour les aigus que pour les graves ? Pour expliquer ce phénomène, qui n'est pas sans conséquence sur l'écholocalisation des chauves-souris, nous le verrons, plusieurs effets se combinent : la géométrie, la viscosité de l'air, la conduction thermique et d'autres encore. Reste à démêler les contributions de chacun…

Dans toutes les directions

Commençons par la seule géométrie et claquons des mains dans de l'air au repos. En comprimant localement le fluide, nous produisons une perturbation. Lorsque la zone d'air comprimée se détend, elle appuie sur l'air environnant, qui se comprime à son tour, et ainsi de suite. La perturbation se propage dans toutes les directions tandis que chaque petite portion d'air n'effectue qu'un mouvement bref et de faible amplitude avant de revenir pratiquement à sa position initiale. Nous avons créé une onde sonore !

Celle-ci transporte, d'une part, de l'énergie potentielle élastique, car l'air se comprime localement comme un ressort, et, d'autre part, de l'énergie cinétique associée au mouvement local de l'air pendant le passage de l'onde. En l'absence de dissipation, l'énergie totale transportée par l'onde reste constante. Si la source est quasi ponctuelle, cette énergie traverse des sphères de plus en plus grandes à mesure que l'onde s'éloigne : la même énergie doit donc se répartir sur des surfaces de plus en plus grandes.

Or la surface d'une sphère est proportionnelle au carré de son rayon. L'intensité acoustique, c'est-à-dire l'énergie qui traverse une unité de surface par unité de temps, est inversement proportionnelle à la surface de cette sphère et donc inversement proportionnelle au carré de la distance à la source. Lorsque l'on double la distance qui nous sépare d'une source sonore, l'intensité acoustique est divisée par quatre.

Cette décroissance géométrique est une conséquence de la conservation de l'énergie dès lors que la source est ponctuelle et émet dans toutes les directions, quels que soient la fréquence et le milieu de propagation. En pratique, plutôt que l'intensité acoustique elle-même, exprimée en watts par mètre carré, on exprime généralement le niveau sonore en décibels (dB). Par convention, 0 dB correspond approximativement au seuil d'audibilité de l'oreille humaine. Cette unité fonctionne selon une échelle logarithmique : une augmentation de 10 dB, correspond à une multiplication de l'intensité par 10, de 20 dB à une multiplication par 100. Typiquement, à une distance de 1 mètre, le niveau sonore d'un lave-vaisselle est d'environ 50 dB, celui d'un sèche-cheveux de 80 dB et celui d'un marteau-piqueur peut atteindre 110 dB. Sur cette échelle, multiplier la distance par 10 fait perdre 20 dB. En prenant

LES AUTEURS



Jean-Michel Courty
professeur de physique à Sorbonne Université, au laboratoire Kastler-Brossel



Édouard Kierlik
professeur de physique à Sorbonne Université, au LPTMC (CNRS, SU)

© Bruno Vacaro

* * *

110

C'est l'intensité sonore, en décibels, d'un marteau-piqueur situé à 1 mètre de vos oreilles.

Écholocalisation

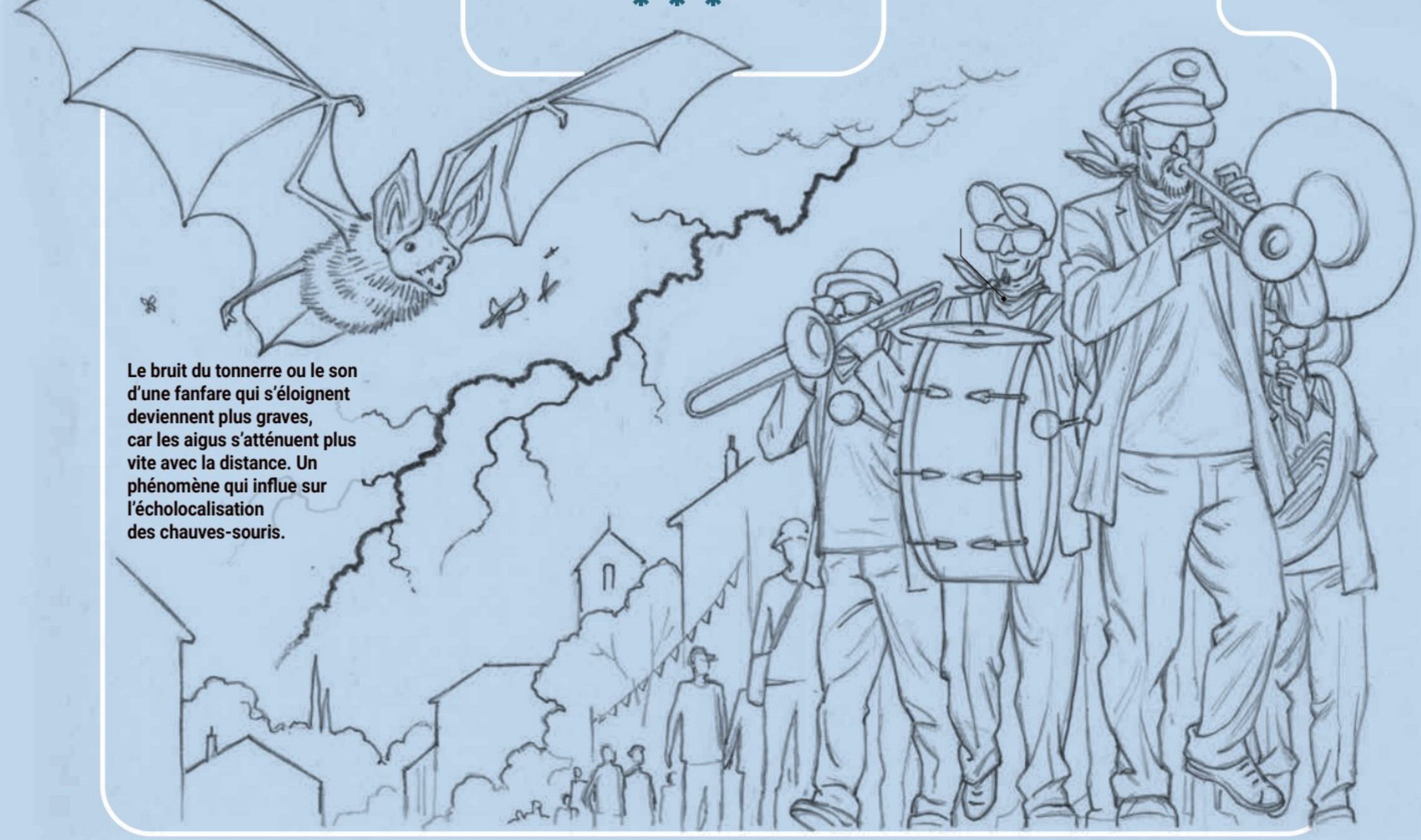
Ce sens, dont disposent les chauves-souris, consiste à émettre des sons et à en percevoir les échos renvoyés par les éléments de l'environnement pour se repérer ou chasser.

* * *

* * *

460 Hz

C'est la fréquence de relaxation du diazote de l'air quand celui-ci est à 20 °C et contient 70 % d'humidité relative.



Le bruit du tonnerre ou le son d'une fanfare qui s'éloignent deviennent plus graves, car les aigus s'atténuent plus vite avec la distance. Un phénomène qui influe sur l'écholocalisation des chauves-souris.

comme référence le niveau sonore à 1 mètre, à 10 mètres l'intensité est divisée par 100, soit une perte de 20 dB, à 100 mètres, elle est divisée par 10000, soit une perte de 40 dB et à 1000 mètres, la perte atteint 60 dB.

Ça frotte et ça chauffe

Malgré les complications que constituent la réverbération et l'absorption des sons sur les surfaces rencontrées lors de la propagation, cette loi géométrique est plutôt bien vérifiée au quotidien pour les sons ordinaires, mais elle surestime largement la portée réelle des sons. Le bruit d'un marteau-piqueur situé à 10 kilomètres ne nous paraît certainement pas réduit aux quelque 30 dB que prédirait la seule loi géométrique. Pourquoi ? Parce qu'une partie de l'énergie du son est absorbée par l'air.

Commençons par deux mécanismes inévitables : la conduction thermique et la viscosité. Les variations de pression de l'air dues à l'onde sonore s'accompagnent de variations de température et mettent l'air en mouvement. Pour un niveau sonore de 80 dB (un sèche-cheveux), la variation de pression est de 0,2 pascal (Pa), celle de température de 0,00016 °C et l'air acquiert une vitesse de 0,5 millimètre par seconde. L'air n'est plus un milieu uniforme : des zones sont plus chaudes que d'autres et la vitesse varie selon les régions.

La conduction thermique tend alors à uniformiser la température dans le milieu par un transfert d'énergie des endroits chauds vers les froids tandis que la viscosité a tendance à égaliser les vitesses. Le résultat combiné de ces

deux mécanismes est une dissipation de l'énergie acoustique en chaleur. À la décroissance géométrique de l'intensité acoustique s'ajoute donc une autre, exponentielle cette fois, due à la dissipation. Le coefficient qui caractérise ce phénomène est proportionnel au carré de la fréquence: plus le son est aigu, plus l'atténuation est importante. Dans le domaine des ultrasons, à 100 kilohertz (kHz), l'absorption atteint 160 dB pour 100 mètres. Les ultrasons ne se propagent décidément pas bien loin dans l'air. Mais à 1 kHz, l'atténuation due à ces deux mécanismes n'est que de 0,016 dB pour 100 mètres, soit 1,6 dB à 10 kilomètres! Autrement dit, pour cette composante du bruit de notre marteau-piqueur, elle ne changerait presque rien à la prédiction fondée sur la seule géométrie. Le compte n'y est pas.

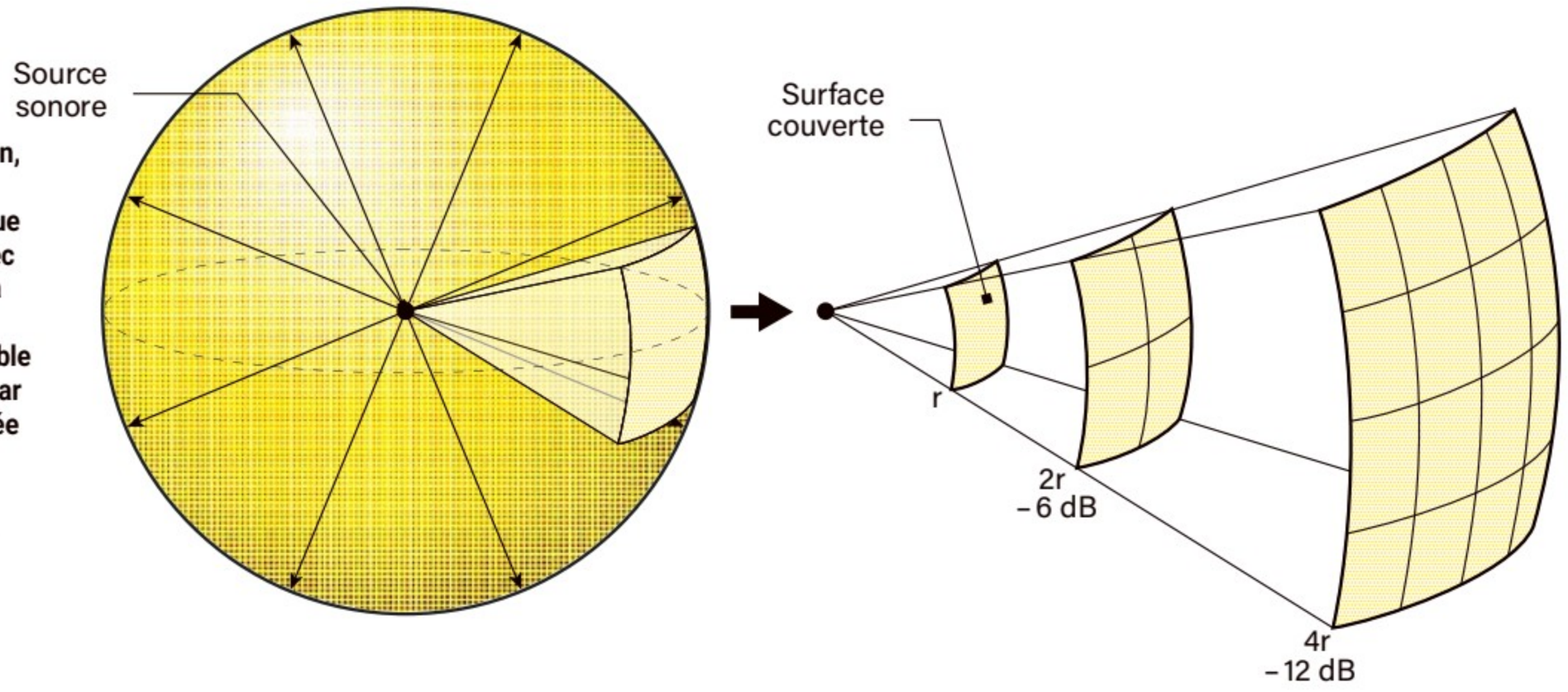
Avancer, tourner, vibrer...

Nous devons faire appel à un troisième mécanisme d'atténuation de l'onde sonore: la relaxation moléculaire. Nous savons qu'à l'échelle microscopique, la température d'un gaz est liée aux mouvements désordonnés de ses molécules. Mais cette agitation ne se réduit pas à leur déplacement dans l'espace. Les principaux constituants de l'air, le diazote et le dioxygène, sont en effet des molécules diatomiques. Leur énergie peut prendre plusieurs formes: l'énergie cinétique associée au déplacement de leur centre de masse, celle qui est liée à leur rotation, mais aussi celle qui dépend des mouvements internes de vibration, dans lesquels les deux atomes oscillent l'un par rapport à l'autre selon l'axe de leur liaison.

Quand l'air est à l'équilibre thermique, ces différentes formes d'énergie ont une répartition déterminée par la température. Si l'on comprime soudainement cet air, l'énergie cinétique de translation augmente tout aussi soudainement, mais les énergies de rotation et de vibration interne demeurent quant à elles inchangées dans l'immédiat. Ce sont les collisions intermoléculaires qui vont ensuite progressivement rétablir l'équilibre en transférant de l'énergie entre le mouvement de translation et les mouvements internes, et réciproquement: c'est le processus de relaxation. Chaque type de transfert possède un temps caractéristique qui lui est propre et qui dépend des conditions thermodynamiques (pression et température) ainsi que des molécules considérées. On peut aussi associer à ce temps une fréquence de relaxation, de l'ordre de son inverse: elle correspond à la fréquence pour laquelle la période de l'onde devient comparable au temps nécessaire au transfert d'énergie.

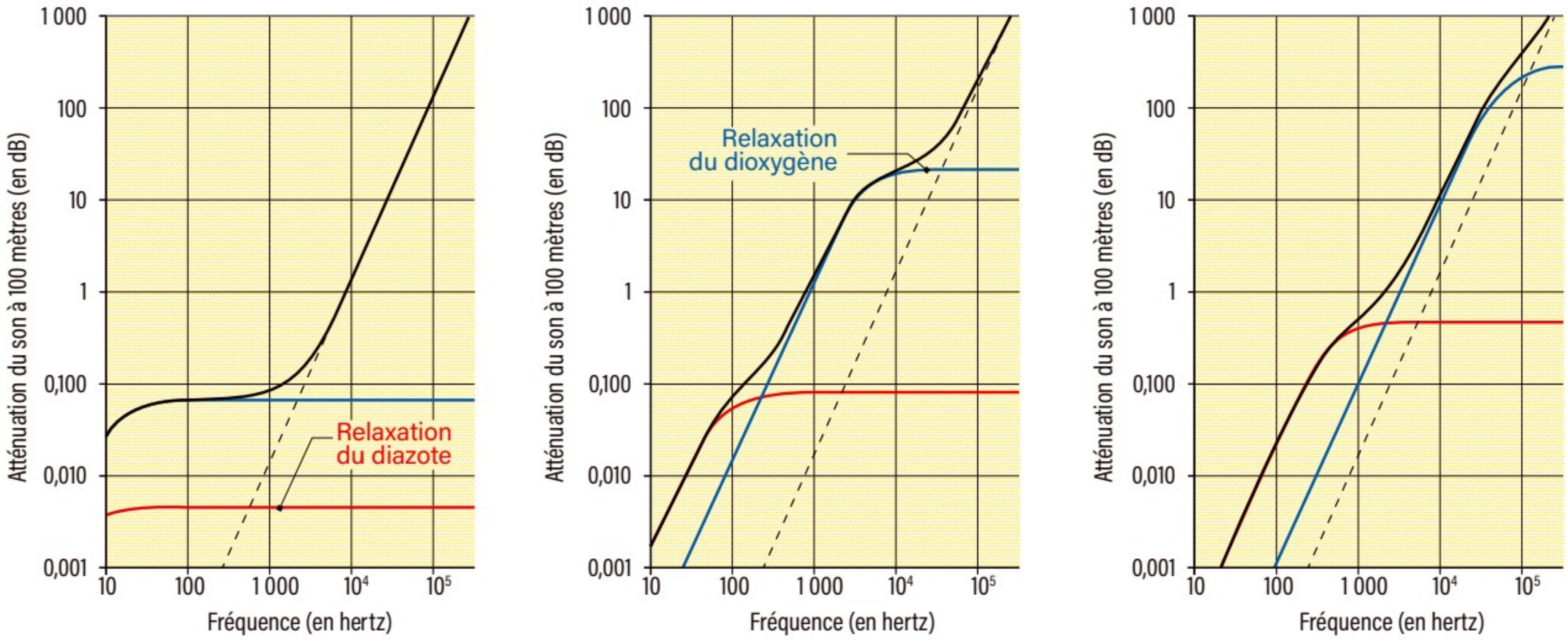
Pour déterminer l'importance d'un transfert, il faut alors comparer sa fréquence caractéristique à celle de l'onde sonore. Lorsque la fréquence du son est très inférieure à celle de la relaxation, les échanges sont suffisamment rapides pour suivre les variations de l'onde. L'énergie qui a été stockée dans les degrés de liberté interne lors de la compression a le temps d'être restituée durant la détente. Dès lors, les énergies de translation et internes demeurent presque constamment à l'équilibre et il n'y a pas ou peu de dissipation d'énergie.

En revanche, quand la fréquence de l'onde devient comparable à celle de la relaxation, la situation change. Les énergies internes réagissent avec retard: l'énergie transférée vers les mouvements internes pendant une compression n'est pas entièrement restituée au bon moment lors de la détente qui suit. Une partie de l'énergie de l'onde est ainsi dissipée. C'est autour de ce régime que les échanges retardés entre les mouvements de translation et internes dissipent efficacement



En l'absence de dissipation, l'intensité du son d'une source ponctuelle s'atténue de façon géométrique avec la distance *(r)* du fait de la conservation d'énergie. Quand cette distance double *(2r)*, la surface couverte par l'onde sonore est multipliée par quatre, ce qui correspond à une perte de 6 dB du niveau sonore. Lorsque cette distance double encore *(4r)*, le facteur est de 16 et la perte de 12 dB.

© Bruno Vacaro



L'atténuation du son avec la distance *(ici exprimée en décibels pour 100 mètres à 20 °C et à pression atmosphérique)* varie, entre autres, selon le taux d'humidité *(de gauche à droite : 0, 10 et 70 %)*. Le phénomène *(en noir, l'effet total)* dépend des effets thermiques et visqueux *(en pointillé noir)* et de la relaxation moléculaire, essentiellement du diazote *(en rouge)* et du dioxygène *(en bleu)*.

l'énergie de l'onde, avant de saturer pour des fréquences plus élevées.

Qu'en est-il pour l'air ? Tout d'abord, la fréquence de relaxation associée à la rotation est extrêmement élevée, de l'ordre du gigahertz. Aux fréquences acoustiques qui nous intéressent, la rotation suit donc presque instantanément les variations de l'onde et sa contribution à l'atténuation est négligeable. Tel n'est pas le cas pour les fréquences de relaxation associées aux vibrations internes du diazote et du dioxygène. Celles-ci dépendent de la pression et de la température et, surtout, de l'humidité. Dans l'air parfaitement sec, à 20 °C et à une pression d'une atmosphère, les fréquences de relaxation vibrationnelle des deux molécules sont très basses, de l'ordre de quelques dizaines de hertz. Mais dès que l'air contient de la vapeur d'eau, tout change.

Bien que les molécules d'eau soient peu nombreuses – à 20 °C, même un air saturé n'en contient qu'un peu plus de 2 % – elles constituent des partenaires collisionnels particulièrement efficaces pour les échanges d'énergie entre les différents mouvements moléculaires. Les fréquences de relaxation augmentent alors considérablement. À 20 °C et 70 % d'humidité relative, elles sont d'environ 460 Hz pour le diazote et 53 kHz pour le dioxygène. La première intervient ainsi dans le domaine audible, tandis que la seconde joue surtout à plus haute fréquence pour des ultrasons.

Des chauves-souris limitées

Quel que soit le taux d'humidité, l'atténuation augmente avec la fréquence (*voir la figure ci-dessus*), ce qui explique que les sons aigus et les ultrasons soient plus affectés que les sons graves. Cependant, l'effet de la dissipation est généralement moindre que l'effet géométrique à courte distance : le niveau sonore à 440 Hz (le *la* du diapason) ne perd qu'environ 3 dB par kilomètre. Mais cela devient manifeste quand on entend une *rave party* ou un orage grondant au loin : les aigus ont presque disparu et seuls les graves restent audibles.

Les chauves-souris ont moins de chance : pour chasser avec l'écholocalisation et repérer des petites proies, typiquement de l'ordre du centimètre, elles ont besoin d'une bonne résolution spatiale de leur système sonar. Cela impose d'utiliser des ultrasons, dans le domaine de quelques dizaines de kilohertz, là où l'atténuation peut atteindre ou dépasser 1 dB par mètre. Cette forte atténuation contribue ainsi à limiter la portée de leur système de détection, typiquement de l'ordre de 5 à 15 mètres. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Viggen, The lattice Boltzmann method : Fundamentals and acoustics, thèse de doctorat, université norvégienne des sciences et technologies à Trondheim, 2014.

D. T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics*, John Wiley & Sons Inc., 2000.

International Organization for Standardization, Acoustique – Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre (ISO 9613-1), 1993.

Chlorophylles : de la luzerne dans votre assiette

Hervé This

Les extraits de végétaux verts sont utilisés en cuisine depuis des siècles, pour colorer des préparations telles que les sauces. L'industrie alimentaire a reproduit les pratiques culinaires.

Depuis le Moyen Âge, les cuisiniers extraient le vert des végétaux verts, notamment des épinards : on broie les végétaux dans un mortier, à l'aide d'un pilon, puis on filtre (jadis dans un linge), et l'on chauffe doucement le liquide récupéré, de sorte qu'une écume d'un beau vert clair se sépare d'un liquide brun. L'écume permet de colorer en vert divers aliments, notamment des sauces, pour évoquer le printemps, lequel était associé à la résurrection de Jésus Christ.

Pour les mêmes raisons, à connotation religieuse, on voulait des légumes verts bien verts, et le monde culinaire avait appris à cuire dans de la lessive de cendres : on met des cendres de bois dans un filtre, et l'on ajoute de l'eau afin de récupérer ce qui est en réalité une solution basique, notamment en raison de la présence d'hydroxyde de potassium. La cuisson dans une telle solution est ainsi accélérée en même temps qu'elle préserve la couleur verte, évitant que les composés qui donnent cette couleur, les diverses chlorophylles (dites a, a', b, et b'), ne perdent leur atome central de magnésium, par une réaction de « phéophytinisation » qui engendre une couleur vert olive. Enfin il faut citer cette pratique, aujourd'hui abandonnée, qui consistait à cuire les végétaux verts dans des « bassines à reverdir », en cuivre : ce métal venait remplacer le magnésium… mais il ne faut pas en abuser !

Et dans l'industrie alimentaire ? Pour garder un vert engageant, les techniques sont apparentées. ■

Origine

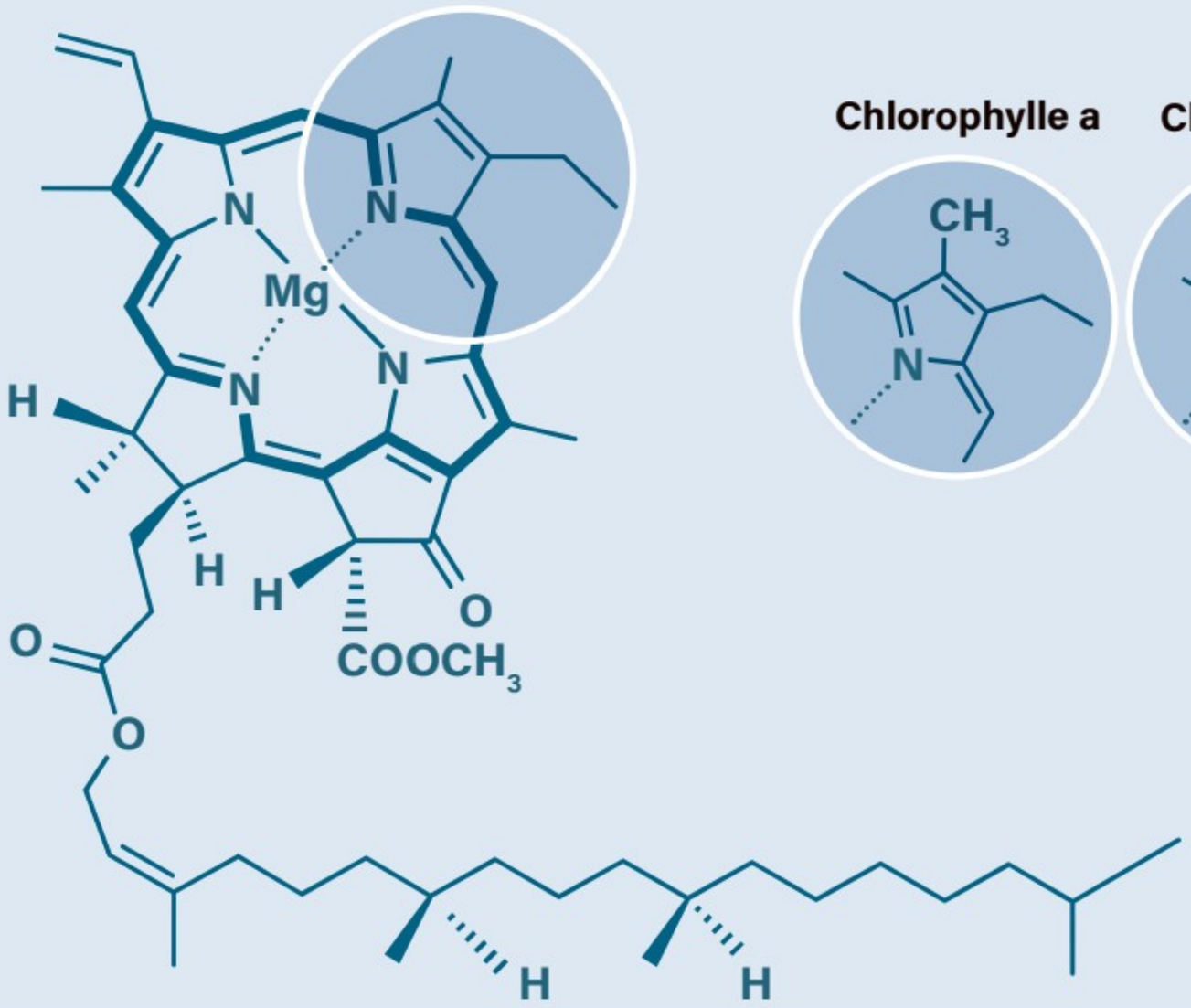
Les chlorophylles sont les principaux pigments assimilateurs des végétaux photosynthétiques. Leur étude a commencé quand les chimistes français Joseph Bienaimé Caventou et Joseph Pelletier ont introduit le mot « chlorophylle », au singulier, en 1816, reconnaissant que l'introduction du mot ne servait qu'à faire entrer le vert d'épinard dans le champ scientifique.

* * *

Peu après, et surtout après le début du XXe siècle, les progrès de l'analyse chimique, et, notamment, la chromatographie, ont montré que ce que l'on pensait être une matière simple (un « principe immédiat ») était en réalité un mélange de nombreux composés : les pigments responsables du vert et du bleu, et des pigments responsables de jaune, orange et rouge. Les premiers furent progressivement identifiés, et nommés « chlorophylles » (ainsi que divers dérivés : phéophytines, phéophorbides, etc.), et les seconds furent nommés « caroténoïdes ».

* * *

Tous contribuent à la photosynthèse, avec la transformation du dioxyde de carbone de l'air en glucides, notamment le D-glucose, et la production de dioxygène.



© Pour la Science

Structure moléculaire des chlorophylles a et b. Sauf indication contraire, chaque sommet ou extrémité d'un segment est occupé par un atome de carbone. Les lettres C, N, O, H et Mg représentent respectivement des atomes de carbone, azote, oxygène, hydrogène et magnésium. La partie inférieure est nommée « queue phytol ».

Lors d'une cuisson en milieu acide, l'atome de magnésium central est remplacé par des atomes d'hydrogène, qui conduisent à une couleur vert olive. Mais quand il est remplacé par un atome de cuivre, la couleur est d'un beau vert.

© smspsy/Shutterstock



Les cuisiniers savent extraire la couleur des végétaux verts, en particulier des épinards, par broyage, filtration et chauffage.

PROPRIÉTÉS

L'industrie alimentaire cherche à donner de fraîches couleurs à ses produits, et c'est à ce titre que l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa) a autorisé des produits nommés « chlorophylles » comme additifs alimentaires (E 140 (i)). En dépit du fait que 90 % de la masse des extraits soumis à autorisation étaient non caractérisés chimiquement, et que les chlorophylles provenaient de plantes non régulièrement utilisées comme aliment (herbe, ortie, luzerne), l'Efsa n'a pas considéré de risques à l'utilisation de ces extraits de plantes comme additifs. Ils sont donc autorisés, comme le sont divers complexes cuivriques soit de chlorophylles (E 141 (i)) soit de chlorophyllines (E 141 (ii)), des composés dont les molécules ont été débarrassées de la queue « phytol » (*voir la figure ci-dessus*), ce qui les rend plus solubles dans l'eau.

Destination

Dans les cuisines des restaurants, le vert d'épinard est resté un classique, mais, depuis quelques décennies, il s'est augmenté de vert de poireau, de persil, de cardes… Pas d'additifs… parce que cela n'est pas nécessaire. Pour l'industrie alimentaire, la liste des produits pour lesquels est autorisé l'ajout des additifs nommés « chlorophylles » et « chlorophyllines » (le magnésium est remplacé par un autre atome, tel le cuivre) est longue : crèmes, croûte de fromage comestible, fromage derby à la sauge, fromage au pesto vert et rouge, fromage au wasabi et fromage aux herbes à marbrures vertes, céréales précuites ou transformées, boyaux, enrobages et décorations pour viandes, à l'exclusion de l'enrobage externe comestible du pasturma, vins de fruits et vins autres que de raisin, hydromel, préparations à base de fruits et de légumes (à l'exclusion des compotes, une exception étant la mostarda di frutta), décorations, enrobages et garnitures, pâtes à frire ou à beignets, céréales précuites ou transformées, fruits et légumes au vinaigre, à l'huile ou en saumure…

À LA TRACE



Hervé This
physicochimiste, directeur du Centre international de gastronomie moléculaire Inrae-AgroParisTech, à Palaiseau

L'auteur a publié :
Chevreul, chimiste et encore chimiste, Académie d'agriculture de France, 2026 (livre PDF, gratuit).
Inventions culinaires – gastronomie moléculaire, Odile Jacob, 2025.

Découvrez une recette savoureuse intégrant des chlorophylles, et la bibliographie de cette chronique.

$$K = 2N \cdot \mu \cdot u$$

La vraie distance entre l'humain et la banane

Nous partageons une partie de notre patrimoine génétique avec la banane. Quand nos lignées ont-elles divergé ?

D'un point de vue génétique, chaque humain est une demi-banane. C'est, à peu de chose près, ce que plusieurs médias ou sites internet ont affirmé ces dernières années. De fait, tous les organismes vivants sont apparentés : nous partageons environ 98 % de nos gènes avec les chimpanzés et, donc, un certain nombre avec la banane – même si de récentes analyses suggèrent que ce pourcentage se situe plutôt entre 17 et 25 %. Quand notre chemin s'est-il séparé de celui de notre lointaine cousine végétale (je m'abstiendrai de tout jeu de mots sur ce *banana split*) ? C'est ce qu'on détermine avec la formule ci-dessus.

Cette formule résulte de la théorie dite « neutraliste » de l'évolution moléculaire, formulée dans les années 1960 par le généticien japonais Motoo Kimura. Dans sa version classique élaborée par Charles Darwin, la théorie de l'évolution stipule qu'un organisme vivant subit, à la suite d'une mutation aléatoire, une modification qui lui confère un avantage par rapport aux autres. Il est ainsi mieux adapté aux conditions environnementales en vigueur et se reproduit davantage. Au fil du temps, cette mutation se fixe dans la population. Si le phénomène se répète un certain nombre de fois, une nouvelle espèce finit par apparaître.

Cette description n'est pas complètement fausse, mais la réalité est plus complexe. Premièrement, toutes les mutations sont loin de conférer un atout : nombre d'entre elles, et c'était là l'hypothèse de Motoo Kimura, pourraient ne jouer aucun rôle. Elles sont neutres, c'est-à-dire qu'elles ne présentent ni avantages ni inconvénients, et ne sont donc pas directement soumises à la sélection naturelle (elles ne le deviendront que si des modifications environnementales les rendent soudain utiles ou délétères).

Une horloge moléculaire

Ces mutations se produisent à un rythme quasi constant, que la formule permet d'estimer pour une population composée de N individus. Si ces derniers sont diploïdes – comme l'humain –, chacun d'entre eux possède deux copies de l'information génétique (une provenant du père et l'autre de la mère) ; u désigne la probabilité qu'une mutation apparaisse sur l'une des copies d'un gène au cours d'une génération [le nombre de mutations qui apparaissent dans la population est alors $2Nu$, ndlr]. Et le facteur μ donne la probabilité de fixation, c'est-à-dire la chance que la mutation finisse par se propager à l'ensemble de la population. La formule calcule alors le nombre moyen de mutations qui se fixent par génération.

Au départ, une nouvelle mutation ne concerne qu'une des $2N$ copies d'un gène, et, selon la théorie neutraliste, chacune de ces dernières a la même probabilité de devenir l'ancêtre de toutes les copies futures. Par conséquent, on peut attribuer la valeur de $\frac{1}{2N}$ à μ, ce qui simplifie la formule en $K = u$. En d'autres termes, le nombre moyen de mutations qui se fixent correspond au taux de mutation et ne dépend pas de la taille de la population [plus celle-ci est grande, plus le nombre total de mutations est élevé, mais moins chacune a de chances de s'imposer, ndlr].

C'est là – dans une version très simplifiée – le fondement mathématique de ce qu'on appelle « l'horloge moléculaire », qui permet de calculer la date de la séparation génétique entre deux espèces. Dans le cas de la banane et de l'humain, cela remonte à environ 1,5 milliard d'années. Pas de mauvaise conscience, donc, si vous avez l'habitude de dévorer ces lointains cousins. ■

L'AUTEUR



Florian Freistetter
astronome, auteur et membre de la troupe autrichienne Science Busters, qui mêle théâtre et science.

DOMAINE DE CHAUMONT-SUR-LOIRE
CONVERSATIONS SOUS L'ARBRE

DOMAINE
DE CHAUMONT-SUR-LOIRE
CONVERSATIONS SOUS L'ARBRE

CINQ RENDEZ-VOUS D'AVRIL À OCTOBRE POUR PENSER LA NATURE AVEC DES INVITÉS EXCEPTIONNELS

Marc-André Selosse, Purificación López-García, Perig Pitrou, Pascal Convert, Charles Stépanoff, Astrid de La Forest, Jacques Tassin, Line Le Gall, Evi Keller, Vincent Doumeizel, Mathilde Simon, Bernard Kloareg, François Couplan, Anaïs Tondeur, Éric Lambin, Étienne Klein...



Venez écouter et discuter
avec des philosophes,
des scientifiques
et des artistes.
Une immersion de 2 jours,
dans le confort vert d'un
hôtel d'arts et de nature,
pour une pensée ouverte
aux autres et au monde.

24 et 25 septembre 2026
LES ALGUES,
UN CADEAU DE L'OCÉAN

15 et 16 octobre 2026
LA CUEILLETTE, ENTRE
SAVOIR ET ART DE VIVRE

© DR – *Trattenere 8 anni di crescita* – Giuseppe PENONE

CONDITIONS TARIFAIRES ET RESERVATIONS

WWW.CONVERSATIONSSOUSLARBRE.FR - SEMINAIRE@DOMAINE-CHAUMONT.FR - 02 54 20 99 22

Fondation Malatier – Jacquet · Fondation de France · Pour la Science · philosophie magazine · RÉGION CENTRE VAL DE LOIRE

LE MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE
ET L'INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS
ACCUEILLENT

22e FESTIVAL INTERNATIONAL

PARISCIENCE

LE FESTIVAL QUI RAMÈNE SA SCIENCE

ENTRÉE GRATUITE

LES MEILLEURS FILMS POUR DÉCRYPTER LA BEAUTÉ ET LES DÉFIS DU MONDE

Scolaire / Du 2 au 16 octobre 2026

Grand Public / Du 22 au 26 octobre 2026

Muséum national d'Histoire naturelle
Jardin des Plantes, 57 rue Cuvier, Paris 5e

Institut de physique du globe de Paris
1 rue Jussieu, Paris 5e

Suivez le festival en ligne / www.pariscience.fr

© ESA/Hubble & NASA, R. Sankrit