Novembre 2026
HORS SÉRIE 328 MATHÉMATIQUES
SCIENCE&VIE

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE, CONJECTURES FOLLES RÉSOLUES, RÈGLES DU CHAOS…

MATHS
Le grand bond en avant

OÙ VA LA RECHERCHE ? 38 EXPERTS RÉPONDENT

REWORLD MEDIA
BEL : 7,10 € - ESP : 7,20 € - GR : 7,20 € - DOM S : 7,60 € - DOM A : 8,90 € - ITA : 7,20 € - LUX : 7,10 € - PORT CONT : 7,20 €
CAN : 10,50 $CAN - MAR : 73 DH - TOM S : 990 CFP - TOM A : 1850 CFP - CH : 10 FS - TUN : 15 DTU



ASTROPHYSIQUE, MÉDECINE, ÉTHOLOGIE, ARCHÉOLOGIE

L'information scientifique Mise À Jour

Votre rendez-vous avec l'actualité de la recherche

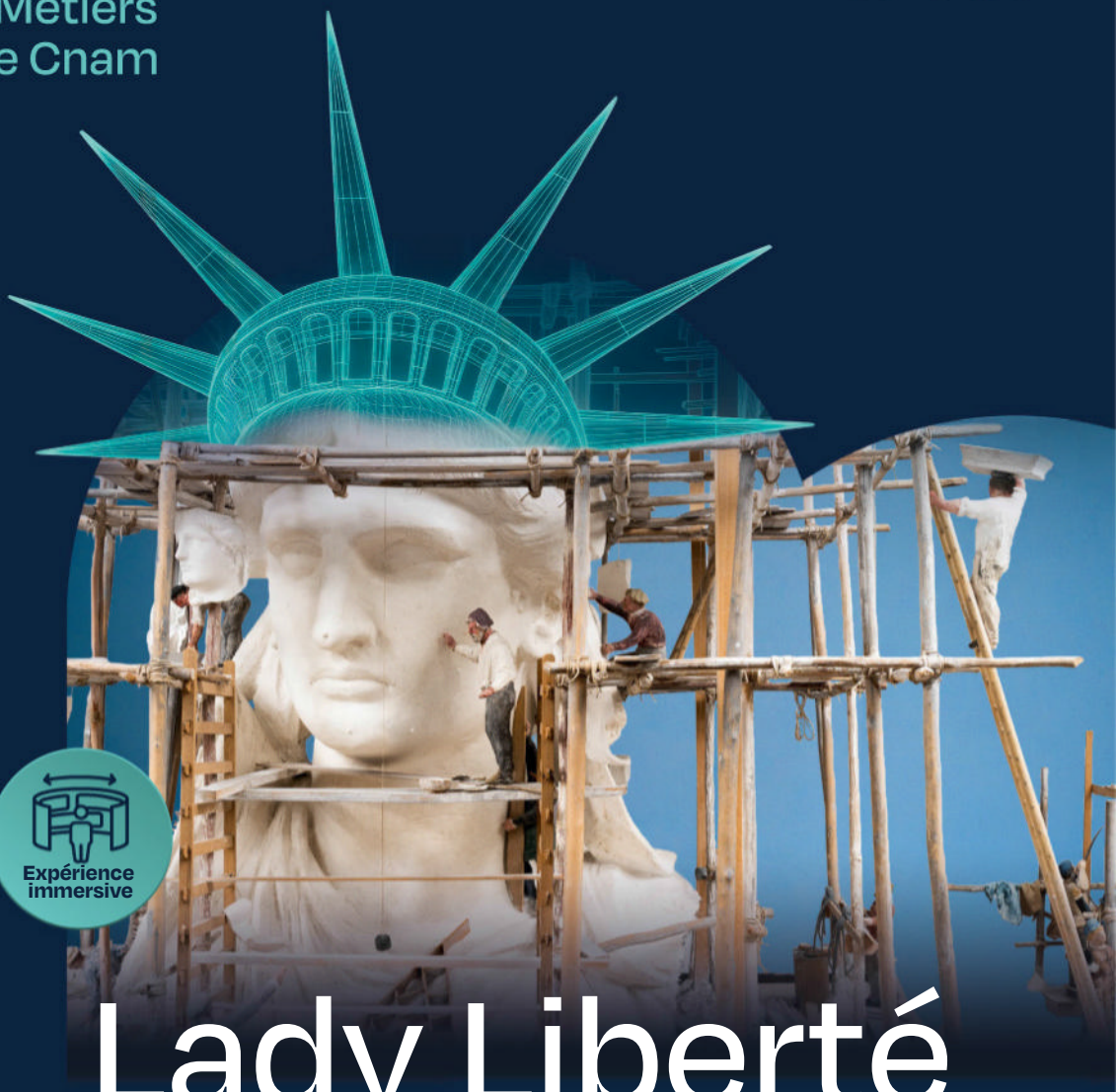
L 19057 - 328 H - F: 6,90 € - RD

Musée des Arts et Métiers › Le Cnam

60 rue Réaumur
75003 Paris

arts-et-metiers.net

Co-production



Expérience immersive

Lady Liberté

De la sueur, de l'audace, du génie

› 22.09.26
01.08.27

expo muam

LIBRE © Musée des arts et métiers - Photo : Franck Bohbot

Édito

HORS SÉRIE SCIENCE&VIE

Une publication du groupe
REWORLD MEDIA
LEADING MEDIA GROUP

ÉDITEUR
Reworld Media Magazines SAS
Siège social : 40 avenue Aristide-Briand, 92220 Bagneux
Directeur de la publication : Gautier Normand
Actionnaire : Reworld Media France
(RCS Nanterre 477 494 371)
Tél. accueil : 01 41 33 55 00
www.science-et-vie.com
SERVICE LECTEURS : sev.lecteurs@reworldmedia.com

RÉDACTION
DIRECTRICE DE LA RÉDACTION : Danielle McCaffrey
ASSISTANTE DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE ET SCIENCE & VIE HORS-SÉRIE : Christelle Borelli

RÉALISATION SCIENCE & VIE HORS-SÉRIE
COM'Presse. 6 rue Tarnac, 47220 Astaffort. Tél. 05 53 48 17 60
RÉDACTEUR EN CHEF : Olivier Carpentier
RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE : Amanda Schrepf Sanz
DIRECTEUR ARTISTIQUE : Emilien Guillon
RÉDACTRICE PHOTO : Géraldine Lafont
SECRÉTAIRES DE RÉDACTION :
Lita Doval, Vincent Ourso, Olivier Vignancour
ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO : Kheira Bettayeb, Riva Brinet-Spiesser, Mathias Chaillot, Adrien Denèle, Marie Dormoy, Michael Ducousso, Lise Gougis, Hugo Leroux, David Marchand, Sandrine Mary, Charlotte Mauger, Héloïse Rambert, Natacha Scheidhauer

DIRECTION-ÉDITION
ÉDITEUR : Germain Périnet
ÉDITRICE ADJOINTE : Charlotte Mignerey

PUBLICITÉ
DIRECTRICE GÉNÉRALE : Élodie Bretaudeau-Fonteilles
DIRECTRICE DU PÔLE COMMERCIAL : Catherine Mireux (19 02)
DIRECTRICE DE LA PUBLICITÉ : Anne Lefeuvre
DIRECTEUR DE LA PUBLICITÉ : Fabrice Guillemain (06 16 55 55 42)
PLANNING : Angélique Consoli (53 52), Stéphanie Guillard (53 50)
RESPONSABLE TRAFIC : Catherine Leblanc (43 86)

MARKETING / INTERNATIONAL
RESPONSABLE MARKETING : Giliane Douls
DIRECTRICE DE LA COMMUNICATION : Laure Charvet

ABONNEMENTS ET DIFFUSION
DIRECTRICE MARKETING DIRECT : Catherine Grimaud
CHEF DE PRODUIT MARKETING DIRECT : Laure Letellier
RESPONSABLE SERVICE DIFFUSION : Philippe Merrien
RESPONSABLE DES VENTES : Arthur Marec

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS
Une question sur votre abonnement ? Appelez-nous au **01 46 48 48 96** (de 9 h à 19 h, du lundi au vendredi, et le samedi de 9 h à 18 h, prix d'un appel local).
Pour toute réclamation/modification concernant votre abonnement : www.serviceabomag.fr
Retrouver toutes nos offres sur www.kiosquemag.com
Par courrier : **Service abonnement *Science & Vie*, 59898 LILLE Cedex 9**

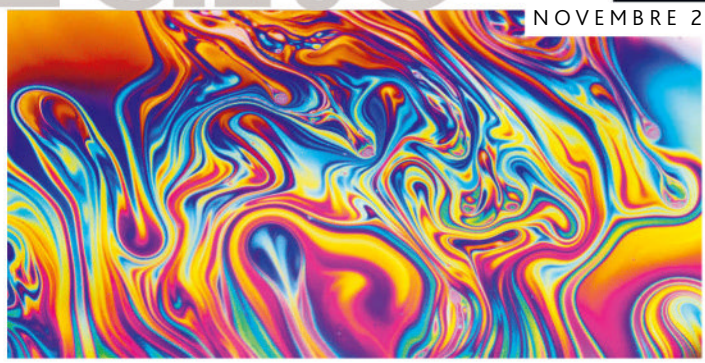
Prix de vente : 6,90 €
Prix de l'abonnement annuel : 61,20 € (12 numéros) ou 102,60 € (12 numéros + 6 hors-séries)

Pour les États-Unis et le Canada : Express Mag, 8155 rue Larrey, Anjou (Québec), H1J 2L5. Tél. 1 800 363-1310 (français) et 1 877 363-1310 (anglais) ; fax (514) 355-3332.
Pour la Suisse : Edigroup Suisse, 022 860 84 50
reworld@edigroup.ch
Pour la Belgique : Edigroup Belgique, 070 233 304
reworld@edigroup.be
Autres pays : nous consulter.
Commande d'anciens numéros et de reliures au 01 46 48 48 83

FABRICATION
DIRECTION DES OPÉRATIONS INDUSTRIELLES : Bruno Matillat
CREATOPRINT

PRÉPRESSE
RESPONSABLE DE SERVICE : Sylvain Boularand

Imprimeur : Maury – France
N° ISSN : 1966-9437
N° de commission paritaire : 0531 K 79977
Dépôt légal : octobre 2026



EN COUVERTURE : RICHARD DRURY/GETTY, CI-CONTRE : GETTY

MATHS, LA VAGUE IA

Coup de tonnerre chez les mathématiciens ! Le 8 septembre dernier, OpenAI a annoncé avoir résolu la mythique conjecture de Navier-Stokes décrivant l'écoulement des fluides. Triompher d'une telle équation, c'est comme si l'on découvrait le Saint-Graal en fouillant une tombe médiévale ! Pour réussir cette prouesse, OpenAI (l'entreprise qui a créé ChatGPT) a utilisé un modèle d'intelligence artificielle mobilisant 10 000 agents et générant 2,7 millions de messages. Le résultat confirme le rôle exponentiel joué par l'IA dans la recherche. Bien sûr, il doit encore être validé par la communauté scientifique, mais les mathématiciens que nous avons interviewés pour ce numéro spécial le confirment tous : l'intelligence artificielle, c'est de la bombe – dans tous les sens du terme. En recherche fondamentale, d'abord. Le 4 septembre, Anthropic révèle que son IA Claude a formalisé la démonstration du dernier théorème de Fermat en seulement onze jours. En mathématiques appliquées, ensuite : l'usage de l'IA démultiplie les efforts des chercheurs, que ce soit pour lutter contre le crime organisé ou étudier le chant des oiseaux : par exemple, des scientifiques bardés d'algorithmes ayant analysé 116 000 chants de 3 000 espèces de volatiles sont parvenus à en extraire 8 "motifs" acoustiques élémentaires qui, un jour prochain, nous permettront de vocaliser avec eux. De là à estimer que l'IA prend trop de place, il n'y a qu'un pas… que certains experts n'hésitent pas à franchir. Pour autant, dans cette course folle au progrès, les humains ne sont pas en reste. Témoin Hong Wang, spécialiste de l'analyse harmonique : pour avoir résolu la conjecture de Kakeya, cette professeure à l'Institut des hautes études scientifiques a reçu la médaille Fields en juillet. Quelle gloire pour notre recherche ! De quoi faire oublier – quelques instants – les très mauvais scores obtenus en mathématiques par les Français de 15 ans lors de la dernière étude Pisa. Quoi, les héritiers de Descartes et Poincaré deviendraient-ils des cancres ? Un paradoxe quasi quantique, à résoudre rapidement… et cette fois-ci, sans IA !

Olivier Carpentier

HORS SÉRIE SCIENCE&VIE

Sommaire

328
NOVEMBRE 2026

AVANT-PROPOS

06 “Les maths créent des outils utiles… ou pas”
Isabelle Gallagher et Jérémie Bouttier, mathématiciens, explorent l’utilité des maths, leurs avancées et leurs défis.



RECHERCHER

14 C’est quoi le problème ?
Six chercheurs décryptent leur domaine de recherche à travers des œuvres d’art.

20 La conjecture de Kakeya est résolue !
Hong Wang et Joshua Zahl sont venus à bout d’une énigme mathématique vieille d’un siècle.

22 Le casse-tête des nombres premiers
De l’hypothèse de Riemann à Goldbach, pourquoi ces objets arithmétiques résistent-ils encore aux mathématiciens ?

26 La quête du spectre
Voici une forme capable de paver un plan sans motif régulier.

28 Quelles règles dans le chaos ?
Fluides, turbulences, climat : ils traquent les limites de la prévision, avec l’IA en renfort.

32 Merci les amateurs !
Quand des néophytes signent des avancées inattendues.

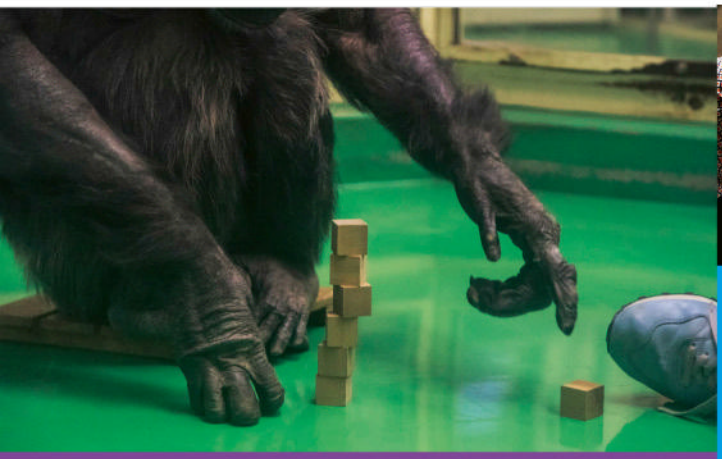
34 Le mot du matheux : “Le monde est une gigantesque énigme, les nombres en sont les clés”
Le mathématicien Cédric Villani raconte comment sa discipline relie des idées éloignées et ouvre de nouvelles pistes.



Recevez Science & Vie et ses Hors-Série
Votre bulletin d’abonnement se trouve en p. 97. Pour commander d’anciens numéros, rendez-vous sur www.kiosquemag.com

Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 08 ou par internet sur www.kiosquemag.com

© NASA/AFP - GETTY - JÉRÉMIE SOUTEYRAT - THE CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY/JPL/NASA





ENSEIGNER

38 “Nous, les héritiers de Descartes”
Martin Andler, historien des sciences, décrypte les ressorts de l’excellence mathématique française et ses fragilités.

42 Matheuses malgré tout
Sophie Germain, Emmy Noether et Maryam Mirzakhani : trois destins d’exception face aux obstacles de leur époque.

44 “En finir avec les génies solitaires et masculins”
La sociologue Clémence Perronnet et le mathématicien Hugo Duminil-Copin proposent des pistes pour réduire les inégalités scolaires.

48 Les pépites du grand oral
Du surbooking à l’expresso, les lycéens transforment leur quotidien en problèmes mathématiques.

50 Le mot de la matheuse : “Écrire une blague, c’est comme résoudre un problème mathématique”
Célia Pelluet, docteure en technologies quantiques et ingénieure au Cnes, mixe science et stand-up pour nourrir sa créativité.

MODÉLISER

54 Des maths pour traquer le crime ?
Police prédictive, graphes, algorithmes… peut-on enquêter sans se tromper ?

58 Nos virus en équations
Les spécialistes des processus stochastiques anticipent les épidémies et guident les décisions.

62 La mode, une affaire de cycles
Et si les tendances étaient un éternel recommencement ?

64 “On a cessé de chercher le scrutin parfait”
Antoine Rolland et Antoine Houlou-Garcia décryptent les forces et limites des systèmes de votes.

70 Le mot du matheux : “Les maths ne doivent jamais être la seule façon d’aborder nos problèmes”
Le statisticien Avner Bar-Hen interroge ce que nous gagnons à tout modéliser.

IMAGINER

74 Comment compter nous est venu à l’esprit
Et un jour, cerveau, langage et société ont fait émerger les nombres…

78 Le calcul sonne-t-il juste ?
De Pythagore à Schönberg, les nombres, géométrie et rythmes façonnent la musique.

80 Les maths, c’est de la folie ?
Autisme, dyscalculie, troubles psychiques : ce que la recherche révèle sur nos aptitudes numériques.

84 Des chiffres et des mots
Structures, contraintes et symétries nourrissent aussi la création littéraire.

86 “L’IA aide le chercheur à explorer des pistes”
Stéphane Mallat et Gabriel Peyré, mathématiciens, analysent leur discipline à l’heure des agents numériques.

92 Des origamis dans l’espace
Satellites, panneaux solaires, habitats lunaires… découvrez les maths du pliage.

98 Le mot de la matheuse : “Nous vivons la révolution industrielle des mathématiques”
Sylvia Serfaty, mathématicienne, explique comment l’IA accélère la recherche et redéfinit le métier de chercheur.

100 Biblio



PAGE 101

“MÀJ” COMME MISE À JOUR

Un tir de trébuchet, ça fait mal ? A-t-on découvert la première particule de matière noire ? Peut-on rafraîchir un bâtiment sans consommer d’électricité ? Douze pages d’actualité scientifique pour faire le point sur vos thématiques favorites.

“Les maths créent des outils utiles… ou pas”

À quoi servent les mathématiques aujourd’hui ? Nous avons posé la question à Isabelle Gallagher *, présidente de la Société mathématique de France, et Jérémie Bouttier **, directeur de l’Institut Henri-Poincaré. PROPOS RECUEILLIS PAR CHARLOTTE MAUGER

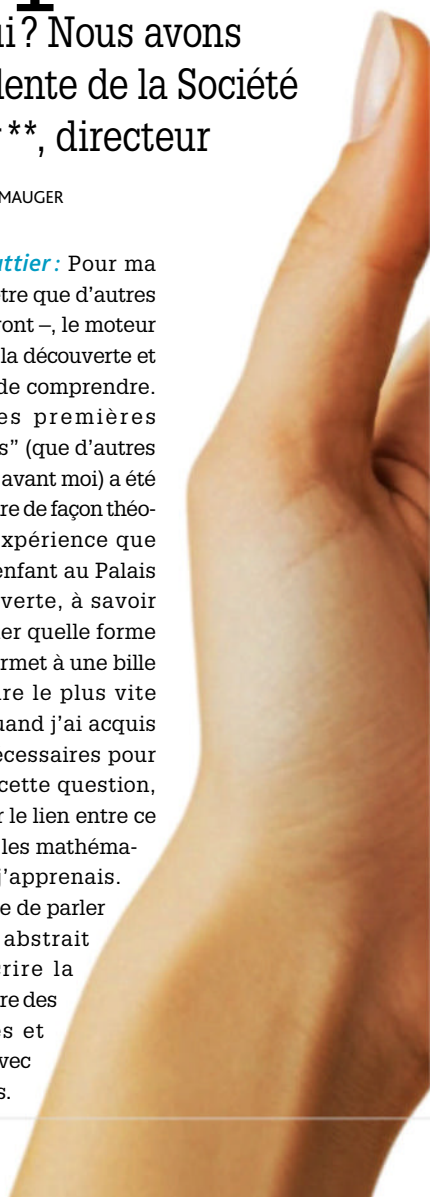




SVHS : Quel est le moteur de la recherche en mathématiques ?

Isabelle Gallagher : Il y a autant de réponses que de personnes qui font des mathématiques. Pour certaines, le plaisir, c’est d’apporter les mathématiques nécessaires pour répondre aux questions de scientifiques ou de personnes dans l’industrie. D’autres sont mues par la construction de quelque chose de nouveau, d’objets ou de structures mathématiques qui serviront peut-être un jour. D’autres encore, et c’est mon cas, se situent entre ces deux approches. Je m’intéresse à des problèmes physiques, que je simplifie pour apporter une réponse mathématique. Souvent, ces réponses sont connues des physiciens, mais les mathématiques viennent confirmer et vérifier leurs intuitions.

Jérémie Bouttier : Pour ma part – peut-être que d’autres s’y retrouveront –, le moteur est la joie de la découverte et la curiosité de comprendre. Une de mes premières “découvertes” (que d’autres avaient faite avant moi) a été de comprendre de façon théorique une expérience que j’avais vue enfant au Palais de la découverte, à savoir de déterminer quelle forme de rampe permet à une bille de descendre le plus vite possible. Quand j’ai acquis les outils nécessaires pour répondre à cette question, j’ai aimé voir le lien entre ce problème et les mathématiques que j’apprenais. C’est une joie de parler ce langage abstrait utile à décrire la nature, de faire des découvertes et d’échanger avec nos collègues.





« On peut se demander pourquoi faire de la recherche fondamentale. Mais ce n'est pas en améliorant les bougies qu'on aurait inventé l'ampoule électrique »

SVHS : La recherche en mathématiques doit-elle être utile ?

I.G. : Je crois que c'est dangereux de chercher à tout justifier par une utilité. De manière générale, je crois que les mathématiques ne doivent pas être vues avant tout comme une discipline de recherche avec une utilité. Sinon, vous allez vous empêcher d'explorer des directions qui semblent plus éloignées de prime abord, mais qui, finalement, vous approcheront de la solution. Les mathématiques servent à répondre à des questions, à s'en poser et à créer des outils qui seront peut-être utiles un jour, à un horizon de temps qu'on ne maîtrise pas (et qu'on ne doit pas maîtriser).

IMAGE GÉNÉRÉE PAR IA

J.B. : On peut se demander pourquoi faire de la recherche fondamentale en général. Mais ce n'est pas en améliorant les bougies qu'on aurait inventé l'ampoule électrique. Si la recherche ne doit apporter que des retombées immédiates, on ne réussira que des petits progrès. Les approches de court terme et long terme sont toutes deux utiles et doivent coexister.

SVHS : ***Cela veut-il dire que les mathématiques se découpent en deux sous-domaines distincts : celles fondamentales et celles appliquées ?***

I.G. : C'est une vision datée qu'il faudrait faire disparaître. Personne n'est dans une case unique en mathématiques : certaines mathématiques dites "fondamentales" seront appliquées plus tard, certaines mathématiques "appliquées" vont créer de nouvelles théories…

J.B. : Le parcours de Stéphane Mallat, récemment décoré de la médaille d'or du CNRS, démontre que les mathématiques ne sont pas segmentées. Au début de sa carrière, ce mathématicien s'intéressait à des questions pratiques d'ingénierie. Il s'est dirigé ensuite vers des sujets plus fondamentaux pour avancer. Cela l'a amené en retour à des retombées très pratiques, comme contribuer à la création du format JPEG 2000. Son parcours illustre la pertinence de la recherche fondamentale, non pas parce qu'elle serait "plus noble", mais parce qu'elle est utile.



IMAGE GÉNÉRÉE PAR IA

SVHS : *Qu'est-ce qui fait d'une question un sujet de recherche pertinent ?*

I.G. : Trouver une bonne question est difficile. C'est pourquoi la thèse est importante dans tous les métiers de la recherche : on commence ses travaux encadré par quelqu'un qui va poser une question balisée, dans un domaine en train d'évoluer. Et puis une partie des mathématiques est incrémentale, on essaie d'améliorer peu à peu les choses, de sortir du cadre précédent. Il arrive parfois qu'un grand pas en avant soit fait dans une direction ou avec des méthodes inattendues.

J.B. : On peut voir les mathématiques comme une chaîne de montagnes infinie. Il y a des petites collines qui se montent très facilement et des sommets complètement inaccessibles. Ce sont les deux écueils : se casser les dents sur une façade lisse ou ne monter que des collines faciles. Mais dans ce paysage, il existe aussi des montagnes inexplorées dans lesquelles une nouvelle voie se dessine. Les communautés se regroupent à leurs pieds afin de les gravir ensemble.

> *« Depuis la réforme du bac 2019-2020, le nombre de filles qui choisissent de faire des maths s'est effondré. C'est désespérant ! »*



SVHS : *Pour reprendre la métaphore, quels "sommets" ont récemment été franchis ?*

I.G. : Dans mon domaine, celui des équations aux dérivées partielles, il y a eu beaucoup d'avancées sur des voies qui paraissaient inaccessibles. D'abord, sur les équations de Navier-Stokes incompressibles, un modèle utilisé depuis le XIXe siècle pour décrire le comportement d'un fluide. En mathématiques, on se demande si ces équations sont bien posées, c'est-à-dire si des solutions existent et sont uniques, sur de longues échelles de temps. Il y a eu de grandes avancées sur ces questions ces cinq dernières années. Ces équations nous donnent une vision macroscopique du fluide. Une grande question est de réussir à faire le lien entre cette vue "globale" et ce qui se passe à l'échelle des particules qui la composent. Yu Deng, Zaher Hani et Xiao Ma ont réussi un tour de force technique pour proposer un premier résultat qui fait un lien entre ces deux échelles. Pour ces travaux, Yu Deng a reçu la médaille Fields cet été. Également, Frank Merle et ses collaborateurs ont récemment été récompensés par plusieurs prix pour leurs travaux sur les solitons, des structures particulières ressemblant à des ondes qui se déplacent sans se déformer, et aussi pour l'étude des solutions d'une autre version des équations de Navier-Stokes (dites "compressibles") utile pour décrire un gaz. Ils ont démontré qu'il est possible que ces solutions explosent dans certaines situations et deviennent infinies *[Notons que depuis, l'entreprise OpenAI a annoncé avoir montré que certaines solutions explosent aussi dans le cas incompressible, NDLR]*.

J.B. : Pour donner des exemples proches de mon domaine, la géométrie aléatoire, je suis admiratif des nombreuses avancées récentes ayant permis de définir rigoureusement la gravité quantique en deux dimensions, justifiant des prédictions faites en physique théorique au cours

des années 1980. Les liens entre des domaines a priori éloignés sont également fascinants : par exemple, les travaux de la mathématicienne Nalini Anantharaman, professeure au Collège de France, et de ses collègues, qui emploient des techniques issues de l'étude des graphes aléatoires pour résoudre des questions en géométrie hyperbolique.

SVHS : ***Cet été, la mathématicienne Hong Wang est devenue la troisième femme à recevoir la médaille Fields. Est-ce révélateur du manque de parité dans la discipline ?***

I.G. : En mathématiques fondamentales (cette catégorie existe d'un point de vue institutionnel), seulement 10 % des professeurs sont des femmes. J'entends parfois dire que si les femmes ne font pas de maths, c'est parce qu'elles n'aiment pas ça. En réalité, c'est plutôt la société qui tend à dire aux femmes qu'elles doivent aimer autre chose. Les préjugés de genre les détournent de la discipline. On parle ici de la problématique de parité entre les hommes et les femmes, mais il existe beaucoup d'autres problèmes de diversité dans notre discipline.

J.B. : Les mathématiciennes ont subi une discrimination historique : Sophie Germain ou Sofia Kovalevskaïa, par exemple, ont été très peu lues de leur vivant parce qu'elles étaient des femmes à une époque où celles-ci souffraient d'une véritable politique d'exclusion. Aujourd'hui, l'exclusion est plus insidieuse et prend place notamment au moment de l'orientation. Depuis la réforme du baccalauréat de 2019-2020, le nombre de filles qui choisissent de faire des mathématiques s'est effondré. Peut-être est-ce un résultat temporaire, mais c'est désespérant. Ce n'est pas le cas partout : en Italie, les femmes font beaucoup plus de mathématiques !

SVHS : ***Les mathématiques sont souvent vues comme élitistes. Elles entraînent parfois de vives réactions négatives chez les élèves. Comment faire évoluer positivement l'image des maths ?***

I.G. : Répondre à cette question est délicat. Il y a peut-être un problème dans la formation des enseignants et enseignantes du premier degré. La plupart n'ont pas suivi une formation en mathématiques à l'université et n'ont pas forcément d'appétence pour cette matière. Cette répulsion est ensuite projetée sur les parents d'élèves et les élèves. Malheureusement, créer une phobie sur une discipline va très vite.

J.B. : Les mathématiques sont une activité humaine au même titre que le foot, par exemple. On peut admirer le talent des joueurs



IMAGE GÉNÉRÉE PAR IA

« Les maths sont une activité humaine au même titre que le foot : on peut admirer le talent des joueurs pros, tout en prenant du plaisir à jouer dans un club amateur »

professionnels, tout en prenant du plaisir à jouer dans un club amateur. Il faudrait que ce soit pareil en mathématiques. Certes, il y a un niveau élitiste, mais on peut faire des mathématiques sans être professionnel. Tout le monde est le bienvenu.

I.G. : Nous ne plaidons pas pour les mathématiques parce que nous sommes mathématicien et mathématicienne, mais parce que cette discipline est essentielle pour la société. On a notamment pu le voir pendant la crise du Covid. Tout le monde doit y avoir accès. ▪

** Isabelle Gallagher est mathématicienne et présidente de la Société mathématique de France. Créée en 1872, cette société savante vise à promouvoir la culture mathématique pour tout le monde. Pour le grand public via des actions de diffusion, mais aussi pour les mathématiciens et mathématiciennes avec des cycles de conférences ou l'édition de journaux et de livres scientifiques.*

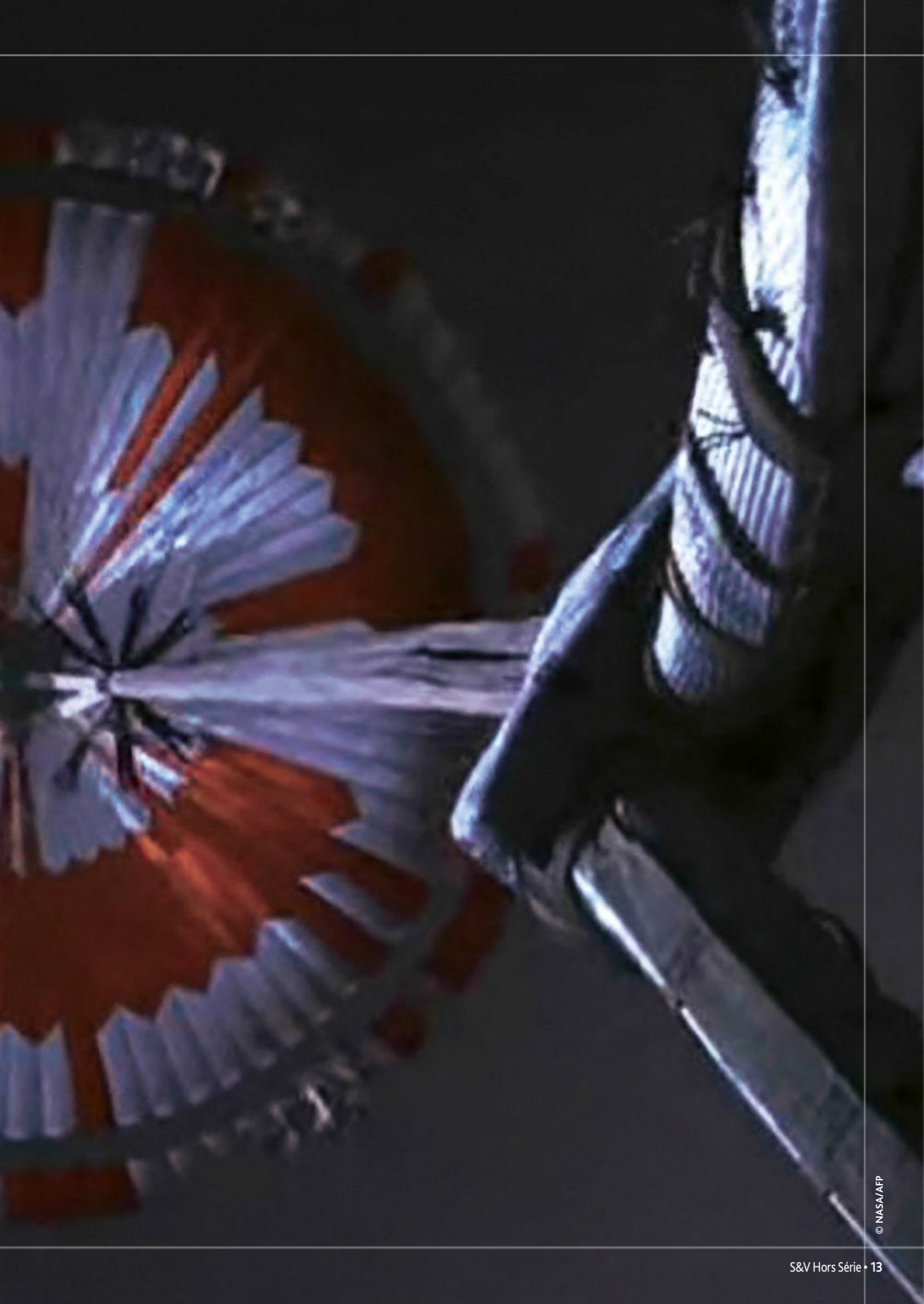
*** Jérémie Bouttier est mathématicien et directeur de l'Institut Henri-Poincaré. Lieu d'accueil de la communauté de mathématiques et de physique théorique, l'institut héberge des conférences, des cours et autres activités liées à la recherche. Il conserve aussi des collections de livres, de journaux et d'objets mathématiques, et abrite depuis 2023 un musée à destination du grand public.*



RECHERCHER



Atterrissage de Perseverance à la surface de Mars en février 2021. Sur cette image tirée d'une vidéo réalisée juste avant l'arrivée du rover, on distingue la partie ventrale du parachute largement déployé. Les motifs dont il est décoré sont porteurs d'un message codé en binaire (le blanc renvoie au chiffre 0 et le rouge au chiffre 1). Traduction : *"Dare mighty things"*, "Osez de grandes choses", la devise du Jet Propulsion Laboratory (Nasa) qui a conçu ce rover.



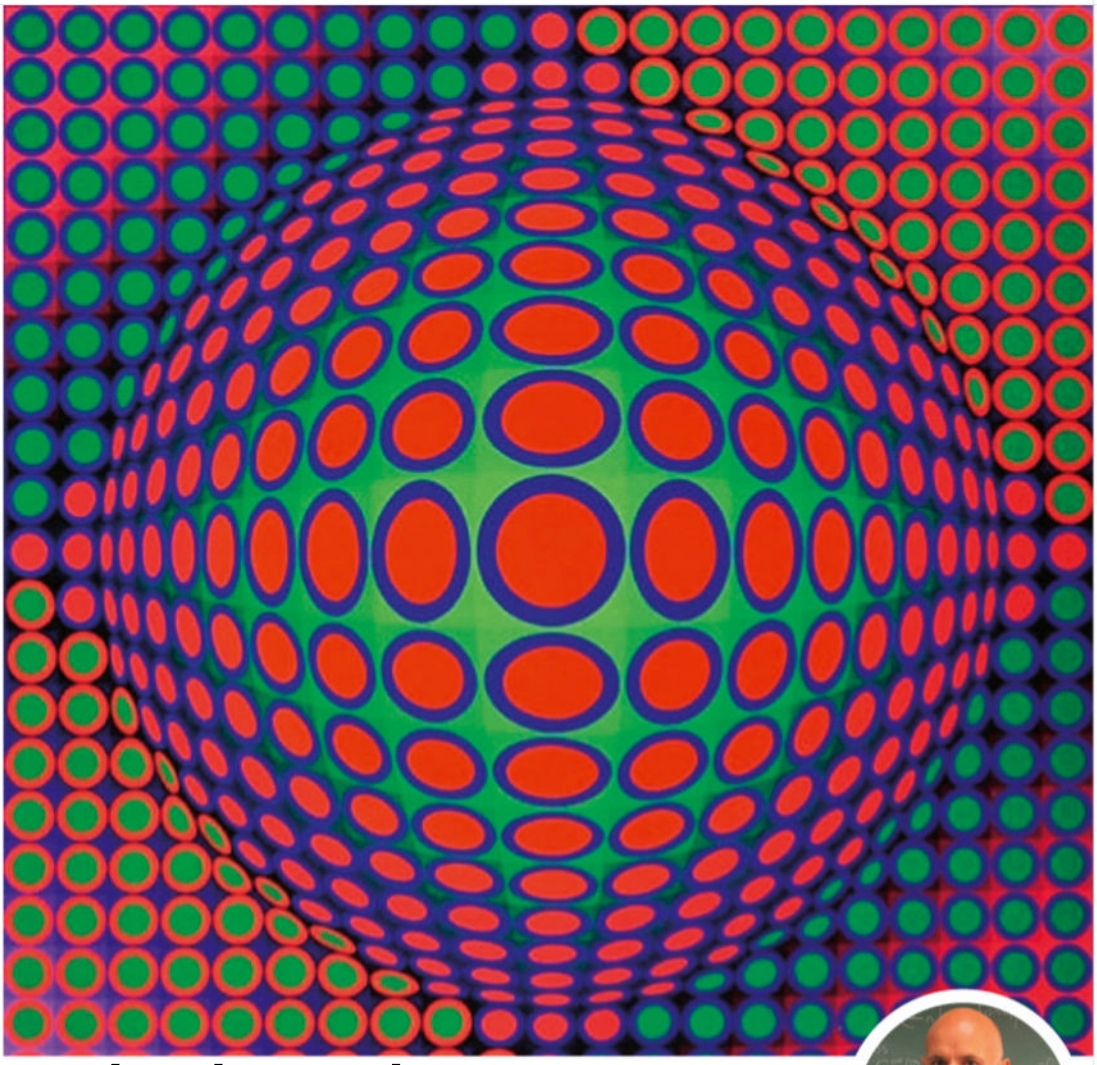
© NASA/AFP

C'est quoi le problème ?

Analyse non lisse, géométrie aléatoire, combinatoire algébrique… Mais qu'est-ce que c'est ? Nous avons demandé à six chercheurs et chercheuses de choisir une œuvre d'art permettant de comprendre l'objet de leurs travaux. PAR SANDRINE MARY



© COLLECTION PRIVÉE





LA GÉOMÉTRIE ALÉATOIRE

illustrée par *Vega 200*, de Victor Vasarely *(ci-dessus)*, et *Les Pyramides de Port-Coton*, de Claude Monet.

RÉMI RHODES, *AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ*

"Mon domaine de recherche porte sur la géométrie aléatoire et ses applications en physique, comme la gravité quantique en deux dimensions. En physique quantique, c'est comme si la nature tirait cette géométrie au hasard, à la manière d'un lancer de dé. Mon travail consiste à comprendre la loi de ce tirage. C'est pourquoi j'ai choisi Vasarely : sa grille se dilate et se resserre, comme si l'unité de longueur variait d'un point à l'autre. Dans mes modèles, la façon de mesurer les distances change au hasard d'un endroit à l'autre et ces variations d'échelle traduisent les fluctuations quantiques. Elles dilatent ou contractent les distances sans modifier les angles. En se superposant, elles créent des effets d'accumulation. C'est ce qu'évoque mon second tableau : dans la mer déchaînée de Monet, les vagues se superposent et les rochers semblent en surgir, comme certaines formes émergent dans les modèles que j'étudie."

Rémi Rhodes travaille sur la théorie de Liouville, modèle mathématique de la gravité quantique en deux dimensions qui permet d'étudier les fluctuations et les phénomènes d'accumulation. *"Les mathématiques que je pratique sont étroitement intriquées avec la physique quantique : derrière l'image de deux disciplines séparées, physique et mathématiques, se cache un dialogue ancien dont la fécondité ne cesse de se renouveler"*, conclut le mathématicien.

© COLLECTION MICHÈLE VASARELY.





LA FORMALISATION DES MATHÉMATIQUES

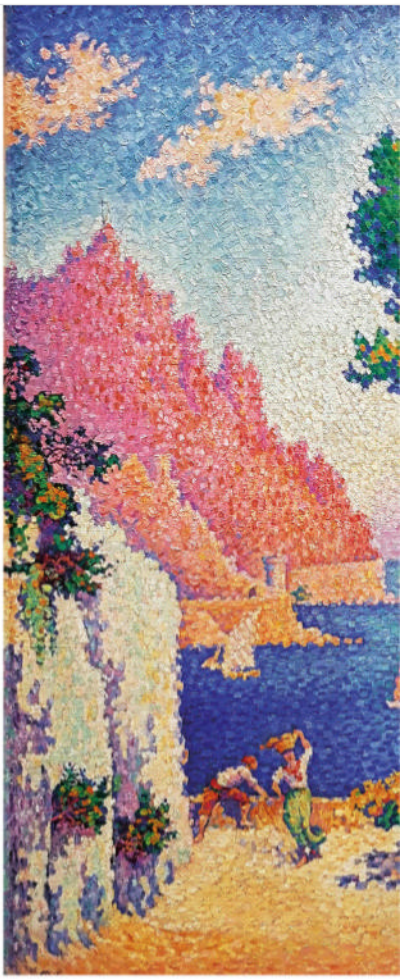
avec la bibliothèque Sainte-Geneviève à Paris.

ASSIA MAHBOUBI, *INRIA*

"Je considère que ma discipline, la logique, est à la confluence des mathématiques, de la philosophie et de l'informatique. Je travaille notamment sur ce que l'on appelle les assistants de preuve, qui sont des logiciels permettant de représenter rigoureusement la littérature mathématique, avec son vocabulaire, ses notations et ses preuves. Si j'ai choisi cette photo de la bibliothèque Sainte-Geneviève, c'est parce qu'une fois que j'ai ainsi rédigé et validé un pan de mathématiques, je le range dans une bibliothèque numérique, accessible à tous, un peu comme lorsqu'on range le savoir en classant des livres sur des étagères", explique Assia Mahboubi.

La formalisation des mathématiques avec un assistant de preuve passe par la traduction en langage informatique de toutes les étapes d'une preuve. Tous les détails du raisonnement logique doivent être validés, même ceux qui semblent évidents. Cette bibliothèque de preuves dites formelles fournit alors un socle fiable et solide pour les futures démonstrations mathématiques sans risque de faux-sens ou de malentendu.

"Ces assistants de preuve ont récemment fait beaucoup parler d'eux dans le contexte de l'entraînement d'intelligences artificielles, rappelle la chercheuse. *Cependant, si j'ai choisi cette magnifique bibliothèque, c'est pour souligner l'importance des mathématiques comme activité humaine, motivée par l'interaction entre personnes et par une quête de l'esthétique. Les bibliothèques de preuves formelles sont un instrument formidable de conservation et d'exploration du patrimoine mathématique, mais aussi de collaboration et d'enseignement."*



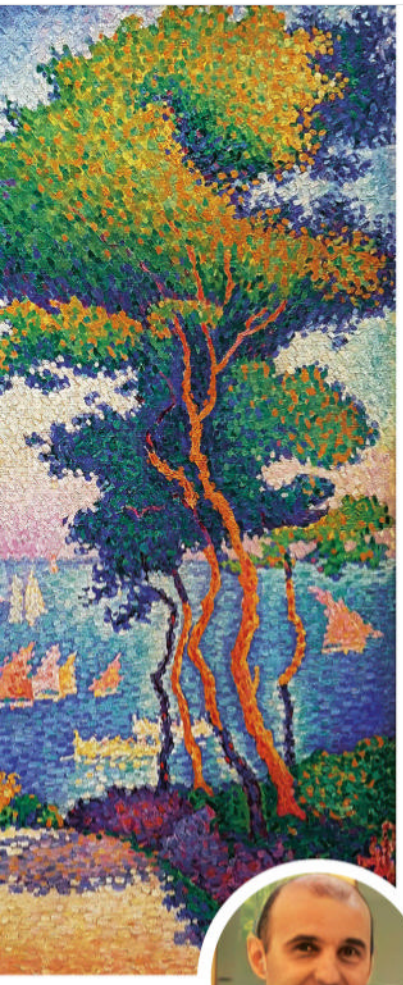
L'ANALYSE TOPOLOGIQUE DES DONNÉES

vue dans *Capo di Noli*, de Paul Signac.

FRÉDÉRIC CHAZAL, *INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATIQUE (INRIA)*

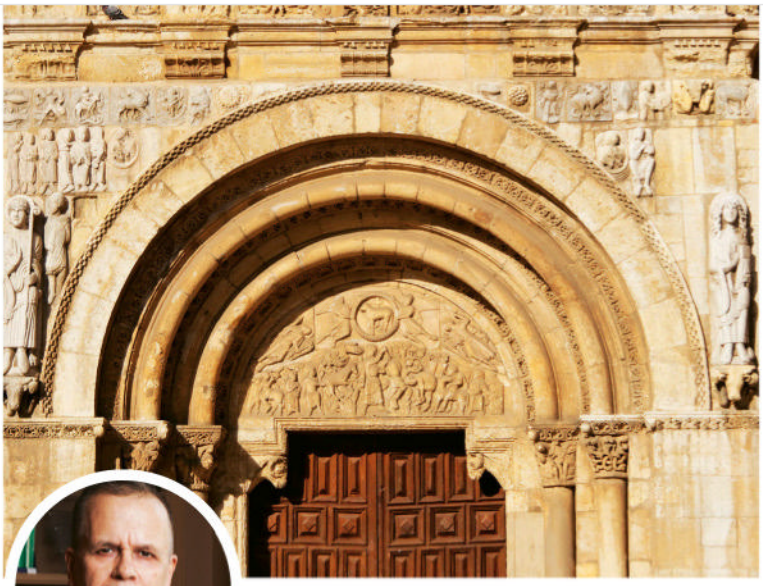
"L'analyse topologique des données, c'est voir, dans une masse de données, se dessiner des formes. Dans ce tableau pointilliste, on distingue des arbres, des bateaux, la mer, et pourtant il n'est composé que de points qui, pris un à un, ne livrent aucune information. Devant

© ALAMY/HEMIS.FR





cette toile, votre cerveau fait de l'analyse topologique sans le savoir. Mes recherches consistent à donner sens à des multitudes de données difficilement exploitables. Je formalise et permets de visualiser la structure, la forme des données complexes. C'est un peu comme donner des lunettes selon les situations et ce que l'on veut voir du monde. Les astronomes le pratiquent lorsqu'ils observent les astres dans plusieurs longueurs d'onde ; suivant ce qu'ils veulent observer. Moi je fournis des lunettes faites de formalismes et d'équations à ceux qui veulent visualiser la forme des champs de données."





L'ANALYSE NON LISSE

illustrée par l'arc en plein cintre.

BERTRAND MAURY, *ENS-PSL ET UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES*

"Cet arc en plein cintre, technique millénaire développée empiriquement, défie l'intuition commune : les lourdes pierres du dessus, qui ne sont pas collées aux autres, semblent en suspension dans le vide. Ce paradoxe apparent peut s'expliquer aujourd'hui grâce à l'analyse non lisse, une branche des mathématiques qui s'intéresse à ce qui ne varie pas en douceur, comme les chocs, les frottements, les blocages", explique Bertrand Maury. Le calcul différentiel classique en mathématique, développé par Isaac Newton et Gottfried Leibniz, suppose que le monde décrit par les équations soit "lisse", c'est-à-dire qu'en chaque point d'une courbe, il existe une tangente unique, une pente bien définie. Mais certains phénomènes sortent de ce cadre et nécessitent d'autres outils qui permettent la prise en compte de tout un éventail de pentes possibles. Les équations complexes qui en découlent permettent de modéliser ces phénomènes non lisses. *"Prenons l'exemple d'un tube de dentifrice : plus on presse et plus le dentifrice sort. Dans le cas de cet arc en plein cintre, a contrario, plus la pierre est lourde et plus ça stabilise l'édifice,* souligne Bertrand Maury. *L'analyse non lisse permet de comprendre ce phénomène, par l'apparition d'un opérateur appelé 'laplacien', que l'on retrouve dans quasiment tous les domaines de la physique, et même en sciences sociales ! Pour ma part, je l'emploie dans le comportement des foules. Par exemple, comment se forme un bouchon lorsque la foule tente de sortir par une porte trop étroite. Ou pour modéliser la propagation d'opinion sur des réseaux sociaux."*

© HUMBERTO VALLADARES/ALAMY/HEMIS.FR

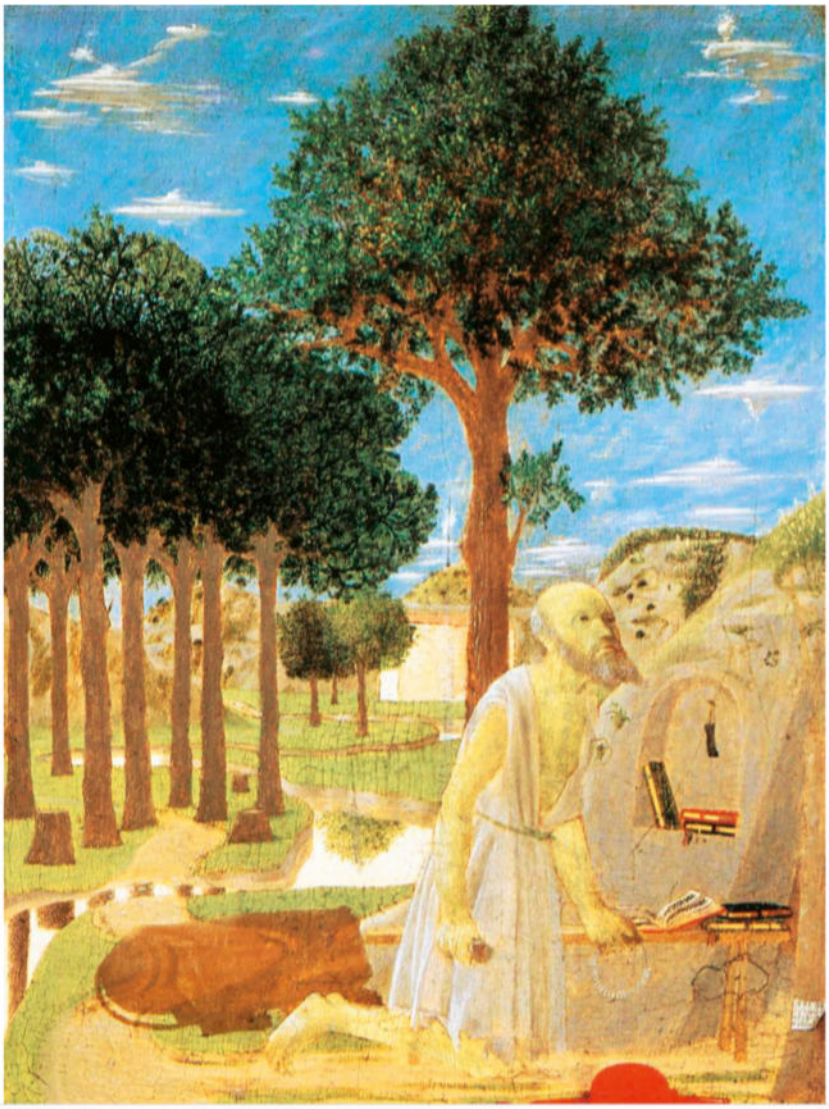
LA GÉOMÉTRIE ARITHMÉTIQUE

selon *Saint Jérôme pénitent*, de Piero della Francesca.

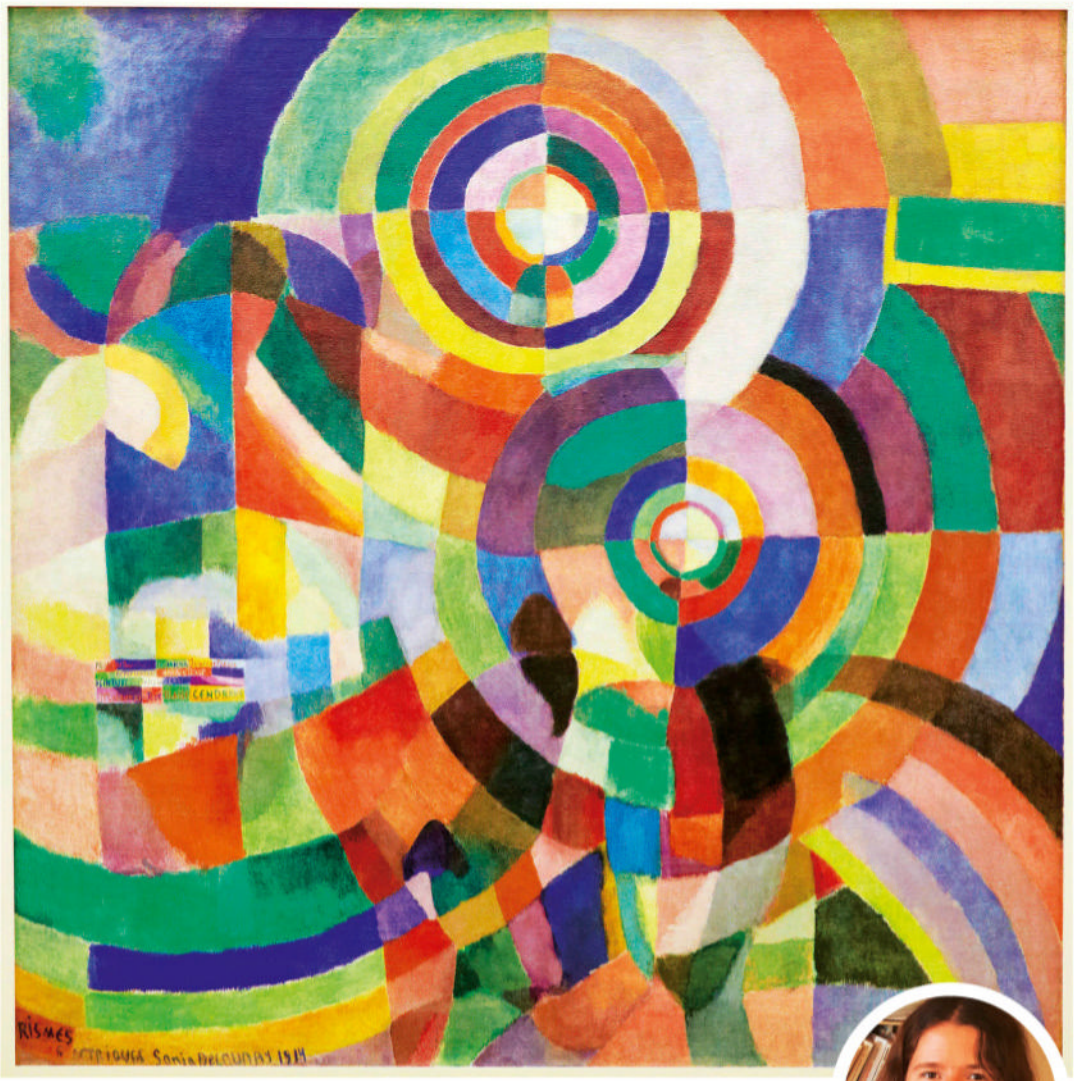
ANNA CADORET, *UNIVERSITÉ DE LA SORBONNE*



"Si j'ai choisi ce tableau, c'est pour le ruisseau qui coule à l'arrière-plan. La première fois que je l'ai vu, j'ai été frappée par le reflet des troncs, que l'on distingue parfaitement dans l'eau, et j'ai immédiatement repéré qu'il y en avait un qui était coupé, ce qui m'aurait peut-être échappé sinon. C'est un peu comme cela que l'on procède en géométrie arithmétique. On part d'une famille d'équations polynomiales dont il est en général impossible de calculer exactement les solutions rationnelles. On commence par regarder l'ensemble – beaucoup plus gros, mais de nature géométrique – des solutions complexes de ces équations : c'est la forêt derrière saint Jérôme, que l'on ne distingue pas bien. On attache alors à ces ensembles géométriques ce que l'on appelle des invariants, par exemple un espace vectoriel muni de structures additionnelles. Cela détache de ce fouillis d'arbres des informations lisibles, comme les troncs reflétés qui se découpent nettement dans le ruisseau. On perd de l'information, car le reflet du tronc est moins riche que l'arbre lui-même, mais on garde celle qui nous intéresse concernant les solutions rationnelles, comme on compte plus facilement les arbres coupés en regardant le reflet de leurs troncs. Cette stratégie permet de décrire le comportement qualitatif des solutions rationnelles. L'exemple le plus emblématique est la spectaculaire conjecture de Mordell, démontrée par Gerd Faltings en 1983. Il s'agit d'équations à deux variables. Dans ce cas, l'ensemble des solutions complexes est une courbe et l'invariant associé un entier positif ou nul très facile à calculer, le genre. Si le genre est plus grand que 2, l'équation de départ n'a qu'un nombre fini de solutions rationnelles ! Plutôt que les solutions complexes, on peut regarder les solutions dites p-adiques ; c'est une idée déjà ancienne, mais la géométrie p-adique a fait des progrès époustouflants ces vingt dernières années, ce qui ouvre des perspectives pour l'étude des équations à trois variables ou plus, sur lesquelles on ne sait encore presque rien dire."



© ALAMY/HEMIS.FR





LA COMBINATOIRE ALGÉBRIQUE

illustrée par *Prismes électriques,* de Sonia Delaunay.

VIVIANE PONS, *UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY*

"Lorsqu'on regarde cette œuvre, on peut voir que l'espace est découpé en plusieurs zones ; c'est un peu ce que je fais dans mes travaux en combinatoire algébrique, je découpe l'espace et ensuite je compte les zones, je les compare et je regarde le lien que chacune entretient avec celles qui les entourent. La combinatoire, c'est l'art de compter des objets discrets, c'est-à-dire qui ne se suivent pas de manière continue comme une suite de nombres entiers", explique Viviane Pons.
La suite de Fibonacci, où chaque terme est la somme des deux précédents, est l'un des exemples les plus connus de la combinatoire. Un autre exemple serait : "combien de solutions possibles au tirage de loto ?" *"Je commence à partir d'une petite suite de nombres,* ajoute la chercheuse, *puis je les programme pour tester mes intuitions à plus grande échelle ; c'est pourquoi je suis à l'interface des maths et de l'informatique, mais on peut retrouver la combinatoire en sciences de la vie – elle peut par exemple servir à décoder l'ADN – ou en physique des particules."*

© ALAMY/HEMIS.FR

LA CONJECTURE DE KAKEYA EST RÉSOLUE!

Cette question vieille d'un siècle concernait les formes dans lesquelles on peut faire tourner une aiguille. Hong Wang et Joshua Zahl ont trouvé la réponse.

PAR CHARLOTTE MAUGER



Hong Wang, professeure à l'Institut des hautes études scientifiques, présente ses travaux sur la conjecture de Kakeya.

© DAVID SONG/NYU - IMAGE MODIFIÉE PAR IA

Le 23 juillet 2026, la mathématicienne chinoise Hong Wang, professeure permanente à l'Institut des hautes études scientifiques, est devenue la troisième femme lauréate de la médaille Fields. Soit l'une des plus prestigieuses récompenses en mathématiques. Cette distinction récompense son travail sur la conjecture de Kakeya, en particulier sa résolution en dimension 3 avec son collègue Joshua Zahl, de l'université de Nankai en Chine.

L'AIGUILLE ET SA SURFACE

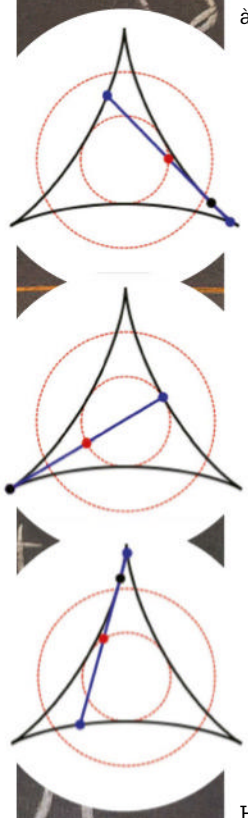
Explorons déjà la version en 2D à l'aide d'une aiguille posée sur une table. En 1917, le mathématicien japonais Sōichi Kakeya se demande quelle est la forme de plus petite aire à l'intérieur de laquelle une aiguille peut faire un tour complet. Par exemple, si on la fait tourner par son milieu, on dessine un disque. Sōichi Kakeya montre qu'il y a mieux : la deltoïde – une sorte de triangle équilatéral dont les côtés sont courbés vers l'intérieur. Celui-ci permet de diviser l'aire nécessaire à la rotation par 2.

Peut-on faire plus petit ? Oui, répond le mathématicien russe Abram Besicovitch : il existe des formes aussi petites que l'on veut dans lesquelles faire tourner l'aiguille. Si l'aiguille a une épaisseur nulle, on peut même trouver une forme de surface nulle qui contiendra toutes les directions de l'aiguille. Ces ensembles dits "de Besicovitch" sont recouverts d'épines.

"Même si la surface est nulle, on peut avoir plus d'informations sur sa taille grâce aux dimensions de Minkowski et de Hausdorff", soutient Hong Wang. Ces dimensions décrivent à quel point une figure remplit l'espace, même si cette figure a une aire nulle.

Les mathématiciens supposent que ces dimensions valent 2 pour les ensembles de Besicovitch en 2D. Hong Wang décrit ce qu'une dimension de Minkowski égale à 2 signifie : *"Imaginons qu'on recouvre l'ensemble d'aire nulle avec des petits disques de rayon δ. Cela veut à peu près dire qu'on aura besoin d'au moins $\delta^{-\beta}$ disques, avec β proche de 2 et δ proche de 0."* En clair, si le rayon est petit, on peut ajouter beaucoup de disques à l'intérieur. Roy Davies démontre cette conjecture en 1971.

Et au-delà de la 2D ? Dans quel volume peut-on faire tourner une aiguille ? *"La question du volume minimal a été résolue par Abram Besicovitch : pour toutes les dimensions, ce volume est nul"*, explique Hong Wang. Donc peu importe la dimension, il existe un ensemble de toute les orientations de l'aiguille dont le volume vaut 0. Ne reste qu'à trouver les dimensions de Minkowski et de Hausdorff : valent-elles 3 en 3D ? Puis 4 dans la 4e dimension, et ainsi de suite ? C'est exactement ça, la conjecture de Kakeya.

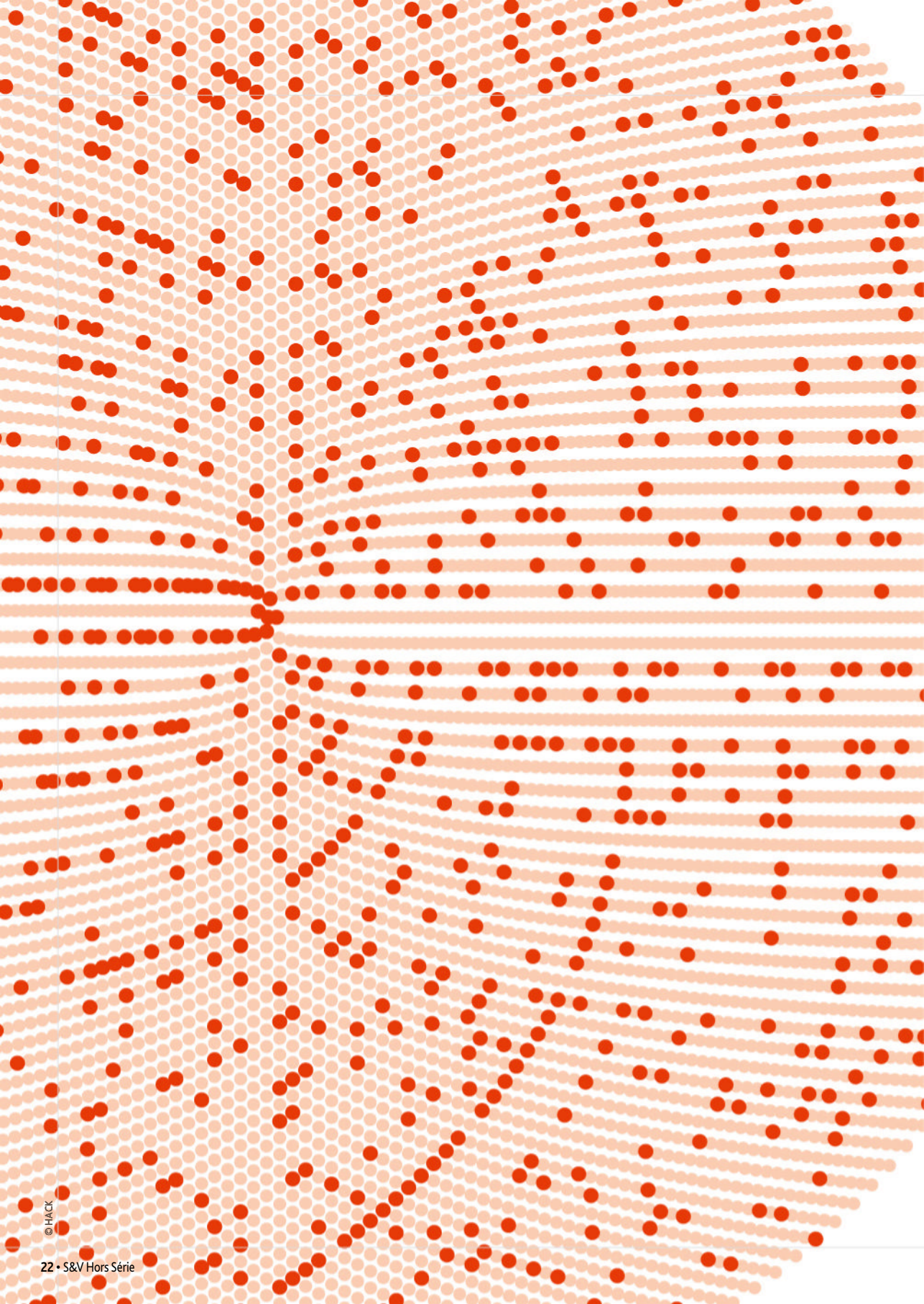


Conjecture de Kakeya, version 2D : pour faire pivoter une aiguille *(trait bleu)* en prenant le moins de place possible, il faut la faire évoluer dans une deltoïde *(trait noir)*.

ANALYSE HARMONIQUE

Hong Wang et Joshua Zahl se sont emparés de la conjecture dans la 3e dimension et ont réussi à la démontrer en février 2025. Pour réussir cette percée, ils ont notamment poursuivi les travaux de Larry Guth. Ce mathématicien américain regardait ce à quoi ressembleraient les ensembles de Besicovitch si jamais la conjecture était fausse. Finalement, le duo conclut à une absurdité… La conjecture ne peut donc qu'être vraie !

La conjecture de Kakeya n'est pas seulement une question centenaire : elle est aussi liée à d'autres domaines des mathématiques, notamment l'analyse harmonique ou la théorie géométrique de la mesure. Hong Wang annonce explorer ces autres champs : *"La conjecture de Kakeya est un cas particulier d'un problème plus général appelé les projections restreintes dans la théorie géométrique de la mesure. C'est une question à laquelle je m'intéresse désormais."* ▪



© HACK

Le casse-tête des nombres premiers

En mathématiques, une définition simple peut cacher des problèmes difficiles. Ainsi les nombres premiers : étudiés depuis des centaines d'années, on ne sait pourtant que peu de choses sur eux.

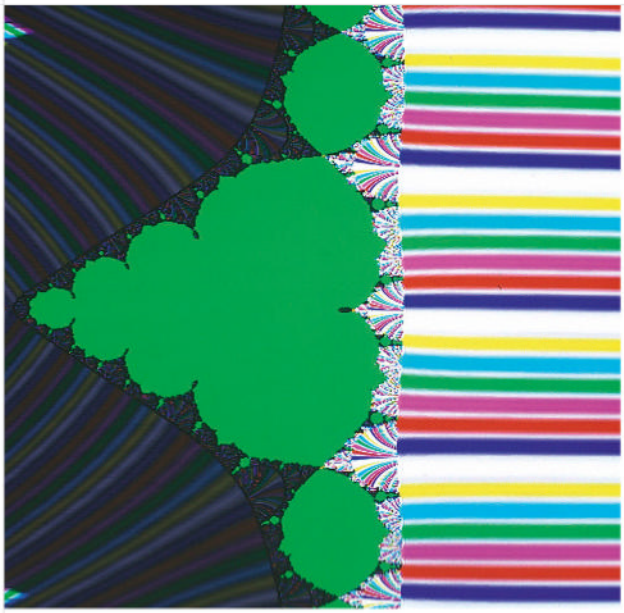
PAR CHARLOTTE MAUGER

Leur liste s'étend à l'infini. 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19… Ces nombres sont les "premiers", c'est-à-dire ceux divisibles seulement par 1 et par eux-mêmes. Le nombre 9, par exemple, n'en fait pas partie, car $3 \times 3 = 9$, donc 3 le divise. Ces objets permettent de construire n'importe quel entier *[nombre sans partie décimale ou fractionnaire, NDLR]* plus grand que 2. En effet, chaque élément s'écrit sous la forme d'une multiplication de nombres premiers : par exemple, 20 c'est 4×5, mais c'est aussi $2 \times 2 \times 5$. Quelques lignes suffisent donc à définir ces nombres et à expliquer leur rôle central. C'est simple, non ? Eh bien non. Dès que l'on s'intéresse à leurs propriétés, on se heurte à des questions qui semblent faciles… mais dont certaines résistent encore après des siècles de recherches.

L'une des principales difficultés des nombres premiers, c'est leur distribution, c'est-à-dire comprendre où ils se cachent parmi les entiers. *"Elle semble aléatoire, nous ne sommes pas capables de prédire quand apparaîtra le prochain nombre premier"*, expose Cédric Pilatte, de l'université d'Oxford au Royaume-Uni. Pour étudier leur répartition, on pourrait les compter : combien de premiers se trouvent entre 0 et 100, puis entre 100 et 1 000, puis entre 1 000 et 1 million, etc. Car à moins de les dénombrer un par un, il n'existe pas de manière d'avoir le compte juste. Néanmoins, les mathématiciens possèdent une formule qui donne à peu près combien d'entiers plus petits que x sont premiers : il y en a environ $x/\ln(x)$ *[où* ln *désigne la fonction logarithme, NDLR]*. Grâce à elle, il est possible de montrer que les nombres premiers se raréfient parmi les grands nombres.

Mais à quel point la formule se trompe-t-elle ? Cette question est liée à l'un des problèmes les plus connus des mathématiques : l'hypothèse de Riemann. *"Si on compare le vrai nombre de nombres premiers plus petits que* x *avec ce que donne une version améliorée de la formule, on constate que l'erreur semble être très petite. C'est ce que l'hypothèse de Riemann permet de prouver"*,

Sur le disque ci-contre, les nombres entiers (points rouges) sont disposés dans l'ordre croissant à partir du centre, selon une spirale d'Archimède (la spirale dessinée sur un disque vinyle). Cette représentation permet de découvrir des motifs dans leur répartition.





Ci-contre: représentation de la fonction zêta de Riemann dans le plan complexe. Les couleurs codent pour les valeurs prises par la fonction. Les points où la fonction s'annule sont représentés sur la droite verticale à l'intersection entre les bandes colorées *(à droite)* et les dômes colorés. En bas: Larry Guth, mathématicien au MIT, spécialiste de la fonction zêta de Riemann.

explique Cédric Pilatte. Cette conjecture formulée par Bernhard Riemann en 1859 indique le lieu où une certaine fonction, appelée "fonction zêta de Riemann", s'annule. *"Cette fonction pilote la répartition des nombres premiers"*, souligne Bruno Martin, de l'université du Littoral Côte d'Opale. Réécrite sous une certaine forme, elle fait en effet apparaître la liste des nombres premiers.

À ce jour, la démonstration de l'hypothèse de Riemann semble inaccessible. En 2024, Larry Guth et James Maynard ont néanmoins fait une avancée : ils ont démontré que si la fonction zêta s'annulait à d'autres endroits que ceux prévus par l'hypothèse, le cas reste extrêmement rare. *"C'est un progrès remarquable. Mais on est encore loin d'avoir fait la moitié du chemin"*, constate Cédric Pilatte. En août 2026, on a appris que l'entreprise Anthropic s'intéressait à cette question : un de ses modèles d'IA a réussi à prouver que 67,2 % des zéros *[non triviaux, NDLR]* de la fonction se trouvent bien là où on le suppose – contre 41,6 % avant.

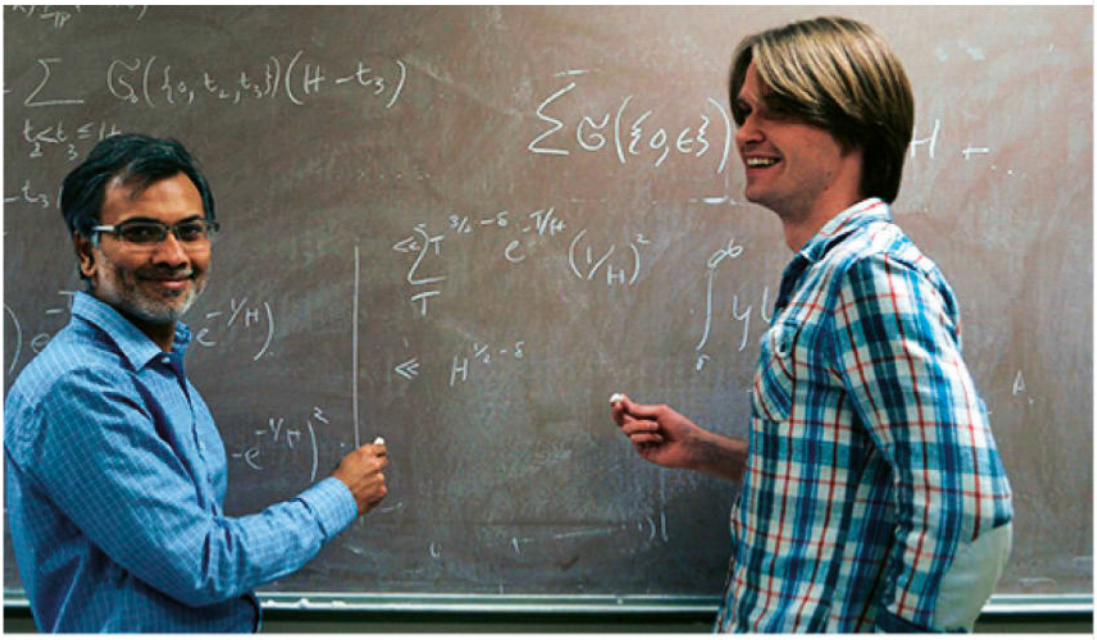
Si décrire la répartition des nombres premiers est hors de portée, que peut-on tout de même apprendre ? Certains mathématiciens recherchent les biais de ces nombres, c'est-à-dire des caractéristiques qui les distinguent d'un ensemble parfaitement aléatoire. *"De tels biais fourniraient des filtres pour cibler la recherche de nombres premiers"*, explique Bruno Martin. Par exemple, on peut faire deux groupes de nombres premiers impairs : ceux qui s'écrivent comme $4 \times n + 1$ et les autres qui s'écrivent comme $4 \times n + 3$. Est-ce qu'il y a autant de nombres premiers dans ces deux catégories ? Un théorème de Gustav Lejeune Dirichlet en 1837 affirme que c'est le cas. Comme si les nombres premiers se glissaient partout.

RÈGLES CACHÉES

C'est bien le cas, même quand les mathématiciens regardent d'autres filtres. Par exemple, Christian Mauduit et Joël Rivat ont démontré en 2010 que la somme des chiffres des nombres premiers était en moyenne aussi souvent paire qu'impaire. En 2024, Ben Green et Mehtaab Sawhney ont, quant à eux, travaillé avec un filtre plus contraignant : ils ont prouvé qu'il y a une infinité de premiers s'écrivant comme $p^2 + 4q^2$, avec p et q premiers eux aussi. *"S'il n'y a pas d'obstruction évidente à avoir des nombres premiers dans un ensemble infini de nombres entiers (comme dans les nombres pairs), on prédit généralement qu'il va y en avoir une infinité, sans toujours être en mesure de le prouver"*, expose Bruno Martin.

Pourtant, à de rares occasions, les mathématiciens mettent le doigt sur une règle cachée. Ce fut le cas en 2016, quand les chercheurs Kannan Soundararajan et Robert Lemke Oliver ont établi que le chiffre des unités d'un

© JEAN-FRANÇOIS COLONNA/CNRS IMAGES – BRYCEVICKMARK - À DROITE IMAGE MODIFIÉE PAR IA



Kannan Soundararajan *(à gauche)* et Robert Lemke Oliver *(à droite)* ont remarqué un biais dans la distribution des nombres premiers jusqu'à un milliard : un premier finissant par 1 a peu de chance d'être suivi par un premier se terminant également par 1.

nombre premier influe sur celui du prochain nombre premier de la liste. Ces nombres sont décidément difficiles à cerner ! Même des questions très simples se montrent particulièrement délicates à prouver. La conjecture des nombres premiers jumeaux et celle de Goldbach sont les deux exemples les plus emblématiques. La première demande de prouver qu'il y a une infinité de nombres premiers tels que si on leur ajoute 2 on obtienne un autre premier, comme 11 et 13 ou bien 17 et 19. La seconde, c'est réussir à démontrer que les nombres pairs plus grands que 2 s'écrivent tous comme la somme de deux nombres premiers, comme 8 = 5 + 3. *"Ces questions s'énoncent très simplement, alors que leurs démonstrations sont pour le moment hors d'atteinte"*, précise Bruno Martin. *"Les nombres premiers sont liés à la multiplication, mais ces deux conjectures demandent de les lier à l'addition, cela rend les choses très délicates"*, poursuit Cédric Pilatte.

> *« La distribution des nombres premiers semble aléatoire, nous ne sommes pas capables de prédire quand apparaîtra le prochain »*

Des progrès ont néanmoins été faits. En 2013, Harald Helfgott a démontré une version plus faible de la conjecture de Goldbach en prouvant que les nombres impairs à partir de 7 s'écrivent comme la somme de trois premiers. Quant aux nombres premiers jumeaux, les mathématiciens ont réussi à prouver qu'une infinité de premiers sont séparés de moins de 246 entiers – mais l'écart de 2 est encore loin ! *"Il semble qu'on n'ait pas encore les outils pour ces conjectures"*, conclut Bruno Martin.

Hypothèse de Riemann, conjecture de Goldbach et des premiers jumeaux : ces trois problèmes forment une partie des 23 "problèmes de Hilbert", une liste de questions non résolues que David Hilbert considérait comme essentielles pour les mathématiques du XX^{e} siècle. Cent vingt-six ans plus tard, aucun des trois n'a encore livré tous ses secrets. ■

LA QUÊTE DU SPECTRE

Existe-t-il une forme capable de recouvrir un plan sans laisser de trou ni créer de régularité ? Oui, a répondu une équipe d'amateurs et de mathématiciens. La voici. PAR CHARLOTTE MAUGER

Malgré son nom et ses 13 côtés, ce "spectre" *(en illustration)* n'a rien d'effrayant. S'il s'appelle ainsi, c'est à cause de son apparence de fantôme flottant dans son drap blanc. Depuis un demi-siècle, les mathématiciens étaient à sa recherche. Certains convaincus de son existence, d'autres plus sceptiques. Mais lui, il demeurait invisible… jusqu'à ce qu'un groupe de quatre amateurs de formes géométriques lui mette la main dessus.

Que cache cette forme ? Elle résout un problème appelé "einstein", qui n'est pas une référence directe au fameux physicien, mais un jeu de mots. En allemand, *ein stein* veut dire une pierre ou un pavé. Ouverte depuis les années 1970, cette question vise à savoir s'il est possible de recouvrir n'importe quelle surface (même infinie) sans laisser de trou et sans créer de régularité. Plus précisément, cette absence de régularité veut dire que si on décalquait le pavage, jamais on ne réussirait à superposer le calque ailleurs. Les mathématiciens parlent de pavage apériodique. Et l'"einstein" ne doit former que ce type de pavages.

En 2010, Joan Taylor, amatrice de mathématiques, et Joshua Socolar, de l'université Duke, étaient proches de résoudre ce problème. *"Joan Taylor a trouvé une tuile – une*

© UNE LIGNE DE CRÉDIT

forme géométrique – et a demandé à Joshua Socolar de la comprendre. Dans le domaine des pavages, beaucoup d'avancées sont faites grâce à des amatrices et amateurs", retrace Michaël Rao, chercheur CNRS à l'École normale supérieure de Lyon. Cette forme pave bien le plan de manière apériodique. Le hic, c'est qu'elle est composée de plusieurs morceaux. La quête de l'"einstein" s'est donc poursuivie.

La force des amateurs de pavages est leur capacité à explorer le monde des formes, guidés par leur intuition. David Smith, qui se décrit lui-même comme *"quelqu'un qui aime jouer avec les formes"*, en fait partie. En 2023, il découvre un polygone ressemblant à un chapeau au comportement étonnant : il n'arrive pas à créer de pavage régulier avec. *"Avant de contacter le mathématicien Craig Kaplan, je l'ai envoyé à quelques amis. Je voulais être sûr de ne pas avoir manqué un pavage évident"*, raconte-t-il. Or, ni lui ni personne n'en trouve. David Smith partage alors son chapeau avec Craig Kaplan. Quelques mois plus tard, avec l'aide de Joseph Samuel Myers et de Chaim Goodman-Strauss, la démonstration est publiée : le chapeau pave le plan de manière apériodique.

Mais si on veut être tatillon, cette forme a tout de même un petit défaut : il faut utiliser son côté pile et son côté face pour recouvrir le plan. Le quatuor ne tarde pas à revenir à la charge. Deux mois après leur retentissante annonce du chapeau, ils proposent le spectre. Cette forme pave cette fois le plan de manière apériodique sans qu'il soit besoin de la retourner. L'équipe de David Smith n'avait pas à chercher bien loin. En modifiant les paramètres du chapeau, ils ont découvert une famille d'autres tuiles. Parmi elles, T(1,1) qui pave le plan de manière apériodique si on s'interdit d'utiliser son côté pile et face dans le même pavage. Il deviendra « l'un des » spectres, car en réalité l'équipe a trouvé toute une famille de spectres en courbant les côtés de ce polygone.

"À ce jour, ces formes sont une sorte de pépite. Car mis à part elles, on ne connaît pas d'autres tuiles apériodiques", fait savoir Michaël Rao. Le défi est lancé : en découvrira-t-on un jour qui soit très différente du chapeau et du spectre ? Amateurs de mathématiques, à vous de jouer ! ▪

Quelles règles dans le chaos ?

Fluides, turbulences, climat… Les maths tentent de décrire des systèmes fondamentalement imprévisibles. Certains chercheurs parlent désormais d'"ultra-chaos". PAR DAVID MARCHAND

Cette nuit-là, dans l'Atlantique, une tempête fait rage. À la surface de l'océan, le vent soulève des vagues hautes comme des immeubles. Plus haut, un avion reliant Paris à New York est fortement secoué. Dans le cockpit, le café brûlant du pilote déborde de sa tasse. Sa vapeur se disperse en volutes avant d'être emportée par la ventilation… Une tempête, des turbulences, du café qui tourbillonne : à des échelles différentes, tous ces mouvements relèvent des mêmes lois de la mécanique des fluides. Au XIXe siècle, Claude-Louis Navier et George Gabriel Stokes les ont traduites en équations, en tenant compte notamment de la conservation de la matière, de la pression, de la viscosité et des forces exercées sur le fluide. Ces équations aux dérivées partielles décrivent ainsi l'évolution de la vitesse du fluide dans l'espace et le temps.

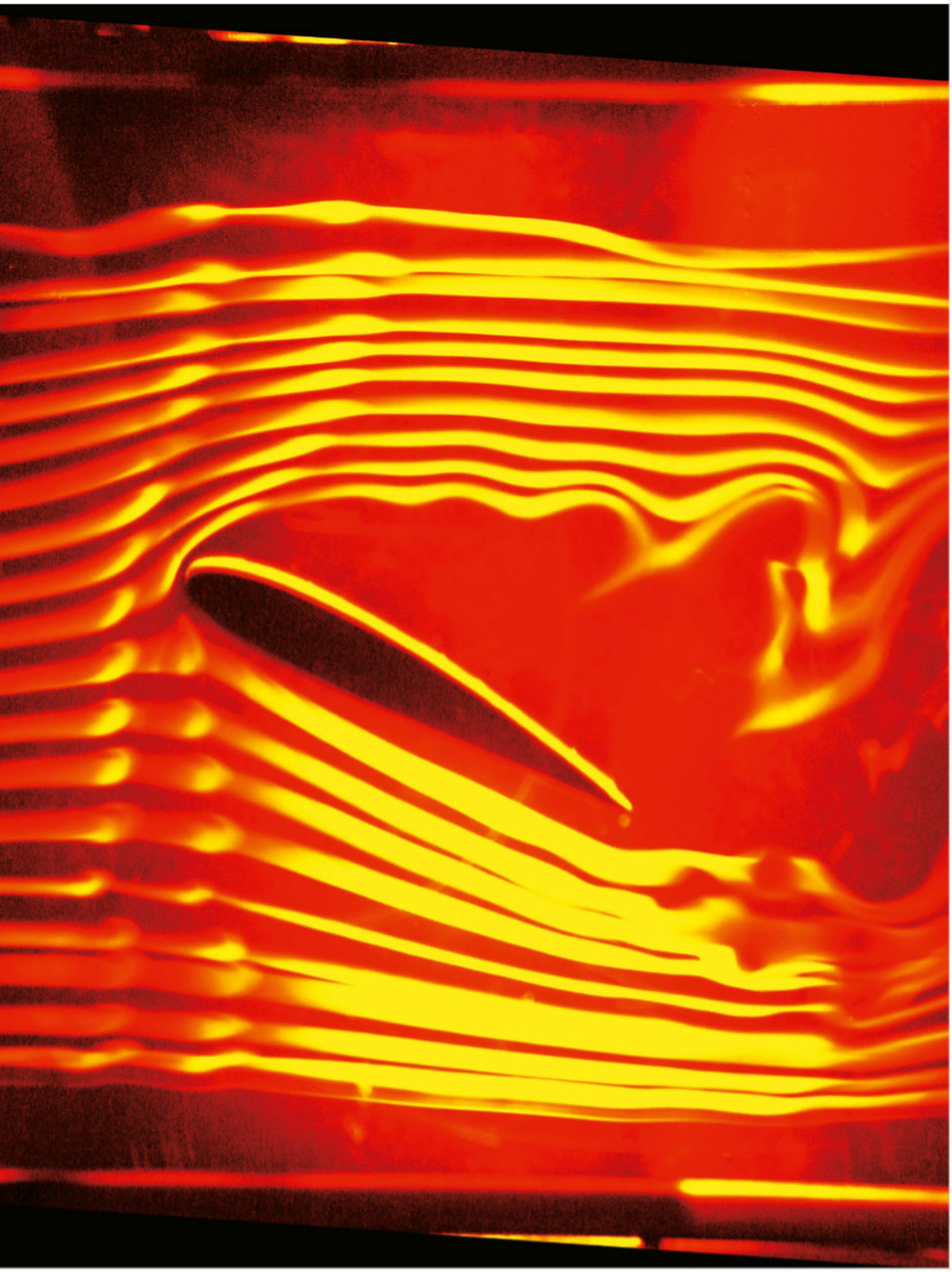
Elles sont aujourd'hui omniprésentes. Pourtant, en trois dimensions, personne n'a démontré qu'un écoulement initialement régulier le demeure toujours. Les équations pourraient-elles conduire à une singularité, un emballement faisant apparaître des vitesses infinies ? Pourraient-elles même admettre plusieurs évolutions pour un même état initial ? Longtemps, on a ignoré si de telles étrangetés pouvaient effectivement se produire. Une annonce récente pourrait changer la donne *(voir encadré p. 31)*. Cette énigme figure parmi les "sept problèmes du prix du millénaire" retenus en 2000 par le Clay Mathematics Institute, qui promet un million de dollars à qui démontrera que les solutions des équations de Navier-Stokes restent toujours régulières ou, au contraire, fournira un exemple où elles "explosent".

D'autant que les équations de Navier-Stokes ne montrent pas ce qui se passe au cœur du fluide. À notre échelle, l'eau d'une rivière forme un courant continu. En zoomant apparaissent des zones plus ou moins denses où les particules ont des vitesses différentes. En zoomant encore, le fluide se révèle composé d'une multitude de molécules soumises aux lois de Newton. Entre cette vision d'ensemble et le ballet de ses molécules se trouve une échelle intermédiaire, dite mésoscopique. Elle est régie par l'équation de Boltzmann. Celle-ci ne suit pas chaque particule une à une : elle décrit leur répartition statistique selon leur position et leur vitesse.

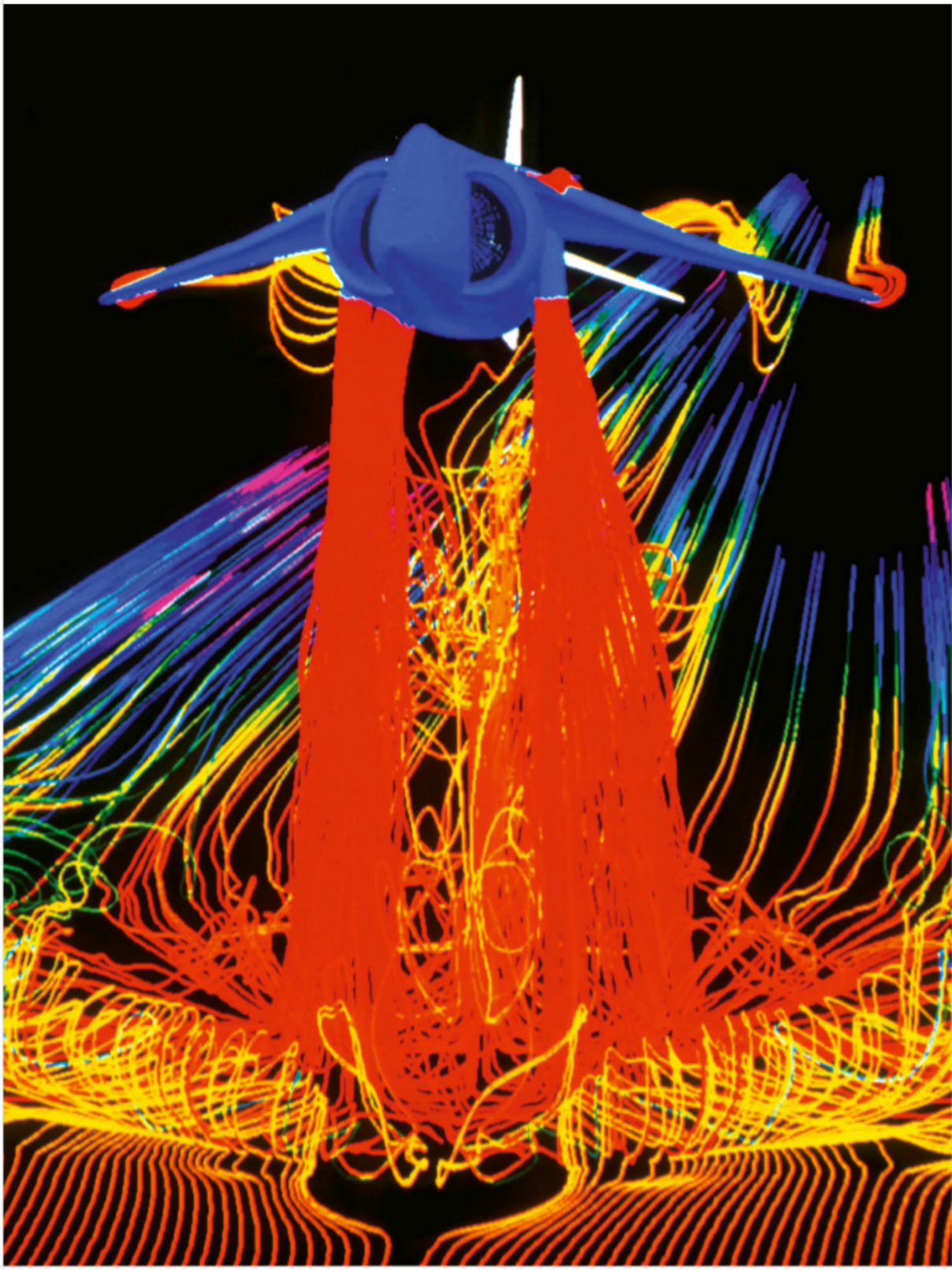
ENCHEVÊTREMENT DES COLLISIONS

Dès 1900, le mathématicien allemand David Hilbert appelait à établir des ponts rigoureux entre les modèles de Newton, de Boltzmann et de Navier-Stokes. En 2025, Yu Deng, Zaher Hani et Xiao Ma, mathématiciens à l'université de Chicago, pour le premier, et du Michigan pour les seconds, ont franchi une étape majeure : montrer comment, à partir des trajectoires et des collisions de milliards de particules, émerge la description statistique de Boltzmann.

La mécanique des fluides est étudiée, entre autres, dans des simulateurs. Ici, un tunnel à vent permet de visualiser la répartition des flux d'air autour d'une aile d'avion *(au centre)*.



© DR. GARY SETTLES/SPL



© NASA AMES RESEARCH CENTRE/SPL

Toute la difficulté était de suivre, sur une longue durée, l'enchevêtrement des collisions : chaque choc modifie les trajectoires et en provoque de nouvelles. Les chercheurs ont représenté ces histoires de collisions sous la forme de graphes, dont les branches retracent les chocs successifs. "*Et nous avons construit une nouvelle manière d'analyser ces graphes*", explique Yu Deng. Leur méthode permet de classer ces configurations, d'isoler celles qui influencent réellement l'évolution d'un gaz et de montrer que les autres deviennent négligeables. Ils établissent ainsi comment la description statistique de Boltzmann émerge des lois de Newton… tant que la solution de l'équation de Boltzmann reste régulière. Leur résultat reste limité à un cadre précis : un gaz très dilué, dont les particules sont assimilées à des sphères dures. Même avec des équations déterministes, prévoir un écoulement peut devenir impossible. C'est le chaos mis en lumière par Edward Lorenz, dès 1963 : deux états presque identiques finissent par suivre des trajectoires très différentes.

Il reste pourtant un refuge : les statistiques. À défaut de prévoir chaque tourbillon, on peut calculer leur taille moyenne, la distribution des vitesses ou la fréquence des événements. C'est ainsi que les climatologues étudient des tendances plutôt que le temps d'un jour lointain. Depuis 2021, Shijun Liao et Shijie Qin, deux chercheurs à l'université Jiao Tong de Shanghai, explorent une forme plus extrême d'imprévisibilité, baptisée "ultra-chaos". Dans un chaos ordinaire, deux états presque identiques suivent rapidement des trajectoires différentes, mais leurs propriétés moyennes restent semblables. Dans un système ultra-chaotique, même ces moyennes changeraient : une perturbation infime pourrait modifier durablement la distribution des vitesses, la symétrie de l'écoulement ou la fréquence de certaines configurations. Le résultat suggère que certaines turbulences pourraient être imprévisibles jusque dans leur comportement moyen. Il demeure isolé pour le moment.

IMMENSITÉ DES SOLUTIONS POSSIBLES

Pour sonder les équations des fluides, les mathématiciens disposent désormais de réseaux de neurones guidés par les lois de la physique. Le réseau propose une solution possible, puis mesure à quel point elle satisfait l'équation. Il ajuste ensuite ses paramètres pour réduire progressivement l'erreur. L'IA sert ainsi d'éclaireuse : elle repère, parmi l'immensité des solutions possibles, celles que les chercheurs ont intérêt à examiner.

En 2025, une équipe internationale a utilisé cette méthode pour rechercher des solutions singulières, susceptibles de s'emballer. Très instables, elles sont presque impossibles à repérer par une simulation classique : la moindre erreur numérique suffit à les faire disparaître. Le réseau peut au contraire rechercher directement leur forme, sans simuler seconde après seconde toute l'évolution du fluide. Les chercheurs ont ainsi découvert de nouvelles singularités candidates. Ces résultats de 2025 ne portent pas directement sur les équations de Navier-Stokes en trois dimensions. Mais leur grande précision fournit aux mathématiciens des pistes pour de futures démonstrations.

Dans le cockpit, le café a cessé de déborder. Mais les équations des fluides, elles, continuent d'agiter les mathématiciens. Deux siècles après Navier et Stokes, trois défis demeurent : relier les échelles, mesurer jusqu'où va l'imprévisibilité et découvrir les solutions encore cachées. ▪

Simulation du décollage vertical d'un avion Harrier. Sous l'appareil, on distingue les jets de propulsion. En perdant de leur température, les flux d'air passent d'une température très chaude, représentée en rouge, à moins chaude, passant du bleue au mauve.

L'IA A-T-ELLE LA SOLUTION ?

Breaking news : le problème du millénaire évoqué dans ces pages vient peut-être de tomber. Le 8 septembre dernier, OpenAI a annoncé qu'un système d'intelligence artificielle avait établi qu'une solution de Navier-Stokes peut devenir singulière en temps fini. Dans le cas étudié, un fluide incompressible au repos, soumis à une force extérieure régulière, développe un tourbillon qui se resserre et accélère jusqu'à faire apparaître, dans les équations, une vitesse carrément sans limite. Ce n'est pas un phénomène physique réel ; mais cette vitesse infinie signale que le modèle de Navier-Stokes cesse alors de décrire correctement le fluide réel. Pour arriver à un tel résultat, la société aurait mobilisé un modèle d'IA non public, *"plus performant que GPT-6 Astra"*, et quelque 10 000 agents pendant 88 heures. Cette piste s'inscrit dans des travaux humains récents : Levent Alpöge, chercheur chez Anthropic, et Tristan Buckmaster, mathématicien à l'université de New York, exploraient une stratégie voisine. La preuve, formalisée en Lean, doit encore être examinée par la communauté mathématique.

MERCI LES AMATEURS !

En mathématique, les découvertes sont réalisées par des experts, mais aussi par des néophytes. Démonstration.

PAR SANDRINE MARY

Le problème de la mitre de Sam Loyd, vous connaissez ? Il consiste à découper une forme de mitre en un minimum de pièces pour reconstituer un carré. Lorsque Vesa Timonen, concepteur finlandais de casse-tête, décide de s'attaquer au problème, c'est dans l'idée… d'imaginer de nouveaux puzzles. *"Je savais que, depuis 1911, la solution du meilleur découpage s'arrêtait à cinq pièces,* explique-t-il. *J'ai alors développé un logiciel pour trouver d'autres découpages à cinq pièces. Le programme tournait en continu. Après trois semaines, j'avais déjà 186 solutions inédites. L'une d'elles a retenu mon attention…"* Vesa s'aperçoit qu'en fusionnant deux morceaux, il parvient à reconstituer un carré parfait en seulement quatre pièces. *"Je n'y ai pas cru tout de suite, j'ai pensé que mon logiciel faisait une erreur ! Alors j'ai tout envoyé à un ami qui l'a prouvé mathématiquement."* Vesa vient de repousser les limites d'un problème mathématique mondialement connu !

Les découvertes fortuites réalisées par des non-mathématiciens sont généralement motivées par la curiosité. Mais pour deux lycéennes américaines, Ne'Kiya Jackson et Calcea Johnson, c'est surtout la récompense de 500 dollars offerte par leur école pour le premier prix d'un concours de maths qui leur a fait relever un défi : démontrer le théorème de Pythagore ("*le carré de l'hypoténuse est*



Le problème de la mitre de San Loyd consiste à reconstituer un carré *(à gauche)* en un minimum de pièces découpées dans une mitre *(à droite)*. Ici, la solution en 4 pièces seulement *(orange, blanche, noire et beige)*.



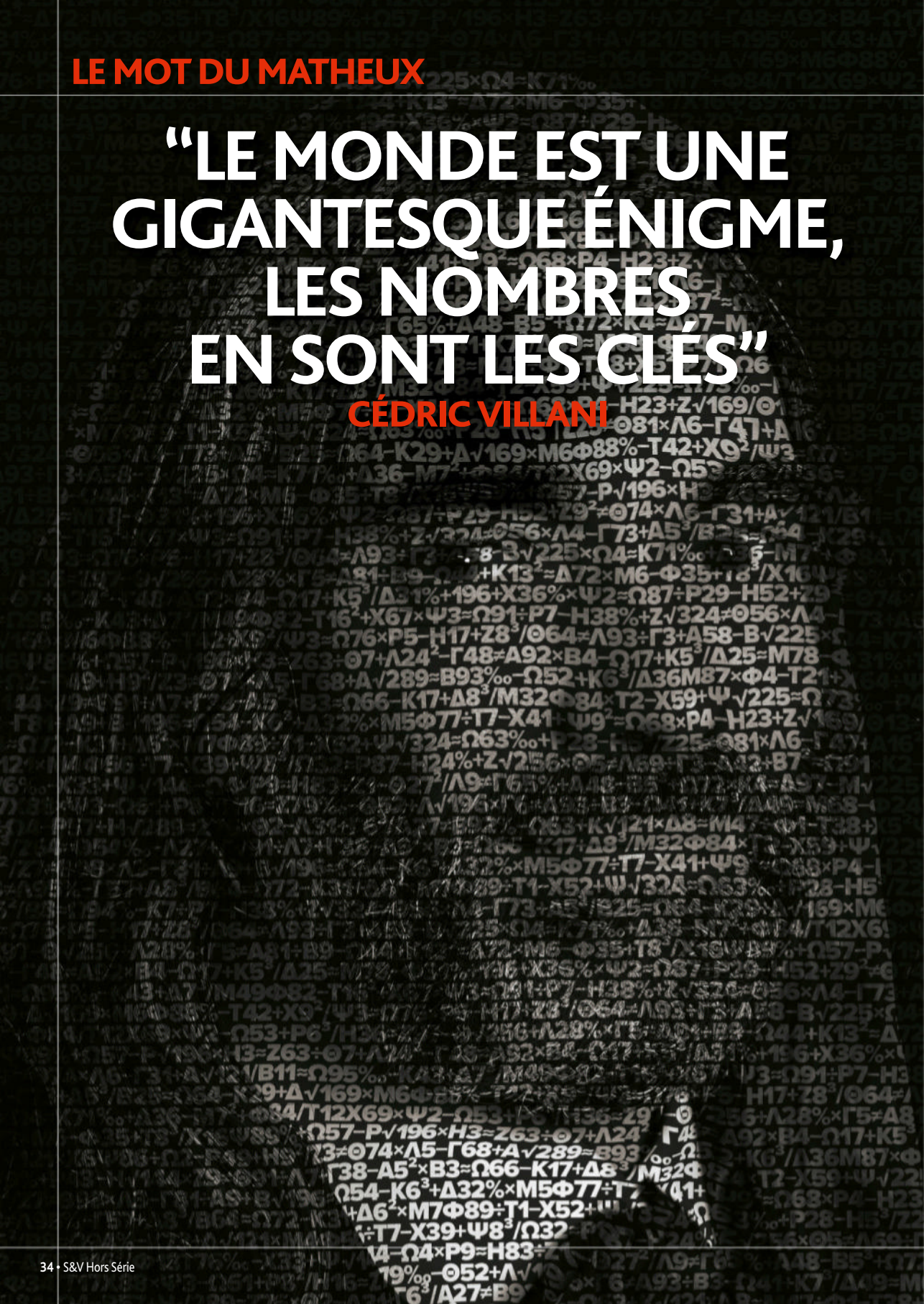
À gauche, l'énigme du canapé de Gerber: quelle forme optimale *(en orange et beige, ci-contre)* celui-ci doit-il avoir pour "passer" dans un couloir à angle droit *(en blanc)*?

égal à la somme des carrés des deux autres côtés") à l'aide de la trigonométrie. Mission a priori impossible, parce que relevant du "raisonnement circulaire" : l'identité trigonométrique fondamentale ($\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1$) reposant sur le théorème de Pythagore, on ne saurait l'invoquer pour démontrer ce même théorème. Pour contourner cet obstacle, les deux jeunes filles ont eu l'idée de remplir un triangle rectangle d'une infinité de triangles semblables de plus en plus petits. Et invoqué la loi des sinus pour démontrer l'égalité de Pythagore. Inédit et imparable !

Jineon Baek, jeune mathématicien coréen au Korean Institute for Advanced Study (KIAS), rêvait de résoudre "*un grand problème*". Il s'est donc attaqué à la célèbre énigme du canapé de Gerver. L'objectif est de trouver la forme optimale d'un canapé pour le déplacer dans un couloir en angle droit. En 1992, le mathématicien Joseph Gerver propose un canapé composé d'un assemblage de 18 sections de courbes. Par calcul, il obtient une surface maximale de 2,2195 unités [*une unité représentant la largeur du couloir,* NDLR] au-delà de laquelle le canapé ne passe plus. Problème : personne n'arrive à démontrer que cette surface est vraiment optimale. "*Après trois ans de recherches infructueuses,* raconte le jeune Coréen, *j'ai pris le problème différemment : j'ai imaginé une formule unique applicable à n'importe quelle forme de canapé. C'est sous ma douche, un matin, que j'ai eu l'idée de légèrement surestimer la surface optimale via cette équation et de démontrer qu'elle était convexe. J'ai ainsi retrouvé la valeur annoncée par Joseph Gerver.*" L'article est encore en relecture par les pairs, mais le parcours de Jineon Baek, comme ceux de Vesa Timonen, Ne'Kiya Jackson et Calcea Johnson, prouve une chose : en mathématiques, prendre des chemins détournés peut ouvrir la voie à de géniales trouvailles. ▪

“LE MONDE EST UNE GIGANTESQUE ÉNIGME, LES NOMBRES EN SONT LES CLÉS”

CÉDRIC VILLANI



Les mathématiques ne servent pas seulement à construire des ponts ou à faire tourner nos ordinateurs. Pour le mathématicien Cédric Villani, elles invitent à regarder le monde autrement.

PROPOS RECUEILLIS PAR ADRIEN DENÈLE

SVHS : *Vous dites souvent que* "les mathématiques doivent nous apprendre à rêver". *De quel rêve parlez-vous ?*

Cédric Villani : Les mathématiques permettent de voir des liens invisibles, des relations insoupçonnées entre des concepts qui semblaient sans rapport. Prenez le théorème central limite : il montre que les fluctuations de phénomènes aléatoires suivent toutes une même courbe en cloche, la courbe de Gauss. Cette loi apparaît aussi bien dans les statistiques que dans la théorie des gaz ou la thermodynamique. Les mathématiques tissent ainsi des liens invisibles à travers le temps, les disciplines et les objets.

SVHS : *Qu'est-ce qui fait la beauté des mathématiques ?*

C. V. : La beauté naît justement de ces liens. Regardez l'identité d'Euler, souvent considérée comme la plus belle des mathématiques : $e^{i\pi} + 1 = 0$. En une seule ligne, elle réunit cinq nombres remarquables découverts à des époques différentes. Dans l'ordre : le chiffre 1, puis pi, puis 0, puis l'exponentielle, et enfin "i" le nombre imaginaire *[nombre dont le carré est négatif ou nul, NDLR]*. Cette formule relie l'algèbre, la géométrie et l'analyse. Elle tisse une véritable toile d'araignée entre des concepts très éloignés, dans l'histoire humaine aussi bien que dans ses disciplines. J'aime voir le monde comme une gigantesque énigme dont les nombres sont les clés. Depuis Pythagore, les mathématiciens découvrent peu à peu des indices qui permettent de relier les pièces du puzzle.

SVHS : *A-t-on encore beaucoup de choses à découvrir en mathématiques ?*

C. V. : Énormément. On ne découvre un nouveau territoire qu'en arrivant à sa frontière ; avant cela, on ne peut même pas imaginer ce qui se cache derrière. La plus grande *terra incognita* est donc celle dont nous ignorons encore l'existence. Bien sûr, il existe des problèmes célèbres comme l'hypothèse de Riemann. Mais le paysage mathématique est immense. Chaque année, des centaines de milliers de théorèmes sont démontrés et, comme dans toutes les sciences, chaque découverte fait naître de nouvelles questions. Nous sommes très loin d'avoir fait le tour du sujet.

SVHS : *Les mathématiques sont souvent justifiées par leurs applications. Est-ce là leur véritable intérêt ?*

C. V. : Leur force est justement qu'elles finissent souvent par trouver des applications là où personne ne les attendait. Les nombres complexes, par exemple, ont été introduits au XVIe siècle comme un simple outil de calcul pour résoudre certaines équations. On a ensuite découvert qu'ils étaient indispensables pour comprendre l'électromagnétisme, traiter les signaux ou démontrer de très nombreux résultats. Les mathématiques ne sont donc pas seulement utiles parce qu'elles permettent de construire des technologies. Elles le sont aussi parce qu'elles révèlent des relations profondes entre les phénomènes.

SVHS : *Quel message aimeriez-vous transmettre aux jeunes qui découvrent les mathématiques ?*

C.V. : Le plus important est d'apprendre à chercher. Lorsque j'étais étudiant, il pouvait m'arriver de passer des semaines, parfois des mois, sur un même problème. Il n'y avait pas d'internet ni d'intelligence artificielle pour donner immédiatement la solution. C'était une chance. Le plaisir ne vient pas seulement du résultat final. Il vient de la construction de la preuve, de cette manière d'empiler les arguments jusqu'à faire apparaître une idée claire. C'est un art qui s'est développé au fil des siècles et qui reste aujourd'hui, plus que jamais, le véritable cœur des mathématiques. ▪

© ANDBZ/ABACA

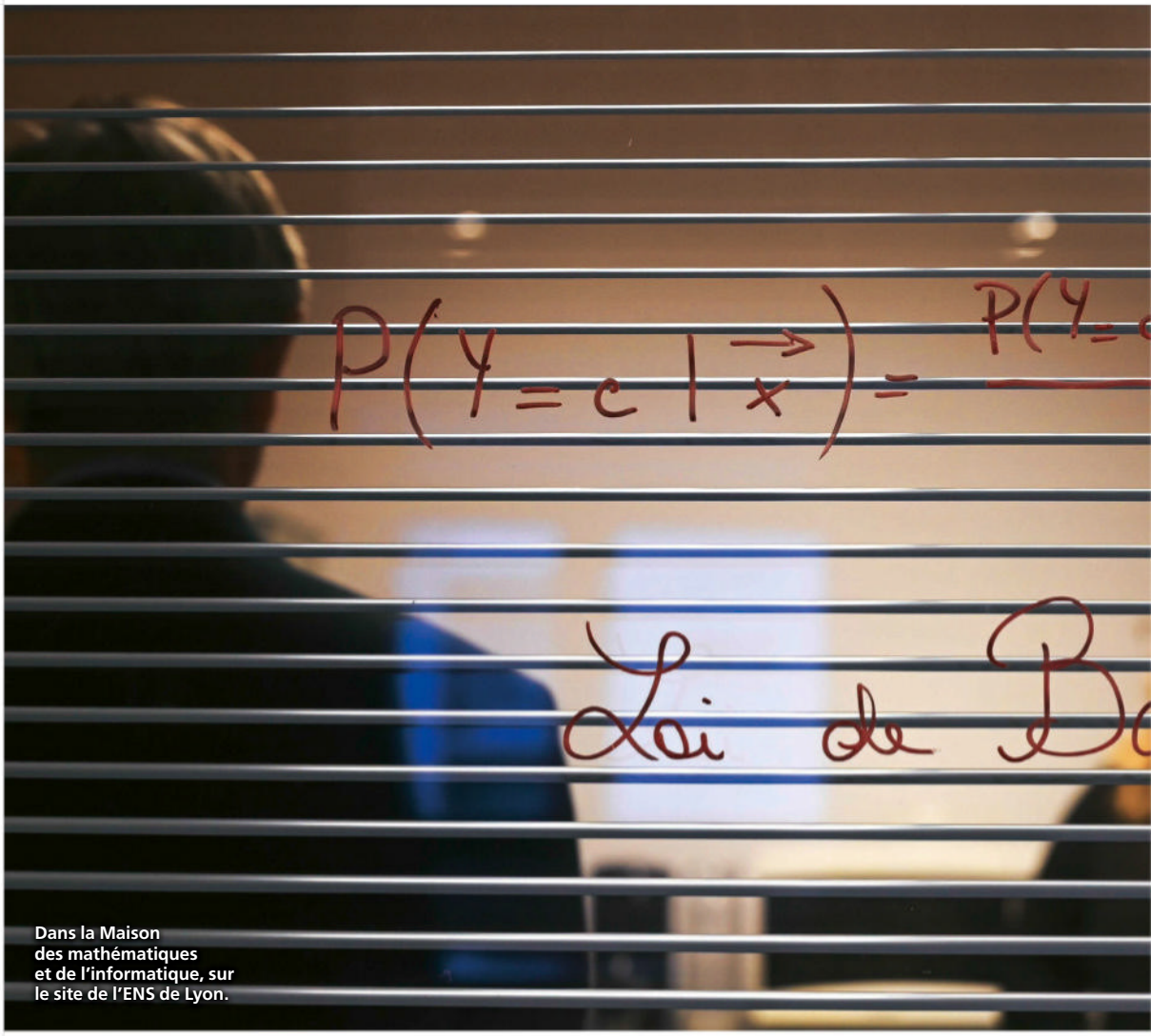
ENSEIGNER



© JEREMIE SOUTEYRAT



À l'Institut de recherche sur les primates de l'université de Kyoto, au Japon, Ai, femelle chimpanzé, effectue un calcul à l'aide de cubes en bois sous la direction du chercheur Tetsuro Matsuzawa. Ai, dont l'intelligence a frappé le monde scientifique, est morte en janvier dernier à l'âge de 49 ans.



Dans la Maison des mathématiques et de l'informatique, sur le site de l'ENS de Lyon.

© STEPHANE AUDRAS/REA

"Nous, les héritiers de Descartes"



La recherche française en mathématiques est auréolée de 15 médailles Fields, la plus haute récompense de la discipline. Merci qui ? Réponse avec l'historien des sciences Martin Andler*.

PROPOS RECUEILLIS PAR RIVA BRINET-SPIESSER

SVHS : La France est-elle une nation de grands mathématiciens ?

Martin Andler : La réponse est oui, et depuis un certain temps. Nous sommes les héritiers de Descartes, qui a privilégié l'approche déductive en sciences. Nous devons beaucoup au prestige de l'École polytechnique, fondée pendant la Révolution, qui a formé tous nos mathématiciens jusqu'à la fin du XIXe siècle et qui a mis les mathématiques au cœur de la formation de nos ingénieurs. Avec la IIIe République, l'École normale supérieure (ENS) prend le relais et devient le haut lieu de formation de l'élite mathématicienne qu'elle est encore aujourd'hui. Les fondateurs du mouvement Bourbaki en 1935, fer de lance des mathématiques françaises après la Seconde Guerre mondiale, en sont issus. Suivront de grands noms : Henri Cartan, l'un d'entre eux, forme des générations de mathématiciens, dont Jean-Pierre Serre, qui reçoit la médaille en 1954, à 28 ans, et qui, à plus de 100 ans, est encore actif dans sa discipline. Depuis les années 1990, nous vivons un âge d'or avec huit médaillés formés en France, tous normaliens, auxquels il faut ajouter la polytechnicienne chinoise Hong Wang, professeure à l'IHES Paris-Saclay, qui a reçu la médaille Fields en juillet 2026.

SVHS : La médaille Fields est-elle un bon indicateur du dynamisme de la recherche française ?

M. A. : En partie oui, quinze médaillés sur un total de soixante-huit, c'est impressionnant. Mais pour moi, il y a un autre indicateur qui permet de faire des statistiques plus solides : celui des deux cents mathématiciens invités à donner des conférences au Congrès international des mathématiciens, qui se tient tous les quatre ans. En 2014, trente-deux mathématiciens ayant fait toutes leurs études en France sont intervenus. Côté américain, ils étaient vingt-huit alors que les États-Unis sont cinq fois plus peuplés que la France. Indéniablement, notre système scolaire et universitaire forme des mathématiciens de premier plan. Mais si l'on regarde où ces chercheurs travaillaient, alors les États-Unis étaient très loin devant. Clairement, les universités américaines offrent de meilleurs salaires et conditions de travail.

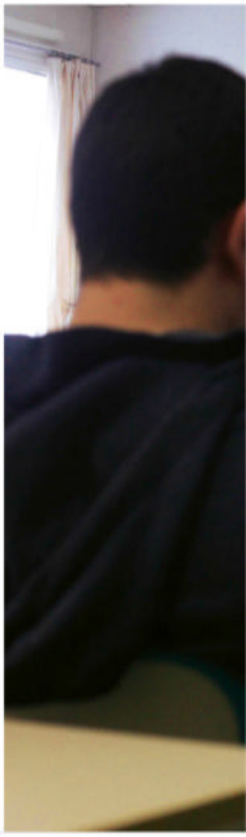


SVHS : ***Comment la France arrive-t-elle à former de tels cerveaux ?***

M. A. : Différents facteurs entrent en compte. D'abord, nous avons ce système des classes préparatoires scientifiques où les mathématiques sont la clé de la réussite. Celles que l'on y apprend ne sont pas d'un niveau particulièrement élevé, mais les problèmes à résoudre sont très durs, et les jeunes Français sortent des classes prépas avec une grande rigueur théorique et une habileté dans la résolution de problèmes. Le système de concours, avec des épreuves difficiles en un temps limité, permet d'identifier les jeunes talents. Les plus brillants d'entre eux iront à l'École normale supérieure ou à Polytechnique. Ceux qui souhaitent faire des maths suivront les cours de chercheurs de haut rang, puis seront mis en contact avec les meilleurs spécialistes de leur domaine. C'est cette rencontre entre de jeunes esprits ambitieux et les meilleurs scientifiques qui forme le terreau de l'excellence française. Une relation de maître à élève qui produit des générations de mathématiciens : Cédric Villani a fait sa thèse avec Pierre Louis-Lions, lui-même médaillé Fields et professeur au Collège de France. Wendelin Werner (médaille Fields 2006) avec Jean-François Le Gall, l'un des meilleurs probabilistes au monde dans son domaine, Laurent Lafforgue et Ngô Bao Châu (médaille Fields 2002 et 2010) avec le très renommé géomètre Gérard Laumon. Enfin, d'après le travail du sociologue Pierre-Michel Menger, les communautés académiques de professeurs et chercheurs en mathématiques fonctionnent de manière différente des autres disciplines. Les carrières sont plus rapides : on décroche un poste au CNRS ou à l'université rapidement après le doctorat. La mobilité est forte : un chercheur obtient son premier poste dans une institution différente de celle où il a fait sa thèse ; et l'on ne devient pas professeur dans la même université que celle où l'on a été maître de conférences. Cela crée un brassage extrêmement fertile.

SVHS : ***Tout ceci semble parfaitement huilé…***

M.A. : À une exception près, ce système ne fonctionne pas pour les femmes. Pour elles, la situation est catastrophique, voire scandaleuse. Cette année, seules



© BRIDGEMAN IMAGES - MARTIN/ANDIA.FR

trois femmes sur trente-huit figurent sur la liste principale du concours de l'ENS en mathématiques. Et ce n'est pas un accident, c'est comme ça tous les ans depuis 1986, année où l'on a fusionné l'École normale supérieure de jeunes filles avec l'École normale réservée aux garçons. Du jour au lendemain, on est passé de 40 % à moins de 10 % de femmes. Attention, les jeunes filles ne sont pas moins bonnes en maths ; elles rencontrent des difficultés d'ordre psychosocial : l'ambiance en classes préparatoires est très dure, mais elle l'est encore plus pour les filles, minoritaires. Elles se retrouvent en difficulté dans un système très compétitif et peuvent être confrontées à des agressions sexistes, allant de remarques "innocentes" jusqu'à des tentatives de viol.

SVHS : Demain, les mathématiques françaises brilleront-elles encore ?

M.A. : Nous devons être prudents, car le modèle français a plusieurs éléments de fragilité. Tout d'abord, l'écart s'est creusé entre le niveau d'enseignement dans les meilleurs lycées et dans les autres. Résultat : notre modèle de sélection laisse sur le bas-côté toute une série de jeunes à haut potentiel ; les filles, on l'a vu ; et ceux qui n'ont pas les codes des "bonnes familles", pour qui il est de tradition d'envoyer leurs fils en classe préparatoire. Ensuite, il y a la question du financement de la recherche. Vu la réputation de l'école française en mathématiques, les jeunes chercheurs n'ont aucune difficulté à être recrutés aux États-Unis, en Chine ou en Suisse, où les salaires sont nettement plus confortables… et où les entreprises de la tech ou de la finance ne lésinent pas sur les moyens pour les attirer. ▪

** Martin Andler est professeur émérite à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et historien des sciences contemporaines. Il est aussi président d'honneur de l'association Animath, qui favorise la pratique des mathématiques chez les jeunes.*

À gauche, en 1935, une réunion du mouvement Bourbaki à Besse, dans le Puy-de-Dôme. Ces mathématiciens, dont Henri Cartan *(en haut à gauche)*, seront à la pointe de la recherche après la guerre. Ci-dessous, cours de maths au lycée Jean-Luçat de Martigues, dans les Bouches-du-Rhône.



MATHEUSES MALGRÉ TOUT

Sous-représentées dans la recherche fondamentale, les femmes ont pourtant leur chiffre à dire en mathématiques. La preuve par trois. PAR RIVA BRINET-SPIESSER

Sophie Germain
1776-1831

Nous fêtons le 250e anniversaire de sa naissance, et la mairie de Paris vient d'annoncer que son nom sera gravé au premier étage de la tour Eiffel aux côtés de ceux de 71 femmes scientifiques. Sacrée revanche pour cette femme peu considérée à une époque où la science était réservée aux hommes. Ne pouvant avoir accès à l'École polytechnique, Sophie Germain se forme seule. Son audace la sauvera. Pour pouvoir correspondre avec les plus grands mathématiciens, de Joseph-Louis Lagrange à Carl Friedrich Gauss, elle s'invente un pseudonyme masculin et se fait passer pour "Antoine Auguste Le Blanc". Un stratagème payant qui l'amène à proposer de nouveaux outils pour démontrer des théorèmes, dont celui de Fermat. Mais ses travaux ne sont pas publiés de son vivant et la mathématicienne tombe dans l'oubli. Aujourd'hui, Sophie Germain est devenue le symbole du combat des femmes scientifiques pour obtenir davantage de reconnaissance.



© SP - IMAGE MODIFIÉE PAR IAL



Emmy Noether *1882-1935*

Au début du XXe siècle, se faire un nom dans la société scientifique lorsqu'on est une femme est un parcours semé d'embûches. Emmy Noether, jeune mathématicienne allemande, en fait les frais. Sur les bancs de l'université d'Erlangen, en Bavière, elle doit demander la permission des professeurs pour pouvoir accéder à leurs cours. Une fois doctorante, elle obtient le droit d'enseigner… mais bénévolement. Et jamais on ne lui accorde le titre de professeur : elle reste à vie *"Privatdozent"*, maître de conférences. Mais son abnégation paie. Elle tisse des relations avec deux mathématiciens de renom, David Hilbert et Felix Klein, et publie surtout deux articles qui l'intronisent parmi les grands. En 1918, "Problèmes variationnels invariants", qui est aujourd'hui considéré comme l'un des grands jalons du développement de la physique théorique. Mais ce sont ses recherches en algèbre abstraite qui la rendent célèbre de son vivant. En 1921, "Théorie des idéaux dans les anneaux" exhibe une classe particulière d'objets qui porteront son nom, les "anneaux noethériens". Albert Einstein écrira : *"Fräulein Noether était le génie mathématique créatif le plus considérable produit depuis que les femmes ont eu accès aux études supérieures jusqu'à aujourd'hui."*

Maryam Mirzakhani *1977-2017*

"La première femme, enfin !" **Voici le cri que pousse Michèle Artigue, professeur émérite à l'université Paris-Diderot, lorsque Maryam Mirzakhani devient, en 2014, la première femme à décrocher la médaille Fields.** Et ce alors qu'elle avait remporté, à peine majeure, les fameuses Olympiades internationales de mathématiques deux années de suite ! Cette jeune femme iranienne a un destin hors norme. Son parcours universitaire est brillant. Elle se forme dans l'une des meilleures universités de Téhéran, passe sa thèse – reconnue comme un "chef-d'œuvre" – à Harvard, puis est nommée professeure à Stanford à 31 ans. Autre curiosité dans sa vie : son domaine de prédilection. Sa passion pour la géométrie des formes complexes (comme les surfaces de Riemann) lui fait découvrir de nouvelles façons de calculer les volumes d'objets avec des surfaces hyperboliques, comme une "selle de cheval" dont la courbure est négative. *"Plus je passais de temps à faire des maths, plus j'étais heureuse"*, confie-t-elle la veille de sa mort – Maryam Mirzakhani meurt à 40 ans des suites d'un cancer.



© GL ARCHIVE/ALAMY/HEMIS.FR - STANFORD UNIVERSITY/SIPA - IMAGE MODIFIÉE PAR IAL



Dans cette classe de l'école élémentaire Benjamin-Franklin, à New York, c'est l'heure des maths.

"En finir avec les génies solitaires et masculins"

© CHRISTOPHER CAPOZZIELLO/THE NEW YORK TIMES/REA



La France est l'un des pays où les écarts entre élèves de milieux favorisés et défavorisés sont les plus marqués. Même chose entre garçons et filles. Comment réduire ces inégalités ? La sociologue Clémence Perronnet * et le mathématicien Hugo Duminil-Copin ** répondent. PAR HUGO LEROUX

SVHS : Le classement international Pisa 2025 confirme la dégringolade du niveau des élèves français en mathématiques : 36 % sont désormais en difficulté, contre 5 % jugés très performants. Que vous inspire ce constat ?

Hugo Duminil-Copin : Si la baisse du niveau général est regrettable, les meilleurs élèves continueront probablement à avoir accès à des cursus d'excellence. Le creusement des écarts de performance me préoccupe davantage, parce que les maths sont utilisées au quotidien, et que tout un chacun a besoin d'une compétence minimale.

Clémence Perronnet : Sur les inégalités mesurées, il y a un phénomène réel, mais aussi un effet propre aux modes d'évaluation choisis. En multipliant les tests, on multiplie en effet les situations anxiogènes… dont il est prouvé qu'elles pénalisent particulièrement les filles et les élèves de milieux populaires, via certaines modalités comme le temps limité, ou l'enjeu fort.

SVHS : Comment se construisent les stéréotypes et le sentiment d'être "nul en maths" ?

C. P. : Les écarts se mesurent dès le CP. Les filles comme les enfants de milieux populaires intériorisent très tôt que leur "esprit" ne correspond pas à ce qu'on imagine d'une personne bonne en maths : les premières parce que la société véhicule plutôt l'image d'hommes forts en maths, les seconds parce qu'ils ne s'identifient pas aux figures de "génies masculins" qu'on leur présente. Puis arrivent les évaluations, qui renforcent ces écarts : quand un individu a intégré l'idée qu'il n'est pas "doué", il sous-performe davantage.

H. D.-C. : On doit déconstruire deux idées : que les maths seraient une affaire de logique pure et qu'il existerait une "bosse des maths". Rien ne prouve l'existence d'un cerveau naturellement mathématique. Les différences viennent de la pratique régulière, comme en sport. Réduire les maths à la seule logique tétanise les élèves, alors qu'en réalité la pensée mathématique mobilise tout autant l'analogie et l'imagination.

SVHS : La baisse de niveau ne relève-t-elle pas aussi du système éducatif ?

H. D.-C. : Il semble en effet qu'il y ait des causes

> *On doit déconstruire deux idées : que les maths seraient une affaire de logique pure et qu'il existerait une bosse des maths*

structurelles – formation continue insuffisante, classes trop chargées, programmes trop lourds. Ce dernier point m'interpelle particulièrement : les maths relèvent davantage de compétences clés que d'une accumulation de connaissances ; or les enseignants "courent contre la montre" face à des programmes qui abordent trop de choses, pas toujours essentielles. Cela empêche une appropriation profonde.

C. P. : De mon côté, je vois surtout un problème de conditions d'enseignement, à commencer par des effectifs trop importants. Les réformes à répétition ces dernières années ont aussi eu tendance à déstabiliser les enseignants…

SVHS : Comment redonner une meilleure image des maths et susciter l'envie ?

C. P. : L'imaginaire compte énormément. Il faut sortir des récits qui font des maths un domaine de génies solitaires et masculins. Diversifier les figures, les histoires. Et freiner les représentations sociales des maths comme étant liées à l'intelligence. Reconnaître aussi que les maths ne sont pas socialement neutres : la manière dont on formule un problème peut inclure ou exclure. Par exemple, certains problèmes de géométrie sont présentés comme des situations où l'on déménage un piano dont on doit implicitement comprendre qu'il est triangulaire… mais pour qui un piano est-il triangulaire ?

H. D.-C. : Il faut valoriser le fait que toute résolution de problème commence par un acte de recherche quasiment créatif, même à l'école. Se souvenir aussi que les maths sont une aventure intellectuelle, pas un concours de vitesse. Cela veut dire prendre le temps de la répétition. Pour l'application d'une même idée mathématique, il faut présenter aux élèves des

Un étudiant et une étudiante révisent de concert dans l'espace de travail ouvert de l'école CentraleSupélec qui forme des ingénieurs.



situations variées, en allant des plus simples à celles qui bousculent l'intuition.

SVHS : Quelles solutions voyez-vous pour réduire les inégalités et réconcilier les élèves avec les maths ?

C. P. : Bien qu'on insiste souvent sur le côté capital de la petite enfance, tout ne s'y joue pas. À chaque étape – école, collège, lycée, université – les inégalités opèrent un tri. Je suis d'avis que l'instauration de quotas serait judicieuse pour diversifier les filières scientifiques, tout comme former les enseignants et les jurys à repérer leurs propres biais. On pourrait aussi adapter les évaluations : temps plus long, consignes qui réduisent l'anxiété. Il est prouvé que la seule mention d'une deuxième chance permet aux filles de moins échouer !

H. D.-C. : Du côté de l'école, alléger les programmes, améliorer les conditions de travail et insister sur la lenteur de l'apprentissage seraient déjà des avancées majeures. Les maths ne sont pas plus difficiles qu'un sport : elles demandent répétition, entraînement, droit à l'erreur. Si les élèves le comprennent, les barrières tombent. C'est là que naît la gratification. ▪

** Clémence Perronnet est sociologue à l'agence Phare, coauteure de* Matheuses, les filles, avenir des mathématiques *(CNRS Éditions, 2024) et auteure de* La bosse des maths n'existe pas *(éd. Autrement, 2021).*
*** Hugo Duminil-Copin, médaille Fields 2022, est coauteur de* De l'autre côté du tableau noir. Les mathématiques à visage humain *(éditions du Seuil, 2026).*



© MARTA NASCIMENTO/REA



Préparation au grand oral du bac dans un lycée de Poitiers.

LES PÉPITES DU GRAND ORAL

"Pourquoi ma vie est-elle une suite récurrente ?" ou *"quelle est la probabilité de me tromper en remplissant Parcoursup ?"* Au bac, les élèves rivalisent de fantaisie dans le choix de leur sujet ! PAR SANDRINE MARY

Cette épreuve, intégrée pour la première fois au bac en 2021, évalue les candidats durant vingt minutes sur *"leurs capacités argumentatives et leurs qualités oratoires"*, dixit le Bulletin officiel de l'Éducation nationale. Mais comment transformer une matière principalement écrite, les mathématiques, en un oral à la fois captivant et qui démontre la maîtrise du programme ? *"La difficulté"*, explique Fabien Vinsu*, professeur de mathématiques au lycée Victor-Hugo à Besançon, *"c'est de trouver un sujet captivant qui mobilise des notions du programme, en apportant une touche d'originalité. Par exemple, un élève passionné par le transport aérien s'est intéressé au surbooking en appliquant la loi binomiale pour savoir comme un modèle probabiliste permet d'optimiser la stratégie commerciale d'une compagnie aérienne sur les vols."*

Gil Arthaud, professeur au lycée Adam-de-Craponne à Salon-de-Provence, se souvient surtout de sujets qui impliquent directement la vie des élèves ou leur passion. *"Un élève a proposé 'Comment les mathématiques permettent-elles d'estimer la production de fromage d'un troupeau en estive ?' J'ai alors compris qu'il s'occupait d'un troupeau de chèvres durant l'été. Une autre élève, qui veut devenir avocate, a choisi un procès, l'affaire Castenada contre Partida, qui a eu lieu aux États-Unis. Rodrigo Partida avait été condamné à travers le verdict d'un jury d'accusation. Les mathématiques ont démontré que le jury n'était pas représentatif de la population locale et Rodrigo Partida a pu ainsi faire annuler sa condamnation."*

La grille d'évaluation de l'épreuve est basée sur la capacité à retranscrire une connaissance, mais la prise de parole et sa fluidité sont essentielles. *"C'est un exercice qui n'est pas toujours évident"*, explique Frédéric Baudart, auteur de l'article *Monde de l'oral et monde de l'écrit en mathématiques*. *"C'est un peu comme les concours pour résumer une thèse en 180 secondes, il faut savoir de quoi on parle pour ne pas se réfugier derrière les symboles mathématiques, et rendre les choses compréhensibles. Finalement, la compréhension d'une matière passe par l'oralité ; retranscrire avec des mots simples et efficaces, c'est démontrer sa maîtrise du sujet."*

"Il y a aussi les élèves qui parviennent à nous intéresser par leur façon d'aborder un sujet, explique Fabien Vinsu. *Un élève a proposé : 'Comment des modèles mathématiques permettent-ils de déterminer l'instant idéal pour boire son expresso ?' Il a traité le problème en mathématiques discrètes à l'aide d'une suite, et en mathématiques continues à l'aide d'une fonction. Résultat, il a eu 20."*

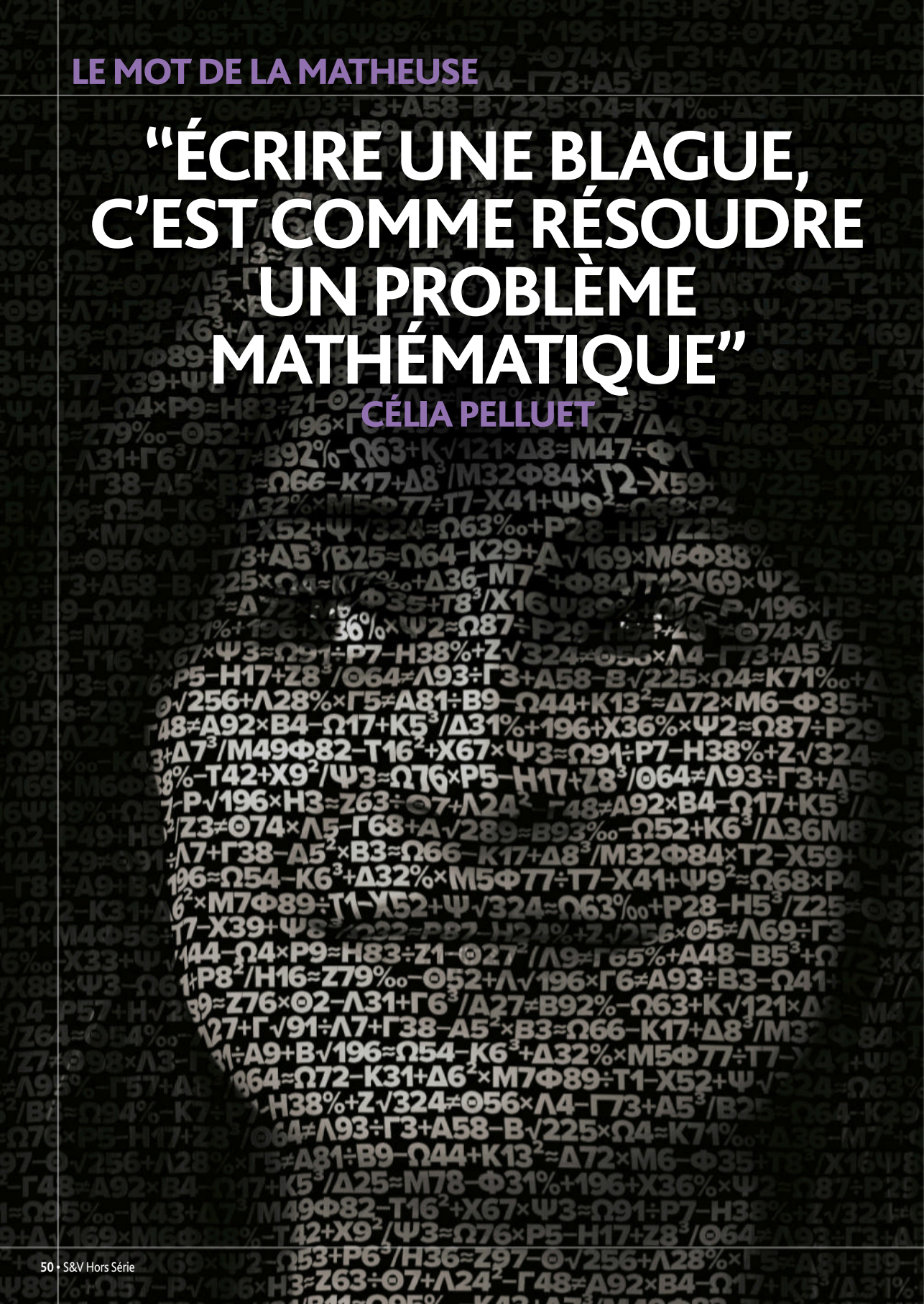
Au passage, cet oral peut également apprendre à l'élève une ou deux choses… sur lui-même. *"Une élève qui pratiquait la danse classique ne progressait plus depuis deux ans*, raconte Gil Arthaud. *Elle a cherché mathématiquement pourquoi. En s'appuyant sur une équation différentielle du type $y' = ay+b$, qui modélise les progrès d'un sportif, elle a pu comprendre que sa stagnation n'était pas un signe d'incompétence, mais qu'elle est mathématiquement inévitable dès que l'on s'approche de son niveau de performance maximum. La vitesse de progrès tend alors vers zéro et les progrès deviennent invisibles même en travaillant tout autant."* En résumé : "sujet tiré du quotidien" que multiplie "jury surpris" égale "carton au grand oral de maths". CQFD ! ■

** Fabien Vinsu est l'auteur de* Spécialité mathématiques, *aux éditions Ellipses*

© MATHIEU HERDUIN/LA NOUVELLE RÉPUBLIQUE/MAXPPP

“ÉCRIRE UNE BLAGUE, C’EST COMME RÉSOUDRE UN PROBLÈME MATHÉMATIQUE”

CÉLIA PELLUET



Docteure en technologies quantiques et ingénieure au Centre national d'études spatiales, Célia Pelluet est également en tournée avec son spectacle *Les particules hésitent aussi.* PROPOS RECUEILLIS PAR HÉLOÏSE RAMBERT

SVHS : ***Physicienne quantique et en même temps humoriste, ce n'est pas banal…***

Célia Pelluet : La scène a toujours été présente dans ma vie. J'ai toujours fait de la musique. Même en classe préparatoire, j'étais dans un groupe. De même, je n'ai jamais arrêté de lire pendant mes études. Quitte à me sentir un peu comme une alien : dans nos filières, on est d'abord encouragés à être "monomaniaque" et à consacrer tout notre temps à notre discipline. Cultiver plusieurs intérêts intellectuels n'est pas valorisé. Souvent, dans la pop culture, on est représenté comme des personnes obsédées qui n'ont rien d'autre dans leur vie. Mais je pense qu'il y a plusieurs façons d'être un "matheux" ou une "matheuse". On peut être passionné de mathématiques et d'autres choses !

SVHS : ***Comment le spectacle d'humour a-t-il trouvé sa place dans votre vie de scientifique ?***

C. P. : Un peu par hasard. J'ai participé avec un ami à un concours d'humour étudiant, le Campus Comedy Tour, organisé dans notre école d'ingénieurs. On s'est dit qu'on proposerait une chanson un peu rigolote. Ce passage sur scène, puis la finale organisée à La Cigale à Paris ont été une révélation. Entendre des gens rire à des blagues qu'on avait écrites la veille, c'est une sensation géniale. Un rêve. Je suis ensuite restée en contact avec des humoristes qui m'ont encouragée à me lancer. Après avoir expérimenté la scène pendant plusieurs années, j'ai écrit mon premier seule en scène. Je l'ai pensé un peu comme ma soutenance de thèse. À la fin du spectacle, normalement, on doit comprendre mon sujet… si j'ai réussi mon pari ! Je parle aussi beaucoup de la place des femmes dans la science, un sujet qui me tient particulièrement à cœur.

SVHS : ***Les démarches intellectuelles de vos deux activités présentent-elles des points communs, selon vous ?***

C. P. : Oui, même si je n'en ai pas eu conscience tout de suite. Il y a des réflexions logiques à faire dans les deux cas. Écrire une blague, c'est un peu une résolution de problème. En mathématiques ou en physique, quand on veut expliquer un phénomène que notre cerveau a du mal à imaginer, on fait des modèles. On va faire un dessin ou une analogie, simplifier le système en enlevant des paramètres pour le rendre plus facile à étudier. Et quand on veut expliquer une anecdote, une émotion ou un concept en stand-up, on fait cela aussi : tirer le fil, imaginer jusqu'où va l'absurdité de tel ou tel concept. On fait de la caricature. Finalement, quand on écrit pour faire rire, on construit aussi une sorte de modèle. Et au-delà de leurs similarités, mes deux activités me nourrissent de leurs différences. Dans ma pratique de la science, je suis moins créative que sur scène. En tant qu'ingénieure, j'accompagne plutôt la créativité des chercheurs et chercheuses vers des technologies robustes. Il y a un aspect très concret et terre à terre (ce qui est assez ironique). Le stand-up assouvit mon besoin de créativité. Et surtout, dans le domaine spatial, les projets peuvent être longs à voir le jour ! Dans le spectacle vivant, il y a une vraie instantanéité, un lien immédiat avec le public. J'ai vraiment besoin de cet équilibre entre les deux temporalités. ▪

> *« Quand j'ai écrit mon premier seule en scène, je l'ai pensé comme ma soutenance de thèse »*

© AYOUB BENKARROUM

MODÉLISER



Parmi les nombreuses applications de la mécanique des fluides: la modélisation du trafic automobile dans les mégapoles, comme ici sur un échangeur routier géant, afin d'éviter au maximum accrochages et embouteillages.



© GETTY

Des maths pour traquer le crime ?



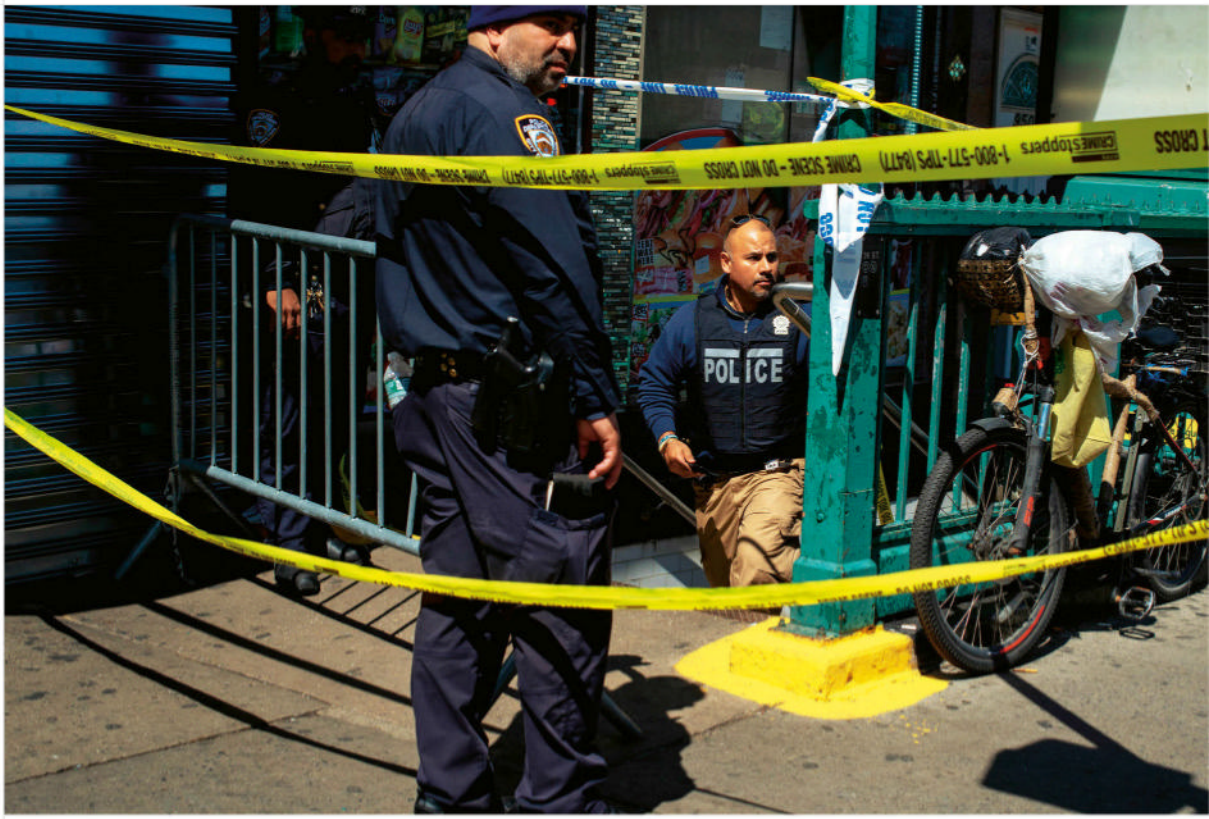
Derrière les enquêtes criminelles se cachent aussi des algorithmes. Objectif : modéliser les actions des délinquants pour anticiper passages à l'acte et zones dangereuses. Non sans risque d'erreurs. PAR NATACHA SCHEIDHAUER

Un algorithme inventé par un sismologue a inspiré de nombreux logiciels de police prédictive. David Marsan, expert en répliques des séismes et professeur à l'université Savoie Mont Blanc, cherchait à déterminer les liens directs ou indirects entre celles-ci. *"Quelle que soit leur magnitude, les séismes peuvent en déclencher d'autres,* explique le chercheur. *Ils provoquent des répliques, qui déclenchent leurs propres séquences locales de répliques, entraînant ainsi une cascade de déclenchements qui étend la portée du séisme principal initial."* Analyse spatio-temporelle (où et quand se produisent les séismes), répétition, contagion, propagation (le mécanisme des répliques)… Ces problématiques de la sismologie ne pouvaient qu'intéresser la criminologie, selon une hypothèse classique qui pose que les crimes ne se produisent pas par hasard, qu'ils sont dépendants les uns des autres et qu'ils ont tendance à se répéter.



À Pontoise, dans les locaux du Centre de lutte contre les criminalités numériques, un service de la gendarmerie nationale, les enquêteurs utilisent notamment le logiciel Anacrim, outil regroupant et traitant des milliers de données issues des auditions, des relevés téléphoniques, bancaires, etc.

© AUGUSTIN LE GALL/HAYTHAM/REA



Les algorithmes consacrés à la lutte anticriminelle sont nourris des données recueillies au cours des enquêtes, notamment les relevés de terrain, comme ici après une violente attaque perpétrée à Brooklyn (États-Unis) en 2022.

Pour la police, pouvoir prévoir où va se dérouler le prochain crime répond à une réelle attente : chercher à positionner ses effectifs au bon endroit et au bon moment afin d'optimiser leur action. Utilisatrices d'outils statistiques depuis le XIXe siècle, les forces de l'ordre cherchent à anticiper les phénomènes criminels. L'essor du big data leur offre de nouvelles possibilités et certaines font appel à des start-up dans le domaine du *machine learning* pour développer des logiciels prédictifs. L'idée ? Modéliser la manière dont des événements criminels se concentrent dans le temps et l'espace en cherchant à séparer les événements aléatoires de ceux liés par un phénomène de contagion.

PROCESSUS AUTOEXCITANTS

C'est ainsi que la sismologie a pu inspirer les développeurs, notamment lorsqu'elle utilise les processus autoexcitants de Hawkes qui supposent qu'un événement augmente temporairement la probabilité d'événements ultérieurs. Pour autant, ces logiciels font trop souvent l'impasse sur des différences notables. *"L'activité sismique est un processus naturel sur lequel l'humain n'a pas d'impact,* estime David Marsan. *Or, en matière de crime, il faut intégrer une dimension de non-stationnarité. Par exemple, les mesures prises par les forces de l'ordre peuvent influencer le comportement des cambrioleurs et le faire évoluer dans le temps."* Pire : le paramètre de contagion entre crimes que ces logiciels voudraient croiser avec la concentration des infractions relevées apparaît négligeable. Un test mené par le sismologue sur son algorithme nourri de deux ans de données de la police de Chicago montre que la composante autoexcitée, soit la part attribuée à l'influence d'événements antérieurs, ne représentait au mieux que 1,7 %, pour ces deux années. Une enquête coréalisée aux États-Unis en 2018 par *Wired* et *The Markup* sur la base notamment de la correspondance entre les policiers de Plainfield (New Jersey) et la start-up PredPol, qui commercialisait un

© HILARY SWIFT/THE NEW YORK TIMES/REA



logiciel de police prédictive, a pour sa part montré que sur 23 631 prédictions étudiées, moins de 100 correspondaient à un crime ultérieurement signalé *"dans la bonne catégorie et au bon endroit"*, soit un taux de réussite inférieur à 0,5 %.

Outre leur efficacité non démontrée, les outils de police prédictive ont un autre défaut, et non des moindres : le manque de contrôle sur les données avec lesquelles leurs modèles sont entraînés s'avère source de biais. Ainsi, en 2016, le sociologue Bilel Benbouzid rappelait que l'algorithme de Predpol était nourri de données parcellaires qui ne rendaient pas compte de la réalité des situations. Jugée inefficace, biaisée, peu transparente – comme le regrette la Quadrature du Net, ONG consacrée à la défense des libertés individuelles, dans un rapport daté de 2024 –, la police "prédictive" reste donc très controversée.

POINTS DE VULNÉRABILITÉ

D'autres approches mathématiques sont mises à profit pour aider à lutter contre la criminalité. Ainsi, le théorème de Bayes aide à déterminer une probabilité de culpabilité ; le profilage géographique utilise des modèles de décroissance de distance basés sur la formule du criminologue canadien Kim Rossmo ; la théorie des jeux de Stackelberg cherche à optimiser le placement de contrôles là où un adversaire exploiterait des failles prévisibles… Enfin, l'analyse de réseaux sociaux (SNA pour *Social Network Analysis*) s'appuie sur la théorie des graphes pour identifier les points de vulnérabilité d'un réseau criminel. Ce dernier domaine suscite un intérêt croissant en criminologie. L'approche SNA et les graphes – où un sommet représente un acteur du réseau et une arête une interaction – ne sont pas nouveaux, mais des pistes inédites en raffinent les résultats. Longtemps considérés comme bâtis sur des hiérarchies rigides, les groupes criminels sont désormais appréhendés comme décentralisés et flexibles. Aussi des chercheurs comme Didier Lebert, économiste expert en théorie des graphes et professeur à l'ENSTA, travaillent à identifier *"les membres clés sur lesquels repose vraiment la solidité du réseau et dont la mise hors d'état de nuire est susceptible d'entraîner son démantèlement naturel"*. Des centralités qui ne se confondent pas avec les postes de leaders : l'analyse a pu montrer que, davantage que les chefs, les meilleures cibles seraient *"les individus qui font le lien entre la sphère criminelle et la sphère légale, par exemple des entrepreneurs"*, précise l'économiste.

Depuis les travaux de la sociologue Giulia Berlusconi (2016), le SNA révèle aussi des connexions cachées, un acquis que Didier Lebert cherche à affiner : *"L'idée est de s'inspirer des travaux de Newman sur les marches aléatoires (2005) pour introduire une pondération par intensité des contacts dans une méthode qui ne traitait l'existence d'un lien que de façon binaire."* Prudents sur la portée opérationnelle de leurs résultats, les chercheurs soulignent que les simulations de démantèlement des réseaux sont difficiles à transposer dans la réalité, comme le montre la littérature sur la plateforme CrimRxiv dédiée à la recherche en criminologie. Didier Lebert confirme la nécessité d'approfondir les recherches : *"Une prochaine étape cruciale serait de confronter ces outils à des affaires judiciaires en cours afin d'en vérifier la robustesse."* Mais le renforcement du partage de données entre institutions de recherche et services d'enquête est une démarche encore balbutiante au vu de la sensibilité des données à collecter.

Quelles que soient les méthodes testées, une chose est sûre : si les mathématiques sont les bienvenues pour venir en aide à la lutte contre le crime, il est indispensable que les acteurs qui s'emparent de leurs résultats comprennent ce qu'elles mesurent réellement, avec quelle marge d'erreur, et quelles conséquences leur usage produit sur le terrain. ▪

> *"Une étape cruciale serait de confronter ces outils à des affaires judiciaires en cours afin d'en vérifier la robustesse"*



En janvier 2021, le vélodrome de Saint-Quentin-en-Yvelines est devenu un "vaccinodrome". Les campagnes de vaccination ont été optimisées grâce aux modélisations mathématiques qui ont permis de déterminer les tranches d'âges prioritaires à un moment où les vaccins manquaient.

© MAGALI COHEN/HANS LUCAS

Nos virus en équations



En matière d'épidémiologie, *"il faut nous débarrasser des mathématiciens"*… C'est ce que clamait, dans une tribune au journal *Le Monde* et en pleine émergence de la Covid-19 ou SARS-CoV2, en 2020, Didier Raoult, microbiologiste déjà égaré. La même année, nombre de Français découvraient l'apport potentiel des maths dans la gestion des épidémies. Pressés par les décideurs de la santé publique, des mathématiciens jonglaient avec des fonctions exponentielles, des échelles logarithmiques et des paramètres de toutes sortes pour concevoir en urgence des modèles destinés à scénariser les dynamiques de la propagation du virus. Objectif : aider à contrôler la pandémie. La discipline se retrouvait soudainement sous les feux de la rampe. Elle prenait, dans le même temps, quelques coups de bâton : la plupart des chercheurs et chercheuses avaient pourtant mis en avant la complexité de l'exercice – entre paramètres capricieux et données parcellaires – et donc les limites de leurs résultats. Mais certains décideurs ont pu prendre les scénarii avancés pour des boules de cristal, provoquant incompréhensions, déceptions et même vives polémiques. Six ans plus tard, les modèles épidémiologiques sont finalement entrés dans la boîte à outils des politiques de santé. Mais que peuvent-ils nous dire exactement ? Nous avons posé la question au mathématicien Étienne Pardoux, professeur émérite à l'institut de mathématiques de Marseille.



SVHS : Y a-t-il un avant et un après-Covid pour les modèles mathématiques des épidémies ?

Étienne Pardoux : Oui. Le fait que les mathématiques pouvaient être utiles dans un domaine comme celui de la santé a été une découverte pour beaucoup. Il y a aussi eu une explosion du nombre de mathématiciens qui se sont mis à travailler sur la modélisation des épidémies, chacun

Propagation d'un virus, efficacité d'un nouveau vaccin… Les maths nous aident à tirer les leçons des épidémies et à lutter contre les vagues à venir. Ces modèles font désormais partie de la boîte à outils des décideurs.

PAR NATACHA SCHEIDHAUER



© XINHUA/ABACAPRESS

apportant ses méthodes et sa vision. Ce qui a favorisé l'émergence d'idées intéressantes. Par exemple, Tom Britton, Frank Ball et Pieter Trapman ont montré l'importance de tenir compte de l'hétérogénéité de la population qui influence considérablement l'immunité acquise pour la maladie : la proportion d'individus infectés est en effet plus élevée dans les groupes présentant le plus de contacts sociaux que dans ceux où ces derniers sont faibles. Cette approche a permis d'expliquer pourquoi certaines vagues épidémiques commençaient à décroître plus tôt que ce que prévoyaient les modèles mathématiques traditionnels. Elle a pu être utile aux décideurs politiques pour affiner leurs stratégies, leur permettant de mieux cibler les mesures de restriction et les campagnes de vaccination.

> *« Il faut que les décideurs prennent les modèles pour ce qu'ils sont, des indicateurs de tendances »*

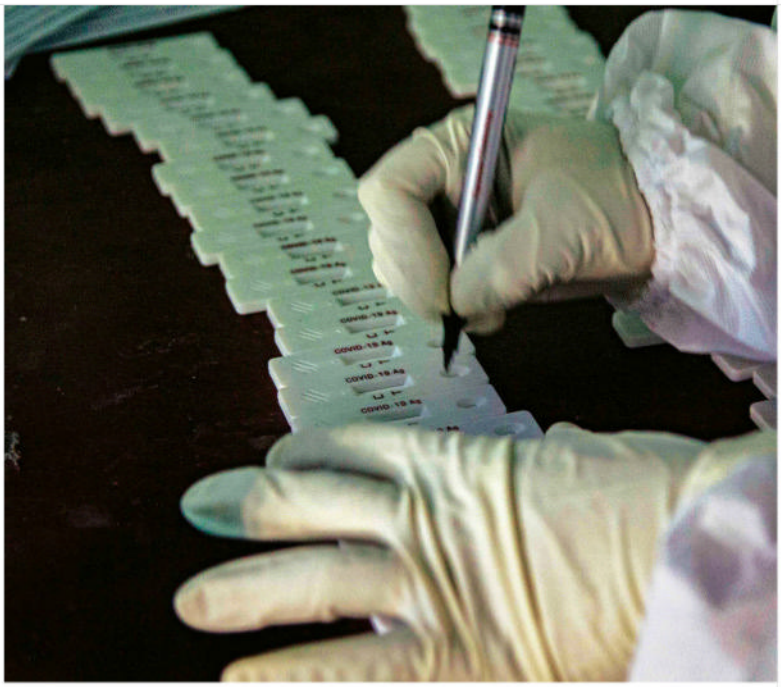
SVHS : Comment représente-t-on l'évolution d'une épidémie ?

E. P. : Nous avons à notre disposition différentes sortes de modèles, des plus simples aux plus complexes. Le modèle fondateur de l'épidémiologie mathématique a été formalisé en 1927 par Kermack et McKendrick. Ce sont eux qui ont notamment eu l'idée de faire varier l'infectivité avec l'âge d'infection. Leur modèle, de type compartimental, porte le nom de SIR, car il divise la population en trois compartiments évolutifs : les individus sains (S), les individus infectés et contagieux (I) et les remis (R), des individus qui n'ont plus de rôle dans la transmission, qu'ils soient rétablis et immunisés, ou décédés. Des équations différentielles (ou intégrales) nous permettent de connaître l'évolution des effectifs de ces groupes. Les modèles nous donnent aussi le R_0, soit le nombre moyen de personnes infectées par un malade au

début de l'épidémie et qui détermine à terme la fraction de la population totale touchée par le virus. Et pour tenir compte de la complexité de la réalité et mieux comprendre comment le virus circule, nous pouvons ajouter des compartiments : par exemple, prendre en compte l'âge, le comportement ou la distribution spatiale. Hormis les débuts et fins d'épidémie, si la taille de la population n'est pas trop petite, les modèles déterministes (sans hasard) s'avèrent en général suffisamment précis. Dans le cas contraire, on peut utiliser des modèles qui font appel aux probabilités. "Individu-centrés", ils décrivent dans le détail chaque infection, chaque guérison. Ils sont plus réalistes, mais bien plus complexes à manier, notamment car cette modélisation stochastique (qui intègre le hasard) nécessite d'exécuter un très grand nombre de simulations pour obtenir des résultats robustes. Mais, quand c'est adapté, l'approximation du modèle stochastique par le bon modèle déterministe est acceptable.

SVHS : Que peut-on en attendre ?

E. P. : Il faut avoir conscience qu'aucun modèle ne peut refléter le réel dans toute sa complexité. La modélisation épidémiologique est un outil utile, le seul dont on dispose aujourd'hui, mais elle ne peut prédire le futur avec certitude. Il ne faut pas sous-estimer la part systématique d'incertitude en donnant une valeur démesurée aux résultats.



D'Ebola à la Covid-19, les mathématiques jouent un rôle clé. Modèles de propagation, taux de reproduction et prévisions permettent d'anticiper l'évolution des contaminations et de guider les décisions de santé publique.

Travailler de manière rétrospective en ajustant un modèle à des données passées, c'est faisable. Et cela permet de vérifier dans quelle mesure les modèles permettent de refléter la réalité. Mais le propre d'une épidémie émergente, comme l'a été le Covid, c'est sa part d'inconnu. Ainsi, ajuster des paramètres à des données dont on ne dispose pas encore en début d'épidémie, c'est une autre affaire. Il faut donc que les décideurs prennent les modèles pour ce qu'ils sont, des indicateurs de tendances.

SVHS : Est-ce que les collaborations transdisciplinaires permettent d'affiner les modèles ?

E. P. : Je crois à la collaboration entre mathématiciens, épidémiologistes, économistes, décideurs, etc., pour renforcer nos modèles et tenter de répondre à des questions qui peuvent conditionner la survie de dizaines, voire de centaines de milliers de gens. Ces collaborations ne vont pas toujours de soi, notamment car le langage n'est pas commun entre ces disciplines. Mais les échanges sont enrichissants : je viens de débuter une collaboration avec des médecins, et leurs premiers retours, nourris par leur pratique, m'ont permis de corriger des points importants dans des modèles avec perte progressive de l'immunité. Notre collaboration a pour but de confronter nos modèles spatiaux aux données de l'épidémie du Covid à Marseille, affinées quartier par quartier. Une vraie gageure, qui nous promet des tailles de calcul importantes… ▪

© SUDIP CHANDA/PACIFIC PRESS/ZUMA/REA



LA MODE, UNE AFFAIRE DE CYCLES

En modélisant un siècle de tendances vestimentaires, des mathématiciens américains ont montré qu'elles obéissent à des cycles de vingt ans. PAR LISE GOUGIS

La mode est un éternel recommencement. Pantalons pattes d'éléphant, minijupes, vestes à épaulettes, sabots… Tour à tour tendance puis ringards, vêtements et accessoires finissent toujours par revenir sur le devant des podiums et des vitrines. Mais pour quelles raisons ? Et surtout, à quel rythme ? Des mathématiciens se sont récemment emparés de ces questions qui, bien au-delà des vêtements, nous éclairent sur des phénomènes sociaux plus généraux.

"Longtemps, la mode a échappé à toute modélisation, faute de données quantitatives. Mais la récente numérisation des archives historiques rend désormais possible une telle démarche", s'enthousiasme Emma Zajdela, mathématicienne à l'université Northwestern, aux États-Unis, qui a entrepris pour la première fois ce laborieux travail, présenté en mars dernier au Global Physics Summit de la Société américaine de physique. À partir d'archives de patrons de couture et de collections de défilés, elle a analysé, avec son équipe, près de 37 000 images de vêtements féminins datant de 1889 à aujourd'hui. Longueur des jupes,

© GETTY



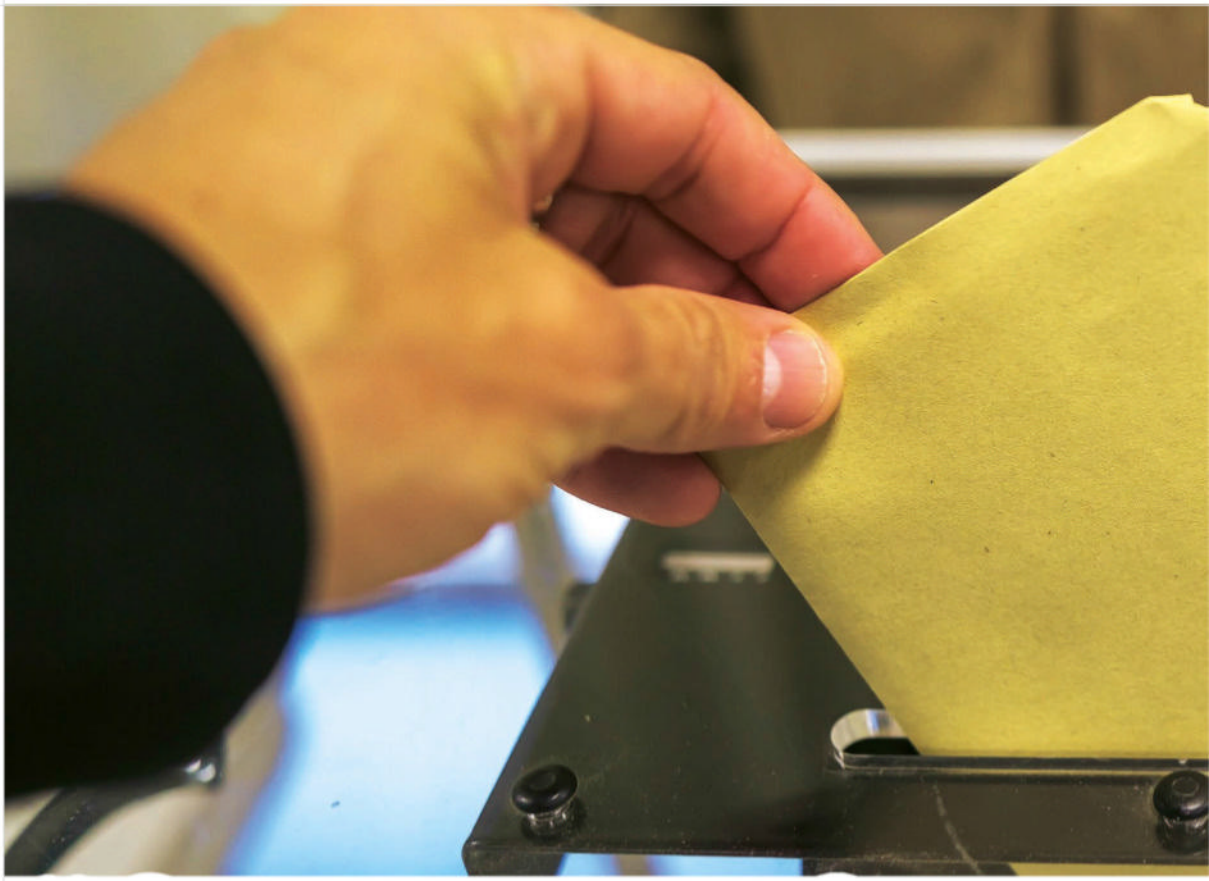
forme de l'encolure, positionnement de la taille : chaque caractéristique a été transformée en donnée mesurable. Puis, afin de restituer leurs variations au fil des décennies, les chercheurs ont conçu un modèle mathématique inspiré de ceux utilisés pour décrire la diffusion des opinions, des innovations ou de certains comportements sociaux…

TOUS LES VINGT ANS

Ce modèle intègre un concept bien connu des psychologues, appelé "distinction optimale", autrement dit la tension entre le désir de se démarquer et celui de ressembler suffisamment aux autres pour s'intégrer. Car c'est la recherche de cet équilibre délicat qui engendre les cycles de la mode : lorsqu'un style devient trop répandu, les créateurs comme les fashionistas s'en détournent, ouvrant la voie à d'autres tendances, qui doivent malgré tout rester "portables". Avec le temps, les styles abandonnés finissent par retrouver peu à peu leur originalité… jusqu'à redevenir désirables.

"Notre analyse révèle que ce cycle se répète environ tous les vingt ans. On le voit tout particulièrement dans la longueur des jupes", dévoile la chercheuse. Au cours du siècle dernier, elles n'ont cessé de raccourcir… avant de rallonger. Dans les années 1920, les robes des *"flappers"*, ces jeunes Américaines au look "garçonne", laissaient apparaître les genoux. Puis dans les années 1950, elles se sont faites de nouveau plus longues et sages, jusqu'à l'arrivée des minijupes à la fin des années 1960.

Cette régularité semble toutefois s'éroder à partir des années 1980. *"Ces dernières décennies, les options se sont multipliées et coexistent désormais : robes très courtes, midi, longues… On observe une fragmentation croissante des tendances et une moindre conformité"*, analyse Emma Zajdela. De quoi signer la fin des cycles de la mode ? Pas si sûr à l'heure où le jean taille basse, emblématique des années 2000, fait son grand retour. Pour le meilleur ou pour le pire ? Les équations ne tranchent pas ! ▪



“On a cessé de chercher le scrutin parfait”

Depuis deux siècles, les mathématiques analysent les modes de scrutin et en imaginent de nouveaux. Peuvent-elles améliorer la démocratie ? Deux experts, Antoine Rolland * et Antoine Houlou-Garcia **, nous livrent leur analyse. PROPOS RECUEILLIS PAR LISE GOUGIS

© ADOBE STOCK







SVHS : Depuis quand les mathématiques s'immiscent-elles en politique ?

Antoine Houlou-Garcia : Ce lien entre maths et politique existe assez naturellement dès lors qu'on est dans un système politique qui s'apparente à de la démocratie. C'était donc déjà le cas dans les cités antiques. Même si elles n'étaient pas nécessairement démocratiques au sens où on l'entend aujourd'hui, le peuple y existait en tant qu'acteur politique. Ce qui impliquait ne serait-ce que de déterminer l'unité de décision : qui pouvait voter (esclaves, femmes, enfants…) ? Est-ce que chacun valait une voix, ou bien préférait-on donner des poids différents, comme à Rome ? Même le tirage au sort reposait sur des systèmes complexes destinés à garantir un hasard équitable, comme le *klèrôtèrion*, machine utilisée pour sélectionner les jurés de l'héliée et de la boulê parmi les citoyens athéniens.

SVHS : À quel moment le vote devient-il un objet d'étude pour les mathématiciens ?

A.H.-G. : C'est surtout en France, à la fin du XVIII[e] siècle, que deux personnages centraux commencent à s'y intéresser. Jean-Charles de Borda, d'abord, constate que les résultats des élections au

> *Condorcet développe une méthode qui consiste à faire des duels entre candidats : celui qui les gagne avec le plus d'avance est considéré comme le bon vainqueur*

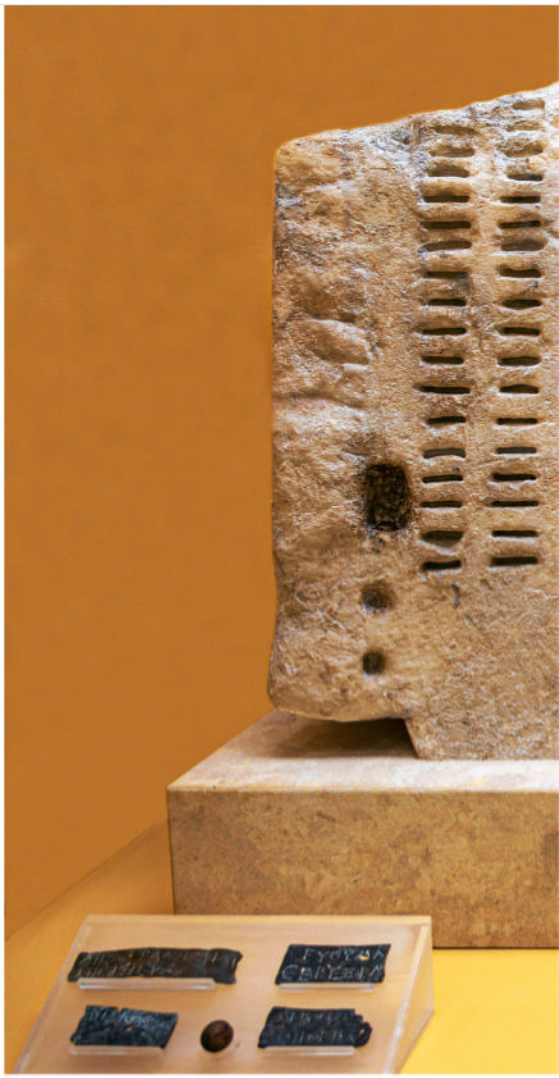
sein de l'Académie des sciences, dont il fait partie, suscitent beaucoup de mécontentements. Il propose alors de ne pas voter seulement pour un nom, mais de classer l'ensemble des candidats par ordre de préférence, de façon à mieux respecter le vœu des électeurs. Dans la même optique, Condorcet développe une méthode qui consiste à faire des duels entre candidats : celui qui les gagne avec le plus d'avance est considéré comme le "bon" vainqueur, le plus légitime.

Antoine Rolland : Il y a aussi eu beaucoup de réflexion au XIXe siècle aux États-Unis. On s'est demandé comment faire, dans cette démocratie naissante qui n'était pas du tout centralisée, pour élire un parlement de façon à ce que chaque État soit représenté équitablement par rapport à sa population. Puis, après la Seconde Guerre mondiale, avec la naissance d'un champ d'études appelé la théorie du choix social, des économistes, mais aussi des mathématiciens, des informaticiens, des psychologues, des politistes, ont commencé à étudier les méthodes de prise de décision collective, dont le vote, de manière très mathématique, c'est-à-dire en analysant leurs propriétés.

SVHS : Est-ce qu'un mode de scrutin idéal a émergé de ces travaux ?

A.R. : Au début des années 1950, l'économiste américain Kenneth Arrow a mis fin à cet espoir en démontrant un théorème dit d'impossibilité. Imaginons trois candidats, A, B et C. Une partie des électeurs préfère A à B, une autre préfère B à C, mais une troisième préfère C à A. Collectivement, chacun des candidats peut donc être battu par un autre : il n'y a plus de vainqueur évident. C'est ce qu'on appelle le paradoxe de Condorcet. Arrow montre que ce type de situation est inévitable dans tout mode de scrutin utilisant des ordres de préférence. À partir de là, les chercheurs ont cessé de chercher le scrutin parfait. Ils se sont plutôt attachés à comprendre les qualités et les défauts de chaque mode de scrutin : tous sont imparfaits, mais certains répondent mieux que d'autres à des objectifs précis.

A.H.-G. : Ce n'est peut-être pas aux mathématiques de définir une règle parfaite, car vouloir alors appliquer la même partout reviendrait à faire abstraction de la réalité historique et politique de chaque pays. Par exemple, on critique souvent le fait qu'un



Cette grosse pierre, appelée *klèrôtèrion* et conservée au musée de l'Agora antique d'Athènes, permettait de tirer au sort les jurés parmi les citoyens de la ville. Ceux-ci exprimaient ensuite leur vote à l'aide d'un jeton en bronze *(à droite)* avec une tige centrale creuse (coupable) ou pleine (non coupable).



candidat puisse être élu avec moins de voix que son adversaire aux États-Unis, comme cela avait été le cas de Donald Trump face à Hillary Clinton en 2016. Pourtant, ce système est cohérent avec le choix historique du fédéralisme : ce sont les États qui élisent le président, plus que la population elle-même.

SVHS : Quels sont les défauts du mode de scrutin français ?

A.R. : Il n'incite pas les électeurs à exprimer leurs véritables préférences et les pousse à faire des calculs. Beaucoup se retrouvent à voter "utile", pour des personnes dont ils ne veulent pas – mais un peu moins que les autres – plutôt que pour leur candidat favori, parce qu'ils anticipent ses chances d'accéder au second tour. Le scrutin majoritaire à deux tours favorise aussi les candidats les plus polarisants, qui cherchent avant tout à mobiliser un noyau dur d'électeurs plutôt qu'à rassembler largement. Pour un président de la République censé représenter l'ensemble du pays, c'est tout de même problématique.

A.H.-G. : Ce mode de scrutin est lié à notre histoire, au contexte des années 1950 dominé par deux grands partis, même s'il est manifeste qu'il n'est plus cohérent avec le paysage politique actuel qui s'est fragmenté. Mais par quoi le remplacer ? On pourrait imaginer élire le gouvernement à la proportionnelle,

© GINA RODGERS/ALAMYHEMIS.FR

« Le plus efficace serait de tirer au sort 500 citoyens. La loi des grands nombres nous dit qu'on obtiendrait une répartition proche de celle de la société française »

comme en Italie ou en Allemagne. Cela impliquerait de faire des alliances pour avoir une majorité, ce qui n'est pas dans la culture française. Une chose est sûre : la solution ne peut pas être purement mathématique. C'est une décision politique, qui doit faire l'objet d'une délibération et avant tout convaincre suffisamment de citoyens.

SVHS : Peut-on imaginer de meilleures façons de voter ?

A.R. : Les chercheurs ont élaboré de nombreuses alternatives. Certaines demandent de classer les candidats, comme c'est le cas du scrutin à un tour en Irlande. Mais cela rend le dépouillement compliqué et les résultats mettent du temps à tomber. Or, en plus d'être mathématiquement juste et socialement acceptable, l'enjeu est de trouver une méthode qui reste simple à mettre en œuvre. C'est le cas du scrutin par approbation qui est fréquemment utilisé en milieu associatif : au lieu de voter pour un seul candidat, chacun peut soutenir tous ceux qu'il juge acceptables. Cela encourage les candidats à rassembler le plus largement possible et rend les campagnes plus respectueuses. D'autres permettent d'exprimer un vote avec encore plus de nuances, comme le jugement majoritaire qu'avait mis en place la primaire populaire en 2022 pour essayer de faire émerger un candidat unique à gauche. Le principe : les électeurs attribuent une mention (excellent, bon, passable…) à chaque candidat, et le vainqueur est celui qui obtient la meilleure mention médiane.

A.H.-G. : C'est séduisant, mais il ne faut pas croire qu'une nouvelle règle supprimera le vote stratégique. Les mathématiciens à l'origine du jugement majoritaire ont longtemps affirmé qu'il résistait aux manipulations, mais ce n'est pas le cas. Comme dans un jeu de société, dès qu'il existe une règle, tout le monde essaye de tricher. Toutes les méthodes de vote favorisent certains partis et peuvent être contournées d'une manière ou d'une autre.

SVHS : Existe-t-il un nombre idéal de députés pour représenter un pays ?

A.H.-G. : Cette question illustre par excellence la limite des maths en politique. On cite souvent la règle de la racine cubique de la population, formulée en 1972 par le politologue estonien Rein Taagepera, mais elle est largement surinterprétée. Son auteur constatait simplement que de nombreuses démocraties avaient des assemblées dont la taille s'en approchait. Il n'a fait que mettre des maths sur une réalité, il ne dit pas que c'est un idéal à atteindre. Au final, cette idée n'a pas beaucoup de sens. En France par exemple, où nous comptons 577 députés, cela voudrait dire qu'on devrait diminuer d'un tiers la taille de notre Assemblée nationale. Alors qu'il est déjà discutable qu'un député puisse raisonnablement couvrir un territoire d'environ 120 000 habitants.

A.R. : Il n'y a effectivement pas de règle absolue. Certains pays, comme l'Estonie ou Israël, fonctionnent avec une centaine de députés, d'autres avec beaucoup plus. Tout dépend du mode de scrutin et du seuil à partir duquel vous voulez des élus. Si l'on veut, par exemple, qu'un parti recueillant 2 % des voix obtienne au moins un siège, il faut déjà disposer d'un nombre suffisant de sièges à répartir. C'est également intimement lié au pouvoir des députés.

SVHS : Cela dépend aussi de ce qu'on attend d'une assemblée…



Les membres de la commission LIBE, à Bruxelles, votent à main levée. Ce comité dédié aux libertés civiles, à la justice et aux affaires intérieures du Parlement européen est chargé de débattre et de légiférer sur les questions liées aux droits fondamentaux, notamment la sécurité et la migration.



A.R. : Oui, la question est philosophique. Veut-on une assemblée représentative de la population ? Dans ce cas, le plus efficace serait de tirer au sort 500 citoyens. La loi des grands nombres nous dit qu'on obtiendrait naturellement une répartition proche de celle de la société française, en termes d'âge, de sexe ou d'opinions. Si on veut représenter les territoires, on crée des circonscriptions. Mais ce système invisibilise les minorités : un parti qui recueille 49 % des voix partout peut n'obtenir aucun élu.

A.H.-G. : Tout dépend finalement de ce que l'on entend par "représenter". Si on veut déléguer notre pouvoir de citoyen à des gens compétents, une assemblée restreinte de 100 députés peut suffire. Si on souhaite en revanche que les citoyens participent activement à la vie politique, alors il faudrait sans doute beaucoup plus de représentants, avec des assemblées locales. Condorcet imaginait par exemple un système d'assemblées provinciales qui alimenteraient une assemblée nationale. Mais est-ce ce que nous voulons ? ▪

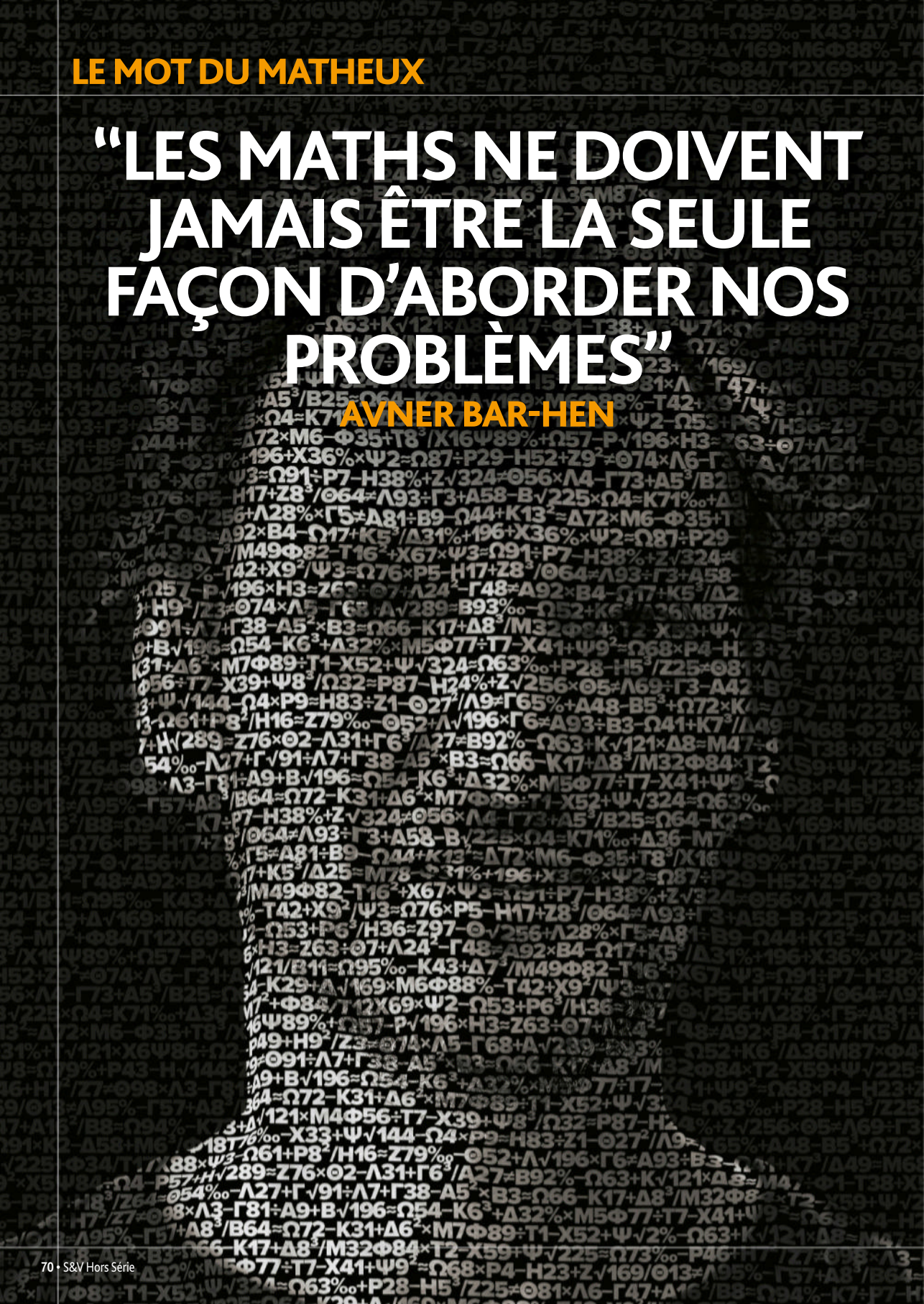
** Antoine Rolland est maître de conférences en statistique à l'université Lumière Lyon 2, coauteur de* Comment être élu à tous les coups ? Petit guide mathématique des modes de scrutin, aux éditions *EDP Sciences.*

*** Antoine Houlou-Garcia est docteur en études politiques de l'EHESS, chargé de cours à l'université de Trente (Italie), auteur du* Théorème du jury de Condorcet, *aux éditions Les Belles Lettres.*

© EUROPEAN UNION

“LES MATHS NE DOIVENT JAMAIS ÊTRE LA SEULE FAÇON D’ABORDER NOS PROBLÈMES”

AVNER BAR-HEN



Des choix les plus anodins aux enjeux de société, les maths permettent de modéliser un nombre croissant de problèmes. Faut-il y voir un progrès ? Le point de vue du statisticien Avner Bar-Hen*.

PROPOS RECUEILLIS PAR LISE GOUGIS

SVHS : Les maths semblent s'immiscer partout dans nos vies : médecine, justice, politique… Doit-on mathématiser tous nos problèmes ?

Avner Bar-Hen : Les mathématiques sont effectivement de plus en plus présentes. Aujourd'hui, avec l'IA générative, on a tendance à modéliser nos interactions, voire notre savoir, ce qui est relativement nouveau. Mais les maths ne sont qu'une manière d'aborder les problèmes parmi d'autres, elles ne doivent jamais être la seule. La vraie question n'est donc pas de savoir si l'on peut tout modéliser ou pas, mais ce que l'on souhaite réellement déléguer aux modèles ou conserver dans notre périmètre de décision et d'action. Prenons l'exemple du diagnostic médical : l'IA peut probablement être très douée pour détecter une maladie. Mais ne préférerions-nous pas l'apprendre de vive voix, par un humain plutôt que par une machine ? D'autant que le travail du médecin ne se limite pas à diagnostiquer les maladies, il doit avant tout savoir comment les soigner. Heureusement, nous gardons notre libre arbitre et la capacité de décider quelle place nous voulons laisser aux modèles et à leurs réponses : quand nous apportent-ils un vrai plus ? À l'inverse, est-ce qu'on ne vivrait pas mieux sans eux parfois ? D'autant qu'ils ont un coût, notamment écologique.

SVHS : Que peuvent nous apporter les maths ?

A. B.-H. : Elles nous permettent de prendre de la hauteur, d'avoir une vue plus macroscopique. Car à l'échelle humaine, on peut observer un arbre ou la météo, mais il est beaucoup plus difficile de saisir l'ensemble d'une forêt ou le climat sur un temps long. Les modèles procurent cette vision d'ensemble, cette capacité de synthèse que nous n'avons pas. Ils permettent aussi de faire des liens entre des phénomènes très différents, que l'on ne perçoit pas spontanément. L'exemple typique, c'est le mouvement brownien *[le déplacement aléatoire et désordonné d'une particule en suspension dans un fluide, NDLR]*, développé à l'origine pour décrire le déplacement de particules, et qui a servi à modéliser les marchés financiers.

> *« Les modèles procurent une vision d'ensemble, une capacité de synthèse que nous n'avons pas »*

SVHS : On mathématise même des problèmes qui peuvent sembler triviaux, comme le choix d'un plat au restaurant : vaut-il mieux prendre toujours son plat préféré ou explorer le reste de la carte… Quelle est l'utilité de tout cela ?

A. B.-H. : Ce compromis entre l'exploration de nouvelles possibilités et le fait de continuer à exploiter une stratégie qui fonctionne déjà existe en fait dans divers domaines. Historiquement, ce problème s'appliquait aux casinos : est-ce qu'il vaut mieux rester sur la même machine à sous ou aller de machine en machine ? Puis il a été beaucoup décliné dans d'autres domaines, comme le choix d'une stratégie publicitaire ou la recherche de nouveaux médicaments : vaut-il mieux augmenter le nombre de patients sur un traitement ou en essayer plusieurs ? La réponse est assez technique en fait et dépend des situations, c'est pour cela que cela reste un domaine de recherche très actif. C'est aussi le cas de la théorie des jeux, qui s'intéresse autant à l'art de tirer un penalty – vaut-il mieux tirer à droite ou à gauche ? – qu'aux négociations internationales. ▪

**Avner Bar-Hen est professeur de la chaire statistiques et données massives au Conservatoire national des arts et métiers, coauteur de* Dingue de maths *(éd. epa).*

© B. FOURRIER/INRIA

IMAGINER





Au Jet Propulsion Laboratory de Pasadena, en Californie, une chercheuse déploie un panneau solaire spatial précédemment replié selon les principes japonais de l'origami.

© THE CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY/JPL/NASA



Comment compter nous est venu à l'esprit

Compter serait accessible à tout humain, une capacité dont il hériterait dès la naissance. Mais pour en arriver là, il a fallu que nos cerveaux, nos corps et nos sociétés convergent.

PAR MATHIAS CHAILLOT





Des vases, des bols d'argile. Sur ces artefacts vieux de huit mille ans découverts en Mésopotamie, se trouvent des fleurs à 4, 8, 16 ou 32 pétales. Cette progression géométrique, basée sur des puissances de 2, serait la première illustration connue d'une abstraction mathématique, d'après les auteurs de l'étude qui en fait état*. Et l'aboutissement d'un long processus sociocognitif.

La capacité à compter repose d'abord sur le fait de pouvoir estimer des quantités. Ce socle perceptif, la faculté de distinguer "beaucoup" de "un peu", est appelé "sens du nombre". Présent chez des espèces aussi éloignées que les abeilles et les primates, dont les cerveaux divergent depuis des centaines de millions d'années, il est le signe d'un trait évolutif qui a émergé de façon répétée dans des lignées distinctes.

Andreas Nieder, directeur de l'institut de neurobiologie de l'université de Tübingen (Allemagne), et auteur d'*A Brain for Numbers*, a ainsi démontré que primates et corvidés représentent le nombre de la même façon, non pas exactement, mais comme une grandeur approximative perçue avec les mêmes effets de distance (il est plus facile de distinguer 2 de 8 que 7 de 8) et de taille (à écart égal, plus les quantités sont grandes, plus il est difficile de distinguer l'écart)**.

UN HÉRITAGE MULTIMILLÉNAIRE

Homo erectus puis ses descendants étaient donc, par héritage, déjà équipés de ces aptitudes cognitives répandues dans une grande part du règne animal. Andreas Nieder souligne par ailleurs que chez tous les vertébrés étudiés, la même région du cerveau est impliquée : le pallium du télencéphale, la couche superficielle du cerveau antérieur dont dérive notre cortex. Ses propriétés le rendraient idéalement adapté pour héberger ces représentations.

L'arithmétique précise ne serait pas pour autant une simple progression, une évolution logique de ces aptitudes biologiques. Rafael Núñez, spécialiste des sciences cognitives des mathématiques à l'université de Californie à San Diego, distingue ainsi le "quantitatif" (*"quantical"*, la capacité à percevoir des quantités, répandue dans le monde animal) du



© ADOBE STOCK

« Au moment où les migrations vers les continents les plus éloignés de l'Afrique étaient en cours, il n'existait au mieux que quelques nombres… et peut-être même aucun »

"numérique" (sens précis du nombre). Si la cognition "quantitative" fournit les préconditions biologiques de la cognition numérique, elle ne se prolonge pas jusqu'au nombre exact sans une médiation culturelle. Pour preuve, estime Rafael Núñez, il existe des peuples incapables de nommer le nombre. Les Mundurukú d'Amazonie n'ont ainsi aucun terme pour aller au-delà de 5, alors que les Pirahã, chasseurs-cueilleurs vivants eux aussi en Amazonie, n'en ont pas pour nommer 1. Sans ce langage du nombre, leurs aptitudes dans des tâches mathématiques exactes s'en trouvent fortement réduites. Le langage serait donc aussi, selon plusieurs théories, une condition indispensable de la cognition mathématique, sans être la seule. D'autres, à l'inverse, y voient un sens approximatif universel du nombre, pour lequel le langage et la culture n'apporteraient que l'exactitude.

LE RÔLE DES OUTILS

Karenleigh A. Overmann, directrice du Centre d'archéologie cognitive de l'université du Colorado à Colorado Springs (États-Unis), a ainsi cherché les conditions préalables nécessaires à ces capacités cognitives. *"Le problème lorsqu'on cherche les premières manifestations du nombre est qu'il est peu probable qu'elles aient laissé des traces matérielles"*, reconnaît la chercheuse qui travaille sur la façon dont les sociétés sont devenues capables de compter et lire : *"Nous devons donc nous tourner vers des indices indirects, notamment le moment où sont apparus les différents prérequis cognitifs et comportementaux."* D'un point de vue morphologique, elle distingue le développement du lobe pariétal, dérivé mammalien du pallium, où se concentre le traitement des quantités, *"important à la fois pour les capacités numériques et pour l'utilisation des outils"*. Deux aptitudes plus liées qu'il n'y paraît : *"La condition sine qua non de la numératie humaine réside dans l'usage d'outils numériques, une pratique propre à notre espèce*, ajoute Karenleigh A. Overmann. *Cela signifie que les capacités numériques des autres espèces sont très probablement d'une nature différente."* Un substrat qui prend sa forme moderne il y a 100 000 à 35 000 ans.

Pour que le nombre apparaisse, l'humain a d'ailleurs pu passer de la perception au concept grâce à un "outil" biologique : nos cinq doigts. *"D'abord, la main constitue l'outil qui permet aux sociétés de dépasser les quantités pouvant être appréhendées directement par notre système perceptif"*, généralement trois ou quatre, soulève Karenleigh A. Overmann. En étant outil et moyen d'action sur le monde, la main fait le lien entre le mental et le monde physique : c'est par exemple le fait de compter sur les doigts qui aide un enfant à acquérir les concepts numériques. *"Certes, la main fait partie du*





À gauche, l'"os d'Ishango", bâton de comptage vieux de 20 000 ans, découvert dans l'actuelle République démocratique du Congo. Ci-dessous, tablette de comptage sumérienne trouvée à Uruk.

© JOEYKENTIN - IMAGE MODIFIÉE PAR IAL





Parure en abaque

Les tombes de Sungir, en Russie, ont livré plusieurs dépouilles remontant au Paléolithique supérieur. Si les vêtements ont depuis longtemps disparu, les parures sont parvenues jusqu'à nous : armes, cordages et, surtout, des milliers de perles qui semblent indiquer une capacité au comptage.

corps, mais elle révèle aussi ce que le cerveau, à lui seul, ne fait pas", ajoute la chercheuse. Encore faut-il, pour qu'ils apparaissent, que les nombres aient un but au-delà d'un sens. C'est là qu'interviennent les dernières conditions – démographiques et sociales – de l'abstraction mathématique. Une petite bande de chasseurs-cueilleurs n'a pas besoin de compter au-delà de quelques unités. Des sociétés nombreuses et interconnectées, oui.

COMPTAGE PALÉOLITHIQUE

"Ces tendances, en particulier la concentration des systèmes numériques récents aux extrémités des grandes routes migratoires ayant conduit jusqu'en Australie et en Amérique du Sud, suggèrent qu'au moment où ces migrations étaient en cours, il n'existait au mieux que quelques nombres… et peut-être même aucun", estime Karenleigh A. Overmann. Selon elle, *"en Europe, les conditions sociales nécessaires à l'usage des nombres semblent réunies dans certaines sociétés dès la fin du Paléolithique supérieur"*, l'ère de l'art préhistorique et des outils en os il y a entre 45 000 et 12 000 ans. Les sépultures de Sungir, en Russie, célèbres pour leurs 13 000 perles d'ivoire, ont ainsi été creusées il y a environ 34 000 ans : *"Les perles incarnent une valeur, et tout ce qui possède une valeur incite à compter. Les analyses génétiques des individus enterrés montrent également que cette société entretenait de nombreux contacts avec d'autres groupes, or les systèmes numériques ont tendance à se développer lorsque les échanges entre sociétés sont fréquents."*

Plus tôt encore, il y a environ 42 000 ans, l'os de Lebombo fut gravé à l'autre extrémité du monde, en Afrique australe. C'est l'un des plus anciens "bâtons de comptage" qui nous soient parvenus : il comporte 29 encoches, qu'un représentant d'*Homo sapiens* était donc probablement capable de compter une par une. ▪

** Y. Garfinkel et S. Krulwich, "The Earliest Vegetal Motifs in Prehistoric Art: Painted Halafian Pottery of Mesopotamia and Prehistoric Mathematical Thinking", Journal of World Prehistory, 2025.*
*** A. Nieder, "Evolution of Cognitive and Neural Solutions Enabling Numerosity Judgements: Lessons from Primates and Corvids", Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2018.*

> *Les systèmes numériques ont tendance à se développer lorsque les échanges entre sociétés sont fréquents*

© LIBOR BALÁK - IMAGE MODIFIÉE PAR IAL

LE CALCUL SONNE-T-IL JUSTE ?

Que ce soit pour accorder des instruments, composer ou analyser une mélodie, musique et mathématiques entretiennent des liens profonds. PAR CHARLOTTE MAUGER

La légende court depuis deux millénaires : en promenade près d'une forge, le mathématicien et philosophe Pythagore aurait été frappé par le bruit de marteaux frappant des enclumes et produisant une grande variété de sons. Inspiré par cette découverte, il aurait alors créé un instrument de musique à l'aide d'une corde tendue, le monocorde *(voir encadré)*. La vibration de la corde produit un premier son ou une première note. En raccourcissant une corde de moitié, on obtient le même son, mais plus aigu : c'est son octave. En conservant les deux tiers de sa longueur, on obtient une autre note, appelée la quinte de la première. Ce sont ces rapports de longueur de corde qui permettent de créer des sons harmonieux.

En inventant la gamme chromatique des 12 notes, la tradition pythagoricienne a marqué la musique occidentale, même si *"on n'a pas de trace écrite de Pythagore, seulement des choses racontées des années après"*, tempère Victoria Callet-Feltz, professeure de mathématiques et autrice de l'ouvrage *Mathématique des tubes. Comment mieux apprécier la musique, de Bach à Taylor Swift* (à paraître en octobre 2026). Le problème, c'est que *"la gamme pythagoricienne ne boucle pas"*, souligne Victoria Callet-Feltz. C'est-à-dire qu'après les douze quintes, on arrive presque sur la même note qu'au départ… mais pas tout à fait. *"Cela empêche de jouer en orchestre,*

Et Pythagore inventa les notes de musique

La tradition attribue à cet érudit grec né au VIe siècle av. J.-C. à Samos la création du monocorde *(ci-dessus)* qui lui servit à étudier la musique d'un point de vue mathématique. Il est le premier à établir que les sons musicaux sont gouvernés par les nombres. Ses disciples inventeront la gamme chromatique des 12 notes. Une histoire relatée et illustrée *(gravure page de droite)* dans l'ouvrage *Theorica musicae*, écrit par le théoricien italien de la musique Franchini Gaffurio et publié en 1492.

© ADOBE STOCK



car les instruments ne sont pas tous accordés de la même manière." Pour contourner cet obstacle, les distances entre les notes ont été légèrement modifiées. *"Tous les écarts sonnent un peu faux"*, mais la boucle des quintes se referme.

RELATIONS HARMONIQUES

Les rapports entre les notes constituent sans doute le lien le plus évident entre mathématiques et musique. Mais ils sont loin d'être les seuls. Au XVIIIe siècle, le mathématicien suisse Leonhard Euler imagine ainsi une représentation géométrique des relations entre les notes. Dans ce réseau, les notes sont disposées selon leurs relations harmoniques, notamment les quintes et les tierces majeures. L'outil, appelé aujourd'hui Tonnetz, sera ensuite enrichi d'autres relations. Un tel outil permet *"de retrouver des motifs ou des grilles d'accords similaires entre deux musiques*, précise la professeure. *Le Tonnetz donne une visualisation géométrique de la musique."* Il soulève aussi des questions mathématiques : existe-t-il un chemin permettant de parcourir certains accords sans jamais repasser par le même ?

Le rythme peut être vu lui aussi sous le prisme des mathématiques. On peut par exemple le représenter sur un cercle, en marquant les moments où les notes sont jouées. *"Cela permet d'étudier les rythmes courants et les liens entre les rythmes des différentes régions du monde"*, poursuit Victoria Callet-Feltz. Enfin, comme en littérature, les mathématiques offrent une contrainte créative. Dans les années 1920, Arnold Schönberg développe ainsi sa méthode dodécaphonique : il organise les douze notes en séries, qu'il peut ensuite renverser, transposer ou lire à rebours pour composer. ▪



© PICTORIAL PRESS LTD/ALAMY/HEMIS.FR



Les maths, c'est de la folie ?

Certains troubles cognitifs et maladies mentales s'accompagnent de facultés mathématiques hors du commun. D'autres au contraire auraient l'effet inverse. Pourquoi ?

PAR KHEIRA BETTAYEB

© FRANÇOIS GUENET/DIVERGENCE



Séance d'exploration fonctionnelle de l'activité cérébrale chez un enfant au "développement typique" dans les laboratoires du Centre de pédopsychiatrie de l'université de Tours.

Plusieurs études et observations l'ont montré : certaines affections en lien avec la santé cérébrale, caractérisées par des troubles du comportement, peuvent être associées à des facultés exceptionnelles en mathématiques. À l'inverse, d'autres peuvent être liées à des capacités moindres dans cette discipline. Premier cas : l'autisme, un trouble du développement du cerveau, caractérisé par des difficultés dans la communication et les interactions sociales ainsi que par des activités et des comportements restreints et répétitifs. L'autisme concerne environ 700 000 personnes en France, selon l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm). Lors d'une étude parue en 2009 dans la revue scientifique *Human Brain Mapping*, une équipe de chercheurs américano-canadienne a analysé les capacités de calcul de 33 personnes de 14 à 36 ans, dont 15 autistes. Ils ont noté que ces derniers ont pu résoudre les problèmes jusqu'à 40 % plus rapidement que les non-autistes.

STRATÉGIES NEURONALES

Comment cela peut-il s'expliquer ? Dans une autre recherche, décrite en 2013 dans *Biological Psychiatry*, l'équipe de Vinod Menon, psychiatre et neurologue à l'université de Stanford, aux États-Unis, a tenté de répondre à cette question. Pour cela, ils ont examiné le cerveau de 18 enfants autistes et de 18 enfants au "développement typique". Cela grâce à la technique d'imagerie cérébrale fonctionnelle (IRMf) non invasive, qui permet de voir les zones du cerveau activées lors de la réalisation d'une activité. Il est apparu que les aptitudes mathématiques supérieures des enfants autistes étaient associées… à un schéma d'activation unique de leur cerveau. *"Notre étude a révélé que ces enfants présentent des schémas d'activité cérébrale distincts au niveau de régions cérébrales impliquées dans le traitement des informations visuelles, des informations sensorielles et attentionnelles : le cortex temporo-occipital ventral, le cortex pariétal postérieur et le lobe temporal médian. Cela suggère que ces régions pourraient être recrutées ou coordonnées différemment pour faciliter la résolution de problèmes mathématiques"*, expose Vinod Menon. Comment cela est-il possible? Pourquoi ces enfants arrivent-ils à utiliser ces zones différemment de ce que l'on observe chez des personnes au "développement typique" ? *"Il peut être dû à des différences dans le développement et le câblage des circuits cérébraux des autistes. Lesquels les amènent à traiter l'information en utilisant des stratégies neuronales différentes"*, précise le chercheur. Après, *"les différences d'attention et les types d'informations sur lesquels les enfants se concentrent préférentiellement*

> *Il y a des histoires célèbres de troubles mentaux ou de fragilité psychologique associés à un pur génie ; mais rien de statistique ou de systématique qui permettrait d'en tirer des conclusions*

pourraient également influencer ces schémas". Précision très importante : tous les autistes ne sont pas des génies en maths ! C'est ce que confirment des travaux publiés en février 2026 dans *Nature*. Des chercheurs chinois de l'université de Hong Kong ont analysé les résultats de 66 études ayant évalué les compétences en mathématiques des personnes autistes par rapport à la population non autiste. Conclusion : comparés à la population générale, les autistes présenteraient, en moyenne, des scores en mathématiques "significativement plus faibles".

IMPOSSIBLE DE GÉNÉRALISER

Mais il n'y a pas que l'autisme. D'autres troubles en lien avec la santé cérébrale ont été associés à des compétences en maths exceptionnelles. C'est le cas de plusieurs troubles psychiques qui ont concerné certains génies de cette discipline. Ainsi, le mathématicien autrichien naturalisé américain Kurt Gödel (1906-1978), l'un des plus grands logiciens du xx^{e} siècle, a été atteint d'un délire de persécution. Le mathématicien allemand Georg Cantor (1845-1918), père de la théorie des ensembles (une branche des maths), a pour sa part souffert de dépression chronique. Quant à l'Américain John Nash (1928-2015), lauréat en 2015 du prix Abel, l'une des plus prestigieuses récompenses mathématiques, il était schizophrène. Là aussi, impossible de généraliser, estime Cédric Villani, mathématicien médaillé Fields et homme politique, coauteur des *Coulisses de la création* (éd. Flammarion). Le mathématicien l'assure : il n'y a pas plus de "folie" chez les matheux que dans les autres catégories de la population. *"Certes, il y a des histoires et des cas particuliers célèbres de troubles mentaux ou de fragilité psychologique associés à un pur génie ; mais rien de statistique ou de systématique qui permettrait d'en tirer des conclusions"*, souligne-t-il.

Certains troubles peuvent, à l'inverse, induire des capacités en mathématiques plus faibles que la moyenne. *"C'est le cas notamment de la dyscalculie développementale"*, pointe Vinod Menon. Il s'agit là d'un trouble spécifique des apprentissages qui affecte principalement la capacité à comprendre les nombres et à acquérir des compétences arithmétiques. D'après une expertise de l'Inserm, ce trouble toucherait de 5 % à 7 % des enfants en France.

Toujours selon Vinod Menon, les performances en mathématiques peuvent également être affectées par *"des troubles d'apprentissage plus généraux et par plusieurs affections neurodéveloppementales ou génétiques"*. Et de citer le syndrome de Turner, une maladie génétique rare due à l'absence ou à l'altération d'un chromosome X chez la femme, et qui se manifeste notamment par une petite taille, un retard de puberté et une infertilité. Ou encore le syndrome de Down, dit aussi trisomie 21, lié à la présence de trois chromosomes 21 – et non deux. Ces deux troubles peuvent affecter le développement cognitif des personnes concernées, et ainsi entraîner des difficultés dans certains domaines, dont les mathématiques.

Cependant, insiste Vinod Menon, *"la nature et la gravité des difficultés en mathématiques varient considérablement d'une personne à l'autre et selon l'affection"*. Surtout, les personnes touchées par ces troubles ne sont pas toutes concernées par des facultés altérées en mathématiques. ▪

Dans une école élémentaire parisienne, un jeune élève en classe ULIS apprend à compter. Ce dispositif permet de scolariser des enfants en situation de handicap.



© ARNAUD ROBIN/DIVERGENCE

DES CHIFFRES ET DES MOTS

Pourquoi séparer l'art de la logique de celui de la langue ? Entre littérature et mathématiques, la frontière est parfois poreuse… PAR CHARLOTTE MAUGER

Dans certaines œuvres littéraires, les mathématiques sont incontournables. C'est le cas des romans d'espionnage où les personnages sont amenés à décoder des messages ennemis en s'aidant de la cryptographie. Mais il y a bien d'autres occasions où les auteurs viennent puiser dans les maths. *"Mathématiques et littérature sont liées de manière inextricable, et comprendre ces liens accroît votre plaisir des deux"*, écrit Sarah Hart, mathématicienne au Gresham College, dans son ouvrage *Once Upon a Prime: The Wondrous Connections Between Mathematics and Literature*. Or, ces liens sont extrêmement variés… et féconds.

La poésie en vers, avec toutes ses contraintes de rimes, de longueurs et de nombre de vers, a quelque chose d'intrinsèquement mathématique. Poètes et mathématiciens eux-mêmes voient des similitudes dans leurs travaux. *"Dans une démonstration ou un poème, on cherche à partager son idée de la manière la plus concise, vraie et élégante"*, nous confie Sarah Hart lors d'une interview. Cela, en respectant la structure imposée par sa discipline.

ÉCRITURE SOUS CONTRAINTE

Certains auteurs se sont amusés à faire reposer leurs poèmes sur une structure mathématique. C'est le cas de Raymond Queneau, cofondateur de l'Ouvroir de littérature potentielle (Oulipo), un groupe visant à explorer le potentiel de l'écriture sous contrainte pour développer la créativité. Dans son livre *Cent mille milliards de poèmes*, l'écrivain tire profit de la combinatoire pour, littéralement, proposer cent mille milliards de poèmes. De quelle manière ? Son ouvrage est composé de sonnets – des poèmes de deux quatrains et deux tercets – dont le rythme des rimes suit ce motif : ABAB ABAB CCD EED. Pour chacun de ces quatorze vers,



© ADAGP / GALLIMARD, 1961/BNF

le poète propose dix options, toutes interchangeables. Ce qui fait bien, au total, cent mille milliards de combinaisons de vers possibles, et autant de poèmes !

AU RYTHME DE LA LUNE

L'autrice néo-zélandaise Eleanor Catton montre que le roman se prête également aux jeux mathématiques. Dans *Les Luminaires*, chaque chapitre est moitié plus court que le précédent. Ce qui fait que le premier chapitre représente la moitié de l'œuvre. Ce choix n'est pas un simple jeu d'esprit, mais résonne avec le thème de l'œuvre, en particulier les phases de la Lune. Libre ensuite au lecteur de s'interroger sur ce que cette structure raconte de l'œuvre. Sarah Hart rassure : *"Vous n'avez pas besoin d'avoir étudié les mathématiques pour apprécier les structures présentes dans une œuvre. Vous pouvez simplement les constater et cela enrichira votre lecture. Vous pouvez aussi vraiment les creuser pour accéder à un autre niveau de lecture."*

Certains auteurs se servent des maths pour décrire scènes et personnages. C'est le cas de l'Américain Herman Melville, dont *"l'esprit est rempli de mathématiques"*, selon Sarah Hart. Dans *Moby Dick*, l'écrivain donne ainsi à voir le roulis infini des vagues ou la forme oblongue de la tête du cachalot grâce aux séries infinies et à la symétrie. *"Les bons auteurs ramènent des éléments de tout horizon pour mieux décrire leur univers"*, conclut la spécialiste. En littérature, tout grain est bon à moudre, y compris, et peut-être surtout, les mathématiques. ▪

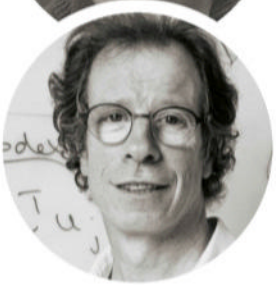


Avec son livre animé *Cent mille milliards de poèmes*, découpé en languettes et publié chez Gallimard en 1961, Raymond Queneau réalise un chef-d'œuvre de la poésie combinatoire.

“L’IA aide le chercheur à explorer des pistes”

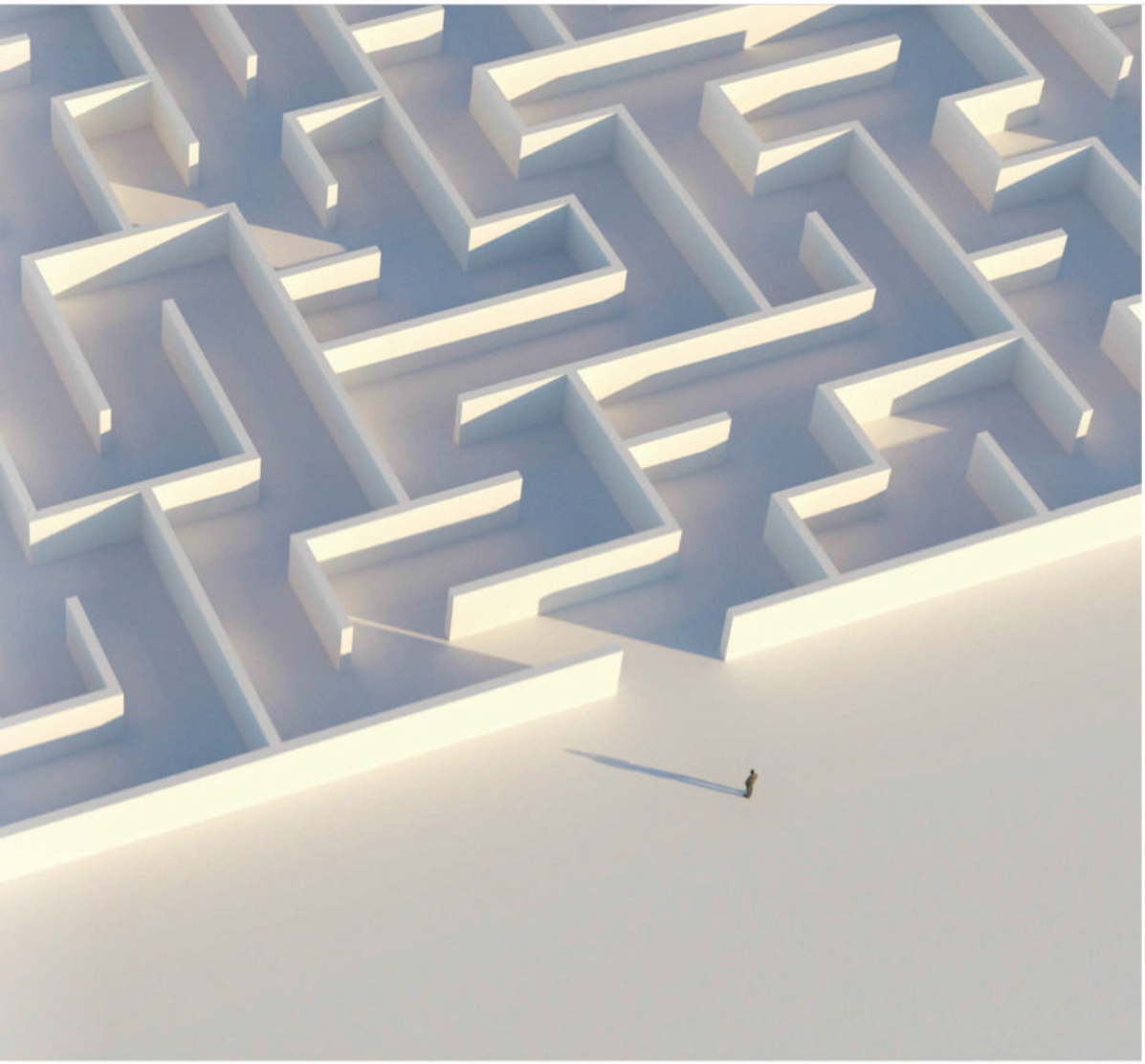
Capacités de calcul, IA agentique… L’arrivée de l’intelligence artificielle renouvelle la recherche en mathématiques. Deux experts livrent leur analyse. PAR DAVID MARCHAND





Coup de tonnerre aux Olympiades internationales de mathématiques de 2025 : pour la première fois, des modèles d’IA atteignent un score correspondant au niveau médaille d’or. Moins d’un an plus tard, un modèle d’OpenAI réfute une conjecture formulée en 1946 par Paul Erdos sur le problème des distances unitaires. Pour comprendre cette accélération *(voir encadré p. 31)*, *Science & Vie* a interrogé deux mathématiciens : Gabriel Peyré, qui utilise déjà ces outils dans ses recherches ; et Stéphane Mallat, médaille d’or du CNRS 2025, qui cherche à expliquer les performances des réseaux de neurones.

SVHS : Les performances récentes constituent-elles une véritable rupture ?



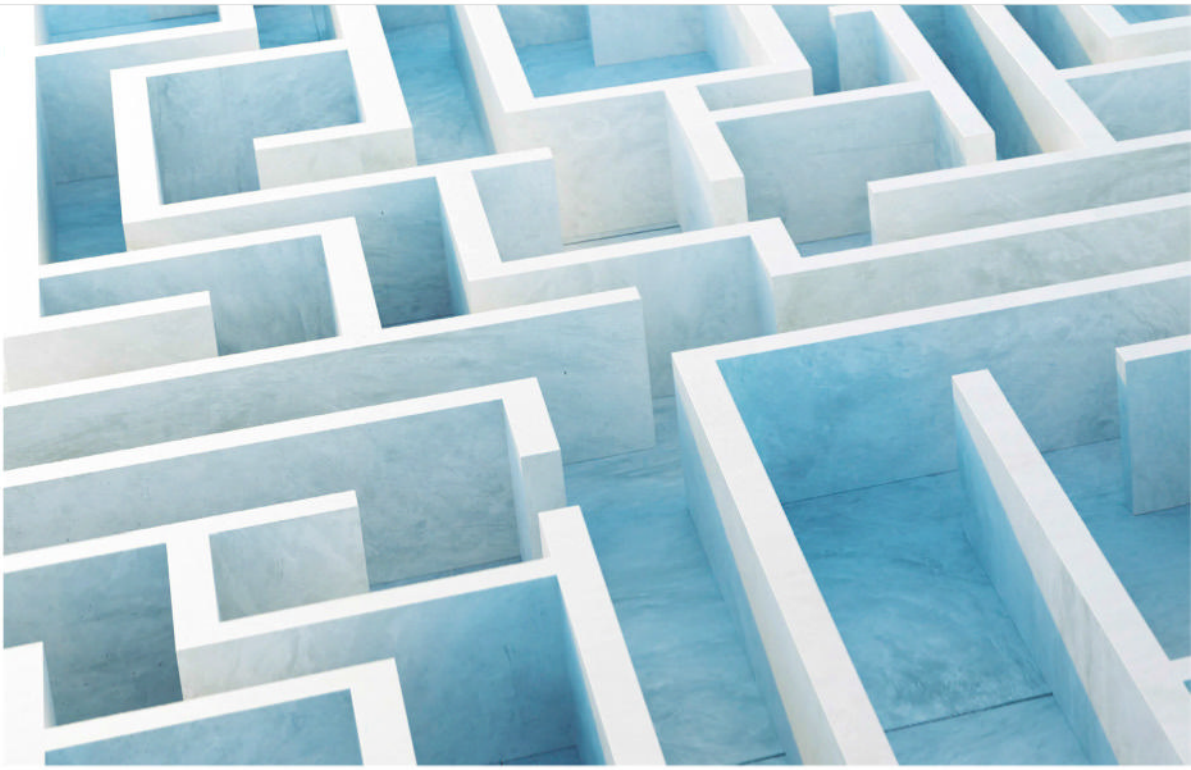
Gabriel Peyré : Oui. Depuis quelques mois, le changement est devenu très concret dans les laboratoires. Le principal changement est l'essor de l'IA agentique. Les modèles sont désormais intégrés à des systèmes capables d'organiser une recherche : ils décomposent le problème, explorent plusieurs pistes, utilisent des outils de calcul ou de vérification, puis adaptent leur stratégie.

Stéphane Mallat : Ce qui se passe actuellement pourrait provoquer une remise en question profonde de la discipline. Des systèmes commencent à produire des démonstrations ou des contre-exemples d'un niveau qui peut représenter le travail d'une carrière. Il ne s'agit donc plus seulement de résoudre des exercices, mais de réfléchir à la place que l'IA prendra dans la production de mathématiques nouvelles.

SVHS : ***Comment les réseaux de neurones artificiels parviennent-ils à résoudre des problèmes aussi complexes ?***

S. M. : Les réseaux de neurones calculent des probabilités conditionnelles : étant donné un problème, quelle est la probabilité de chaque réponse ? La difficulté vient du nombre inimaginable de possibilités. Pour y parvenir, le système doit trouver une structure qui simplifie le problème et le décompose

© ISTOCKPHOTO/GETTY IMAGES



en étapes intermédiaires. Descartes, dans son *Discours de la méthode*, ne disait pas autre chose lorsqu'il recommandait de diviser chaque difficulté en problèmes plus simples. Prenons l'image d'un visage. Deux pixels très éloignés peuvent être liés, parce que leur relation dépend d'une même structure globale. Il serait impossible d'étudier directement toutes les relations entre tous les pixels. Le réseau organise donc l'information en plusieurs niveaux, qui permettent de relier des interactions locales à des formes plus globales, comme les yeux, la bouche ou le visage entier. On retrouve ce type d'organisation hiérarchique dans de nombreux domaines : les lettres forment des mots, puis des phrases ; les particules forment des atomes, puis des molécules et des matériaux. Les réseaux de neurones semblent capables d'exploiter ces structures. Nous connaissons précisément les opérations exécutées par leurs algorithmes, mais nous comprenons encore mal les raisons de leurs performances.

> *« Des systèmes commencent à produire des démonstrations d'un niveau qui peut représenter le travail d'une carrière »*

G. P. : L'IA ne se contente plus d'effectuer de gros calculs ou de dérouler une méthode connue. Elle peut aider un chercheur à explorer des pistes, à se débloquer et parfois à introduire de nouveaux concepts. Mais la plupart de ces résultats sont encore formulés dans le langage mathématique ordinaire, sans vérification automatique de chaque étape par un assistant de preuve comme Lean. Ils doivent donc être relus et contrôlés avec beaucoup d'attention.

SVHS : Peut-on vraiment parler d'une "idée" produite par une machine ?

S. M. : Il faut d'abord préciser ce que l'on appelle une idée.



Pour résoudre un problème, un réseau de neurones doit trouver un chemin parmi un nombre immense de possibilités. Lorsqu'il découvre une voie nouvelle, différente de celles déjà explorées, on peut établir un parallèle avec ce que les mathématiciens appellent une idée : une nouvelle manière d'aborder le problème. Cela ne signifie pas que la machine pense comme un humain. Mais ses performances nous obligent à préciser des notions que nous utilisions jusque-là de façon assez intuitive. Qu'est-ce que connaître ? Une conception rationaliste définit la connaissance comme la manipulation de symboles selon des règles logiques. Selon une approche plus empirique, on peut envisager la connaissance comme la capacité à évaluer correctement la probabilité d'un événement : si cette probabilité est très élevée, on est presque certain ; si elle est faible, on reste dans l'incertitude. Nous commençons ainsi à donner un contenu mathématique à des notions comme la connaissance ou l'idée. Il s'est produit quelque chose de comparable avec l'information : longtemps très vague, cette notion a reçu avec les travaux de Claude Shannon une définition scientifique précise, liée notamment à l'incertitude et à l'entropie.

G. P. : Des modèles généralistes associés à des agents commencent en tout cas à produire des mathématiques nouvelles, parfois à un niveau proche de la recherche. Pour mesurer rigoureusement ces progrès, le projet indépendant First Proof soumet les systèmes à des questions de niveau recherche, encore non publiées et dont les solutions sont tenues secrètes pendant l'évaluation. Leurs démonstrations sont ensuite examinées par des mathématiciens. L'objectif est de dépasser les annonces spectaculaires, souvent difficiles à vérifier, et d'évaluer de manière transparente ce que ces systèmes savent réellement faire. Le récent contre-exemple à la conjecture d'Erdos sur les distances unitaires constitue un cas particulièrement spectaculaire, puisque l'IA a produit le résultat de manière autonome. Mais cet exemple n'est pas représentatif de la façon dont les

© ISTOCKPHOTO/GETTY IMAGES



mathématiciens utilisent aujourd'hui ces outils. Le plus souvent, l'apport de l'IA vient de la boucle construite avec le chercheur : celui-ci oriente les recherches, critique les propositions et réinjecte ses observations. Cette collaboration entre humains et agents est probablement l'un des enseignements majeurs des résultats récents.

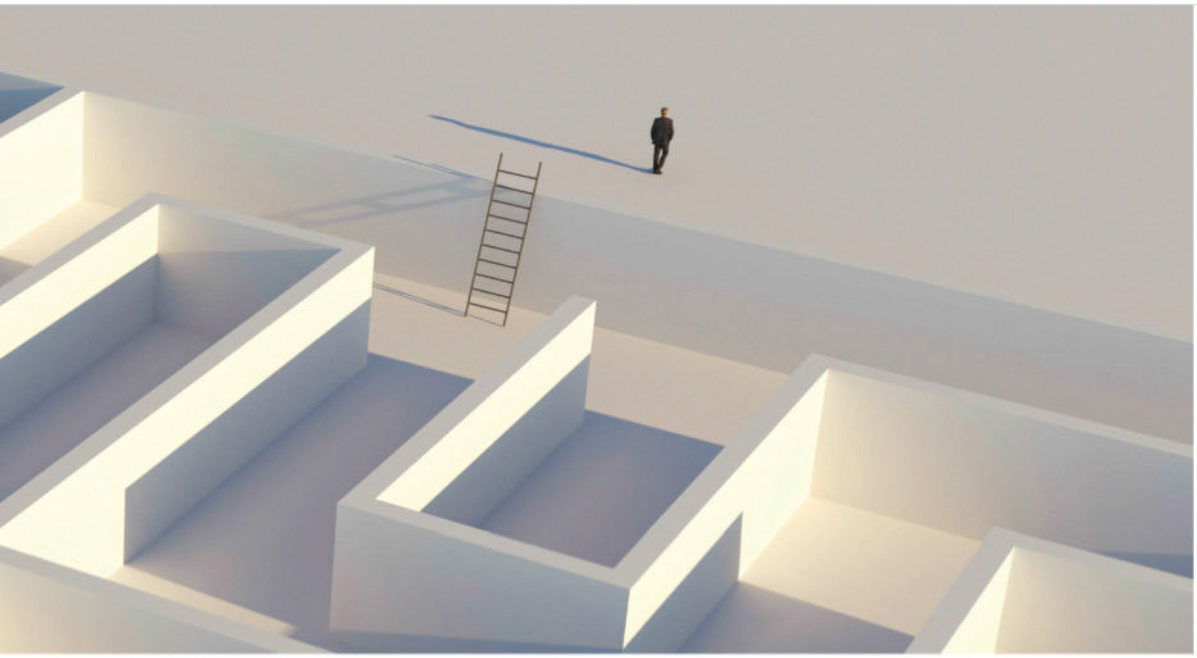
SVHS : Comment expliquer qu'un modèle capable de prouesses échoue sur des problèmes apparemment simples ?

S. M. : Il faut se méfier du mot "simple". Certaines questions nous paraissent élémentaires parce que nous disposons d'un immense contexte implicite que nous ne fournissons pas à la machine. Même en mathématiques, il arrive qu'un système perde le sens de la question. Mais je travaille avec des doctorants, et eux aussi peuvent mettre longtemps à comprendre ce qu'un problème demande réellement. Ce qui paraît évident à un enseignant repose en fait sur un bagage considérable. Si les données ou le contexte sont insuffisants, le modèle estime mal les probabilités et peut halluciner. Un étudiant qui n'a pas assez travaillé peut lui aussi tenter une réponse vraisemblable plutôt que reconnaître qu'il ne sait pas. Je ne dis pas que les phénomènes sont identiques, mais ils présentent une ressemblance.

G. P. : Il reste presque impossible de prévoir ce qui mettra un agent IA en difficulté. Cela m'arrive quotidiennement : un problème apparemment simple le fait échouer, tandis qu'un autre, beaucoup plus technique, est résolu rapidement. Ces échecs prennent rarement la forme d'une faute de calcul grossière. Le modèle introduit plutôt une hypothèse trop forte ou mal adaptée, puis développe un raisonnement très convaincant en apparence. La combinaison d'agent IA avec des assistants de preuve comme Lean devrait apporter des progrès spectaculaires. Ils vérifient formellement chaque étape d'une démonstration, au lieu de juger si le texte paraît plausible. Mais nous sommes encore loin d'une automatisation complète et fiable de la recherche.

SVHS : Ces outils ont-ils déjà changé votre manière de travailler ?

G. P. : Je les utilise presque à toutes les étapes : chercher des idées, explorer rapidement plusieurs pistes, programmer des expériences, tester des conjectures, repérer des erreurs ou proposer des variantes d'une démonstration. Ils sont



particulièrement utiles dans les phases d'exploration. En revanche, la direction scientifique, le choix des bonnes questions et la validation finale restent sous la responsabilité du chercheur. Dans un projet de recherche récent, je cherchais depuis près de cinq ans une analyse unifiée de la vitesse de convergence de plusieurs algorithmes. Des étudiants et moi-même avions obtenu des résultats partiels, mais nous restions bloqués. Sous ma direction, des agents de programmation ont exploré un grand nombre de pistes, jusqu'à faire émerger un ensemble d'approches cohérentes. Une partie importante des résultats a ensuite été certifiée dans Lean.

SVHS : ***Quel rôle restera-t-il aux mathématiciens ?***

S. M. : Pour l'instant, les grandes idées et les questions sont encore principalement formulées par des humains. Mais si la technicité et la profondeur des démonstrations passent progressivement du côté des machines, le métier devra évoluer. Cela ne rendra pas les mathématiques inutiles : elles resteront un langage qui permet aux humains de définir des abstractions, de simplifier et de comprendre. Ce questionnement est particulièrement important pour les jeunes qui commencent aujourd'hui leur carrière.

G. P. : Le bouleversement est déjà en cours. Le chercheur pourrait de moins en moins rester directement aux commandes de chaque étape d'une preuve, et davantage formuler les problèmes, définir les concepts, organiser les explorations et superviser la validation. Les effets les plus importants de cette transformation seront peut-être différents de ceux que nous imaginons aujourd'hui. Ces outils pourraient notamment permettre un déploiement sans précédent des mathématiques dans d'autres sciences, en particulier en biologie. ▪

> *« L'apport de l'IA vient de la boucle construite avec le chercheur : celui-ci oriente les recherches, critique les propositions et réinjecte ses observations »*

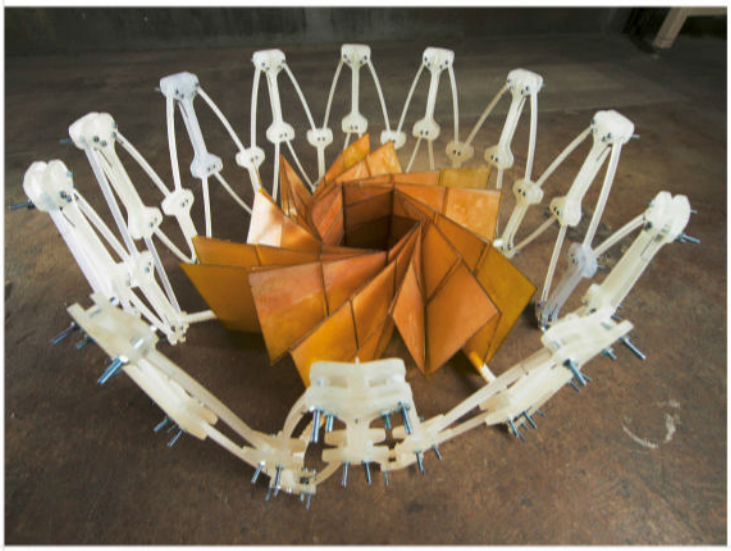
© ISTOCKPHOTO/GETTY IMAGES

Des origamis dans l'espace

L'art ancestral du pliage inspire désormais satellites déployables, robots médicaux, airbags, panneaux solaires spatiaux ou structures lunaires compactes. La preuve en images. PAR ADRIEN DENÈLE

Comment faire entrer une antenne de plusieurs dizaines de mètres ou un immense panneau solaire *(photo ci-dessous, en maquette)* dans la coiffe d'une fusée ? Pour trouver la réponse, les ingénieurs se tournent vers une source d'inspiration inattendue : l'origami (littéralement "plier le papier"). Non pas l'art du pliage en lui-même, mais les mathématiques qui le décrivent. *"Ce n'est pas l'origami qui est un langage mathématique, mais les mathématiques qui décrivent remarquablement bien l'origami"*, explique Robert J. Lang, physicien de formation, pionnier de l'origami computationnel et ancien chercheur du Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la Nasa. *"Cette compréhension a permis d'utiliser les méthodes de l'ingénierie aussi bien pour créer des œuvres artistiques que pour résoudre des problèmes techniques."*

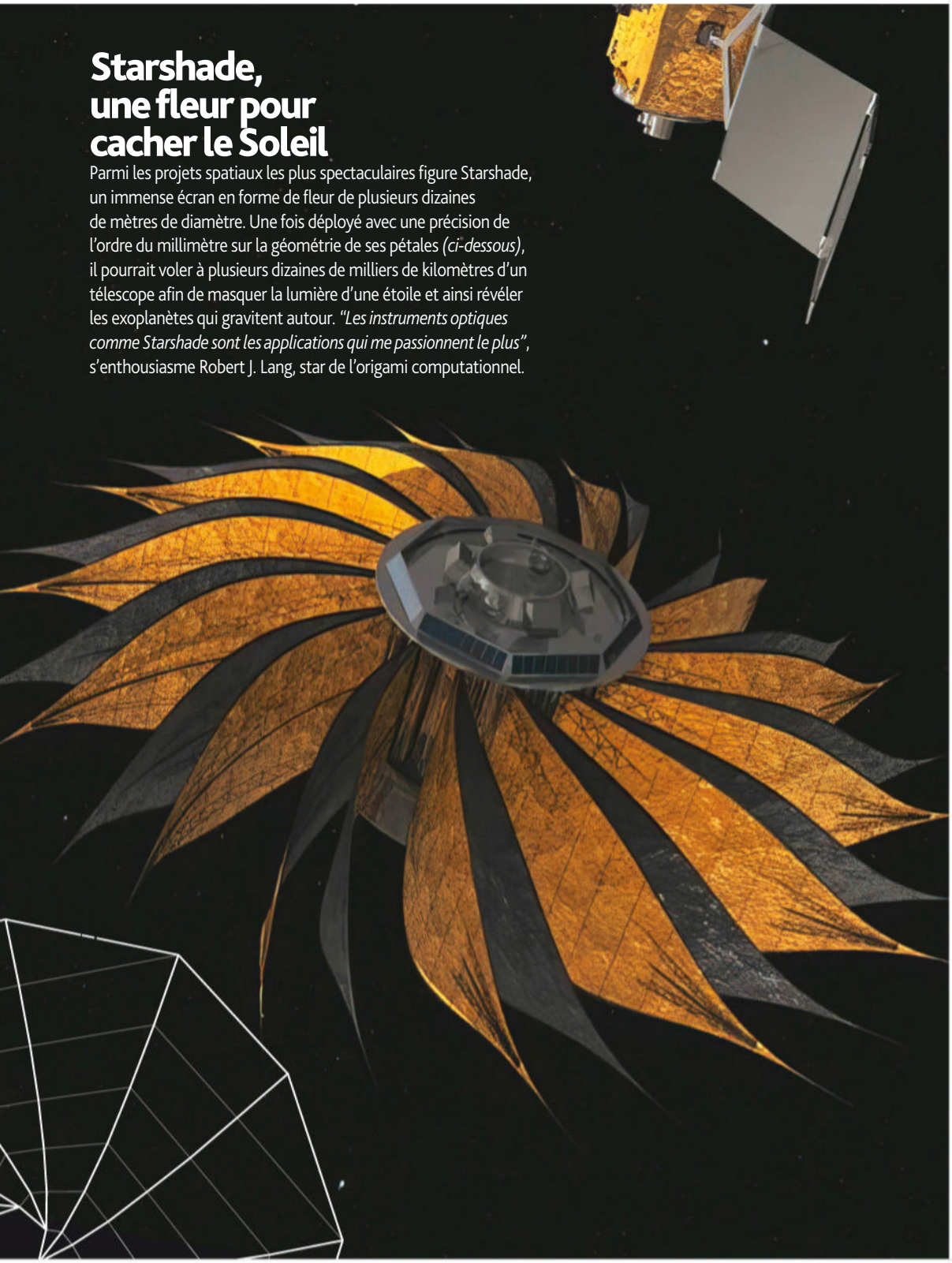
Depuis les années 1990, les mathématiciens décrivent un pliage comme un ensemble de contraintes géométriques : angles, longueurs, intersections, rigidité des faces ou encore ordre des plis. Plusieurs théorèmes, comme ceux de Kawasaki et de Maekawa, permettent de déterminer si un motif est effectivement pliable. Les chercheurs utilisent ensuite des algorithmes de géométrie computationnelle et des logiciels spécialisés, tels que TreeMaker, développé par Robert J. Lang, ou Origamizer, conçu par le Japonais Tomohiro Tachi, pour calculer automatiquement les lignes de pliage capables de produire une forme tridimensionnelle donnée. Les simulations vérifient ensuite que le déploiement pourra s'effectuer sans collision, sans déformation excessive et avec les tolérances exigées par les contraintes spatiales. ▪



© BYU PHOTO

Starshade, une fleur pour cacher le Soleil

Parmi les projets spatiaux les plus spectaculaires figure Starshade, un immense écran en forme de fleur de plusieurs dizaines de mètres de diamètre. Une fois déployé avec une précision de l'ordre du millimètre sur la géométrie de ses pétales *(ci-dessous)*, il pourrait voler à plusieurs dizaines de milliers de kilomètres d'un télescope afin de masquer la lumière d'une étoile et ainsi révéler les exoplanètes qui gravitent autour. *"Les instruments optiques comme Starshade sont les applications qui me passionnent le plus"*, s'enthousiasme Robert J. Lang, star de l'origami computationnel.



© NASA/JPL - IMAGE MODIFIÉE PAR IAL



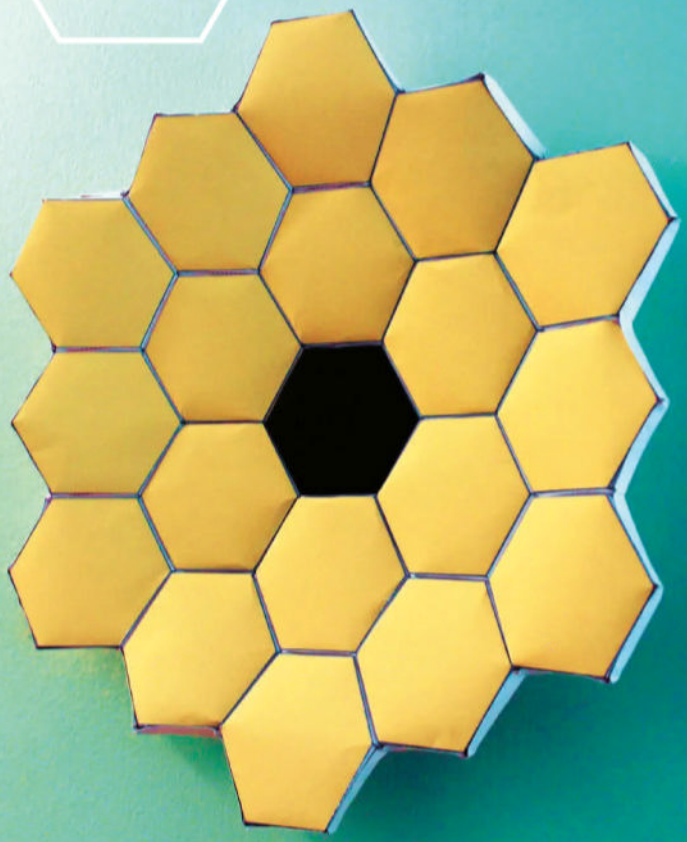
Le pli qui a changé la donne

Mis au point dans les années 1970 par le physicien japonais Kōryō Miura, le pli Miura permet de replier une grande surface plane en une forme compacte dans un volume réduit. Mais son véritable atout réside dans son mouvement. *"Le pli Miura est à la fois extrêmement simple et remarquablement efficace pour empaqueter une grande surface dans un petit volume,* explique Robert J. Lang. *Ce qui le rend unique, c'est son mouvement de pliage et de dépliage contrôlé par un seul degré de liberté."* Concrètement, toutes les facettes se déplacent simultanément : une seule action suffit à ouvrir ou refermer l'ensemble de la structure. Cette cinématique réduit le nombre de moteurs, de charnières et de points de défaillance, un avantage crucial dans l'espace où chaque mécanisme supplémentaire augmente les risques de panne.

Du papier au satellite



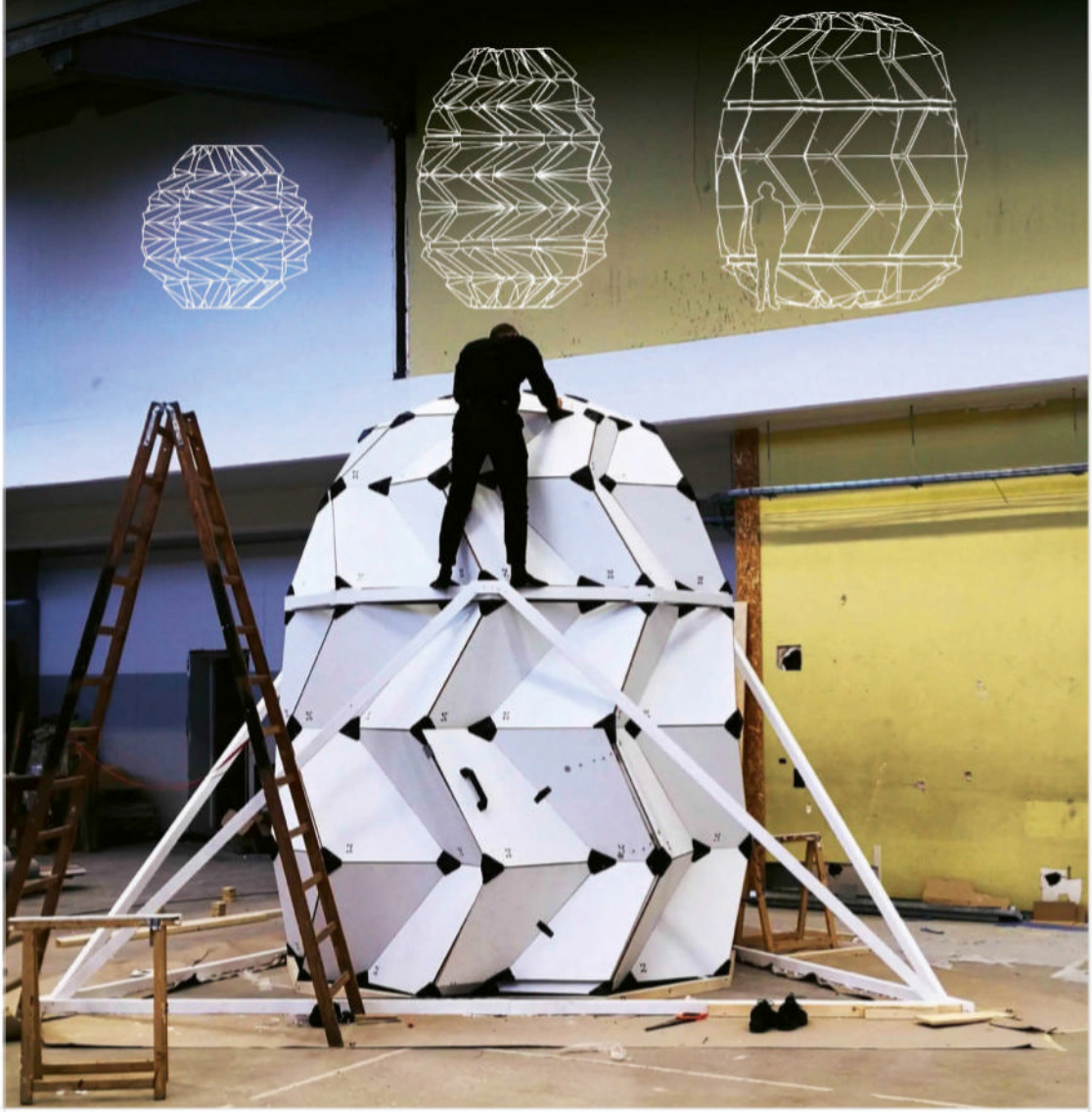
Un joli pliage ne fait pas un satellite. *"Dans une mission spatiale, le motif d'origami représente environ 1 % du chemin. Les 99 % restants, c'est de l'ingénierie spatiale"*, rappelle Robert J. Lang. Le papier *(comme cette maquette de miroir du télescope James-Webb, ci-dessous)* laisse place à des alliages d'aluminium, des composites en fibre de carbone ou des polymères haute performance. Les charnières doivent résister aux vibrations du décollage, supporter des centaines de cycles d'essais au sol, puis fonctionner parfaitement après plusieurs mois, voire plusieurs années, passées dans le vide spatial. Les amplitudes thermiques, qui peuvent dépasser 300°C d'écart entre les phases d'ensoleillement et d'ombre, provoquent en outre des dilatations qu'il faut anticiper dès la conception. Autre difficulté : sur Terre, la gravité déforme les grandes structures lors des essais *(comme ci-dessus, à l'occasion d'un test de déploiement du James-Webb)*, alors qu'elles fonctionneront ensuite en apesanteur. Les ingénieurs doivent donc multiplier les simulations numériques et les essais de compensation pour vérifier que le déploiement sera conforme une fois en orbite. Le déploiement mécanique du télescope spatial James-Webb n'a duré qu'une quinzaine de jours, mais il a nécessité des milliers d'heures de simulations et d'essais au sol.



© PETER SOOY/NASA – CHRIS GUNN/NASA - IMAGE MODIFIÉE PAR IAL

Des habitats spatiaux dépliables

La logique de l'origami pourrait s'étendre aux futures bases lunaires ou martiennes. Au lieu d'expédier des structures volumineuses, les ingénieurs imaginent des habitats transportés sous une forme compacte avant de se déployer automatiquement une fois arrivés à destination. L'objectif est simple : réduire au maximum le volume et la masse au lancement, deux paramètres qui conditionnent directement le coût d'une mission spatiale. Pour Robert J. Lang, cette perspective n'a plus rien de futuriste : *"Cette vision est tout à fait réaliste. Plusieurs entreprises investissent déjà des moyens importants dans des structures déployables pour les habitats spatiaux."* Parmi les acteurs explorant ces technologies figurent notamment Max Space, SAGA Space Architects ou AI SpaceFactory, aux côtés de programmes soutenus par la Nasa et l'Esa. Toutes ces approches ne reposent pas exclusivement sur l'origami : certaines combinent structures gonflables, composites ou mécanismes déployables.



© SAGA

BIENTÔT DANS SCIENCE&VIE

UN **DOSSIER INÉDIT** SUR

LA MATIÈRE NOIRE



Inclus dans votre abonnement :

- 12 numéros + 6 hors-séries.
- Version numérique à consulter sur **KiosqueMag.com**
- Accès illimité au site et à SCIENCE&VIE TV
- Podcasts de nos journalistes.
- Accès à La Science en direct, visioconférence animée par la rédaction.
- **EN CADEAU** Votre enceinte Bluetooth en ABS recyclé.

ÉCONOMISEZ 43%

89€

au lieu de ~~156,36€~~*

+



EN CADEAU

Votre **enceinte Bluetooth**

PROFITEZ-EN en scannant le QR code ci-dessus ou rendez-vous sur **bit.ly/svhs-328**

Bulletin d'abonnement à compléter et à retourner sous enveloppe affranchie à : Service abonnements Science & Vie - 59898 Lille Cedex 9

M030 # D1654680

① Je choisis la formule d'abonnement (je coche la case) :

☐ **Formule annuelle avec hors-séries :** 12 numéros + 6 hors-séries + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) **+ l'enceinte Bluetooth en cadeau** (1) — **89€** au lieu de ~~156,36€~~* **-43%**

☐ **Formule annuelle :** 12 numéros + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) **+ l'enceinte Bluetooth en cadeau** (2) — **69€** au lieu de ~~113,64€~~* **-39%**

Mon abonnement se renouvellera automatiquement à date anniversaire sauf résiliation de ma part.

☐ **Formule mensuelle :** 1 n° par mois + 1 hors-série tous les 2 mois + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) (3) — **3€** le 1er mois au lieu de ~~13,09€~~* **-76%**

Je résilie quand je le souhaite. Après le premier mois, je serai prélevé de 7,20€/mois.

② Je choisis le mode de paiement :

Par prélèvement automatique :

je complète l'iban ci-dessous à l'aide de **mon Relevé d'Identité Bancaire (R.I.B) à joindre.**

IBAN :

Vous autorisez Reworld Media Magazines à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de Reworld Media Magazines. Créancier : Reworld Media Magazines 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux - France. Identifiant du créancier : FR 05 ZZZ 489479

Date et signature obligatoires

Date : ☐☐/☐☐/☐☐

Par carte bancaire :

je me rends sur KiosqueMag.com :

bit.ly/svhs-328

La boutique officielle de Science & Vie.

Plus simple, plus rapide, 100% sécurisé !

Par chèque

(formules annuelles uniquement) **:**

je renvoie le coupon accompagné de mon chèque libellé au nom de Science & Vie (sans agrafe, ni scotch) à : Science & Vie Service abonnement - 59898 Lille Cedex 9

SCANNEZ-MOI !

③ Je complète les coordonnées du bénéficiaire de l'abonnement :

** À remplir obligatoirement.

Nom** : Prénom** :

Adresse** :

CP** : Ville** :

Date de naissance : / / (pour lui fêter son anniversaire) Tél. (portable de préférence) : (envoi d'un SMS en cas de problème de livraison)

Email :

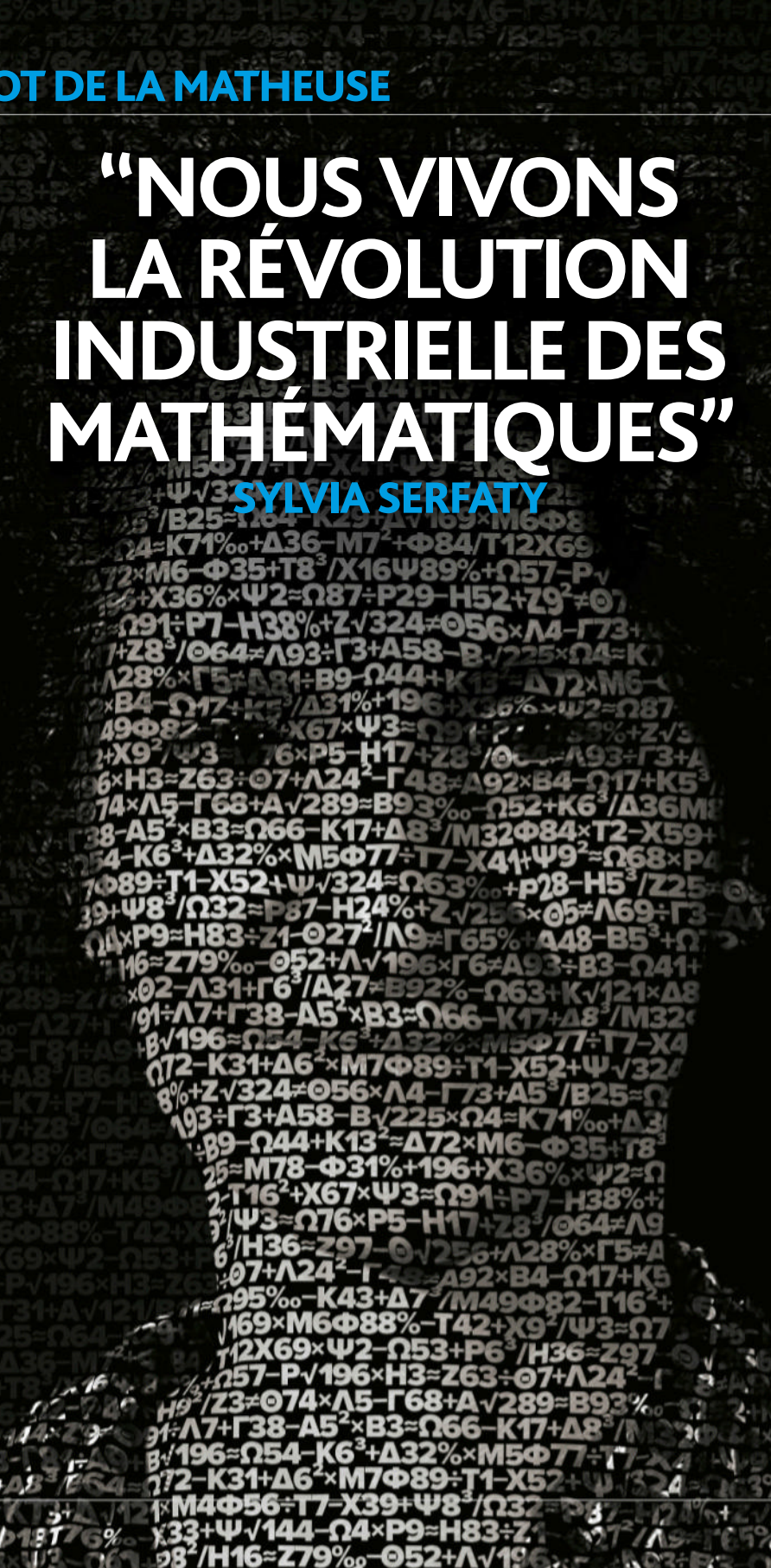
☐ Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège Science&Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande par la Poste, e-mail et téléphone. Dommage !

☐ Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. Dommage !

*Le prix de référence à l'année de la formule sans hors-série se compose du prix kiosque (63,60€), des frais de port (8,64€), du site internet (41,40€). Le prix de référence à l'année de la formule avec hors-série se compose du prix kiosque (105€), des frais de port (9,96€), du site internet (41,40 €). (1)(2) Formule annuelle avec engagement : abonnement automatiquement reconduit à date d'anniversaire. Le règlement s'effectue en une seule fois. Vous serez informé par écrit dans un délai de 3 mois avant le renouvellement de votre abonnement. Vous aurez la possibilité de l'annuler 30 jours avant la date de reconduction auprès du service client. A défaut l'abonnement sera reconduit pour une durée identique à votre abonnement initial. (3) Formule mensuelle sans engagement : je peux résilier à tout moment sur simple appel ou par courrier au service client. Je paie 2€ le 1er mois. Après le 1er mois, je serai prélevé de 5,80€/mois. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur kiosquemag.com et contacter le service client par mail sur serviceabomag.fr ou encore par courrier à Reworld Media Magazines - Service Client - 40 avenue Aristide Briand - 92227 Bagneux.Offre réservée aux nouveaux abonnés en France Métropolitaine valable jusqu'au 24/11/2026. DOM-TOM et autres pays nous consulter. Vous disposez, conformément à l'article L 221-18 du code de la consommation, d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception du magazine en notifiant clairement votre décision à notre service abonnement. Les informations demandées sont destinées à la société REWORLD MEDIA MAGAZINES (KiosqueMag) à des fins de traitement et de gestion de votre commande, de la relation client, des réclamations, de réalisation d'études et de statistiques et, sous réserve de vos choix, de communication marketing par KiosqueMag et/ou ses partenaires par courrier, téléphone et courrier électronique. Vous bénéficiez d'un droit d'accès, rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-DPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand – 92220 Bagneux, ou par mail à dpd@reworldmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour en savoir plus sur la gestion de vos données personnelles, vos droits et nos partenaires, consultez notre politique de Confidentialité sur www.kiosquemag.com.

“NOUS VIVONS LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE DES MATHÉMATIQUES”

SYLVIA SERFATY



Dans son dernier livre *, la mathématicienne Sylvia Serfaty déclare son amour à sa discipline, aujourd'hui bouleversée par l'IA.

PROPOS RECUEILLIS PAR HÉLOÏSE RAMBERT

SVHS : Comment est né votre intérêt pour les mathématiques ?

Sylvia Serfaty : De manière soudaine et inattendue, au lycée. J'ai eu une sorte d'intuition fulgurante que la recherche en mathématiques pourrait convenir à ma tournure d'esprit, alors que je n'en connaissais pas du tout les réalités. J'ai passé plus d'une heure sur la résolution d'un problème, mais j'étais tellement absorbée que je n'ai pas vu le temps passer. J'ai proposé ma propre solution et j'ai bien vu dans le regard de ma prof que ce n'était pas celle attendue. C'est justement pour faire découvrir ces aspects-là des mathématiques – la beauté d'une idée qui germe, la créativité – que j'ai voulu écrire ce livre.

SVHS : Vous expliquez que l'IA est en train de tout changer à la recherche mathématique.

S. S. : Tout a changé il y a moins d'un an. Jusque-là, on pouvait faire de petites simulations numériques, mais les maths théoriques se faisaient entièrement à la main, de manière artisanale. On a tous travaillé avec un papier et un crayon, avec des collaborateurs, des discussions. Les projets pouvaient durer des années pour aboutir à la réponse et sa rédaction. C'était une quête intérieure. Lors de l'émergence de l'IA "grand public" comme ChatGPT, nombre de chercheurs étaient sceptiques, voire en riaient. Il faut dire qu'elle se trompait beaucoup en répondant à des questions mathématiques. Nous manquons souvent d'imagination et de capacité à nous projeter dans quelque chose qui va évoluer. Au tournant de 2026, les mathématiciens sont sortis du déni face aux performances de l'IA. Pour moi, c'est l'équivalent de la révolution industrielle. Un article qui nous aurait pris deux ans est maintenant bouclé en deux mois. On ne sait même pas ce qu'on va faire de cette masse de résultats.

> *« Avec l'IA, un article qui nous aurait pris deux ans est maintenant bouclé en deux mois »*

SVHS : Que ressentez-vous face à cette perspective ? Et vos collègues ?

S. S. : Cela dépend des tempéraments. Pour les chercheurs qui se sentent plus artisans, méditatifs, comme moi, il y a un deuil à faire. Certains sont vraiment troublés et ne veulent pas adopter l'IA. D'autres au contraire y voient une opportunité et la saisissent. Les plus jeunes peuvent être angoissés. Ils se demandent sur quoi ils vont être jugés, tandis qu'à un âge comme le mien, on a une légitimité sur ce qu'on a produit sans assistance.

SVHS : Quel est l'avenir de votre discipline ?

S. S. : Vouloir faire de la résistance à l'IA me semble illusoire, même s'il faut réfléchir à la manière de l'encadrer et de la distribuer. C'est un outil incroyablement puissant. Du point de vue des résultats, de la connaissance, on y gagne collectivement. Et puis, malgré ce changement de paradigme, et si on ne devient pas complètement caduc, le talent compte encore. Il y a plusieurs dimensions. Certains mathématiciens sont avant tout de très bons techniciens, de très bons *"problem solver"*. Avant il y avait une prime à la technicité, mais elle va perdre de sa valeur. Il faut avoir une vision, savoir poser les bonnes questions à l'IA, tester des hypothèses. Avoir une sorte de démarche expérimentale, en somme. Les chercheurs davantage portés sur cet aspect ont pour le moment un avantage. Mais l'IA pourrait très rapidement être capable de poser elle-même ses propres questions et développer ses propres concepts. Les avis divergent. Même les mathématiciens les plus influents et célèbres tendent encore à sous-estimer ce que pourrait faire l'IA. ▪

*Des équations personnelles, *éd. Flammarion, 224 p., 20 €.*

© BERNARD MARTINEZ

Bibliographie



LE THÉORÈME DU PARAPLUIE

De Mickaël Launay, éd. J'ai lu, 2021, 352 p., 8,80 €.

Voici une loi mathématique dont vous n'avez peut-être jamais entendu parler. Selon la loi de Benford, le premier chiffre d'un nombre d'une série se répartit de la façon suivante : 30,1 % pour le 1, 17,6 % pour le 2, et ainsi de suite en décroissant jusqu'au 9. Autrement dit, quand nous tombons sur un nombre dans la vie de tous les jours, par exemple le prix du pain ou la longueur d'une frontière entre deux pays, nous avons de fortes chances qu'il commence par un 1. Surpris ? Vous le serez bien plus encore en lisant les pages écrites par Mickaël Launay, youtubeur amateur de maths et de physique (l'animateur de la chaîne Micmaths sur le web, c'est lui). Loi de la gravitation, théorie de la relativité, géométrie non euclidienne… Tout ce qui a pu vous passionner – ou vous faire dresser les cheveux sur la tête – au lycée trouve une explication limpide dans cet ouvrage plaisamment sous-titré *L'art d'observer le monde dans le bon sens*.



ALGORITHMES, MOINES ET MARCHANDS

de Giorgio Ausiello, éd. Odile Jacob, 2026, 240 p., 25,90 €.

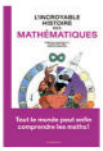
Ingénieur informatique, mais aussi amateur d'histoire, Giorgio Ausiello retrace la renaissance des mathématiques dans l'Italie du Moyen Âge. À partir du XIIIe siècle, les lettrés italiens se passionnent pour un art du calcul tour à tour trivial ou spéculatif, hérité des Arabes, des Grecs et des Indiens. Ils seront vite rejoints par une kyrielle de commerçants, notaires, changeurs et autres banquiers soucieux de compter au plus juste. C'est l'époque des livres "d'abaque", des ouvrages contenant des tables de nombres – l'ancêtre de nos tables de multiplication – et des algorithmes présentés comme autant de recettes permettant de venir à bout des calculs retors. Toute une épopée !



LE CHOIX DU MEILLEUR URINOIR

De Jérôme Cottanceau, éd. Belin, 224 p. (Paru en 2016, il n'est pas facile à trouver neuf, prévoir plutôt un achat d'occasion, de 6 € à 12 €.)

Rédigé par un professeur agrégé, voici l'ouvrage qui fait aimer les mathématiques, abordées de façon ludique en 20 questions plus ou moins décalées. Comment couper un gâteau en parts équitables ? Comment (bien) carreler sa salle de bains ? Quelle équation paramétrique donne une courbe en forme de Pikachu ? Et, comme l'indique le titre de cet ouvrage aussi sérieux qu'amusant, quelle est la meilleure façon de choisir un urinoir ?



L'INCROYABLE HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES

de Quentin Lazzarotto, Avner Bar-Hen et Tristan Garnier, éd. Les Arènes BD, 2026, 320 p., 26 €.

Voici l'épopée des mathématiques, de ses maîtres et des civilisations qui les ont pensées, le tout croqué dans un surprenant roman graphique. L'origine de tout cela ? Une IA, nommée Mesh, qui part à la recherche de ses origines. Ce voyage commence à Ishango, en Afrique, il y a plus de 20 000 ans, où de mystérieux os striés pourraient témoigner d'anciennes pratiques de dénombrements, avant l'apparition des premiers systèmes de numération. Mesh croise également la route de Galilée, Pythagore, Thalès, Hypatie, Fibonacci, Ada Lovelace, Alan Turing… et même Cédric Villani et sa lavallière. Chaque concept mathématique ou théorie est incarné par son penseur ou expliqué par un mathématicien contemporain, le tout grâce à un dessin ou une définition, dans laquelle la pensée philosophique a aussi toute sa place. Un étonnant récit à mettre entre toutes les mains, celles des spécialistes comme celles des néophytes. ▪

C'est dit

"Il est impossible d'être mathématicien sans avoir une âme de poète."

SOFIA KOVALEVSKAÏA, ***MATHÉMATICIENNE RUSSE (1850-1891)***

"La géométrie est l'art de raisonner juste sur des figures fausses."

RENÉ DESCARTES, ***MATHÉMATICIEN ET PHILOSOPHE (1596-1650)***

SCIENCE&VIE

MÀJ

L'INFO SCIENTIFIQUE
MISE À JOUR



Quel avenir pour les greffes d'organes ?

Alors que 6 148 greffes d'organes ont été réalisées en France en 2025, plus de 23 000 patients attendent encore leur greffon. L'ambitieux Plan greffe 2022-2026 n'a donc pas donné tous les résultats escomptés. Que vaut notre système de transplantation ? Réponses avec deux expertes.

PHYSIQUE

A-T-ON CAPTURÉ DE LA MATIÈRE NOIRE ?

Au cœur du détecteur souterrain Lux-Zeplin, un noyau de xénon est entré en collision avec… quelque chose.

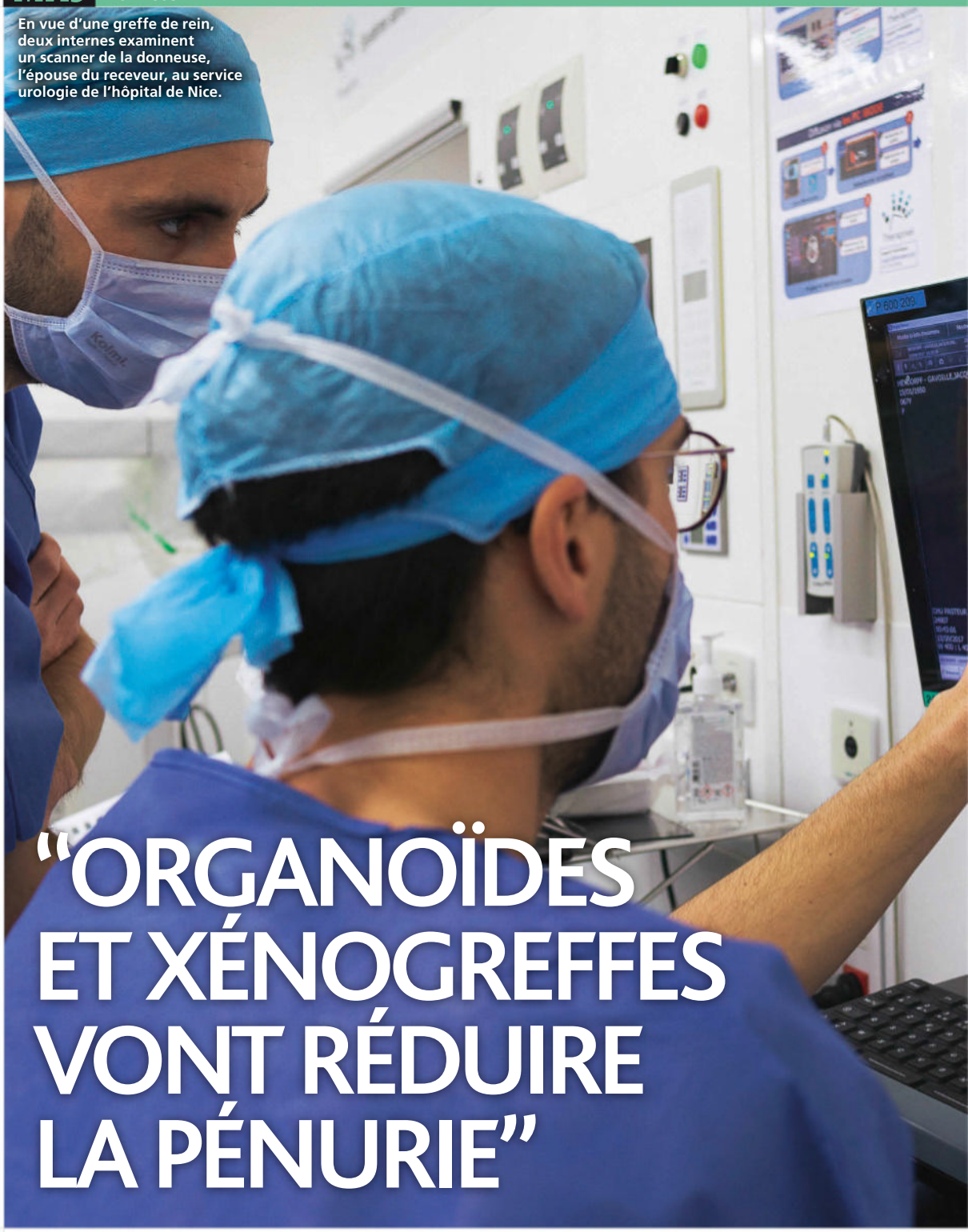
EN DIRECT DES LABOS

NOUVEAU

LES LIONNES SE CACHENT POUR METTRE BAS

Marion Valeix, écologue, témoigne : "quand nous avons posé nos micros dans la savane, nous nous attendions à tout sauf à ça".

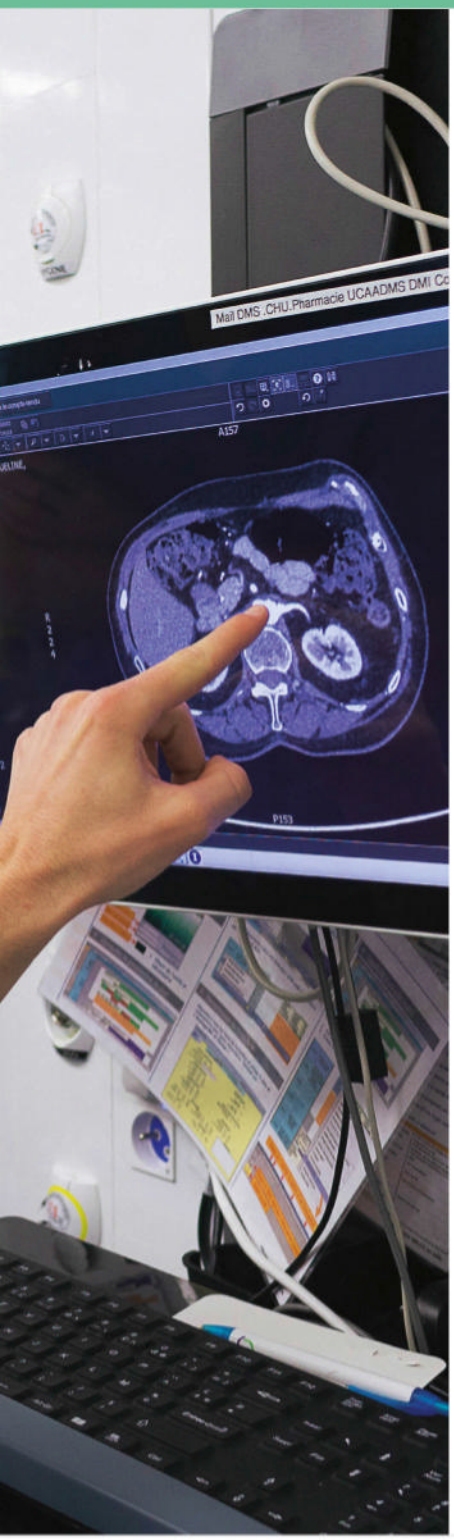
© BURGER/PHANIE/AFP



En vue d'une greffe de rein, deux internes examinent un scanner de la donneuse, l'épouse du receveur, au service urologie de l'hôpital de Nice.

"ORGANOÏDES ET XÉNOGREFFES VONT RÉDUIRE LA PÉNURIE"

© A. NOOR/BSIP/AFP



Greffons bioartificiels, conservation des organes, adhésion de l'opinion publique… Laure Esposito * et Yvanie Caillé ** font le point sur les avancées dans ce domaine.

PROPOS RECUEILLIS PAR MICHAËL DUCOUSSO

SVHS : Où en est le secteur des greffes et transplantations en France par rapport au reste du monde ?



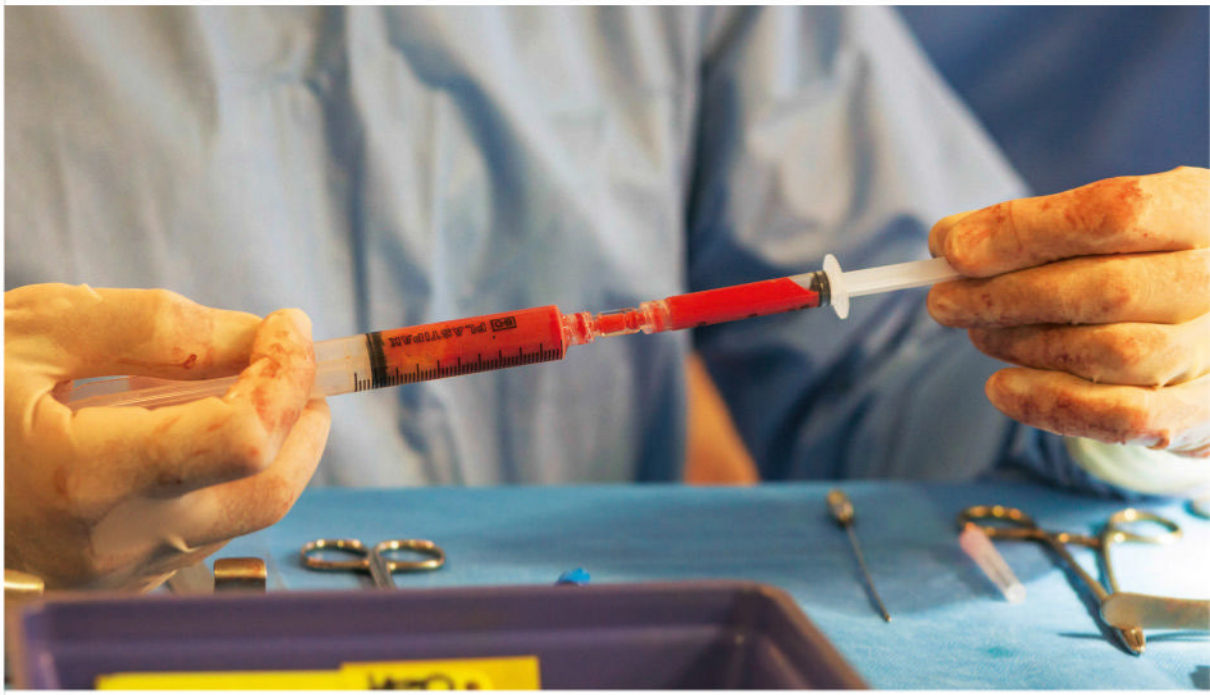


Laure Esposito : La France est plutôt bien positionnée à l'échelle internationale, mais elle est encore loin d'un équilibre entre l'offre d'organes et les besoins ; et à l'échelle mondiale, la question de l'accès à la transplantation est beaucoup plus critique encore. Avec un système relativement structuré, l'activité est en progression, mais pas encore suffisamment au vu du nombre de patients en attente et du nombre de décès sur liste d'attente. La France reste confrontée, comme la plupart des pays, à un déficit d'organes par rapport aux besoins. La progression française a notamment été portée par les prélèvements à cœur arrêté *[impliquant en particulier le protocole Maastricht 3, qui autorise le prélèvement d'organes sur des patients en arrêt circulatoire suite à une décision thérapeutique de limitation des soins, NDLR]*, en hausse de 12,8 %.

Yvanie Caillé : Nous disposons d'un système de transplantation de grande qualité, mais nous ne comptons plus parmi les plus performants. L'Espagne est la référence : en 2024, elle comptait environ 53 donneurs décédés prélevés par million d'habitants, contre 28 en France, et réalisait 83 greffes rénales par million d'habitants contre environ 55 en France. Ce qui est intéressant dans l'exemple espagnol, c'est qu'il montre que la pénurie n'est pas une fatalité. C'est avant tout l'organisation du prélèvement qui permet de mieux identifier et mobiliser les donneurs potentiels.

SVHS : À quoi ont abouti les efforts du Plan greffe ?

L. E. : Le constat est plutôt nuancé. Le plan a effectivement inversé la baisse post-Covid et permis une progression importante de l'activité, mais plusieurs objectifs structurels – notamment le don vivant et la réduction de l'opposition *[des familles des donneurs, NDLR]* – restent en deçà des ambitions initiales. Le déficit chronique entre le nombre de patients ayant besoin d'une greffe et le nombre d'organes disponibles n'est pas résolu. On recense ainsi 1 000 décès par an sur la liste des patients en attente de don. La population française est majoritairement favorable au don, mais au moment du décès, une proportion importante des prélèvements n'aboutit pas.



Lors d'une autogreffe, des cellules graisseuses sont prélevées dans une zone, par exemple le ventre ou les cuisses, avant d'être réinjectées dans une autre partie du corps du même patient.

Le problème n'est donc pas uniquement médical ou chirurgical. Il est aussi organisationnel, culturel et éducationnel.

Y. C. : À mon sens, ce plan est un échec puisque nous restons en dessous des objectifs fixés en termes de greffes. Nous sommes vraiment en retard par rapport à l'Espagne, alors que la législation est quasiment la même – avec la notion de consentement présumé – et que le taux de personnes favorables au don est similaire. Mais le gouvernement espagnol a mis en place une politique et une organisation de priorisation du prélèvement à l'hôpital depuis au moins trente ans, et lui a alloué les ressources humaines nécessaires.

SVHS : ***La France tente de rattraper ce retard avec le développement des prélèvements sur des patients relevant du protocole Maastricht 3, quelle est notre marge de progression ?***

Y. C. : La comparaison avec l'Espagne est spectaculaire. Les donneurs prélevés après arrêt circulatoire représentent plus de la moitié des donneurs décédés en Espagne, contre seulement 17 % en France. Cela montre l'ampleur de notre marge de progression sur ce point. La France est partie tardivement : le prélèvement Maastricht 3 (M3) n'y est autorisé que depuis 2014 et son déploiement a été progressif, reposant sur des conventions avec les hôpitaux concernés. Mais cela nécessite une organisation hospitalière particulièrement robuste et l'accompagnement des proches est crucial.

L. E. : La classification Maastricht 3 répond à des règles très strictes, notamment sur le plan éthique, et l'accompagnement des familles est très important. C'est un cheminement profondément humain où la douceur des soins et le respect de la vie qui s'éteint restent les seules

> *« À mon sens, le Plan greffe est un échec. Nous sommes vraiment en retard par rapport à l'Espagne »*

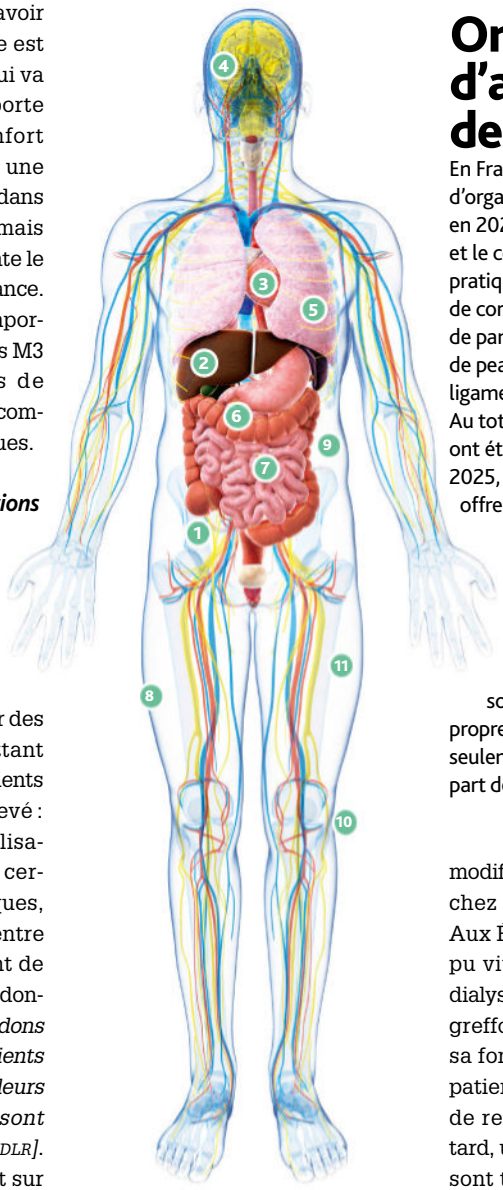
© PHANIE

priorités. Pour les familles, savoir que la volonté de leur proche est respectée et qu'une part de lui va aider quelqu'un d'autre apporte souvent un immense réconfort dans le deuil. Cela demande une organisation assez complexe dans les centres de réanimation, mais c'est une solution qui augmente le pourcentage de greffes en France. Le rendement médical est important : en 2024, les 307 donneurs M3 prélevés ont permis plus de 800 greffes, dont des greffes combinées et des îlots pancréatiques.

SVHS : ***Quelles sont les innovations médicales qui vous semblent les plus prometteuses ?***

L. E. : Les progrès récents concernent d'abord la conservation et la réhabilitation des organes. Les innovations portent également sur des stratégies nouvelles permettant l'accès à la greffe chez des patients ayant un taux d'anticorps élevé : les techniques de désensibilisation permettent de réduire certains obstacles immunologiques, tandis que les dons croisés entre donneurs vivants permettent de réaliser des greffes lorsque le donneur n'est pas compatible *[les dons croisés permettent à deux patients d'être greffés, en échangeant leurs donneurs avec lesquels ils sont eux-mêmes incompatibles,* NDLR*]*. Enfin, des recherches portent sur la tolérance immunologique, la xénotransplantation à partir de porcs génétiquement modifiés et les organes bioartificiels. Ces approches pourraient, à plus long terme, contribuer à réduire fortement la pénurie d'organes.

Y. C. : L'avancée la plus impressionnante est sans doute la xénogreffe, c'est-à-dire la transplantation d'organes de porcs génétiquement modifiés sur l'humain. On en entend beaucoup parler depuis quelques années, car la xénogreffe connaît un nouvel essor, notamment en Chine et aux États-Unis. Des reins de porcs génétiquement modifiés ont désormais été greffés chez plusieurs patients vivants. Aux États-Unis, l'un d'eux a ainsi pu vivre près de neuf mois sans dialyse grâce à son rein de porc. Le greffon a progressivement perdu sa fonction et a dû être retiré ; le patient a repris les dialyses avant de recevoir, quelques mois plus tard, un rein humain. Ces résultats sont très encourageants, mais la xénogreffe reste aujourd'hui expérimentale et soulève d'importants enjeux médicaux, éthiques et sociétaux : durée de fonctionnement des greffons, risque de rejet, effets de l'immunosuppression, risque infectieux, consentement dans un contexte d'incertitude, statut et bien-être des animaux, ou



On greffe d'abord des reins

En France, 63 % des greffes d'organes concernent des reins (1) en 2025. Suivent le foie (2) à 23 % et le cœur (3) à 7 %. Les médecins pratiquent également des greffes de cornées (4), de poumons (5), de pancréas (6), intestinales (7), de peau (8), de tendons (9), de ligaments (10) et d'os massif (11). Au total, 6 148 greffes d'organes ont été réalisées en France en 2025, un record national. Cette offre reste toutefois insuffisante, puisque 23 294 patients étaient inscrits sur la liste nationale d'attente au 1er janvier 2026. Paradoxe français : alors que 74 % de nos compatriotes interrogés sont favorables au don de leurs propres organes après leur mort, seulement 49 % d'entre eux ont fait part de leur avis à leur entourage.

© SEBASTIAN KAULITZKI/ADOBE STOCK

encore équité d'accès. C'est pourquoi le CCNE (Comité consultatif national d'éthique) a ouvert la voie à cette recherche en France tout en recommandant qu'un large débat de société puisse avoir lieu.

SVHS : ***La xénogreffe est-elle une solution plus prometteuse que l'usage d'organoïdes issus de cellules souches ou d'organes artificiels ?***

L. E. : Aujourd'hui, la xénogreffe est proposée pour remplacer un organe entier dans le cadre de travaux de recherche. Des reins de porcs génétiquement modifiés sont désormais testés dans des essais cliniques chez l'humain. Mais le rejet immunologique à moyen terme, la durée de fonctionnement de l'organe et le risque infectieux restent des obstacles importants. Les cellules souches ou organoïdes ont un potentiel théorique plus important : si l'on parvient à fabriquer un organe humain complet vascularisé et fonctionnel, durable, à partir des propres cellules du patient, on pourrait résoudre les problèmes de pénurie et de rejet.

Y. C. : Les projets de reins bioartificiels implantables restent encore très éloignés d'une application clinique. Aux États-Unis, une équipe travaille sur ce sujet depuis plus de vingt-cinq ans sans avoir encore atteint le stade des essais cliniques chez l'être humain, ce qui montre l'ampleur des difficultés scientifiques et technologiques à surmonter. À l'inverse, les progrès dans le domaine des xénogreffes ont été très rapides : on est passé en quelques années des premières greffes compassionnelles expérimentales au lancement d'essais cliniques. Cela ne permet évidemment pas de préjuger de leur succès à long terme, mais, à ce stade, cette voie me paraît plus



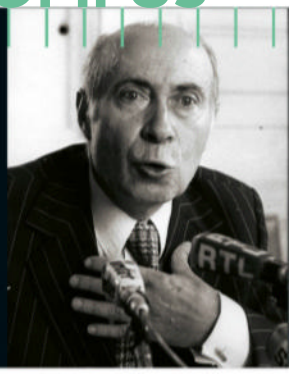
74 ANS DE PROGRÈS ININTERROMPUS



1952
Jean Hamburger réalise la première greffe rénale entre une mère et son fils, Marius Renard, à l'hôpital Necker à Paris.



1968
Christian Cabrol réalise la première transplantation cardiaque en Europe, à l'hôpital de la Pitié Salpêtrière. Quelques mois plus tôt, le chirurgien sud-africain Christiaan Barnard réalisait la première mondiale.



© L'ALSACE/MAXPPP - MICHELINE PELLETIER/GAMMA-RAPHO - ANDRÉ SAS/GAMMA RAPHO - KEYSTONE PICTURES USA/ZUMAPRESS/MAXPPP



Des boîtes contenant des prélèvements de peau sont déposées dans une valise isotherme avant d'être envoyées à la Banque des tissus et cellules des Hospices civils de Lyon.

> *« La greffe humaine, par principe gratuite, nécessite un suivi moins lourd. Et la survie d'un greffon humain est de 15 à 25 ans »*

avancée et plus susceptible d'aboutir à une application clinique.

SVHS : ***Cela pose-t-il davantage de problèmes d'éthique ?***

L. E. : L'idée n'est pas d'opposer progrès médical et respect des principes, mais d'encadrer strictement la pratique par une progression par étapes, avec des essais contrôlés et une surveillance à long terme. L'enjeu éthique est de permettre aux xénogreffes de répondre à la pénurie d'organes sans négliger le bien-être animal, la sécurité des patients et l'équité d'accès.

Y. C. : La xénogreffe soulève des questions éthiques majeures, notamment concernant l'éthique animale, qui doivent pouvoir être débattues de manière transparente. Elle interroge également le modèle économique dans lequel ces innovations se développent : aux États-Unis, la recherche est largement portée par des entreprises de biotechnologie, avec la perspective de greffons commercialisés, alors que la greffe humaine repose en France sur le principe de gratuité du don. Du point de vue des patients, la perspective de pouvoir sortir de la dialyse, voire de l'éviter est évidemment majeure. Mais le bénéfice attendu d'une xénogreffe doit aussi être apprécié au regard de ses contraintes propres : une immunosuppression aujourd'hui très lourde, une surveillance extrêmement rapprochée et de nombreuses incertitudes sur la durée de fonctionnement du greffon. Le recul actuel est de l'ordre de quelques mois, alors que la greffe humaine bénéficie de plusieurs décennies d'expérience et permet couramment un fonctionnement du greffon pendant de nombreuses années. ▪

**Laure Esposito est néphrologue au CHU de Toulouse et membre de la Société francophone de transplantation.*
***Yvanie Caillé est présidente fondatrice de Renaloo et membre du Comité consultatif national d'éthique.*

1976
La loi Caillavet encadre le prélèvement d'organe en fixant notamment le principe du consentement présumé.



2005
Première greffe partielle de visage au monde, réalisée à Amiens par les équipes des docteurs Bernard Devauchelle et Jean-Michel Dubernard.

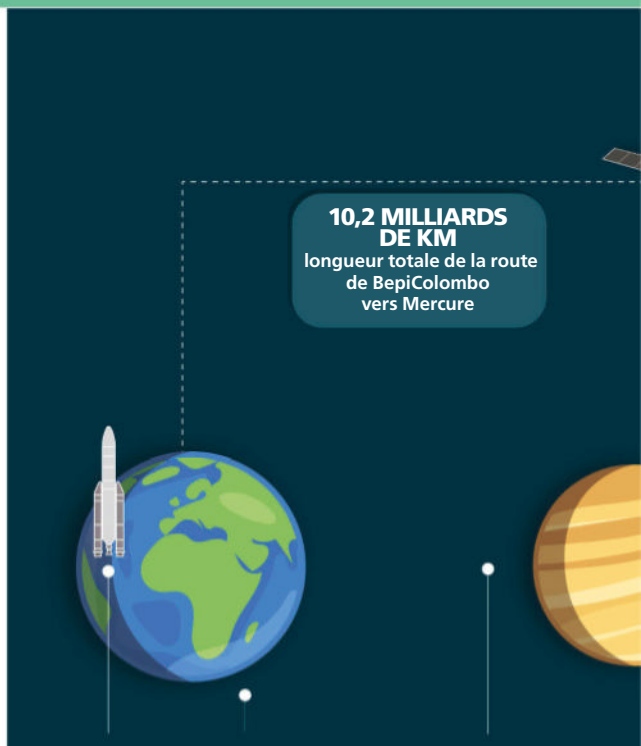


2024
Première greffe d'un rein de porc génétiquement modifié chez un patient humain, au Massachusetts General Hospital, à Boston.

© DENIS CHARLET/ AFP - MICHELLE ROSE/MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL/AFP

Un vol de 8 ans vers Mercure

Après huit ans de voyage et 10,2 milliards de kilomètres parcourus depuis son lancement en 2018, la sonde européo-japonaise BepiColombo touche au but. Jeudi 3 septembre, elle a entamé sa délicate phase d'arrivée autour de Mercure, la planète la plus proche du Soleil. Les deux orbiteurs qui la composent, MPO (Mercury Planetary Orbiter), de l'Agence spatiale européenne (ESA), et Mio (Mercury Magnetospheric Orbiter), de l'Agence spatiale japonaise, se sont détachés du module qui les propulsait depuis le décollage. Une fois stabilisés sur leur orbite définitive, à partir d'avril 2027, ils entameront une campagne scientifique très attendue. MPO scrutera la surface et la composition interne de Mercure, entre 480 km et 1 500 km d'altitude, tandis que Mio étudiera son champ magnétique sur une orbite elliptique culminant à 11 640 km. *"Avant BepiColombo, Mercure n'avait été 'orbitée' que par une seule sonde* [Messenger, entre 2011 et 2015, NDLR]. *Il reste donc beaucoup à en comprendre"*, rappelle Elsa Montagnon, responsable d'opérations à l'ESA. Mais les défis sont nombreux. Contrairement aux sondes envoyées vers les planètes externes (comme Saturne ou Jupiter), qui doivent accélérer, BepiColombo doit, elle, perdre un maximum d'énergie pour approcher Mercure à une vitesse raisonnable sans être happée par l'attraction du Soleil. Pour y parvenir, elle a emprunté un itinéraire tortueux, multipliant les survols planétaires pour freiner et courber sa trajectoire. Il faut aussi résister à une chaleur écrasante, la surface de Mercure pouvant atteindre 450°C. MPO comporte un revêtement ultra isolant ainsi que des radiateurs évacuant la chaleur du côté du satellite tourné en permanence vers l'espace. Prochaine étape scrutée de près : la séparation des deux sondes, encore accouplées, prévue en décembre, *"sans doute la manœuvre la plus critique à venir"*, prévient Elsa Montagnon.

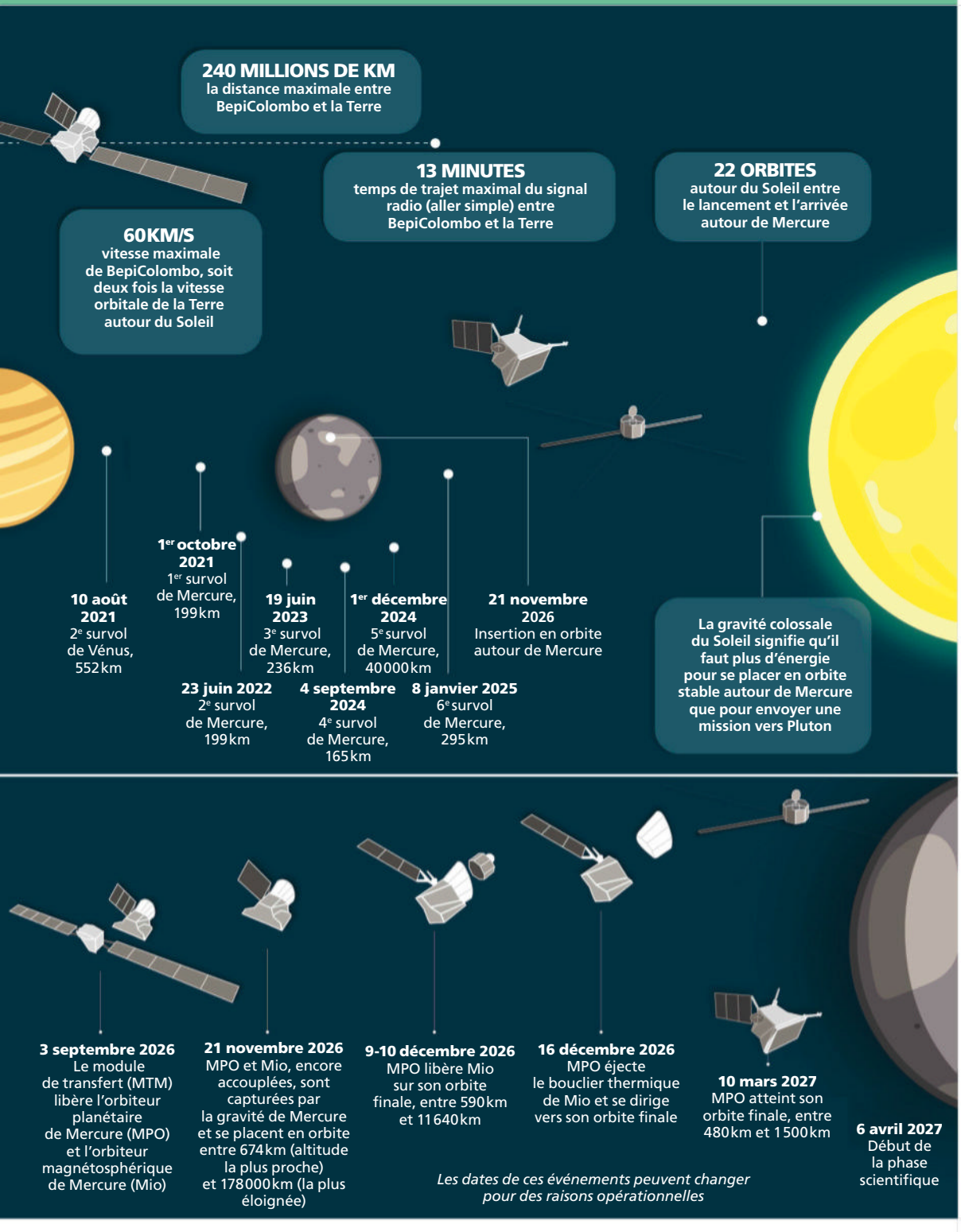


Frise chronologique des survols

Descente à risque

Première étape franchie avec succès le 3 septembre : les deux sondes, encore accouplées l'une à l'autre, se sont détachées du module de transfert (MTM) qui les avait propulsées depuis leur décollage en 2018. Elles doivent désormais entrer, ensemble, dans l'orbite de Mercure le 21 novembre, via un actionnement subtil des propulseurs pour s'accorder à la gravité de la planète. Puis une nouvelle phase critique débutera les 9 et 10 décembre avec la séparation des deux sondes, chacune rejoignant alors son orbite définitive pour entamer sa mission scientifique.

PAR HUGO LEROUX



© ESA



Un tir de trébuchet, ça fait mal ?

Oh que oui ! C'est ce que pourrait nous dire "Squelette 150", retrouvé sous le château de Stirling, en Écosse, s'il avait encore la parole. La bioarchéologue Jo Buckberry de l'université de Bradford, en Angleterre, qui l'a étudié sous toutes les coutures, a répertorié 167 fractures sur l'ensemble de son corps. Celles-ci ont sans doute été causées par l'atterrissage des quelque 140 kg de pierre que pouvait tirer le "War Wolf", trébuchet utilisé par les Anglais lors du siège de Stirling, en 1304, auquel semble avoir participé Squelette 150. Comme l'a affirmé Jo Buckberry lors du 25e Congrès européen de paléopathologie, en août, le puzzle macabre qu'est devenu "SK150" pourrait être la première victime authentifiée d'un tel tir.



78 heures

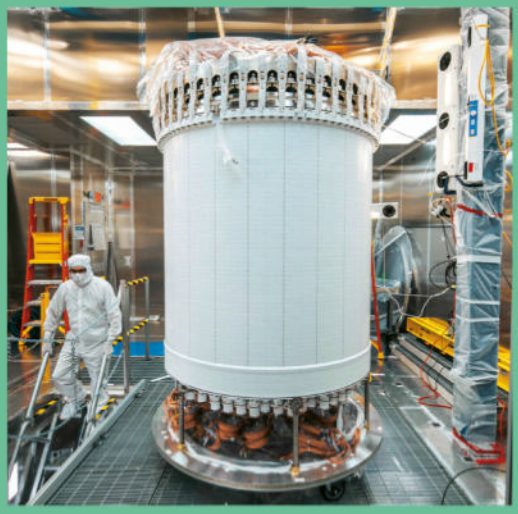
C'est le temps que mettent des larves de vers de farine géants (*Zophobas morio*) à nettoyer le squelette d'un loup. Fatemeh Rastekar et ses collègues de l'université de Mashhad (Iran) ont mené cette surprenante expérience en association avec le Muséum d'histoire naturelle de Stuttgart et en ont communiqué le résultat en juillet sur *PLOS One*. L'objectif : trouver de nouveaux moyens moins nocifs sur le long terme pour nettoyer efficacement les squelettes d'animaux destinés à être exposés dans les musées.

© HEIKO REBSCH/DPA/ALAMY/HEMIS.FR – JIJI PRESS/AFP

PAR MICHAEL DUCOUSSO

A-t-on découvert la première particule de matière noire ?

Peut-être pas, mais le détecteur Lux-Zeplin, installé à 1,5 km sous terre aux États-Unis, a tout de même enregistré un signal inhabituel. Or, ce dispositif ultra sensible composé de 7 t de xénon liquide est entièrement tourné vers la détection d'une potentielle particule de matière noire, qui fascine tant les astrophysiciens. Et soudainement, un noyau de xénon semble être entré en collision avec… quelque chose. L'annonce faite début septembre, lors de la conférence TeV Particle Astrophysics au Japon, demande des études approfondies et la significativité statistique du phénomène reste trop faible pour confirmer une véritable découverte, mais l'anomalie constatée reste inexpliquée.





Qui, dans le règne animal, a des animaux de compagnie ?

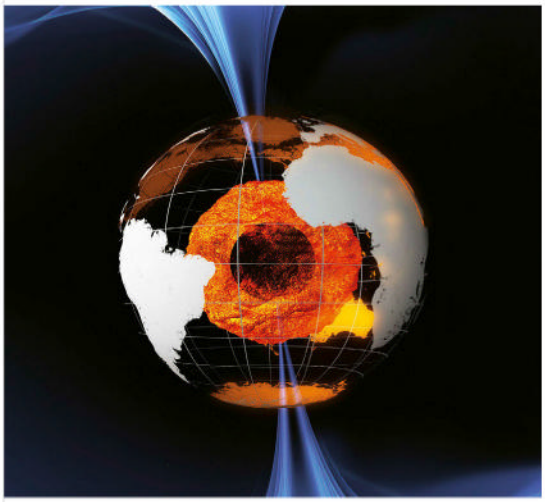
À part le genre humain… d'autres primates ! Les récentes images du jeune macaque Punch, abandonné par sa mère et trouvant un apaisement auprès de son orang-outan en peluche, ont ému les internautes. Or, il n'est pas rare de voir des animaux en "adopter" d'autres. Par altruisme ? Cyril Grueter reste prudent. Anthropologue à l'université d'Oxford, il vient de publier une synthèse basée sur l'étude de 427 cas de relations sociales interespèces. Ces situations, généralement initiées par des primates, impliquaient d'autres singes, mais aussi des écureuils, des cerfs, des chiens, des oiseaux ou même des lézards. Au programme : des jeux dans 139 cas, ou des sessions de toilettage dans 136 cas. Mais, souligne Cyril Grueter, ces relations, souvent ponctuelles, ne sont pas dénuées de brutalité : on note 13 cas de mort à la suite d'une manipulation violente. Bien loin du tendre attachement que certains d'entre nous vouent à leurs animaux de compagnie.



Pourrait-on prédire certaines dépressions dès l'enfance ?

Pas tout à fait, mais nous pourrions au moins prévenir les risques si l'on en croit l'étude des National Institutes of Health publiée cet été. Grâce à l'IA, l'équipe du professeur Ian H. Gotlib, de l'université de Stanford, en Californie, a analysé des entretiens menés auprès de 204 enfants âgés de 9 à 13 ans, au sujet d'événements traumatiques, parfois six ans avant que certains d'entre eux ne développent des pathologies psychiatriques. Cette étude a permis de constater que ceux qui ont souffert d'anxiété ou de dépression par la suite avaient adopté une structuration similaire dans leurs récits. Autant de signaux d'alerte qui pourraient aider les pédopsychiatres à anticiper des risques futurs.

© MATTHEW KAPUST/SANFORD UNDERGROUND RESEARCH FACILITY - ADOBE STOCK



Pourquoi le noyau liquide terrestre a changé de direction ?

On n'en sait rien, et c'est tout le souci. L'Agence spatiale européenne a simplement constaté un changement de sens de rotation dans un courant de fer liquide du noyau externe, sous le Pacifique équatorial. Exposé en août dans *ScienceDaily*, ce phénomène apparu en 2010 reste inexpliqué. Selon l'étude réalisée à partir de l'observation satellitaire des champs magnétiques terrestres sur la période 1997-2025, le courant rebelle – parti vers l'est alors que le reste du noyau tourne principalement vers l'ouest – commence à perdre en intensité. Le signe annonciateur d'un retour à la normale ? En tout cas, le mystère reste entier.



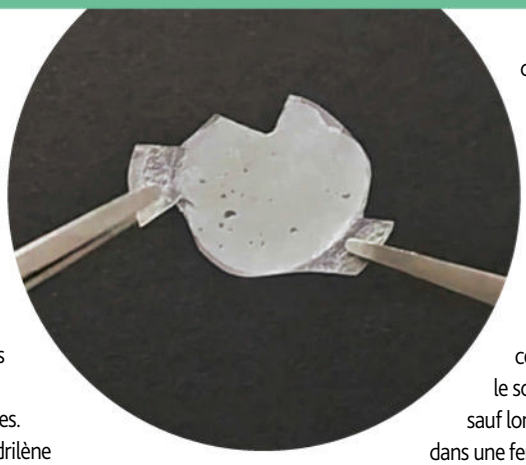
Pourquoi une langue étrangère est-elle plus difficile à comprendre ?

Parce que notre cerveau ne réagit pas de la même manière quand nous écoutons notre langue maternelle : dans ce cas, la réponse cérébrale est davantage synchronisée à la parole. Cela expliquerait que nous soyons capables de discerner immédiatement et même d'anticiper les mots et les structures d'une phrase dans notre langue maternelle… alors que la même chose exprimée dans un autre dialecte ressemble à un charabia ininterrompu. Pour mieux comprendre ce mécanisme, l'équipe polyglotte de l'Inserm, de l'institut de psychologie de l'université de Goethe et du Cooperative Brain Imaging Center, à Francfort, s'en remet à la magnétoencéphalographie. Dans le numéro de juin d'*Inserm Magazine*, le neuroscientifique et linguiste Alessandro Tavano explique : *"Les neurones produisent naturellement un champ magnétique en raison de leur activité électrique. En le mesurant, nous pouvons savoir quels réseaux sont activés lors de l'écoute d'un extrait dans la langue natale et dans une langue étrangère."* Chaque langue ayant son propre rythme, la répétition d'un idiome durant l'enfance pourrait entraîner notre cerveau à activer certains circuits neuronaux afin d'anticiper la syllabe, voire le mot suivant, de façon à mieux distinguer les différents éléments d'une phrase. Inversement, cette habitude de fonctionnement nous rendrait la tâche plus compliquée lorsque nous sommes confrontés à d'autres idiomes. L'équipe de chercheurs espère qu'une meilleure compréhension de ce phénomène permettra de mieux lutter contre les troubles de développement du langage, comme la dyslexie.

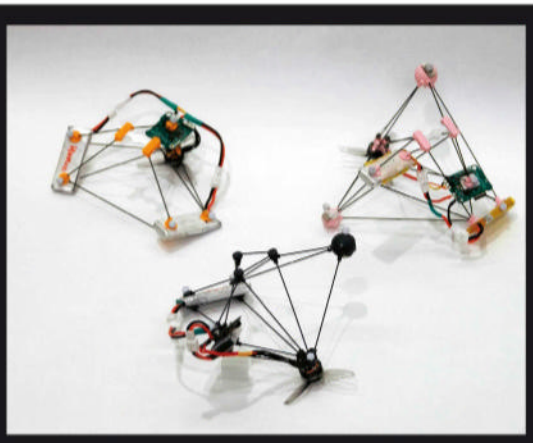
© ESA/AOES MEDIALAB – FRANÇOIS GUENET

PAR MICHAEL DUCOUSSO

Peut-on rafraîchir un bâtiment sans consommer d'électricité ?



Bien sûr, et il existe déjà de nombreuses solutions mêlant architecture traditionnelle et concepts bioclimatiques. Le groupe Finder du CSIC, l'institut madrilène de micro- et nanotechnologie, a décidé d'apporter sa pierre à l'édifice. Comme l'a expliqué la chercheuse Cristina Vicente Manzano dans la revue *Nanophotonics* en juin, elle et son équipe ont mis au point un revêtement capable d'abaisser de 12,9°C la température d'une surface en plein soleil. Et cela, sans aucune consommation d'électricité. Un point essentiel lorsqu'on sait que dès 2018, l'Agence internationale de l'énergie estimait que l'usage de climatiseurs et de ventilateurs électriques consommait près de 10 % de la production électrique mondiale. Pour obtenir un résultat aussi prometteur, le CSIC a exploité une particularité de la lumière infrarouge. Émise par les objets chauds, celle-ci est renvoyée vers le sol par l'atmosphère, sauf lorsqu'elle est comprise dans une fenêtre de longueur d'onde située entre 8 µm et 13 µm. Dans ce cas de figure, le rayonnement part directement dans l'espace. En comblant les pores réguliers et nanoscopiques présents sur l'alumine – l'oxyde d'aluminium – avec du fluorure de polyvinylidène, les scientifiques madrilènes ont mis au point un matériau capable d'exploiter cette fenêtre d'ondes infrarouges spécifique. Un prototype relativement peu coûteux et facile à produire, qui pourrait même être plus efficace que la peinture blanche !



Que faut-il pour rendre un drone invisible ?

Les ingénieurs de l'université de Northwestern, aux États-Unis, qui ont créé Phantom Twist, un drone indétectable à l'œil nu, ont exploité un défaut de la vision humaine : l'appareil, à la structure très fine, tourne sur lui-même jusqu'à 25 fois par seconde, ne devenant ainsi qu'une brume floue à nos yeux. Dévoilé à Sydney lors du salon Robotics : Science and Systems, ce petit robot n'en est encore qu'au stade du prototype, mais il a déjà fallu plus de 20 000 tests de configurations virtuelles à ses concepteurs pour aboutir à ce modèle particulièrement discret.

POUR EN SAVOIR PLUS

CETTE ÉDITION DE MÀJ ACTUALISE DES THÉMATIQUES TRAITÉES DANS CES PRÉCÉDENTS HORS-SÉRIES DE *SCIENCE & VIE*…

#298 La mort et la tentation de l'éternité
#300 Espace, une nouvelle histoire
#301 Énergie, quels défis pour demain ?
#310 Où va la guerre ?
314 Sommes-nous le jouet de nos émotions ?
321 Pourquoi la Terre tremble

© IMN/CSIC – NORTHWESTERN UNIVERSITY

PROPOS RECUEILLIS PAR MARIE DORMOY



EN DIRECT DES LABOS

En Afrique du Sud, Marion Valeix et ses collègues posent des microphones sur des lions et des hyènes.

LA LIONNE QUI NE FAISAIT AUCUN BRUIT

Écologue au CNRS, Marion Valeix étudie depuis vingt ans les grands prédateurs de la savane africaine et cherche à comprendre comment les changements de l'environnement influencent leurs stratégies de chasse. Pour cela, son équipe installe des microphones sur les animaux. Mais lors de la toute première analyse, ces oreilles électroniques vont leur faire entendre tout autre chose. Elle raconte…

Quand Yolan Richard a commencé à écouter l'enregistrement de cette lionne, je m'attendais à tout sauf à… n'entendre presque rien. Nous étions en 2020, au début d'un projet consacré au succès de chasse des lions et des hyènes en Afrique du Sud. Nous venions de tester un dispositif encore très nouveau : un petit audiologger, conçu par Simon Chamaillé-Jammes et ses collègues, et fixé au collier GPS des animaux, capable d'enregistrer leur environnement sonore pendant plusieurs mois. L'idée était de pouvoir entendre leur vie : les courses, les rugissements, les cris des proies…

Comme le Covid nous empêchait de partir sur le terrain, j'avais demandé à Yolan, un ingénieur que je venais de recruter, d'écouter le tout premier enregistrement disponible. Il devait analyser un mois de la vie sonore d'une lionne et repérer tout ce qui pouvait nous renseigner sur son comportement.

Il a mis son casque. Deux jours plus tard, il m'a contactée : *"Je n'entends rien. À part des mouches."* J'étais perplexe. Ce n'était pas possible. Un lion ne peut pas passer des heures sans bouger, sans chasser, sans produire le moindre son. Pourtant, le microphone fonctionnait : on entendait les insectes, parfois des oiseaux. Alors pourquoi ce silence ? Je lui ai dit de continuer. Peut-être finirait-il par se passer quelque chose.

Les heures défilaient. Toujours rien. L'inquiétude scientifique a peu à peu laissé place à l'incompréhension. Le dispositif fonctionnait-il vraiment ? Ou bien cette lionne avait-elle un comportement complètement inhabituel ?

Puis, quelques jours après, Yolan m'a envoyé un extrait sonore. J'ai lancé l'enregistrement. Et là, dans ce qui avait été jusque-là un désert de bruits, j'ai entendu de tout petits miaulements. Tout est devenu clair. Ce que nous avions pris pour un dysfonctionnement était en réalité le signe d'un événement très discret : cette lionne venait de mettre bas !

À l'approche de la naissance, les lionnes s'isolent du groupe et se cachent dans une végétation très dense. Elles sont alors extrêmement vulnérables face aux prédateurs. Elles cessent de chasser et réduisent leurs déplacements. Même leur toilette devient presque silencieuse.

Nous avions placé un microphone sur cette lionne pour étudier ses chasses. Et, par hasard, il nous avait offert une fenêtre sonore sur l'un des moments les plus secrets et les plus beaux de sa vie !

SCIENCE&VIE
CROISIÈRES

Croisière PATAGONIE & TERRES AUSTRALES

ARGENTINE • URUGUAY • CHILI

2 DATES EXCLUSIVES, MARS OU NOVEMBRE 2027



Avec la présence exceptionnelle de **Franck Ferrand** *

*Présence du 8 au 16 mars 2027 sauf cas de force majeure.

Phare des éclaireurs Ushuaïa



En partenariat avec Voyages d'exception

Votre bateau
LE MS OOSTERDAM
Novembre : MS Nieuw Amsterdam



Le voyage d'une vie, en toute sérénité

De l'effervescence de **Buenos Aires** en passant par la ville du bout du monde, **Ushuaïa**, en remontant par **l'avenue des glaciers**, les **fjords chiliens** jusqu'à **Santiago,** ce voyage de 19 jours vous mènera sur les traces des grands navigateurs avec le franchissement du Cap Horn (selon conditions météo) ou du détroit de Magellan.

Une faune incroyable (manchots, albatros, ...) vous attend ainsi que des paysages à couper le souffle. Pour enrichir vos découvertes, vous assisterez à des conférences passionnantes par des intervenants de renom.
Vivez une expérience extraordinaire dont vous vous souviendrez à jamais !

Renseignez-vous vite : les places sont limitées !

- Encadrement francophone
- Accompagnement depuis Paris
- Conférences de prestige signées Voyages d'exception

◗ Téléchargez la documentation
sur www.voyages-lecteurs.fr/sv

◗ Informations & réservations
01 41 33 57 48 en précisant Science & Vie
Du lundi au vendredi de 9h à 18h30, le samedi de 9h à 13h30

Pour découvrir cette offre,
<<< SCANNEZ-MOI

VOYAGES LECTEURS

Crédits photos : © Shutterstock.com

MUSÉE NATIONAL DE LA MARINE
ROCHEFORT

DU 25 SEPTEMBRE 2026
AU 2 JANVIER 2028

AU POSTE DE PLONGÉE !

L'AVENTURE DES PREMIERS SUBMERSIBLES



Le sous-marin *Laplace* et son équipage, octobre 1924
© Musée national de la Marine / C. Rabourdin. Design graphique : Des Cheval

L'APPEL DES PROFONDEURS

1 thématique, 5 expositions
à découvrir dans les sites du musée national de la Marine

BREST PARIS PORT-LOUIS ROCHEFORT TOULON

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
GRAND MÉCÈNE CIC MÉCÈNES NAVAL GROUP
BeauxArts Le Point SCIENCES HUMAINES SCIENCE & VIE SUD OUEST