Pour la Science

Pour la Science
La science expliquée par ceux qui la font

Les clés de la réussite en mathématiques

Xénogreffe : il est temps de se pencher sur l'éthique

Les promesses des matériaux altermagnétiques

Élections, Diagnostics, Réunions...

Intelligence collective

Les étonnantes leçons des expériences de psychologie sociale

09.26

L 13256 - 587 S - F: 7,50 € - RD

DOM : 9,00 € – BEL./LUX. : 9,00 € – CH : 12,70 FS – CAN. : 13,99 $CA – D. : 9,50 € – PORT. CONT. : 9,00 € – MAR : 86,00 DH – TOM : 1 150 XPF – TUN. : 15,70 TND Édition française de Scientific American – Septembre 2026 - n° 587

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

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

Choisissez votre formule d'abonnement

pourlascience.fr/abonnements

Édition française de Scientific American

François Lassagne
rédacteur en chef

Une foule d'experts

À l'heure où ces lignes sont écrites, les forêts d'Europe brûlent. Fin juillet, plus de 450000 hectares avaient été dévorés par les flammes, contre 172000 par an en moyenne, de 2006 à 2025. Sur les écrans, nuages terribles, murs de feu, et… nuées d'experts. Évidemment légitimes, souvent abattus, les climatologues, s'il le faut encore, confirment qu'il n'y a pas de surprise dans la survenue de ces catastrophes d'intensité inédite. En parallèle s'égrènent les avis et recommandations des ingénieurs forestiers, des spécialistes de la lutte anti-incendie, des assureurs, des hydrologues… et la longue file du personnel politique.

Quelles responsabilités attribuer? Comment parer au pire? Comment restaurer bâti et habitats naturels, reloger les déplacés? Comment préparer l'avenir? Si la foule des experts est dense, aucun de ses membres ne peut prétendre, seul, répondre pertinemment à pareilles questions. Mais leur intelligence collective a de bien meilleures chances d'y parvenir.

De très nombreux résultats de recherche l'attestent, un collectif diversifié est parfois imbattable pour identifier les meilleures options, orienter vers les bonnes décisions.

Cela suppose cependant de respecter certains principes, comme le détaille Mehdi Moussaïd, chercheur en psychologie sociale. En particulier celui, donc, de s'assurer que le groupe mobilisé est suffisamment divers (quant à ses connaissances, ses types de raisonnement, ses convictions, ses valeurs…).

Certaines méthodes de l'intelligence collective intègrent le fait qu'il n'est pas possible d'évaluer de façon objective ce que serait la meilleure décision. C'est précieux, d'autant plus pour des problématiques complexes, concernant de larges échelles de population. Ces méthodes tendent en général alors à fixer comme critère de réussite la satisfaction du groupe, l'obtention d'un consensus, ou encore la diminution de la polarisation (autant de critères bien connus des responsables politiques). Elles pourraient ainsi les aider à s'emparer des problématiques complexes auxquelles nous faisons face aujourd'hui, comme l'intensification des événements climatiques extrêmes.

Les élus et prétendants aux responsabilités publiques, engagés déjà, en France, dans la perspective de prochaines échéances électorales, sauront-ils se saisir du riche éventail de méthodes que l'intelligence collective offre aux sociétés soucieuses de se tenir à distance de l'arbitraire? ■

Remerciements

Antoine Balzeau, paléoanthropologue (MNHN), **Nathalie Choisne,** ingénieure de recherche (Inrae), **Florian Maumus,** biologiste (Inrae), **Julien Monteux**, géologue (laboratoire Magmas et volcans)

SOMMAIRE

– Actualités –

06 Virus de plantes: une histoire reconstituée sur 400 millions d'années

07 La comète 3I/Atlas serait âgée de 11 milliards d'années

10 Parkinson, sclérose en plaques: il n'y a pas de pandémie de maladies neurodégénératives

11 La peste chez des chasseurs-cueilleurs

12 Les météorites ont retardé la formation des continents

11

PHYSIQUE

Une surprenante nouvelle forme de magnétisme 32

Paul McClarty

Les matériaux altermagnétiques interrogent la théorie et ouvrent des perspectives en électronique.

MÉDECINE

Xénogreffe: il est temps de se pencher sur l'éthique 42

Ilona Bouvard

L'entrée de la transplantation d'organes de l'animal à l'humain dans le champ clinique est imminente. La réflexion éthique doit suivre.

HISTOIRE DES SCIENCES

La longue marche de l'astronomie chinoise vers la modernité 50

Y. Gomas, T. Montmerle, Z. Yi

Une génération d'astronomes formés à l'étranger, née des cendres d'une insurrection étouffée, a transformé l'astronomie chinoise.

– Points de vue –

60 **La vie dans tous ses états**
Aux limites de la Terre
Perig Pitrou

62 **Les sciences à la loupe**
Évalués par les pairs, oui, mais lesquels? Et combien?
Yves Gingras

64 **Redresseur de code**
Vis ma vie de dév en 2026
Thomas Gerbaud

66 **Retour sur image**
Les mondes extraterrestres, des paysages offerts à tous
Charlotte Bigg

60

Pour la Science.fr

LETTRES D'INFORMATION

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

Soyez informé chaque mois des sorties de toutes nos publications

Profitez de nos offres promotionnelles

Et aussi: des newsletters thématisées

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

À la une

14

PSYCHOLOGIE SOCIALE

Intelligence collective : décide-t-on mieux à plusieurs ?

Mehdi Moussaïd et Guillaume Jacquemont

Les chercheurs en psychologie sociale ont mis en évidence un facteur «c» d'intelligence collective, assimilable, pour un groupe, au quotient intellectuel appliqué aux individus. Des marchés prédictifs à la métamajorité, ils ont aussi élaboré une série de techniques pour mieux décider ensemble.

– Culture –

68 **Logique & calcul**
Un seul être vous manque, et tout est renversé !
Jean-Paul Delahaye

L'élimination d'un seul concurrent dans un tournoi sportif ou une élection peut bouleverser totalement les résultats… même si le concurrent éliminé est le dernier du classement initial !

74 **Art & science**
Le fabuleux voyage de l'oiseau sans pattes
Loïc Mangin

78 **Les livres du mois**

80 **Chroniques de l'évolution**
La plus vieille sangsue du monde
Hervé Le Guyader

84 **Idées de physique**
Une fluidité bien calculée
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

88 **Science & gastronomie**
Lycopènes : une seule couleur – le rouge –, mais trois additifs différents
Hervé This

90 **L'équation**
Pourquoi le nombre 12 est sublime
Florian Freistetter

En couverture : © Andriy Onufriyenko/Gettyimages.

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

24 SCIENCES DE L'ÉDUCATION

Enseignement des mathématiques : comment dépasser le paradoxe français

Entretien avec Pierre-Michel Menger et Stanislas Dehaene

Les élèves français se classent en fin de tableau dans les enquêtes internationales, alors que la France continue de produire des mathématiciens parmi les meilleurs du monde. Un paradoxe qu'éclairent Stanislas Dehaene, neuroscientifique spécialiste de l'apprentissage des mathématiques, et Pierre-Michel Menger, sociologue du travail, fin connaisseur de la formation des élites mathématiques.

74

–Virologie–

Virus de plantes, une histoire reconstituée sur 400 millions d'années

L'étude de génomes de Caulimoviridae, une famille de virus affectant notamment de nombreuses cultures tropicales, révèle leur diversité et surtout leur coévolution avec leurs hôtes.

Retracer l'histoire évolutive des virus à travers des millions d'années est un véritable défi, car ils ne laissent pas directement de fossiles. Cependant, une astuce consiste à lire leur passé dans les chromosomes de leurs hôtes. En effet, lors des infections, des fragments de l'ADN viral s'insèrent parfois dans le génome de ces hôtes, qui les conservent alors de génération en génération, pendant des milliers, voire des millions d'années. Ces séquences virales endogènes constituent de véritables fossiles moléculaires, ouvrant la voie à ce qu'on appelle la « paléovirologie ». Dès les années 1970, des séquences d'ADN de rétrovirus endogènes avaient été découvertes et identifiées chez des vertébrés. Puis, à partir des années 2000, ces séquences ont été utilisées pour explorer l'évolution des virus. Et en 2014, Pierre-Yves Teycheney, virologue au Cirad de La Réunion, a appliqué la technique aux virus des plantes. Mais, par manque de génomes disponibles, l'étude de virus anciens chez les végétaux a longtemps été limitée aux échantillons d'herbiers, ce qui ne permet pas de remonter au-delà de quelques siècles. Depuis quelques années, la paléovirologie végétale s'est développée, profitant d'un nombre croissant de génomes de plantes séquencés et de nouveaux outils bio-informatiques d'analyse automatisés. Pierre-Yves Teycheney, Héléna Vassilieff, de l'université Paris-Saclay et Inrae, désormais à l'université d'Uppsala, en Suède, et leurs collègues ont ainsi reconstitué, sur plus de 400 millions d'années, l'histoire évolutive d'une famille de virus, les *Caulimoviridae*.

Les bananiers sont un des hôtes de virus de la famille des *Caulimoviridae*.

© Andikpras/Shutterstock

L'équipe a exploré 93 génomes complets représentant l'ensemble des grandes lignées de plantes vasculaires, c'est-à-dire les plantes dotées de vaisseaux conducteurs permettant la circulation de l'eau et des nutriments. Cela couvre toute leur histoire évolutive, des lycophytes, parmi les premières plantes vasculaires apparues sur Terre, jusqu'aux plantes à fleurs (angiospermes) en passant par les fougères et les gymnospermes, dont font partie les conifères.

Les chercheurs se sont appuyés sur Caulifinder, un outil bio-informatique qu'ils ont développé en 2022 pour identifier les séquences virales endogènes dérivées de *Caulimoviridae* dans les génomes végétaux. Grâce à cet outil, Héléna Vassilieff et ses collègues ont détecté plus de 47000 séquences de *Caulimoviridae* intégrées dans 75 des 93 génomes étudiés.

Disparitions et émergences

Ce faisant, les chercheurs ont mis au jour une histoire commune de ces virus et de leurs hôtes qui s'étend sur plus de 400 millions d'années. Ils ont, par exemple, identifié des groupes de virus aujourd'hui disparus. Pour certains virus, cette disparition serait peut-être liée aux grandes crises biologiques qui ont marqué l'histoire de la Terre, notamment à la fin du Permien, il y a environ 252 millions d'années, et du Crétacé, il y a 66 millions d'années. D'autres extinctions pourraient résulter de l'apparition de mécanismes de défense des plantes contre ces virus. À l'inverse, l'équipe suggère que l'émergence des plantes à graines, il y a 360 millions d'années, s'est accompagnée de celle de nouvelles lignées de *Caulimoviridae*. Les biologistes ont aussi mis en évidence des associations entre des virus et leurs hôtes remarquablement stables qui ont perduré au moins 150 millions d'années.

Au total, Héléna Vassilieff et ses collègues ont révélé des traces de *Caulimoviridae* dans 421 espèces végétales appartenant à 135 familles botaniques, soit plus du double du nombre d'espèces hôtes répertoriées jusqu'à présent. Ces résultats suggèrent que les virus de cette famille sont beaucoup plus répandus et diversifiés qu'on ne le pensait. ■

Isabelle Bellin

H. Vassilieff *et al.*, *Plos Pathogens*, 2026.

– Astrophysique –

La comète 3I/Atlas serait âgée de 11 milliards d'années

La comète 3I/Atlas entourée de sa coma, le nuage de gaz et de poussière qui se forme autour de son noyau glacé.

En juillet 2025, le réseau de télescopes *Atlas* (Système d'alerte ultime d'impact d'astéroïdes) donnait l'alerte: une comète venue d'ailleurs était en train de traverser le Système solaire à vive allure. Désigné «3I/Atlas», ce bolide présentait une trajectoire fortement hyperbolique ne laissant aucun doute: il était juste de passage, arrivé d'un système planétaire lointain pour repartir, quelques mois plus tard, explorer d'autres régions de la Galaxie.

Pour les astrophysiciens, un tel corps est une aubaine, car il offre un échantillon directement observable d'un monde né autour d'une autre étoile, distante et probablement disparue. L'équipe de Martin Cordiner, du centre Goddard, de la Nasa, aux États-Unis, et celle de Cyrielle Opitom, de l'université d'Édimbourg, en Écosse, ont mené plusieurs analyses de la composition isotopique de 3I/Atlas.

Le rapport deutérium/hydrogène dans l'eau et le ratio carbone 12 sur carbone 13 pour le monoxyde et le dioxyde de carbone, ainsi que pour d'autres molécules, esquissent dans quelles conditions cet objet est né. Les glaces de 3I/Atlas se seraient constituées à une température extrêmement basse, inférieure à 30 kelvins, au voisinage d'une étoile en formation baignée par un flux de rayons cosmiques au moins dix fois supérieur à la moyenne actuelle de la Galaxie, des conditions associées aux régions pauvres en éléments lourds.

En combinant ces données avec des modèles d'évolution chimique galactique calibrés sur plusieurs dizaines d'étoiles proches, et sous certaines hypothèses, Martin Cordiner et ses collègues arrivent à une estimation de 11 à 12 milliards d'années pour l'âge de 3I/Atlas. Cette comète serait donc née dans le sillage d'un sursaut de formation stellaire intense qui a marqué les débuts de la Voie lactée, plusieurs milliards d'années avant l'émergence du Système solaire, âgé pour sa part de 4,6 milliards d'années. ■

Sean Bailly

M. Cordiner *et al.*, *Nature*, 2026 ; C. Opitom *et al.*, *Nature Astronomy*, 2026.

© Observatoire international Gemini/NOIRLab/NSF/AURA/Shadow the Scientist ; Traitement de l'image : J. Miller & M. Rodriguez (Observatoire international Gemini/NSF NOIRLab), T.A. Rector (Université de l'Alaska à Anchorage/NSF NOIRLab), M. Zamani (NSF NOIRLab)

–Paléoanthropologie–

Disparition de Néandertal: une piste mise à mal

De nouvelles données de Néandertaliens qui ont vécu en Europe il y a moins de 50 000 ans remettent en question la théorie du déclin génétique comme cause de leur disparition.

Les restes fossiles d'*Homo neanderthalensis* sont relativement rares, tout particulièrement ceux qui contiennent du matériel génétique en assez bon état pour reconstituer un génome de qualité. Jusqu'à récemment, seuls quatre tels spécimens étaient disponibles, dont trois provenaient de la région de l'Altaï, en Sibérie. Dans une étude récente, Alba Bossoms Mesa, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionnaire, en Allemagne, et ses collègues ont rapporté un nouveau génome de haute qualité, provenant d'un spécimen d'une des grottes de Goyet, près de Namur, et ayant vécu il y a environ 45 000 ans, ainsi que les données génétiques fragmentaires issues de 26 Néandertaliens tardifs, provenant d'une dizaine de sites archéologiques, principalement dans le bassin de la Meuse.

Grâce à ces données, les chercheurs ont identifié plusieurs lignées génétiques et ont reconstitué des arbres phylogénétiques retraçant la parenté entre les individus. Ainsi, ils ont, par exemple, remarqué que l'un d'eux, découvert près de Couvin, en Belgique, appartenait à la même lignée génétique que le Néandertalien surnommé Thorin, exhumé en 2015 dans la grotte Mandrin, dans le sud de la France.

De précédentes analyses, menées sur les génomes des spécimens de l'Altaï, suggéraient que les Néandertaliens de cette région vivaient en petites communautés génétiquement isolées. Cela a conduit les paléogénéticiens à associer la disparition d'*Homo neanderthalensis* à la diminution de la taille de sa population et à ses conséquences: une hausse de la consanguinité et, par extension, une accumulation de mutations défavorables sur leurs génomes. Pourtant, les résultats d'Alba Bossoms Mesa et de ses collègues racontent une autre histoire. Les groupes de Néandertaliens, en Europe de l'Ouest, appartenaient à une population régionale plus vaste et interconnectée, et aucun déclin génétique particulier n'a été constaté dans l'ADN étudié. La diversité génétique de ces Néandertaliens tardifs n'avait donc pas significativement diminué par rapport à celle d'individus bien plus anciens.

Ces résultats ne remettent pas en question la vulnérabilité démographique qui a touché certaines populations de Néandertaliens tardifs, en particulier celles qui ont vécu dans la région de l'Altaï. En revanche, ils mettent à mal l'idée selon laquelle l'espèce a disparu seulement en raison d'un déclin génétique continu. Le mystère de la disparition d'*Homo neanderthalensis* s'épaissit... ■

William Rowe-Pirra

A. Bossoms Mesa *et al.*, *Nature*, 2026.

Entrée des grottes de Goyet, en Belgique, où un génome de grande qualité a été obtenu à partir des restes d'un Néandertalien ayant vécu il y a environ 45 000 ans.

© Mateja Hajdinjak

–Mathématiques–

Les médailles Fields 2026

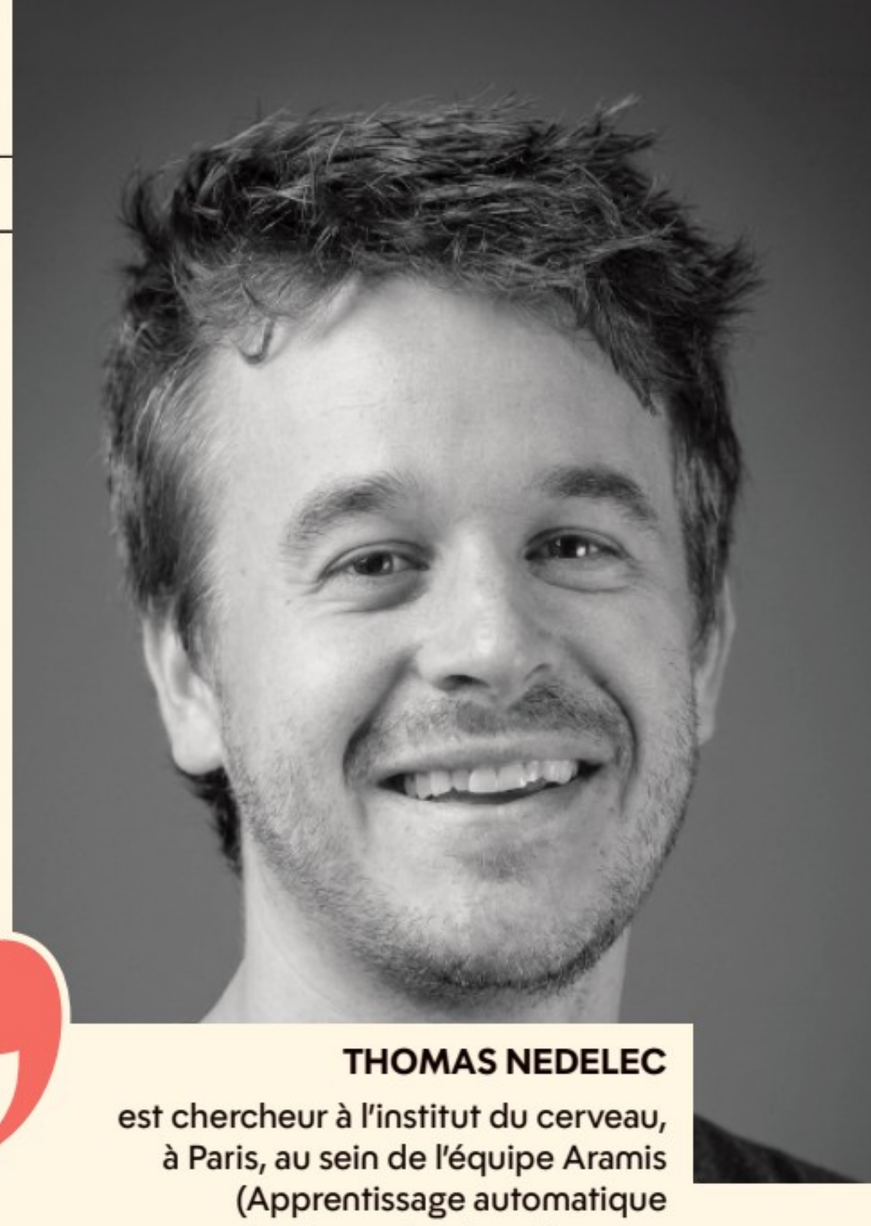
Conjecture de Kakeya, sixième problème de Hilbert, distorsion des nœuds ou encore la conjecture d'André-Oort: les lauréats de la médaille Fields ont réalisé des contributions majeures sur des problèmes qui résistaient parfois depuis des dizaines d'années et pour lesquels on ne pensait pas voir d'avancée avant longtemps, tant les outils manquaient pour les traiter. Le Congrès international des mathématiciens (ICM), réuni à Philadelphie fin juillet, a décerné la médaille Fields 2026, la distinction la plus prestigieuse en mathématiques, à Hong Wang, Yu Deng, Jacob Tsimerman et John Pardon pour leurs travaux brillants.

Ces quatre scientifiques incarnent une partie de la diversité des mathématiques contemporaines. Yu Deng, spécialiste des équations aux dérivées partielles à l'université de Chicago, a établi de façon rigoureuse que l'équation de Boltzmann découle du modèle des sphères dures pour les gaz peu denses. John Pardon, de l'université de Stony Brook, aux États-Unis, a obtenu de nombreux résultats en géométrie symplectique et a aussi infirmé une conjecture formulée par Mikhaïl Gromov en 1983 en théorie des nœuds, sur la distorsion d'un certain type de nœuds. Jacob Tsimerman est professeur à l'université de Toronto et travaille en théorie des nombres et en géométrie algébrique complexe. Il a prouvé la conjecture d'André-Oort, qui concerne certains points spéciaux dans des espaces géométriques exotiques, les variétés de Shimura. Enfin, professeuse à l'institut Courant, à New York, et à l'IHES (Institut des hautes études scientifiques), au sud de Paris, Hong Wang s'intéresse à l'analyse harmonique et à la théorie géométrique de la mesure. Elle s'est attaquée à un problème né il y a plus d'un siècle: la conjecture de Kakeya. Elle a résolu des questions concernant une généralisation de ce problème en dimension trois. Hong Wang n'est que la troisième femme à recevoir la médaille Fields, après Maryam Mirzakhani en 2014 et Maryna Viazovska en 2022. ■

S. B.

–Épidémiologie–

Parkinson, sclérose en plaques: en France, l'incidence reste stable



THOMAS NEDELEC
est chercheur à l'institut du cerveau, à Paris, au sein de l'équipe Aramis (Apprentissage automatique et science des données pour les maladies du cerveau).

Plusieurs maladies neurodégénératives sont de plus en plus répandues, mais ce n'est pas le signe d'une explosion du nombre de nouveaux cas. Explications d'un paradoxe apparent avec le biostatisticien Thomas Nedelec, qui vient de parvenir à cette conclusion avec ses collègues.

Quelles maladies neurodégénératives avez-vous étudiées et à quel point leur fréquence augmente-t-elle?

Nous nous sommes intéressés à trois pathologies neurodégénératives impliquant des symptômes moteurs: la maladie de Parkinson, la sclérose en plaques et la maladie de Charcot (aussi appelée «sclérose latérale amyotrophique»). En France, elles touchent respectivement 230000, 130000 et 8000 personnes. Et leur prévalence – le nombre total de patients vivant avec la maladie – augmente d'environ 2% par an depuis une vingtaine d'années.

C'est au point que beaucoup de publications scientifiques évoquent une pandémie de maladies neurodégénératives, sous-entendant une explosion du nombre de nouveaux cas causée par des facteurs externes. Mais est-ce vraiment le cas? Pour le vérifier, nous avons exploité la base de données de l'assurance maladie française, qui couvre 99% de la population, et son équivalent suédois. Nous avons ainsi eu accès à toute une série de données: âge des patients, diagnostic, traitements...

Et qu'avez-vous conclu?

En résumé, qu'il n'y a pas de pandémie de maladies neurodégénératives, en tout cas pour Parkinson et la sclérose en plaques. Pour cette dernière pathologie, l'incidence est très stable: environ 5000 nouveaux cas par an en France. Si le nombre total de patients augmente, c'est parce qu'ils vivent plus longtemps avec la maladie. Un dépistage plus précoce peut l'expliquer, mais l'âge du diagnostic est resté stable lui aussi. C'est plus probablement une augmentation de l'espérance de vie qui est en cause: de fait, l'arrivée de nouveaux traitements a changé la donne.

Pour la maladie de Charcot, l'espérance de vie n'a pas augmenté, il y a très peu de nouveaux traitements. Nous avons observé une faible hausse de l'incidence (de 1,8%, pour une incidence de l'ordre de 2000 cas par an en France), imputable pour plus de la moitié au vieillissement de la population – la maladie survient à un âge avancé. Pour Parkinson, l'incidence est restée stable (25000 cas par an) et retrancher la part liée au vieillissement de la population conduit même à une légère baisse.

Comment avez-vous calculé la part liée au vieillissement?

Pour chaque tranche d'âge, nous avons pris l'incidence de la maladie il y a une quinzaine d'années, puis nous avons considéré le pourcentage d'augmentation de la population dans cette tranche d'âge. Nous en avons déduit le nombre de nouveaux patients que l'on attendrait avec le vieillissement.

À quoi sont dues les différences entre cette valeur théorique et les incidences mesurées?

Peut-être à des facteurs liés au mode de vie ou à l'environnement, comme la pollution. Mais nos conclusions restent pour l'instant limitées là-dessus, en particulier pour la maladie de Charcot, dont les facteurs de risque sont peu connus. Afin de progresser sur ce sujet, nous cherchons à cartographier l'évolution de l'incidence pour ces trois pathologies sur le territoire européen: cela permettra aux chercheurs qui étudient l'exposition à différents facteurs environnementaux de croiser nos données avec les leurs.

Et qu'en est-il de la maladie d'Alzheimer?

Nous ne l'avons pas étudiée, car la maladie est souvent diagnostiquée avec plusieurs années de retard. En conséquence, les chiffres d'incidence estimés à partir des bases de données que nous utilisons ne sont pas très fiables. ■

Propos recueillis par Guillaume Jacquemont

O. Guinebretiere *et al.*, *Neurology*, 2026.

© DR

La production de riz en danger

Le réchauffement climatique est une menace avérée pour la sécurité alimentaire, surtout en ce qui concerne le riz, qui nourrit plus de la moitié de la population mondiale. De précédentes études avaient conclu que chaque jour au-dessus de 30 °C, lors de phases critiques comme la floraison, conduit à une baisse du rendement de production entre 0,1 et 1,3 %. Mais l'équipe internationale autour de Feng Zhou, de l'université de Pékin, a réévalué cette perte à entre 1,1 et 1,8 %.

Science Advances, 29 juillet 2026.

Des nez sur les ailes

Les ailes des insectes sont dotées de nombreux récepteurs sensoriels (mécaniques et gustatifs). Ahmed Reda Ismaieel, de l'institut Max-Planck, et ses collègues ont également confirmé la présence de récepteurs olfactifs chez un lépidoptère, le sphinx du tabac. Même si ses antennes sont l'organe olfactif principal, le papillon est aussi capable de percevoir des composés volatils dans son environnement avec ses ailes. Reste à comprendre leur rôle précis.

Journal of Experimental Biology, 27 juillet 2026.

La perte des langues, bis repetita

Dans leur scénario sur l'évolution du nombre de langues, Claire Bowern, de l'université Yale, et ses collègues suggèrent que la sédentarisation et l'agriculture ont conduit à isoler des populations, ce qui a augmenté le nombre de langues, passant de plusieurs milliers à la fin de l'ère glaciaire à plusieurs dizaines de milliers. Puis, le commerce et l'émergence de grandes puissances ont fortement réduit leur nombre vers 1000 avant notre ère. La perte de diversité actuelle n'est donc pas un phénomène nouveau… mais reste inquiétante.

Science, 23 juillet 2026.

© sokolova_sv/Shutterstock

–Archéologie–

La peste chez des chasseurs-cueilleurs

Le bacille responsable de la peste, la bactérie *Yersinia pestis (vue d'artiste)*.

Près de 5000 ans avant que la peste noire ne décime l'Europe, la maladie faisait déjà des victimes parmi des populations de chasseurs-cueilleurs aux abords du lac Baïkal, en Sibérie. Ce résultat obtenu par une équipe internationale, menée par Eske Willerslev, de l'université de Copenhague, contredit l'idée selon laquelle les flambées de peste ne se déclaraient que chez des communautés sédentaires et agricoles, plus denses et vivant au contact d'animaux porteurs de la maladie. Cette hypothèse s'appuyait en effet sur les trois pandémies majeures qui ont marqué l'histoire de la maladie : la peste de Justinien (de 541 à 767), la peste noire (XIVe siècle) et la troisième épidémie (de 1855 au milieu du XXe siècle).

Mais, depuis quelques années, on retrouve des traces génétiques anciennes de *Yersinia pestis*, le bacille responsable de la maladie. Et elles dressent une dynamique différente. « Au départ, le projet portait sur les populations de chasseurs-cueilleurs vivant à proximité du lac Baïkal et de ses rivières à la fin du Néolithique, explique Ruairidh Macleod, de l'université de Copenhague. Nous ne nous attendions pas à trouver la peste ici. » Pourtant, en fouillant quatre cimetières sur les rives de l'Angara, ils ont constaté que la plupart des tombes réunissaient des personnes de la même famille, mortes au même moment, et accueillaient de nombreux enfants et adolescents. Sans traces de violence, la meilleure hypothèse était celle d'une épidémie. Les scientifiques ont en effet découvert des traces de peste dans près de 40 % des corps qu'ils ont testé, morts lors de deux épidémies, la première ayant commencé il y a près de 5500 ans, et la seconde il y a 5000 ans. Les marmottes, qui constituent aujourd'hui un réservoir de la maladie dans la région, en sont probablement la source. Les données archéologiques indiquent que les humains interagissaient avec ces animaux, puisque des dents de marmotte ont été retrouvées parmi des objets funéraires. ■

Edwyn Guérineau

R. Macleod *et al.*, Nature, 2026.

–Géosciences–

Les météorites ont retardé la formation des continents

L'intense bombardement de météorites qui a frappé la Terre dans ses 500 premiers millions d'années aurait empêché la formation de continents et la tectonique des plaques telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Un océan magmatique à perte de vue bombardé d'innombrables météorites: voici le paysage infernal qui était celui de notre planète juste après sa formation, au tout début du bien nommé Hadéen (en référence à Hadès, dieu des Enfers en Grèce antique). Mais très rapidement, en refroidissant, la Terre a vu ce magma cristalliser et engendrer une première croûte semblable à la croûte océanique actuelle. Il faut cependant attendre la fin de l'Hadéen, il y a près de 4 milliards d'années, pour retrouver la trace des premiers continents, soit près de 500 millions d'années après la formation de la planète. Ce délai dans l'apparition de la croûte continentale reste encore mal compris. Tim Johnson, de l'université Curtin, en Australie, et ses collègues proposent que les impacts de météorites constituent un mécanisme clé dans la temporalité de la formation des roches continentales.

L'étude de la Terre à des époques si reculées est une tâche ardue, car l'érosion et la tectonique des plaques en ont fait disparaître la quasi-intégralité des témoins. Heureusement, la Lune, qui n'est pas sujette à ces processus de remodelage, a gardé les traces des bombardements météoritiques anciens subis par la planète. À partir de données lunaires et des modèles statistiques, les chercheurs ont estimé la quantité d'impacts de météorites à la surface terrestre et la quantité de chaleur associée durant cette période. En effet, l'énergie libérée lors d'un impact de météorite est en partie convertie en chaleur.

L'équipe a injecté ces informations dans des simulations numériques capables de décrire l'évolution thermique de la Terre hadéenne. Résultats: l'énergie thermique apportée par ces impacts aurait été au moins dix fois plus importante que l'énergie thermique interne de la Terre; les températures plus élevées que prévu auraient entraîné la fusion partielle des roches à des niveaux bien plus proches de la surface (de 2 à 5 kilomètres de profondeur, contre 10 à 15 kilomètres sans prendre en compte l'influence des météorites), rendant la croûte trop fine et instable pour former des continents. Cette fine croûte aurait ensuite été recyclée dans le manteau, effaçant ainsi toute trace de cette période. Ce mécanisme expliquerait l'absence quasi totale d'enregistrements rocheux au cours de l'Hadéen mais aussi pourquoi les roches continentales commencent à se former il y a 3,9 milliards d'années, après la fin des grands bombardements météoritiques qui ont touché la Terre primitive. ■

Le bombardement de la Terre a dégagé de la chaleur qui a retardé la formation des continents pendant 500 millions d'années.

Nicolas Butor

T. E. Johnson *et al.*, *Science*, 2026.

© Getty Images/Science Photo Library/Mark Garlick

–Biophysique–

Comment le piège de la dionée se referme

Dionées attrape-mouche.

La dionée attrape-mouche (*Dionaea muscipula*) est une plante carnivore de la famille des droséracées, qui pousse aux États-Unis dans les seuls États de Caroline. Découverte en 1763, elle a été qualifiée par Charles Darwin de «plante la plus merveilleuse au monde par la rapidité et la puissance de ses mouvements». De fait, c'est une plante emblématique par son piège aux deux lobes formant une sorte de mâchoire, située dans la partie supérieure de ses feuilles. La vitesse de fermeture du piège après qu'un insecte a effleuré sa surface intérieure est étonnamment rapide dans le règne végétal. L'équipe autour de Jeongeun Ryu et Yoël Forterre, de l'université Aix-Marseille, en a identifié le mécanisme.

Les chercheurs ont en premier lieu constaté que le mouvement se produit en deux temps: le piège se met d'abord lentement en action avant de se refermer vite quand les deux lobes inversent leur courbure, passant de convexe à concave. Cette deuxième étape, reposant sur une instabilité mécanique, était connue depuis vingt ans. Restait à identifier l'élément qui déclenche le mouvement.

L'équipe a écarté l'hypothèse d'une redistribution de l'eau à travers le piège car le liquide prend entre 30 et 150 secondes pour traverser l'épaisseur du lobe. Elle a ensuite testé l'idée d'une modification asymétrique des propriétés mécaniques des cellules des lobes. Et, effectivement, quelques secondes après la stimulation des poils sensitifs de la mâchoire, la paroi des cellules des faces externes des lobes se ramollit de 30%. «C'est cette relaxation rapide qui rompt l'équilibre mécanique instable, résume Yoël Forterre. Le piège se ferme comme un ressort comprimé, libéré d'un coup.» Le mécanisme moléculaire sous-jacent reste à déterminer, mais ce résultat pourrait inspirer de nouvelles technologies, comme des actionneurs rapides en robotique. ■

I. B.

J. Ryu *et al.*, *Science*, 2026.

© Little daisy/Shutterstock

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

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

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

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

PUBLICITÉ FRANCE
stephanie.jullien@pourlascience.fr

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

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

DIFFUSION
Contact réservé aux dépositaires et diffuseurs de presse

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

DISTRIBUTION
MLP
ISSN 0 153-4092
Commission paritaire n°0927K82079
Dépôt légal: 5636 – Septembre 2026
N° d'édition: M0770587-01

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

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Jeanna Bryner
President: Kimberly Lau

2026. Scientific American (Scientific American, Inc.)
Soumis aux lois et traités nationaux et internationaux sur la propriété intellectuelle. Tous droits réservés. Utilisé sous licence. Aucune partie de ce numéro ne peut être reproduite par un procédé mécanique, photographique ou électronique, ou sous la forme d'un enregistrement audio, ni stockée dans un système d'extraction, transmise ou copiée d'une autre manière pour un usage public ou privé sans l'autorisation écrite de l'éditeur. La marque et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science SARL».
© Pour la Science SARL – 5 allée de la 2e Division Blindée, 75015 Paris.
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche
Taux de fibres recyclées: 30%
«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne

Imprimé en France
Maury Imprimeur
SA Malesherbes
N° d'imprimeur: 292 211

L'essentiel

L'intelligence collective permet souvent à un groupe de prendre de meilleures décisions que ses membres pris isolément, à condition de préserver la diversité des points de vue, l'indépendance des jugements et une bonne répartition de la parole.

Des méthodes comme celles des marchés prédictifs (qui consiste à acheter des paris sur un événement) ou celle de la métamajorité (les membres du groupe essaient d'estimer ce que vont répondre les autres) améliorent la qualité des prévisions et des choix, tandis que les discussions spontanées sont fréquemment perturbées par des biais cognitifs et sociaux.

© Andriy Onufriyenko/Getty Images

Intelligence collective

Décide-t-on mieux à plusieurs?

Mehdi Moussaïd et Guillaume Jacquemont

Les chercheurs en psychologie sociale ont mis en évidence un facteur «c» d'intelligence collective, assimilable, pour un groupe, au quotient intellectuel appliqué aux individus. Des marchés prédictifs à la métamajorité, ils ont aussi élaboré une série de techniques pour mieux décider ensemble.

«Ils ne sont même pas capables d'estimer le poids d'un bœuf, comment pourraient-ils élire un président?» Ainsi parlait Francis Galton, célèbre savant et aristocrate britannique. Fondateur de l'eugénisme, il s'était mis en tête de démontrer la stupidité collective par une expérience simple: en 1906, il s'est rendu sur une foire et a demandé à 788 personnes d'estimer le poids d'un bœuf. Il y voyait une métaphore de la démocratie, pour laquelle il n'avait que peu d'estime…

Les résultats lui ont procuré une certaine amertume. Certes, tous les visiteurs se sont trompés, parfois dans des proportions loin d'être anecdotiques. Mais la moyenne des estimations atteignait une précision de… 99,6%! L'estimation collective valait ainsi 545 kilogrammes, pour un poids réel de 547 kg. Ce phénomène, qualifié de sagesse des foules et confirmé par de multiples travaux depuis, illustre un constat simple: nous pouvons être meilleurs à plusieurs.

Ce n'est pas automatique pour autant. Car ce que les recherches montrent aussi, c'est que la décision collective est souvent inefficace. Quelles conditions doit remplir un groupe pour bien fonctionner? Comment optimiser les différentes étapes de la décision, depuis la collecte d'informations (typiquement le poids du bœuf si on doit proposer un prix d'achat) au choix final? L'intelligence artificielle peut-elle nous aider à mieux décider ensemble? Autant de questions explorées par le domaine de l'intelligence collective. Hérité de l'intelligence en essaim, qui s'intéressait aux colonies de fourmis et de termites dans les années 1980, ce champ de recherche analyse les différents types de décision humaine. Qu'il s'agisse de trancher sur un budget, de poser un diagnostic médical ou de choisir la playlist de la soirée, les scientifiques ont développé des techniques innovantes.

Les secrets des groupes efficaces

En 2010, Anita Woolley, de l'université Carnegie-Mellon, aux États-Unis, et ses collègues ont publié une expérience pionnière, montrant que la pertinence des décisions collectives est très variable selon les groupes. Dans cette étude, près de 700 personnes, réparties en groupes de deux à cinq, devaient discuter librement et parvenir à un consensus sur les actions à mener. L'objectif était d'effectuer diverses tâches, comme jouer aux dames par équipe contre

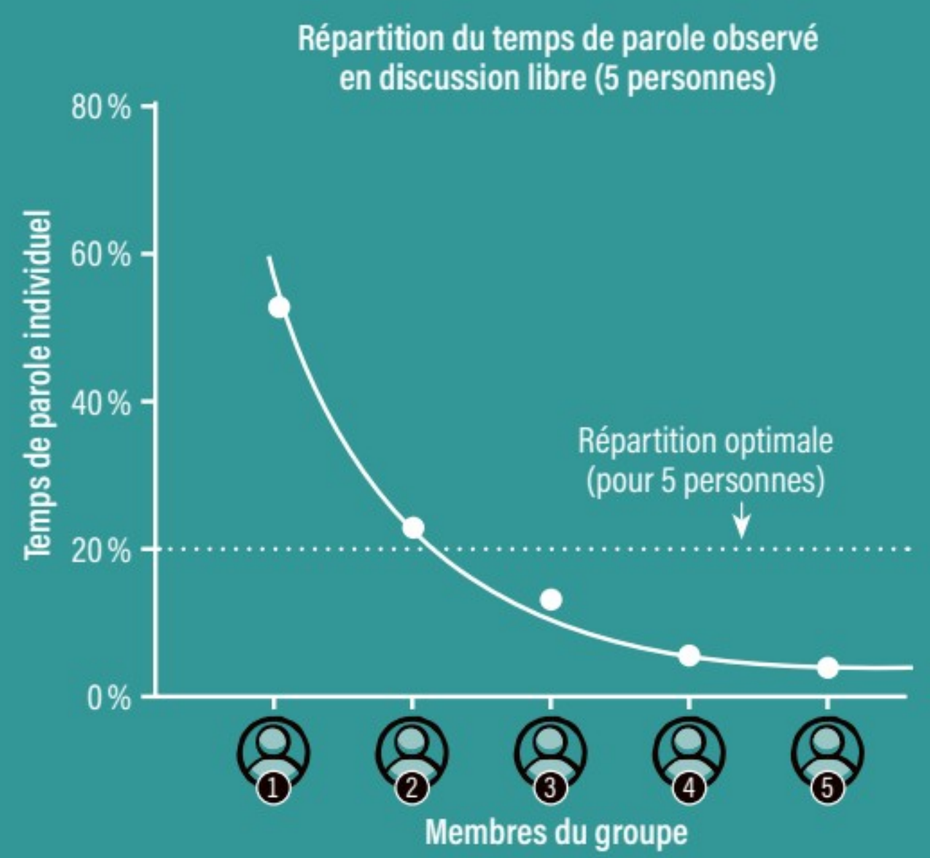
un ordinateur ou maximiser l'efficacité d'une séance collective de shopping – les participants devaient choisir les boutiques où acheter le maximum d'éléments d'une liste de courses, en minimisant la distance parcourue et en respectant le budget. Or les performances aux différentes tâches étaient non seulement très différentes selon les groupes, mais surtout corrélées entre elles. Autrement dit, quand un groupe est performant sur une tâche, il tend à l'être partout. Selon les chercheurs, cela traduit l'existence d'un facteur d'intelligence collective *c* caractérisant l'efficacité d'un groupe et assimilable au quotient intellectuel (QI) déterminé pour les individus.

Les analyses ont montré que la sensibilité sociale – la capacité à comprendre ce que les autres essaient d'exprimer – est un déterminant clé de cette intelligence. On la mesure avec un test qu'on appelle *Reading the mind in the eyes* («lire l'état

Pourquoi les réunions sont souvent inefficaces

Quand il faut prendre une décision à plusieurs, le premier réflexe est de s'asseoir autour d'une table pour en discuter. Hélas, il y a de fortes chances que ce soit inefficace – nous avons tous le souvenir d'interminables réunions qui ne débouchent sur rien de concret. C'est que nos discussions spontanées sont truffées de biais, connus des psychologues depuis longtemps. Et ce, à toutes les étapes du processus de décision.

La collecte d'informations, d'abord. Le principe de l'intelligence collective est de mobiliser celles que chacun détient. Or la discussion a spontanément tendance à se focaliser sur ce que tout le monde sait, sur les points d'accord, et de façon d'autant plus marquée que le groupe est nombreux. Ce biais, qualifié de profil caché *(hidden profile)*, a été observé par le psychologue américain Gary Stasser, de l'université de Miami, en 1989, lors d'expériences où des groupes de 3 à 6 personnes devaient choisir le meilleur candidat au poste de président du conseil des étudiants – chaque membre ayant reçu des informations légèrement différentes. Les forces et les faiblesses identifiées par chacun monopolisaient ainsi la discussion, tandis que celles que seul un des membres du groupe avait repérées émergeaient peu.



Cette courbe montre la répartition moyenne du temps de parole dans un groupe de cinq personnes qui discutent librement : le plus bavard monopolise plus de la moitié de la conversation, le deuxième plus de 20 %. Or les recherches montrent que plus la répartition est inégale, moins le groupe est performant.

La phase de génération d'idées ne s'en sort pas mieux. Dès 1991, une métaanalyse (une synthèse des travaux sur un sujet doublée d'un calcul des effets moyens) effectuée par Brian Mullen, de l'université de Syracuse, aux États-Unis, et ses collègues montrait que le brainstorming est peu efficace : il produit moins d'idées et de moins bonne qualité qu'un groupe d'individus travaillant séparément – même s'il reste utile pour créer une forme d'identité commune et de cohésion de groupe. Le phénomène est accentué par la présence du manager et il s'amplifie avec le nombre de participants. Selon ces travaux, 92 % des groupes font moins bien quand ils brainstorment que si leurs membres avaient travaillé séparément !

Il semble que les membres du groupe tendent à oublier ou à abandonner leurs idées pendant qu'un autre parle et que certains se censurent par peur de dire une bêtise ou de s'exprimer en public. En outre, les premières idées guident trop fortement les réflexions : cet effet, qualifié de biais d'ancrage et mis en évidence par le Prix Nobel d'économie Daniel Kahneman et le psychologue Amos Tversky dans les années 1970, restreint l'espace mental exploré. Il risque en outre de fausser la décision finale, en créant une référence qui l'influence fortement. Supposez par exemple que vous deviez décider d'un budget à allouer à un projet : la valeur finale sera probablement supérieure si le premier participant de la réunion propose 50 000 euros plutôt que 10 000 euros.

Autre biais néfaste au moment de trancher : le biais de diffusion des responsabilités, qui conduit à ne pas contredire une mauvaise décision prise par la majorité ou par une personne d'autorité quand les enjeux sont énormes. Les travaux du psychologue américain Irving Janis, au début des années 1970, suggèrent que ce biais explique plusieurs déconvenues majeures, comme l'invasion ratée de la baie des Cochons, qui visait à renverser le régime de Fidel Castro en 1961, ou l'explosion de la navette Challenger, en 1986 : personne n'a osé prendre la responsabilité d'arrêter ces projets malgré les signaux d'alerte.

Enfin, l'inégalité des temps de parole est souvent délétère à tous les stades. Dès 1951, le psychologue américain Robert Bales a montré que dans un groupe de 5 personnes le plus bavard monopolise en moyenne la moitié de ce temps à lui seul *(voir la figure ci-contre)*. Et ce n'est pas forcément une question de compétence : les hommes, les personnes les plus âgées et celles qui ont un haut statut hiérarchique s'expriment en général davantage. En conséquence, ceux qui parlent le plus ont un poids disproportionné dans la décision, qui relève davantage d'un processus d'influence sociale que d'une véritable combinaison des savoirs.

© Pour la Science, d'après R. F. Bales et al., Channels of communication in small groups, American Sociological Review, 1951.

d'esprit dans les yeux»), qui consiste à essayer de deviner l'émotion exprimée par un regard (*voir la figure page 18*) : en pratique, c'est par cette faculté à détecter une émotion que l'on s'approche le plus de la capacité à identifier le sens d'une expression «en général». Plus le score moyen à ce test est élevé dans un groupe, plus ce dernier est performant (plus son facteur *c* est élevé). Ce score prédisait même bien mieux les performances que le QI moyen des membres. Les groupes étaient en outre d'autant plus efficaces qu'ils comptaient de femmes, ce qui semblait s'expliquer par leur meilleure sensibilité sociale – mesurée par cette étude et attestée par plusieurs autres.

Dans les années qui ont suivi, la psychologue américaine a montré que ce facteur prédit aussi un bon fonctionnement du groupe dans les réunions en visioconférence ou en *chat*. La forte sensibilité sociale favorise notamment les échanges constructifs. Dans ces travaux, les groupes étaient d'ailleurs d'autant plus efficaces que le temps de parole était bien réparti. Comme l'explique Anita Woolley : « Les personnes socialement sensibles communiquent efficacement, car elles savent observer les signaux émotionnels, se mettre à la place des autres et lire entre les lignes. »

En 2017, ses collègues et elle ont découvert que les équipes dotées d'une bonne sensibilité sociale se coordonnent mieux même quand l'essentiel des communications est tacite. Ces équipes avaient ainsi de meilleures performances au jeu vidéo League of Legends, où les joueurs s'organisent en groupes pour combattre les autres. Probablement parce que leurs membres comprenaient mieux les mouvements et les intentions de leurs coéquipiers, et décidaient de leurs propres actions en conséquence sans même avoir besoin de se parler. Dans un travail de doctorat cosupervisé par l'un d'entre nous (Mehdi Moussaïd) et par Brent Strickland (chercheur CNRS à l'École normale supérieure et à l'université UM6P de Rabat), Nouhayla Majdoubi teste actuellement si cela fonctionne aussi au foot : les équipes composées de joueurs ayant une forte sensibilité sociale gagnent-elles plus souvent ? Réponse prochainement !

En 2021, Anita Woolley et ses collègues ont publié une vaste synthèse de 22 études incluant plus de 1 300 groupes. Outre la confirmation de l'existence d'un facteur d'intelligence collective, ces travaux ont montré que les groupes les plus performants sont ceux qui parviennent à se coordonner pour couvrir tous les éléments d'une tâche et à répartir ces éléments entre les membres en fonction de leurs points forts et de leurs points faibles. Les auteurs suggèrent alors de nommer un facilitateur pour répartir les rôles et les tâches. Il peut aussi être utile de cartographier les compétences de chacun en amont (qui sait faire quoi, qui possède quelles informations, etc.) et de faire des points fréquents pour détecter les angles morts. Enfin, mieux vaut être attentif aux nombreux biais de discussion qui rendent souvent les réunions inefficaces (*voir l'encadré ci-contre*).

Comment limiter les biais de discussion

Voici plusieurs méthodes que je propose pour endiguer les processus d'influence sociale qui nuisent à l'intelligence collective :

- Nommer un facilitateur neutre, chargé de répartir le temps de parole et d'éviter que les plus bavards n'aient davantage de poids.
- Faire parler les dirigeants et les experts les derniers (même si on leur donne plus de poids dans la décision finale). En effet, leur parole a énormément d'influence et risque de faire converger les avis trop tôt, au détriment de l'exploration globale. Au sein de mon équipe, à l'institut Max-Planck pour le développement humain, le chef s'exprime toujours le dernier et chacun prend la parole par ordre d'ancienneté, en commençant par le plus jeune.
- Commencer par faire réfléchir chacun au sujet de manière indépendante. Au début de la réunion, on présente une synthèse anonyme des opinions – ou une moyenne des estimations, si l'on cherche à s'accorder sur une valeur précise, comme un budget à allouer à un projet. L'objectif est de créer l'ancrage (la forte influence du premier qui parle) sur l'avis du groupe, et non sur celui d'un de ses membres.
- Discuter de ce premier bilan, et répéter le cycle plusieurs fois. En 2018, Ethan Bernstein et ses collègues de l'université Harvard, ont montré que cette technique de recherche intermittente est plus efficace que des échanges continus pour résoudre le problème dit « du voyageur de commerce » (trouver le plus court chemin qui passe par un certain nombre villes).

FAIRE PARLER LES DIRIGEANTS ET LES EXPERTS LES DERNIERS LIMITERAIT LE RISQUE QUE LEUR INFLUENCE NE FASSE CONVERGER LES AVIS TROP TÔT

Mehdi Moussaïd

Sources : B. Mullen *et al.*, Productivity loss in brainstorming groups : A meta-analytic integration, *Basic and Applied Social Psychology*, 1991 ; E. Bernstein *et al.*, How intermittent breaks in interaction improve collective intelligence, *PNAS*, 2018.

Une autre façon de prévenir ces biais consiste bien sûr à adopter un mode de fonctionnement collectif qui ne passe pas par une discussion. Plusieurs techniques ont fait la preuve de leur efficacité, à tous les stades du processus de décision. En pratique, pour faire un choix, nous essayons souvent d'anticiper ce qui va advenir. Pour décider de retirer un grain de beauté, le dermatologue évalue le risque qu'il évolue en tumeur. Pour miser sur une équipe sportive plutôt que sur son adversaire, le parieur estime la probabilité qu'elle gagne. Pour prendre ou pas son parapluie, le promeneur jauge le risque d'averse…

Anticiper pour décider

Afin d'évaluer collectivement la probabilité de survenue d'un événement, le plus simple est alors de calculer la moyenne des estimations individuelles. Sachant que si le groupe a estimé le risque de pluie à 70% et qu'il ne tombe pas la moindre goutte, cela ne signifie pas qu'il avait tort – puisqu'il restait tout de même 30% de chances de temps sec. Pour mesurer la clairvoyance collective, il faut prendre d'énormes jeux de prédictions et faire quelques statistiques – autrement dit, vérifier que sur 100 fois où le groupe a prédit un risque de pluie de 70%, il a bien plu 70 fois.

C'est ce qu'a effectué l'équipe du psychologue et économiste Philip Tetlock, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, après avoir proposé à des groupes d'évaluer la probabilité d'une série d'événements (du type « Les forces d'opposition syriennes auront-elles repris le contrôle d'Alep avant le 30 avril 2013? »). Les résultats, publiés en 2014, ont confirmé que la moyenne des estimations individuelles donnait une bonne approximation de la probabilité. Diverses astuces permettaient en outre d'optimiser encore les prédictions, comme calculer une moyenne pondérée en donnant plus de poids aux estimations des meilleurs prédicteurs individuels.

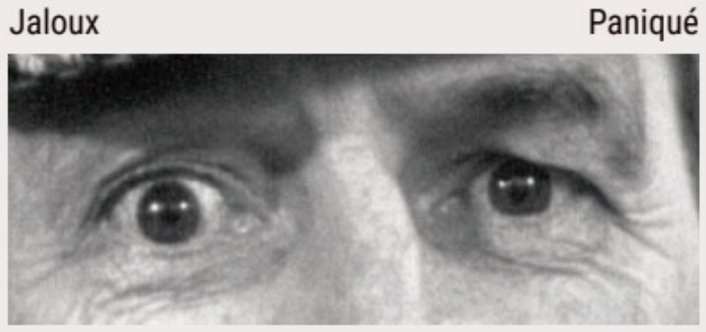
Autre levier majeur pour améliorer la précision d'un groupe: augmenter sa diversité. L'idée est assez intuitive: si on prend des gens qui se ressemblent – qui ont le même âge, la même formation, le même genre, le même savoir-faire… et donc probablement une certaine ressemblance cognitive –, il n'y a pas vraiment de bonus à avoir un groupe, car tous ses membres vont converger vers la même solution, bonne ou mauvaise. Dans une simulation publiée en 2004, les chercheurs américains Lu Hong et Scott Page, de l'université du Michigan, aux États-Unis, ont testé l'influence de la diversité. Pour cela, ils ont créé des agents numériques capables d'appliquer un ensemble de règles afin d'identifier la valeur maximale prise par une fonction mathématique donnée (qui a plusieurs maximums locaux et un maximum global). Or les groupes d'agents dotés de règles très variées trouvaient une meilleure solution que ceux que constituaient les agents individuellement les plus performants (qui restaient plus souvent « bloqués » sur un maximum local). Autrement dit, les groupes hétérogènes surpassent les groupes d'experts, car ils explorent une plus grande partie de l'espace des possibles.

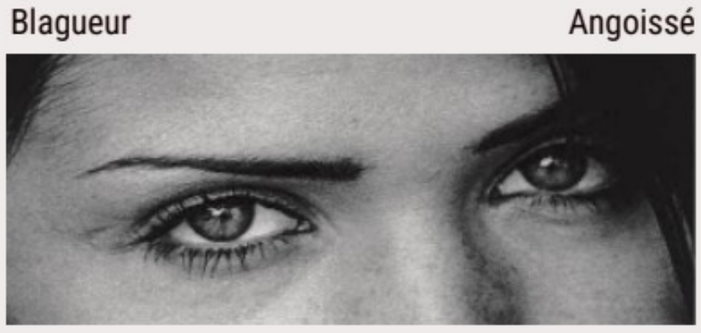
Scott Page est allé jusqu'à établir un « théorème de la diversité des prédictions » (*voir l'équation page ci-contre*), dont la formulation mathématique est un peu compliquée, mais qui signifie en résumé ceci: l'erreur collective est égale à l'erreur individuelle moyenne moins la diversité des estimations. Autrement dit, pour augmenter l'intelligence collective d'un groupe, il y a deux solutions: soit faire monter en compétence chacun de ses membres, soit accroître sa diversité.

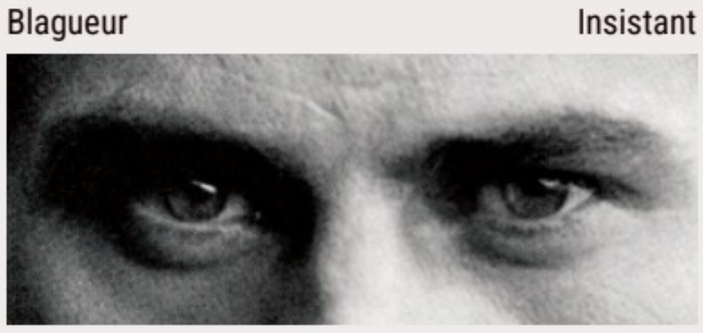
Mieux qu'un expert?

En effet, même quand les erreurs individuelles sont importantes, elles finissent par s'annuler mutuellement si elles se produisent dans des directions aléatoires. En 2011, Julia Minson, de l'université Harvard, a en outre montré qu'un expert peut être surpassé par un groupe: dans une tâche consistant à prédire le montant des indemnités accordées par le jury à la suite d'un procès, 15 étudiants en

Le test *Reading the mind in the eyes* (« Lire l'état d'esprit dans les yeux ») consiste à deviner l'émotion exprimée par un regard (réponses en page-ci-contre pour les 4 exemples ci-dessous). Il comporte 36 photographies dans sa version intégrale. Plus les membres d'un groupe ont un score élevé à ce test, plus le groupe est performant.







© S. Baron-Cohen et al., Journal of Child Psychology and Psychiatry, 1997/S. Baron-Cohen et al., Journal of Child Psychology and Psychiatry, 2001/M. Prevost et al., Cognitive Neuropsychiatry, 2013

$$(c-\theta)^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(s_i-\theta)^2 - \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(s_i-c)^2$$

Cette équation traduit le théorème de la diversité des prédictions, établi par Scott Page, de l'université du Michigan. Le carré de l'erreur collective ($c - \theta$, où c est l'estimation collective, correspondant ici à la moyenne des estimations, et θ la bonne réponse) est calculé en prenant un terme qui traduit l'erreur individuelle moyenne (la somme des $(s_i - \theta)^2/N$ au carré, où s_i est l'estimation de l'individu i et N la taille du groupe) et en lui retranchant un terme caractéristique de la diversité des estimations (la somme des $(s_i - c)^2/N$). Si les membres de ce groupe se trompent beaucoup mais dans des directions très différentes, leur estimation collective est donc très précise.

© Pour la Science; Source : L. Hong et S. E. Page, Groups of diverse problem solvers can outperform groups of high-ability problem solvers, PNAS, 2004

droit, dont les estimations étaient moyennées, ont fait mieux qu'un avocat expérimenté. Pour autant, tous ces travaux ne remettent pas en cause l'importance de l'expertise. D'une part, ils impliquaient des participants ou agents numériques possédant un certain nombre de connaissances de base dans le domaine : l'agrégation améliore la précision d'une foule qui détient un minimum de compétences, elle ne crée pas la bonne réponse à partir de rien. Si vous demandez à des enfants de cinq ans d'effectuer un diagnostic médical, leurs réponses ne seront pas meilleures qu'un lancer de dés et toutes les procédures d'intelligence collective ne feront qu'amplifier un bruit aléatoire.

D'autre part, dans les travaux menés par l'équipe d'Anita Woolley, les groupes réussissaient mieux certaines tâches techniques (comme… le sudoku !) quand ils comptaient un ou plusieurs membres experts. Attention toutefois, lorsque le fonctionnement collectif implique des réunions, à ce que ces derniers n'influencent pas trop le groupe, au détriment de la diversité. Quelques règles simples peuvent y aider (*voir l'encadré page 17*).

Les marchés prédictifs

Le problème de la méthode de la moyenne est qu'elle est sensible aux valeurs extrêmes : le groupe surestime la probabilité des événements rares (gagner au loto, être victime d'un crash aérien) et sous-estime celle des événements très fréquents (comme les conséquences néfastes du tabagisme ou du changement climatique). D'abord en raison d'un biais cognitif individuel, qui nous rend peu doués pour estimer les valeurs statistiques extrêmes, et ensuite en raison d'un effet de groupe : quand on s'approche de 90 %, il reste peu de marge vers le haut et beaucoup vers le bas (ceux qui surestiment la fréquence ne pourront pas monter à 120 %, tandis que ceux qui la sous-estiment iront sans problème jusqu'à 60 %), de sorte que la moyenne des estimations a naturellement tendance à descendre.

Une autre méthode permet alors d'éviter cet écueil : les marchés prédictifs. Le principe est de vendre un pari sur un événement à un certain nombre de personnes, au prix maximum de 1 euro, et de laisser le prix du pari évoluer au gré de l'offre et de la demande ; si l'événement se produit réellement, on gagne 1 euro. Plus il y a de gens qui estiment un événement probable, plus les paris sur cet événement seront demandés et plus le prix de la transaction sera donc élevé.

En 2008, une vingtaine de scientifiques – dont quatre Prix Nobel et Philip Tetlock – vantaient cet outil dans la revue *Science*, y voyant une précieuse aide à la décision. Et en 2012, Lionel Page, de l'université de technologie de Queensland, et Robert Clemen, de l'université Duke, ont compilé le prix de près de 600 prédictions passées (fruits de plus de 500 000 transactions) et ont analysé ce qui est réellement survenu. Résultat : le prix auquel s'échange une prédiction traduit la probabilité de l'événement avec une très bonne précision. La correspondance est excellente à court terme, et un peu moins quand l'événement survient plus de 100 jours après la prédiction.

Les marchés prédictifs sont loin d'être cantonnés au laboratoire. De multiples entreprises, comme General Electric, Google, Arcelor Mittal ou Microsoft les utilisent déjà en interne, par exemple pour savoir si tel produit va bien fonctionner ou pour anticiper l'évolution du cours du pétrole. Un certain nombre de plateformes en ligne en proposent également. Ainsi

Dans les 4 photos ci-contre, il fallait reconnaître, de gauche à droite : paniqué, désir, insistant, hésitant.

de la plateforme Hypermind, conçue par l'entrepreneur et chercheur français Émile Servan-Schreiber. À la question «En 2026, les États-Unis ou Israël récupéreront-ils une partie des stocks d'uranium enrichi de l'Iran?», le marché prédisait «non» à 88% le 16 juin 2026. Le même jour, à la question «Qui succédera à Emmanuel Macron à la présidence de la République française?», aucun des candidats soupçonnés ou déclarés ne dépassait les 25%, là où la réponse «Quelqu'un d'autre» culminait aux environs de 60%.

Ces plateformes suscitent toutefois quelques réserves. Un article publié en 2026 dans la revue *Nature* soulignait ainsi qu'elles peuvent être sensibles à l'émotion du moment et à divers événements marquants: juste après l'annonce d'une épidémie d'hantavirus sur un navire de croisière en mai 2026, l'un de ces marchés a évalué à 19% une probabilité d'épidémie mondiale dans l'année, mais cette probabilité est tombée à 5% quelques semaines plus tard, une fois passé le choc initial. Selon Bill Hanage, épidémiologiste à l'université Harvard, les paris en la matière pourraient être biaisés par l'anxiété autour des pandémies, consécutive au Covid-19. Dans une tribune récente au journal *Le Monde*, l'économiste Jamal Bououyour s'inquiétait en outre des risques de manipulation, certains acteurs pouvant avoir intérêt à biaiser le marché par des achats massifs d'actions, au service de stratégies d'influence ou de spéculation financière. À noter enfin que certaines plateformes sont parfois partiellement bloquées, en raison des régulations sur les paris en ligne (ce n'est pas le cas de Hypermind, qui est gratuite et fonctionne avec une sorte de monnaie virtuelle).

Le moment de trancher

Après la phase d'analyse et de réflexion, il reste à trancher. Peut-on faire mieux à plusieurs? La question a été particulièrement étudiée dans le cas du diagnostic médical, en raison des enjeux associés: pour les seuls États-Unis, on estime que les erreurs de diagnostic seraient à l'origine de plus de 700000 cas graves (handicap permanent ou décès).

En 2016, Ralf Kurvers, de l'institut Max-Planck pour le développement humain, et ses collègues ont étudié l'efficacité d'un simple vote. Dans leur étude, 40 dermatologues ont examiné les dossiers médicaux de 108 patients et se sont prononcés sur la nature d'une lésion cutanée (dont l'évolution était connue des chercheurs): bénigne ou cancéreuse? Résultat: individuellement, les médecins donnaient le bon diagnostic pour 63% des dossiers, et collectivement (en prenant le diagnostic choisi le plus souvent), dans 65% des cas. La précision s'améliorait donc, mais de seulement deux points, pour 40 fois plus de médecins mobilisés.

795000

c'est le nombre de cas graves (regroupant les cas de handicaps permanents et les décès) que les erreurs de diagnostic provoqueraient chaque année aux États-Unis

Source: P. J. Marant-van de Mheen et al., BMJ Quality & Safety, 2024

La technique de la métamajorité

D'autres travaux retrouvent la même conclusion avec des questions de culture générale ou des parties d'échecs dans des configurations piégeuses (un coup paraît évident mais a des conséquences négatives ultérieures). La majorité se trompe donc souvent, en partie à cause d'éléments trompeurs dans les données à analyser. Il existe alors une autre méthode, dont Drazen Prelec, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), aux États-Unis, a prouvé toute l'efficacité en 2017: celle de la réponse étonnamment populaire (*surprisingly popular answer*, en anglais). Le principe est de poser deux questions: «À votre avis, quelle est la bonne réponse?», puis «À votre avis, quelle sera la réponse majoritaire?». On pourrait parler de technique de la

LES AUTEURS

Mehdi Moussaïd
chercheur en psychologie sociale à l'institut Max-Planck pour le développement humain, à Berlin, et à l'université UM6P, à Rabat, créateur de la chaîne Youtube Fouloscopie

Guillaume Jacquemont
journaliste à *Pour la Science*, ingénieur centralien, diplômé en sciences cognitives

métamajorité, car on sollicite ainsi une capacité de métacognition, dans la mesure où les participants doivent prendre du recul sur leur propre réponse.

L'idée est astucieuse : quelqu'un qui détecte une question piège répondra différemment aux deux questions, car il pensera que la majorité se trompera. S'il connaît la capitale de la Côte d'Ivoire, par exemple, il répondra probablement Yamoussoukro à la première question, mais Abidjan – la plus grande ville du pays – à la seconde. Des réponses divergentes signalent ainsi une question piège, il faut alors suivre la minorité.

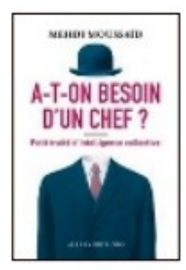
Dans une série d'expériences, Drazen Prelec a appliqué sa méthode au diagnostic médical, aux questions de culture générale et à l'estimation du prix d'œuvres d'art – autre domaine où les gens se trompent beaucoup, ayant tendance à attribuer un prix élevé à toute œuvre qui a l'air profonde. Les résultats ont été systématiquement bien meilleurs qu'avec la méthode de la majorité simple. Quand il s'agissait par exemple d'indiquer la capitale des États américains, cette dernière méthode ne donnait que 35 % de bonnes réponses, là où la métamajorité culminait à plus de 80 %. Pour le diagnostic médical, la précision était d'environ 74 %.

Une liste de choix

Une autre méthode est très performante dans ce dernier cas, comme l'ont montré en 2023 Ralf Kurvers et ses collègues : plutôt que de donner seulement son premier choix, chaque participant est libre d'indiquer plusieurs options, de la plus probable à la moins probable. En cas de douleurs à la poitrine, de fièvre et de malaises, il pourra par exemple proposer : 1. Bronchopneumopathie obstructive chronique (une atteinte des poumons et des bronches souvent liée au tabac) ; 2. Narcolepsie ; 3. Dépression. Selon les auteurs, cela correspond d'ailleurs davantage à la pratique réelle des médecins, qui procèdent par élimination d'hypothèses. On attribue ensuite un poids à chaque option en fonction de sa position sur la liste (la première ayant le poids le plus élevé) et on calcule la moyenne pour tous les participants. Le diagnostic final correspond à la maladie qui obtient la moyenne la plus élevée. Il est aussi possible de renvoyer la liste des 3 options les plus probables selon le collectif, en laissant un médecin, expert du domaine, effectuer le choix final.

Dans l'étude de Ralf Kurvers, la méthode a été testée sur 1333 cas répertoriés dans une base de données et en agrégeant automatiquement les propositions de 10 médecins. Résultat : le bon diagnostic est apparu en tête de liste pour environ 57 % des dossiers – là où les médecins seuls n'étaient qu'à 37 %. La probabilité que ce diagnostic se trouve dans la liste des 3 pathologies les plus plébiscitées est en outre passée de 46 % à 76 %.

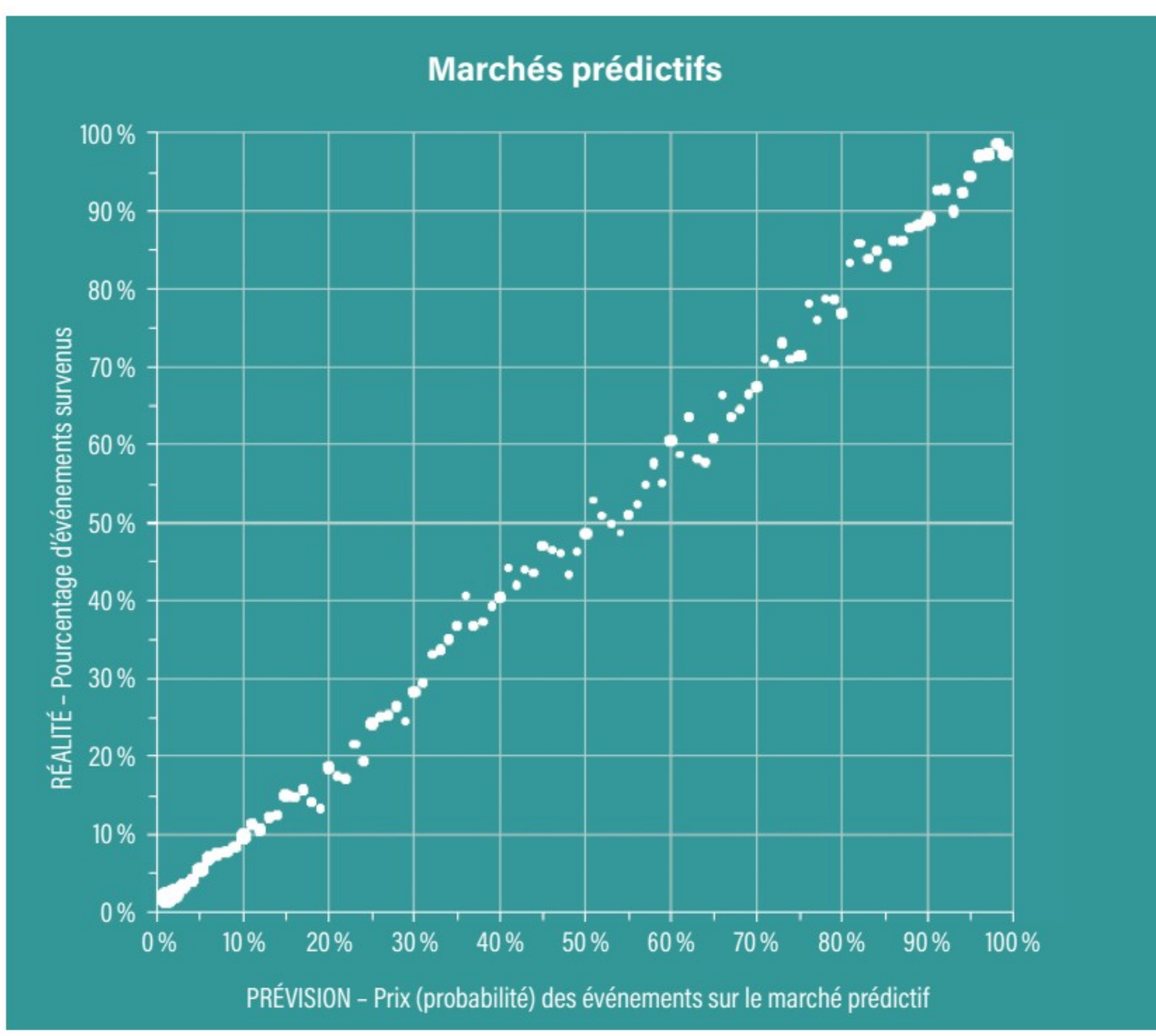
À LIRE



M. Moussaïd, *A-t-on besoin d'un chef ?*, Allary, 2026.

L'IA, un membre du groupe comme un autre ?

En 2025, Nikolas Zöller et ses collègues, au sein de cette même équipe, ont découvert qu'intégrer des IA génératives au groupe permet d'augmenter encore l'efficacité de cette méthode. Les diagnostics de 5 médecins étaient ainsi compilés avec ceux établis par 5 modèles de langage classiques (ChatGPT, Gemini, Claude…), à partir des mêmes descriptions cliniques. Les résultats ont montré que le groupe humain-IA surpassait les humains seuls ou les IA seules. La précision d'un groupe hybride était ainsi supérieure de quelques points de pourcentage par rapport à celle d'un groupe de médecins, et de 10 à 20 points de pourcentage par



Le principe des marchés prédictifs est de vendre un pari sur un événement, dont le prix évolue au gré de l'offre et de la demande (le maximum est fixé à 1 euro). Le prix auquel se stabilise le pari traduit la probabilité de survenue de l'événement. Ici, environ 60 % des événements dont la probabilité était estimée à 60 % (le prix était de 60 centimes) sont survenus. Cette courbe, établie par la plateforme privée Hypermind, est issue de douze ans de données relatives à plusieurs milliers d'événements possibles et près de 1 million de transactions.

© Hypermind.com

rapport à celle d'un médecin seul. Une analyse fine des données a en outre révélé que cette intégration de l'IA accroissait la diversité des erreurs, ce qui aidait les diagnostics corrects à émerger (car si tout le monde faisait la même erreur, ce serait elle qui remporterait le vote).

Plus généralement, un collectif d'experts s'est penché sur les promesses et les dangers de l'IA en matière d'intelligence collective, synthétisant les recherches sur le sujet dans la revue *Nature Human Behaviour* en 2023. Selon eux, les modèles de langage peuvent augmenter cette intelligence, car ils permettent par exemple d'agréger les opinions de groupes plus nombreux (l'IA aide alors à résumer les positions des uns et des autres, traduit les interventions si besoin, etc.) ou d'augmenter le nombre d'idées émises – de récents travaux ont montré qu'il ne faut que quelques heures à une IA générative pour en proposer autant qu'un groupe humain en plusieurs jours, voire plusieurs mois. Le risque étant, pour ces experts, que la diversité des idées diminue si tout le monde s'appuie sur les mêmes modèles de langage. Pour y remédier, ils en appellent à plus de transparence sur le fonctionnement de ces modèles, afin de favoriser leur étude et leur diversification.

Dans une expérience, la majorité des participants ont estimé que cette peinture vaut moins de 1000 dollars, alors que son prix est estimé à 2,6 millions de dollars. À l'inverse, d'autres œuvres, qui ne coûtaient que quelques dizaines de dollars, étaient jugées très chères parce que d'apparence plus sophistiquée. La technique de la métamajorité, qui consiste à poser deux questions aux membres d'un groupe (« À votre avis, quelle est la bonne réponse ? » et « À votre avis, quelle sera la réponse majoritaire ? »), permet d'éviter ce type d'erreur.

© Yue Minjun, The Artist and his Friends, 1991 (collection privée)

Quand la décision est subjective

Plusieurs méthodes permettent donc de mobiliser l'intelligence collective pour améliorer les décisions. Mais, dans nombre de cas, l'existence même d'une bonne décision est sujette à caution, tant les critères de choix incluent une part de subjectivité : quel homme politique est-il le plus compétent pour diriger le pays ? Quelles règles morales faut-il implémenter dans une voiture autonome ? Quel est le meilleur film de l'année, le meilleur morceau de musique, le meilleur restaurant ?

Des recherches surprenantes suggèrent qu'en l'absence de bonne réponse objective, le résultat d'un choix collectif découle en grande partie d'une dynamique d'amplification aléatoire. Dans une expérience publiée en 2006 par Matthew Salganik, de l'université de Princeton, aux États-Unis, et ses collègues, plus de 14000 volontaires se sont vu proposer d'écouter des chansons, qu'ils pouvaient ensuite télécharger librement. Dans les cas où les participants voyaient le nombre de téléchargements de chaque morceau, le succès de ces derniers n'était que très partiellement lié à leur qualité intrinsèque – mesurée par les préférences individuelles en l'absence d'influence sociale. « Les meilleures chansons ont rarement fait un flop, et les pires ont rarement eu du succès, mais tout autre résultat était possible », écrivent les chercheurs.

Ceux-ci ont répliqué l'expérience dans huit « mondes virtuels » indépendants et constaté que le succès d'un même morceau était très variable entre les mondes. Les préférences des premiers participants impriment un mouvement dans un sens ou dans l'autre, qui est ensuite amplifié par la dynamique sociale. Bien sûr, dans la vie réelle, nous ne connaissons pas le nombre exact de téléchargements de chaque morceau. Mais nous sommes exposés à des signaux d'influence sociale bien plus nombreux : le nombre de vues sur YouTube, d'écoutes sur Spotify, d'étoiles sur Amazon, d'avis sur Google, sans parler des sondages électoraux qui proposent en temps réel des intentions de vote de millions de personnes à partir de guère plus de un ou deux milliers de personnes, certes réputées représentatives, interrogées. Loin d'être un artefact de laboratoire, le mécanisme d'amplification aléatoire opère donc en permanence dans nos choix culturels, commerciaux et politiques. Bon à savoir avant l'élection présidentielle de 2027 en France…

L'évaluation des décisions collectives reste en tout cas compliquée lorsque aucune référence absolue ne permet de savoir si l'on a eu tort ou raison. Dans ces situations, on évalue plutôt divers types de critères : le groupe a-t-il réussi à trancher dans un temps raisonnable ? Ses membres sont-ils satisfaits du résultat ? La polarisation a-t-elle diminué ?

Essayer de minimiser les biais de discussion (*voir l'encadré page 17*) est alors probablement utile. Les travaux d'Anita Woolley et ses collègues montrent par exemple qu'un temps de parole mieux réparti aboutit à un meilleur équilibre des perspectives concurrentes dans un jugement moral (en l'occurrence, décider de la procédure disciplinaire à engager envers un étudiant qui a tenté de soudoyer son professeur pour obtenir une meilleure note). Recourir à un facilitateur peut donc être intéressant pour veiller à cette répartition.

Des recherches surprenantes suggèrent qu'en l'absence de bonne réponse objective, le résultat d'un choix collectif découle en grande partie d'une dynamique d'amplification aléatoire

Mais une autre technique semble intéressante : la méthode Delphi (du nom de la ville de Delphes, où un oracle émettait ses prédictions dans l'Antiquité grecque). Le principe est de répéter des cycles de plusieurs séquences : on commence par voter (de façon anonyme, pour minimiser les pressions des autres), puis on observe les résultats, on argumente et on recommence le cycle. Conçue dans les années 1950 en collaboration avec l'armée de l'air des États-Unis pour des évaluations stratégiques (quel ensemble de cibles industrielles choisirait de bombarder un planificateur soviétique ?), cette méthode est intrinsèquement destinée à produire du consensus parmi un groupe de personnes.

En 1999, Gene Rowe, de l'Institut de recherche alimentaire de Norwich, et George Wright, de l'université Strathclyde, ont passé en revue les recherches évaluant son efficacité. Certaines tâches auxquelles elle était appliquée avaient une solution objective (évaluer le diamètre de Jupiter), dont le groupe s'approchait alors davantage. Mais pour d'autres, les réponses comportaient une part de subjectivité (lister par ordre de priorité les 15 objets les plus utiles pour survivre sur la Lune), voire dépendaient des valeurs individuelles (identifier les 7 principales caractéristiques d'un programme de formation efficace ; déterminer quelles valeurs les États-Unis devraient adopter). Dans ces derniers cas, le groupe se rapprochait davantage d'un consensus que s'il interagissait de façon non structurée : les votes ou opinions des uns et des autres devenaient de plus en plus similaires, même si l'accord n'était jamais parfait (là encore, le recours à un facilitateur peut être utile, afin de déterminer quand le niveau d'accord est suffisant pour trancher).

La question de savoir si cela traduit une réelle évolution des opinions individuelles ou une forme de conformisme reste débattue. Mais parvenir à converger sur ces sujets difficiles est déjà un apport notable. Nous avons donc tout intérêt à nous organiser lorsque nous devons décider ensemble.

Ce qui ne signifie pas qu'il n'y a aucune place pour l'informel en matière d'intelligence collective. En 2026, une surprenante étude publiée par Lluís Danús, de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, et ses collègues a analysé l'impact de plus de 130000 articles scientifiques (quantifié par différents indices mesurant à quel point ils sont partagés) et montré que le meilleur prédicteur du succès n'est pas le prestige de l'université, l'expérience du chercheur ou la méthodologie utilisée mais… le nombre de personnes remerciées à la fin ! Si ces personnes peuvent bien sûr participer à diffuser l'article, ce n'est sans doute pas la seule explication. Les discussions de couloir, les retours rapides sur une intuition, les conseils donnés après un séminaire ou les échanges à la machine à café sont importants pour améliorer la qualité d'un travail. Bref, veillez sur votre réseau informel, c'est une véritable infrastructure cognitive. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Danús *et al.*, Informal connections outweigh coauthorship ties in academic impact, *PNAS*, 2026.

N. Zöller *et al.*, Human-AI collectives most accurately diagnose clinical vignettes, *PNAS*, 2025.

D. Prelec *et al.*, A solution to the single-question crowd wisdom problem, *Nature*, 2017.

R. Kurvers *et al.*, Boosting medical diagnostics by pooling independent judgments, *PNAS*, 2016.

A. Woolley *et al.*, Evidence for a collective intelligence factor in the performance of human groups, *Science*, 2010.

K. Arrow *et al.*, The promise of prediction markets, *Science*, 2008.

G. Rowe et G. Wright, The Delphi technique as a forecasting tool : issues and analysis, *International Journal of Forecasting*, 1999.

ENSEIGNEMENT DES MATHÉMATIQUES

Comment dépasser le paradoxe français

Les élèves français se classent en fin de tableau dans les enquêtes internationales, alors que la France continue de produire des mathématiciens parmi les meilleurs du monde. Un paradoxe qu'éclairent Stanislas Dehaene, neuroscientifique spécialiste de l'apprentissage des mathématiques, et Pierre-Michel Menger, sociologue du travail, fin connaisseur de la formation des élites mathématiques.

> Les compétences en mathématiques des élèves en France sont à la fois plus homogènes et moins solides qu'ailleurs

PIERRE-MICHEL MENGER
est sociologue, titulaire de la chaire de sociologie du travail créateur au Collège de France. Ses travaux portent notamment sur les mécanismes de l'excellence, des carrières scientifiques, de l'innovation et des inégalités de réussite.

© Patrick Imbert/Collège de France

> La recherche démontre que ce qui compte, c'est l'enseignement explicite et la quantité d'efforts consentie par l'élève

STANISLAS DEHAENE
est neuroscientifique, titulaire de la chaire de psychologie cognitive expérimentale au Collège de France, directeur scientifique du centre de recherche Neurospin (CEA Paris-Saclay) et président du Conseil scientifique de l'Éducation nationale.

Les résultats d'évaluations internationales, notamment ceux des tests Pisa, dressent un portrait préoccupant des élèves français face aux mathématiques. Fait-il consensus?

Pierre-Michel Menger: Rappelons d'abord que les tests Pisa, au début des années 2000, étaient considérés comme scientifiquement inappropriés ou méthodologiquement faux en France, alors qu'ils commençaient déjà à déclencher des interrogations partout. Peu à peu, ils sont entrés dans le débat public; les tests Pisa, puis Timss (un test beaucoup plus précis sur les programmes en mathématiques), ont été commentés dans la presse généraliste. Autrement dit, on a cessé de déconsidérer des évaluations disponibles, en réalité, depuis très longtemps.

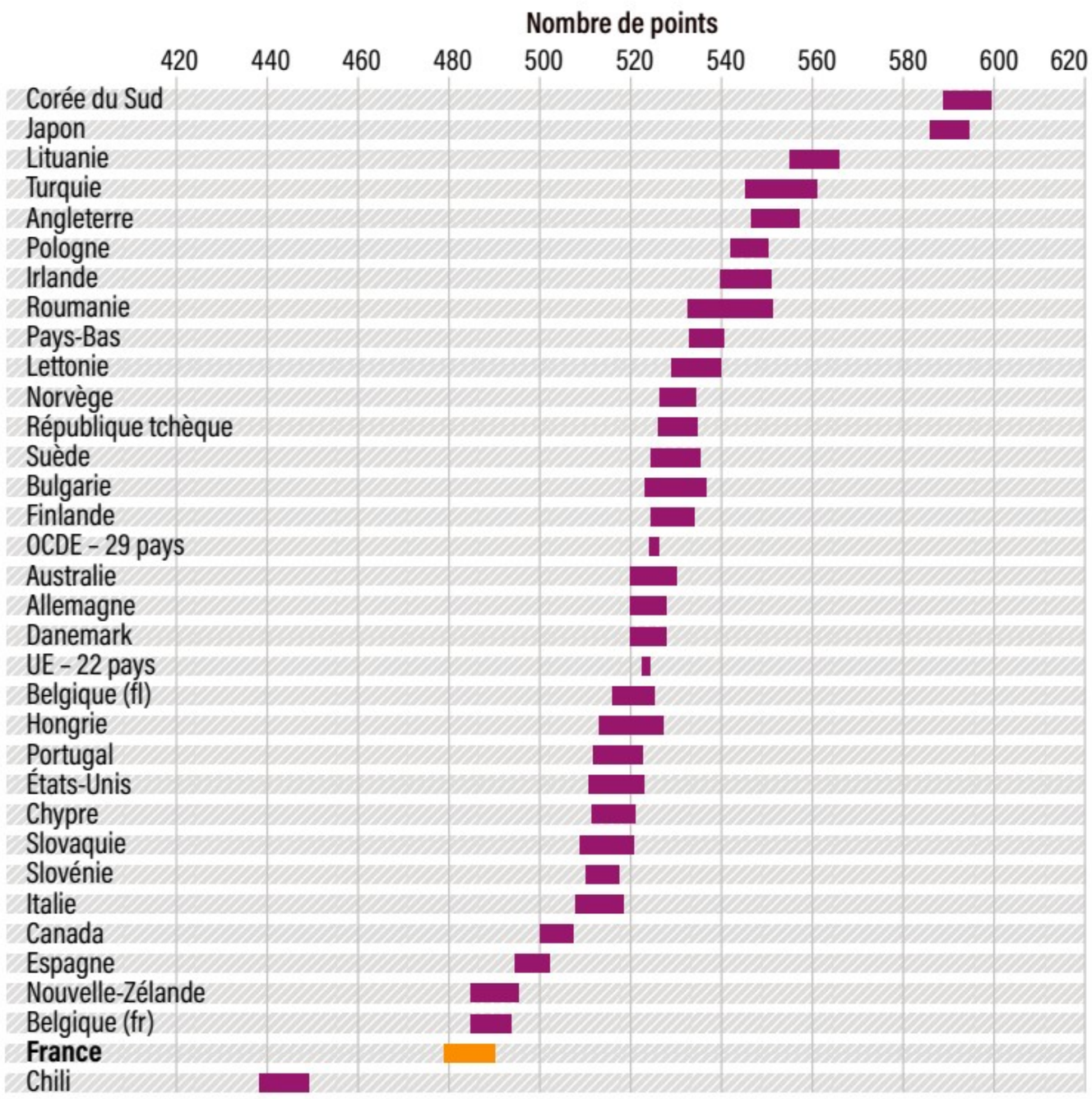
Le sujet a pris de l'importance, parce qu'effectivement les tests ont révélé que la France était en mauvaise position. Or ces tests sont suffisamment rigoureux – et méthodologiquement intéressants. Et, au fur et à mesure qu'ils étaient administrés, s'est confirmée chaque fois une descente française, sans rebond par la suite. Il y a eu des variations mineures, mais la tendance à la baisse a été évidente et continue.

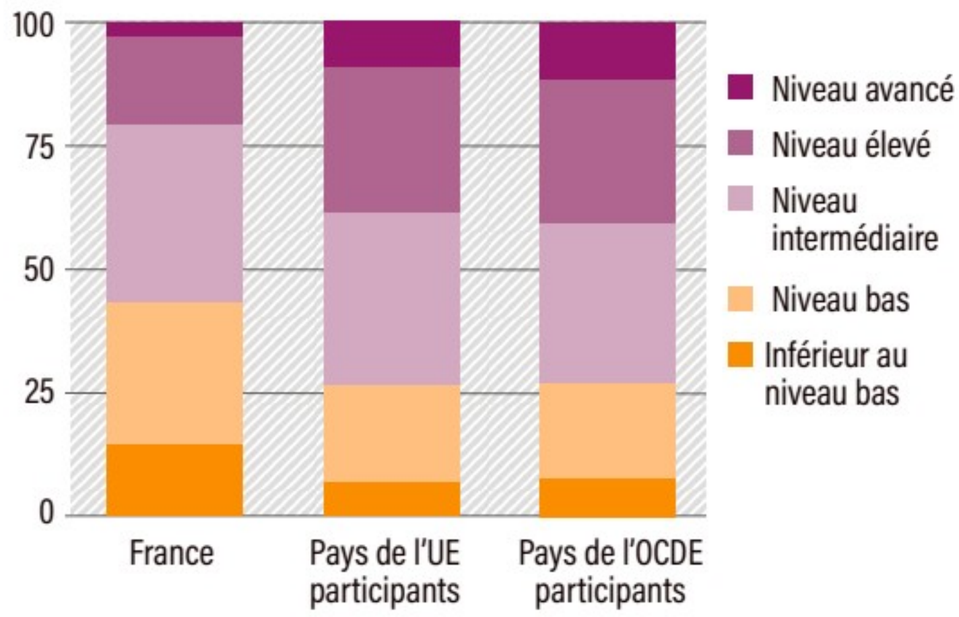
Pourquoi cette baisse préoccupe-t-elle autant?

P. M. M.: Parce que la valeur de la numératie a augmenté spectaculairement dans le monde. Les compétiteurs sont de plus en plus forts, en Asie du Sud-Est, en Europe aussi. On sait que la croissance économique est dépendante aussi de la valeur de la compétence dans les sciences numériques. Quand on considère le salaire des individus, l'avantage va à ceux qui ont suivi des formations comportant des éléments mathématiques.

Stanislas Dehaene: J'ajouterai que ces données internationales sont confirmées par des données nationales, celles de la Depp [direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance, au ministère de l'Éducation nationale, ndlr] qui mène notamment, depuis plus de trente ans, le même test de calcul. Les résultats montrent qu'à chaque décennie, la France a perdu un demi-écart-type de la distribution des scores de calcul. Il s'agit donc d'une baisse en niveau absolu, mais elle est également relative. On pourrait penser que tous les pays sont

Article écrit en partenariat avec le **Collège de France**





Scores moyens, sur l'échelle internationale des mathématiques, de l'évaluation Timss (tenant compte des programmes scolaires) en 2023, pour les élèves de CM1 *(ci-contre)*, et répartition, en poucentage, des élèves dans les niveaux de référence de l'évaluation *(ci-dessus)*.

confrontés à des difficultés similaires avec l'usage des écrans, le temps pris sur l'apprentissage, etc. Mais notre pays, relativement aux autres, occupe une position extrêmement inquiétante, et notamment dernier d'Europe aux tests Timss, en CM1 et en quatrième (*voir ci-dessus et page ci-contre*). Avec mon thésard Maxime Cauté, nous avons étudié la connaissance des fractions par les élèves. Ce qui est stupéfiant, c'est qu'à l'entrée en sixième, donc au bout de cinq ans d'école et, en principe, deux années d'enseignement des fractions, 80% des élèves ne comprenaient pas ce que veut dire 3/2 ou 1/2, de manière à être capable de le placer sur une ligne entre zéro et cinq.

P. M. M.: J'ai montré pour ma part, en exploitant les données Timss, que la France paraissait avoir une préférence pour une école moyenne, c'est-à-dire un écart type faible des résultats et donc une distribution plus homogène qu'ailleurs, mais médiocre. C'est quand même très ennuyeux. On trouve dans certains pays des niveaux plus hauts de performance, mais les scores aux tests y sont plus hétérogènes. Veut-on d'un pays où tout le monde est au centre de la distribution, et qui descend peu à peu, régulièrement?

La France «homogène dans la médiocrité» est pourtant capable, aussi, de produire une élite mathématique, que récompensent régulièrement de hautes distinctions, comme les médailles Fields…

P. M. M.: Il y a en effet une excellence mathématique française. La France est le deuxième pays en recherche mathématique au monde, si l'on considère plusieurs types d'indicateurs comme l'attribution des médailles Fields, le nombre de Français conférenciers plénier dans les congrès mondiaux de mathématiques… Les États-Unis sont les premiers parce qu'ils ont su importer des talents du monde entier, ceux qui ont fui l'Allemagne nazie et ceux qui ont quitté la Russie après la chute du communisme, mais aussi en raison de la puissance de leurs universités de recherche. Mais la France n'est pas en reste: les mathématiques y sont la discipline la plus internationalisée dans son recrutement dans l'enseignement supérieur. La question qui vient est alors, en effet, de savoir si la baisse générale en mathématiques va avoir des répercussions sur cette dynamique d'excellence. Il faut pour cela comprendre ce qu'est une élite mathématique. En l'occurrence, quand vous analysez les lauréats des médailles Fields, ce sont souvent des enfants d'enseignants ou de parents exerçant des professions scientifiques. Ils sont socialisés très tôt à l'effort et au goût de l'énigme et de la difficulté, de manière très quotidienne.

Quel rôle jouent les filières d'excellence?

P. M. M.: L'accès à l'excellence mathématique est une succession d'épreuves où les professeurs savent

© Pour la Science; source: Timss 2023

repérer des jeunes qui ont du potentiel et les placent dans des parcours qui les font progresser plus rapidement. Ces élèves sont orientés vers les établissements connus pour être les plus stimulants. Il faut compter aussi avec la culture du jeu, les compétitions. Depuis que la France participe aux Olympiades de mathématiques, cinq médaillés Fields français sur huit ont participé à ces Olympiades. Et il existe, avant ça, d'autres concours favorisant la détection et le développement ludique des talents. *In fine*, la formation de cette élite, puis le fait que les meilleurs mathématiciens soient ensuite normaliens ou polytechniciens, peuvent être vus de deux façons. On peut trouver catastrophique cette concentration de l'élite dans deux établissements. On peut aussi simplement y retrouver le constat que la France est un pays centralisé. Aux États-Unis, il y a cinq ou six équivalents d'écoles normales, supérieures ou polytechniques : Princeton, NYU, MIT, Stanford, etc. On peut se réjouir que la France maintienne un équivalent.

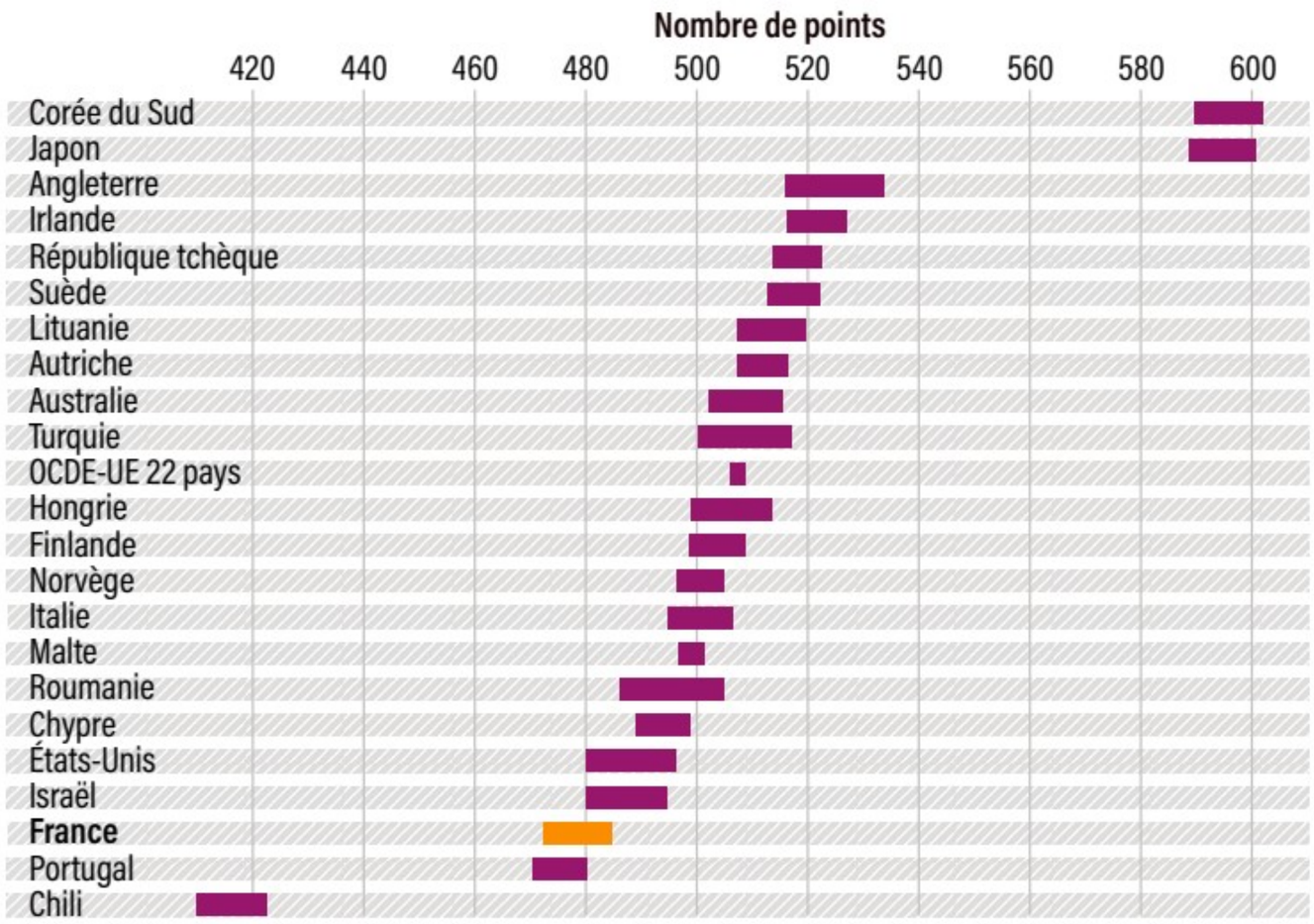
S. D. : Le grand problème français, c'est le cumul de la baisse de niveau et des inégalités persistantes. Dans certaines familles, l'effort mené à la maison parvient à compenser certaines faiblesses de l'école ; dans de nombreuses autres, ce n'est pas le cas. Et dans les disciplines scientifiques, on laisse de côté énormément de jeunes filles, car notre école, semble-t-il, leur donne l'impression que les mathématiques ne sont pas faites pour elles. Plus généralement, il faudrait que les élèves comprennent que les mathématiques, ce n'est pas seulement une discipline scolaire, qui s'applique à leur cursus de façon autoritaire. Elles contribuent à de nombreux aspects du développement personnel, depuis le sens de l'effort jusqu'à celui de la rigueur et de la logique. C'est pourquoi elles servent dans toutes les disciplines. Lorsqu'un cabinet d'avocats recrute quelqu'un de haut niveau, il va s'intéresser beaucoup à sa capacité logique et mathématique, et pas seulement à ses capacités verbales. Le développement de l'enfant est un tout, et les mathématiques doivent absolument en faire partie, longtemps dans la scolarité.

Dans votre livre *Le Rectangle de Lascaux*, Stanislas Dehaene, vous décrivez les mathématiques comme un « premier langage », grâce auquel on peut bâtir, accéder à des formes d'abstractions élaborées. À quoi tient-il ?

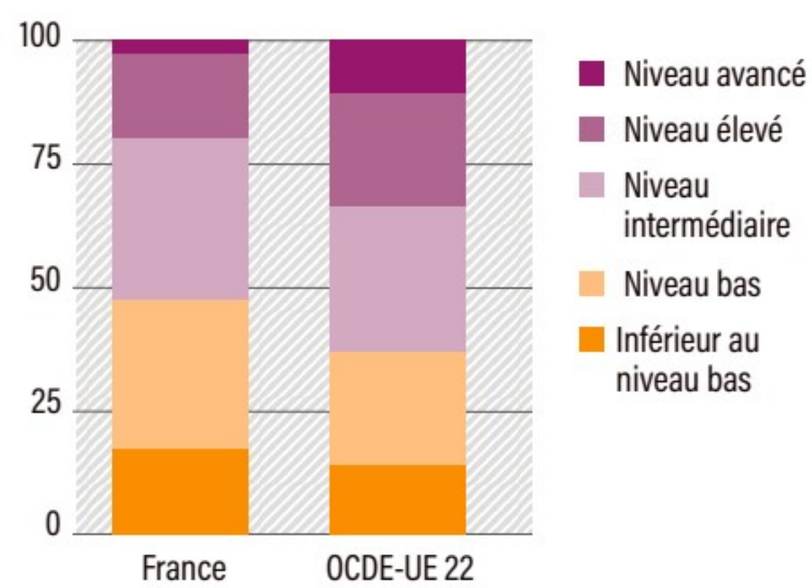
S. D. : Dans mon laboratoire, nous avons découvert que, dès qu'on fait des raisonnements mathématiques – depuis le calcul le plus simple jusqu'aux mathématiques du plus haut niveau – on active tous un réseau d'aires cérébrales identique, qui implique en particulier les aires pariétales dans les deux hémisphères. Ce qui est frappant, c'est que ce réseau est complètement différent de celui des aires du langage. Ainsi, les mathématiques sont un langage – elles permettent de composer les nombres, les formes et les raisonnements – mais ce n'est pas celui que nous utilisons pour communiquer. C'est une sorte de langage de l'esprit, plus abstrait, grâce auquel nous nous représentons des combinaisons d'idées élémentaires. Les premières manifestations

Pisa (Programme international pour le suivi des acquis des élèves), organisé tous les trois ans par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), évalue les compétences des élèves de 15 ans.

Timss (Trends in international mathematics and science study), coordonné tous les quatre ans par l'Association internationale pour l'évaluation du rendement scolaire (IEA), mesure les acquis en mathématiques et en sciences des élèves de CM1 et de quatrième.



Scores moyens, sur l'échelle internationale des mathématiques, de l'évaluation Timss (tenant compte des programmes scolaires) en 2023, pour les élèves de quatrième *(à gauche)*, et répartition, en pourcentage, des élèves dans les niveaux de référence de l'évaluation *(ci-dessous)*.



© Pour la Science ; source : Timss 2023

de l'aptitude à faire des mathématiques, présentes chez tous les enfants dès la naissance, sont les capacités d'estimer les nombres, de reconnaître les formes et de naviguer dans l'espace. Une certaine maîtrise du nombre et de l'espace, ces deux piliers des mathématiques, est également présente chez de nombreuses autres espèces animales. Mais l'espèce humaine a quelque chose en plus : elle sait composer ces objets mentaux élémentaires pour former des concepts mathématiques plus élaborés.

> Nous avons tous les mêmes aptitudes initiales, mais nous n'allons pas tous aussi loin dans la construction de l'édifice des mathématiques
>
> – Stanislas Dehaene –

Cette aptitude est-elle présente dans la lignée humaine depuis longtemps ?

S. D. : On trouve très tôt dans l'histoire de l'humanité des dessins et des gravures qu'on appelle symboliques, notamment sur les parois des grottes, et qui n'ont pas de caractère figuratif. Ce ne sont pas des images immédiatement reconnaissables, mais des objets structurés : un zigzag, un rectangle ou des damiers (à Lascaux), une série de points. On a trouvé à Blombos, en Afrique du Sud, un ocre extraordinaire, datant d'au moins 70000 ans. Il présente des séries de droites parallèles formant des triangles équilatéraux, qui eux-mêmes s'assemblent en hexagones. Mentionnons aussi les bifaces ou les sphéroïdes que les humains ont produits dans la pierre, bien plus anciens encore. Très tôt, donc, notre espèce s'est intéressée aux régularités, aux symétries, jusqu'à créer une sphère dans la pierre : elle en avait déjà l'idée. Autant d'indices que notre capacité à créer un langage des mathématiques est très ancienne, et universelle. N'importe quel humain est capable de penser à un carré. Tous les dessins d'enfants, d'ailleurs, reflètent cette disposition. Un dessin d'enfant, c'est déjà une production graphique extrêmement abstraite, fondée sur des lignes droites, des segments de droite, des arcs de cercle, des cercles, et dont le minimalisme épuré capture l'essence géométrique de ce que l'enfant cherche à représenter. Tous les enfants naissent donc avec un potentiel considérable d'abstraction. Par la suite, tous ne développent pas ce potentiel parce qu'il leur faut construire à partir de ce langage des objets de plus en plus complexes. Pour construire le concept du nombre cent, par exemple, il faut être passé par la construction de la base dix. L'humanité a franchi d'innombrables étapes, que chacun doit refranchir individuellement par le biais de l'éducation. C'est là, je pense, que le bât blesse. Nous avons tous les mêmes aptitudes initiales, mais nous n'allons pas tous aussi loin dans la construction de l'édifice des mathématiques.

Quels facteurs nourrissent l'utilisation de cette capacité ?

P. M. M. : Rappelons d'abord que l'école n'occupe que 15% à 18% du temps éveillé d'un enfant, entre 5 et 18 ans. Donc la famille, les pairs, les réseaux… l'environnement prend toute sa place. Mais il se trouve qu'un des facteurs clés, c'est ce qui se passe de la naissance à 3 ans. Ce qui se joue alors, c'est qu'on déclenche – ou non – cette compétence extraordinaire qui est d'apprendre à apprendre, une métacompétence jouant le rôle de facteur multiplicatif des comportements chez les individus en situation d'apprentissage, qui va engager à accepter les défis, être curieux, persévérer… Sur la persévérance, la comparaison entre les *Asian Americans* (en général très performants aux tests mathématiques) et les *White Americans* aux États-Unis est éloquente. Un collègue de Princeton a mis en regard les composantes de la réussite des jeunes issus de l'immigration asiatique aux États-Unis et des jeunes sans ascendance asiatique. Est-ce une affaire de QI ? Est-ce une affaire d'effort ou de pression parentale ? Ce collègue a montré que l'avantage manifeste pour les élèves d'origine asiatique, c'était essentiellement le niveau d'effort, et pas du tout le QI. La pression parentale peut jouer un rôle – un bon niveau de pression est favorable, mais trop de pression peut démotiver. Voilà qui interroge la notion d'effort. Le test Pisa permet d'en avoir une idée, car il comporte des questions sur l'état d'esprit. L'élève possède-t-il un état d'esprit « fixiste », qui penche vers le fatalisme, le découragement face à l'échec (« je ne suis pas doué pour les maths ») ? Ou bien un état d'esprit progressiste (*growth mindset*, comme l'appelle la psychologue Carol Dweck), présent chez les individus qui comprennent que l'effort compte et s'emploient à progresser en dépit des erreurs ? Un autre facteur favorable, mesuré et démontré, c'est l'acceptation de la gratification différée.

S. D. : Pour compléter, je trouve qu'effectivement, en France, on insiste trop sur le déterminisme génétique et social, et sur l'idée qu'on est soit doué en maths, soit pas doué, alors que toute la recherche

© Pour la Science ; d'après P. Martinot, « Epidemiological and cognitive évaluations in mathematica and language in the whole population of school-age children in France » (thèse), 2023

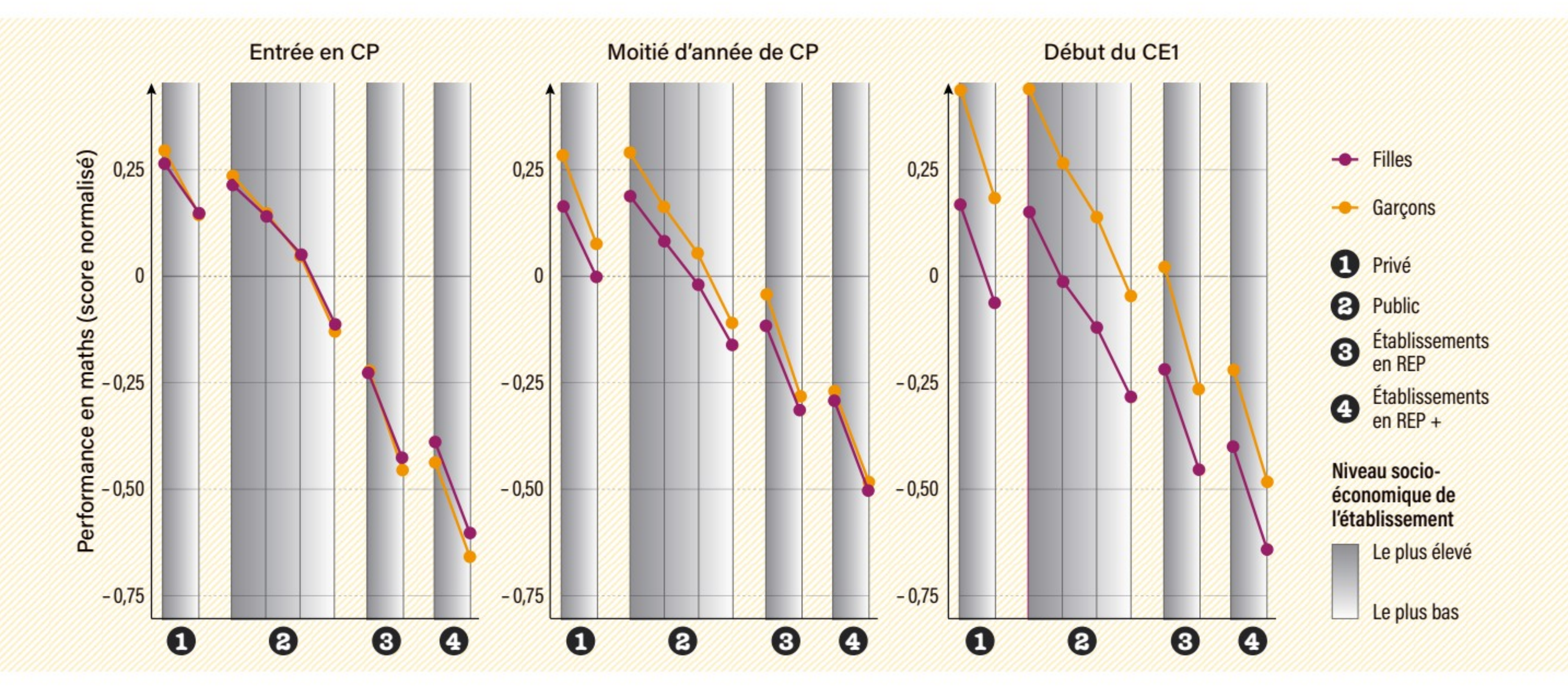
démontre que ce qui compte, c'est l'enseignement explicite et la quantité d'efforts qui est investie par l'élève. Les mathématiques sont comme un exploit sportif qui se construit progressivement avec l'entraînement. J'aimerais par ailleurs évoquer les résultats d'une étude que je trouve importante, menée par Pauline Martinot, qui a fait sa thèse dans mon laboratoire, et ses collègues sur l'apparition d'une différence entre garçons et filles en mathématiques. Une étude importante parce que, grâce à la Depp, nous avons analysé la trajectoire de tous les enfants français entre le CP et le CE1, et ce pendant quatre années de suite, sur plus de 3 millions d'élèves – c'est unique au monde. Il en ressort que lorsque les enfants entrent en CP, il n'y a pas de différence de compétences mathématiques entre garçons et filles. C'est cohérent avec ce qu'on sait en sciences cognitives : les compétences sont les mêmes chez le bébé et tout au long des premières années de la vie, sans différence entre sexes. Mais au bout de quatre mois de CP se manifeste une moindre réussite pour les filles. Et, au bout d'un an, à l'entrée en CE1, l'effet est dramatique. Nous avons comparé l'effet relatif de l'âge, tenu compte du mois de naissance, et de l'entrée à l'école – et les résultats montrent que c'est uniquement l'entrée à l'école qui compte. Quelque chose se déclenche alors, qui semble faire des mathématiques un objet compétitif, où les filles ne se reconnaissent pas. Il reste à identifier les causes ultimes, mais nous avons une certitude : la réussite ne dépend pas d'une différence fondamentale entre le cerveau des filles et celui des garçons. Leurs aptitudes sont malléables.

P. M. M. : Avec mon équipe, nous avons étudié les facteurs de réussite au concours Kangourou des mathématiques, auquel participent des centaines de milliers d'élèves chaque année. Les données montrent qu'effectivement les filles ont des résultats à peu près équivalents à ceux des garçons en CE2 – première année de participation au concours – puis elles décrochent progressivement, en moyenne, les années suivantes. Mais le tableau est différent si on s'intéresse aux 100 premiers du concours. En 2024, par exemple, les filles s'étaient classées premières en CE2, en CM1, en CM2, en sixième. En CE2 la seconde place revenait à une fille et la troisième place en terminale. La moyenne dit toujours quelque chose, mais la distribution dit autre chose. En l'occurrence, ici, elle indique que certaines filles peuvent jouer un « modèle de rôle » pour les autres.

L'importance accordée aux mathématiques induit-elle une pression sur leur apprentissage ? Apprendre la musique demande aussi beaucoup d'effort, mais l'enjeu semble moindre…

S. D. : Ce parallèle est intéressant. Dans les deux cas, on devrait revenir à une approche beaucoup

L'écart entre filles et garçons des performances en mathématiques, en faveur des seconds, se manifeste dès l'entrée à l'école et se creuse rapidement ; le phénomène est d'autant plus précoce dans les établissements les plus favorisés.



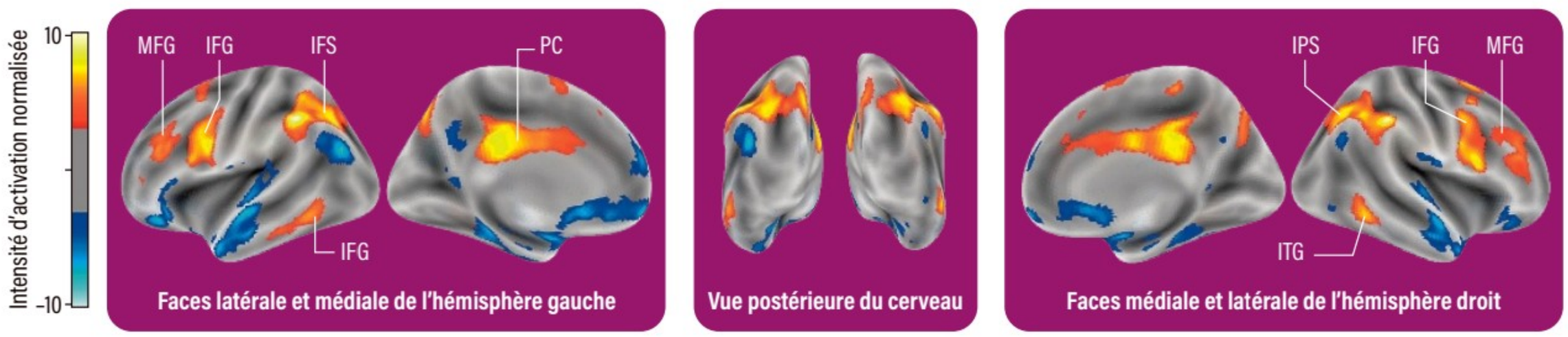
plus ludique. Dans les deux cas, il s'agit avant tout de faire des efforts et, pour cela, d'avoir envie d'apprendre. Au Conseil scientifique de l'Éducation nationale, on milite pour qu'on revienne aux mathématiques par le jeu, au moins dans les petites classes. Il faut évidemment enseigner les fondamentaux, mais il faut que les élèves voient qu'il y a des mathématiques partout, et que ces fondamentaux s'appliquent à toutes sortes d'objets, notamment les jeux collectifs, qu'ils apprécient, les jeux de constructions… De nombreuses études ont démontré que les élèves qui pratiquent des jeux mathématiques réussissent mieux que les autres. L'entraînement à la manipulation mentale des objets, notamment dans des jeux de construction, a un impact important. Là où le parallèle s'arrête, c'est qu'en musique, à mon sens, on a une approche beaucoup plus détendue de l'erreur. Personne ne sait jouer un morceau du premier coup. Les professeurs de musique disent simplement «si tu pratiques tous les jours, tu vas progresser». Cette attitude progressiste n'est pas la plus répandue dans notre enseignement des mathématiques.

Les apprentis musiciens s'entendent souvent dire que l'essentiel est de pratiquer tous les jours…

S. D.: La pratique régulière est tout aussi cruciale en mathématiques. Notamment parce qu'il faut pouvoir dormir sur les idées qu'on a tenté d'apprendre. Des expériences randomisées montrent qu'après avoir dormi, par opposition à une durée comparable, sans sommeil, notre cerveau consolide ce qu'il a appris et fait des découvertes nouvelles, y compris en mathématiques. Et c'est vrai de tous les enfants: ils approfondissent leurs connaissances par le biais du sommeil. Cette découverte coïncide avec d'autres recherches pédagogiques qui montrent qu'il vaut mieux répartir les apprentissages sur plusieurs jours, afin d'y revenir régulièrement. Nous recommandons ainsi une approche très progressive des objets mathématiques, en commençant par le concret, puis l'imagé, enfin l'abstrait – c'est une pédagogie «en spirale» que l'on trouve notamment dans la méthode dite «de Singapour». La pédagogie doit être explicite: l'enseignant doit expliciter tous les détails des opérations mentales qu'il cherche à transmettre, avant de laisser les élèves s'en emparer, toujours avec un *feedback* précis sur leurs erreurs. Il faut d'ailleurs reconsidérer le statut de l'erreur: on n'apprend que parce qu'on essaie, quitte à faire des erreurs. L'enseignement que nous essayons de promouvoir en France inclut tous ces ingrédients.

P. M. M.: Évidemment, les sciences et les mathématiques, encore moins que la musique, ne sont pas une pratique usuelle dans la plupart des familles. Par conséquent l'investissement scolaire est pour beaucoup dans l'acquisition des compétences en mathématiques, et l'apparition d'écarts entre élèves. Il y a un «effet établissement», et surtout un «effet classe» et un «effet maître», tels qu'analysés par Pascal Bressoux, membre du Conseil scientifique de l'Éducation nationale. L'origine sociale joue, toujours d'après les travaux de Pascal Bressoux, pour environ 15% de la variance des écarts de réussite des élèves, quand la classe compte pour 10% à 18%, l'effet étant toujours plus fort en mathématiques. Autrement dit, la compétence de l'enseignant et le comportement de la classe sont des facteurs considérables, pour la réussite et pour compenser les écarts sociaux des élèves. Or, hélas, nos enseignants sont aussi le produit, surtout en primaire, du décrochage en compétences mathématiques en France depuis

UN RÉSEAU CÉRÉBRAL SPÉCIFIQUE AUX MATHÉMATIQUES DÈS L'ENFANCE



Chez les enfants entre 5 et 8 ans, l'écoute d'une large variété d'énoncés mathématiques, que les sujets testés doivent juger vrais ou faux, mobilise un réseau d'aires cérébrales spécifique *(ici, les intensités d'activation, en imagerie cérébrale fonctionnelle)*, incluant notamment les sulci intrapariétaux (IPS), les gyri temporaux inférieurs (ITG), les gyri frontaux inférieur et médian (IFG et MFG), et les gyri cingulaires postérieurs (PC). On retrouve ce réseau chez les adultes.

© T. Morfoisse et al., Initial organization and progressive expansion of the math-responsive brain network during the first school years, PNAS, 2026

trente ou quarante ans. Ils sont l'image de ça, une génération qui a plutôt privilégié la littératie à la numératie.

Qu'est-ce qui fait l'intérêt de la fameuse méthode de Singapour ?

S. D.: Si l'on s'intéresse à Singapour, c'est d'abord parce que les élèves singapouriens sont régulièrement en tête de tous les classements internationaux en mathématiques et, aussi, en créativité. C'est un petit pays qui a fait, il y a des décennies, des choix extrêmement rigoureux en matière d'éducation et qui portent leurs fruits maintenant. Il n'y a en fait pas vraiment de méthode de Singapour. Les professionnels de l'éducation singapouriens récusent ce terme, car ils ont patiemment collecté une série de résultats expérimentaux et d'idées pédagogiques qu'ils ont intégrés dans leur pédagogie, dont la rigueur est remarquable. Ils ont profondément réfléchi à ce que sont les mathématiques, à quoi elles servent, y compris sur le plan sociétal. Ils se sont notamment appuyés sur les réflexions du mathématicien George Pólya, qui s'intéressait à la nature du raisonnement mathématique, et dont le livre *How to solve it* (1945) demeure une excellente lecture pour progresser en mathématiques. Le système de formation des enseignants singapouriens est, par ailleurs, exceptionnel – sont notamment prévues trois semaines de formation chaque année. Ils utilisent enfin de très bons manuels, en nombre limité, au contenu très contrôlé, fondés sur les sciences de l'éducation et les sciences cognitives.

P. M. M.: Les exemples de nations parties de niveaux modestes et qui ont construit un système performant se sont multipliés, notamment ceux qui ont éprouvé le « choc » de résultats décevants aux évaluations Pisa. Ça a été le cas de l'Allemagne, ça a été aussi le cas du Portugal, mais aussi de l'Estonie, de la Pologne, du Maroc ou encore du Royaume-Uni, dont l'ancien ministre de l'Éducation Nick Gibbs soulignait l'importance à accorder à l'établissement scolaire comme organisation. La performance d'un système est une fonction de production. Elle est le produit de différents facteurs, dont aucun ne doit être déficient : la formation des enseignants, leur rémunération, le matériel pédagogique, le respect des enseignants, la qualité du chef d'établissement…

S. D.: Nous savons, globalement, ce qu'il faut déployer pour faire progresser les mathématiques. Afin d'aller plus loin, dans le cadre de l'initiative du Collège de France *Agir pour l'éducation*, dont nous faisons tous les deux partie, nous avons mis en place dans mon laboratoire une initiative appelée *Pionniers des maths*, portée par Marie Lubineau et Maxime Cauté, pour déployer un programme de mathématiques en CE2 et CM1, qui mobilise les différents facteurs évoqués. Il suit le programme officiel, et le décline jour après jour selon les principes de l'enseignement explicite, dans un ordre rigoureusement construit. L'enseignant démontre d'abord comment fonctionne un objet mathématique et puis, très vite, les élèves passent en pratique guidée, où l'enseignant corrige immédiatement les erreurs, et enfin en pratique autonome. Nous avons travaillé en 2025 et 2026 avec 150 enseignants à la mise au point du programme. Cette rentrée, nous démarrons une expérimentation randomisée contrôlée, avec 540 enseignants volontaires de 10 académies, dont celle de la Guyane. Après randomisation, la moitié des enseignants du groupe expérimental vont déployer *Pionniers des maths*, tandis que les autres patienteront un an et joueront le rôle de groupe contrôle. Nos évaluations préliminaires pour des modules particuliers, comme les fractions, sont très encourageantes. Quand on applique cette pédagogie, dans certains tests, les élèves de sixième remontent au niveau des élèves de seconde !

P. M. M.: Quand j'ai débuté la sociologie, dans les années 1970, on s'intéressait peu aux méthodes pédagogiques. On traitait volontiers le système éducatif comme une organisation vouée, par une spirale déterministe inflexible alimentée par la massification scolaire, à reproduire les inégalités sociales de réussite. Et, d'une certaine manière, on voulait ignorer, ou contrôler à l'excès d'en haut, la capacité d'action des enseignants et des établissements pour faire mieux, autrement. Or les enseignants demandent à faire bouger les choses. Et ça devient d'autant plus possible qu'on se donne les moyens de tester, expérimenter, montrer les résultats et ensuite faire école. Par là, les inégalités socioscolaires peuvent être corrigées, par toutes sortes de mécanismes qu'il faut pouvoir identifier et mesurer dans leur efficacité si on veut les diffuser. ■

Propos recueillis par François Lassagne

BIBLIOGRAPHIE

T. Morfoisse *et al.*, Initial organization and progressive expansion of the math-responsive brain network during the first school years, *PNAS*, 2026.

Stanislas Dehaene, *Le Rectangle de Lascaux*, Odile Jacob, 2026.

P. Martinot *et al.*, Rapid emergence of a maths gender gap in first grade, *Nature*, 2025.

P. M. Menger et P. Verschueren (dir.), *Le Monde des mathématiques*, Seuil, 2023.

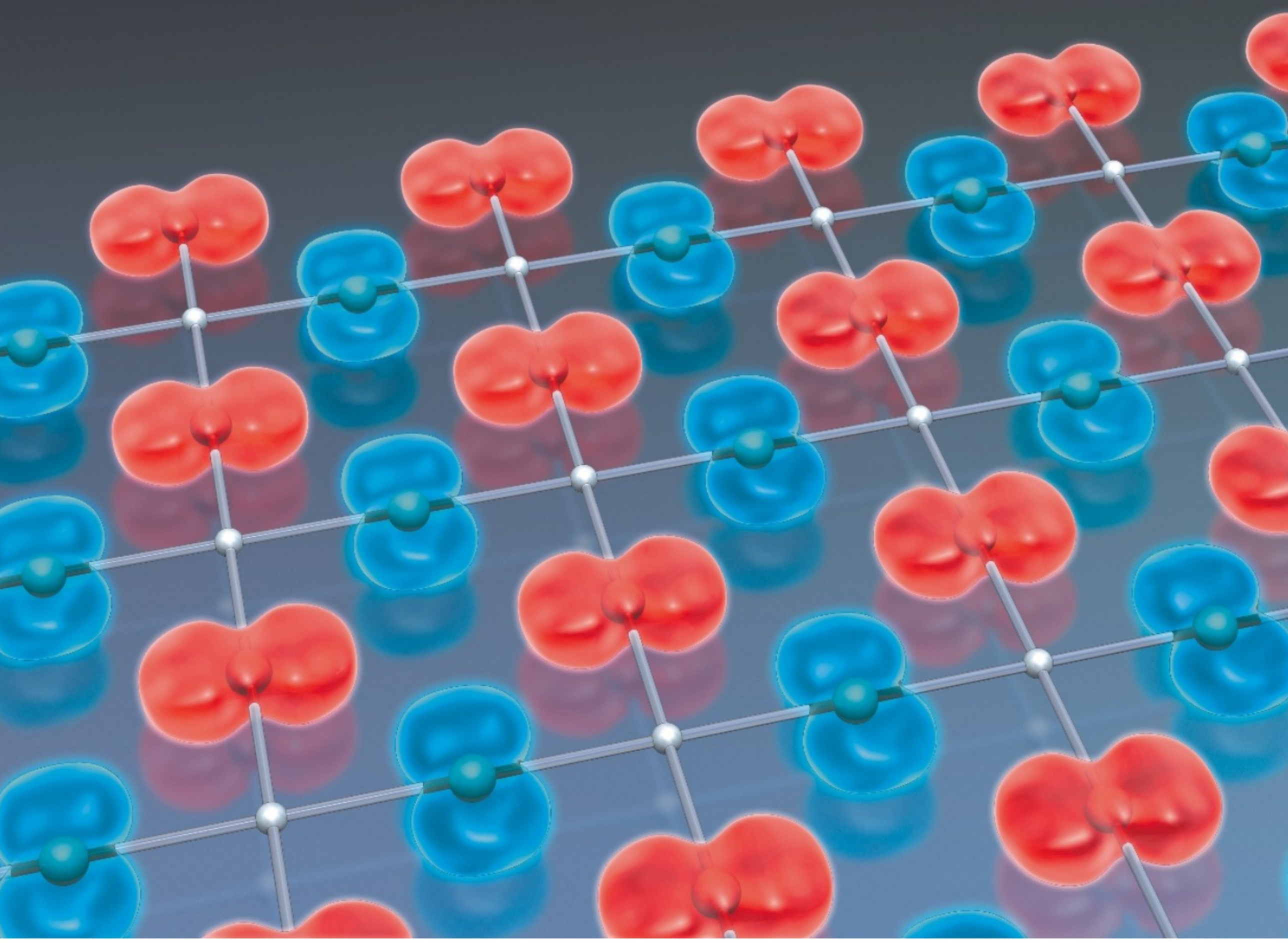
L'essentiel

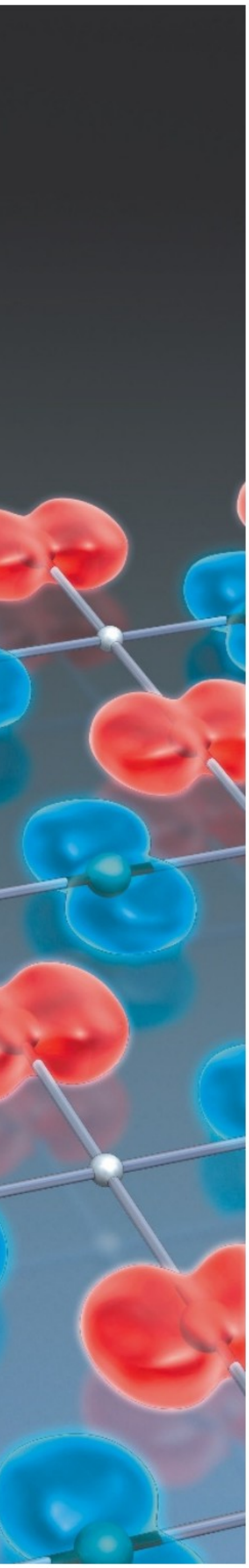
Prédit en 2019, l'altermagnétisme est une nouvelle forme de magnétisme, qui emprunte des propriétés aux matériaux ferromagnétiques et aux antiferro-magnétiques.

Cet état magnétique a été mis en évidence lors d'expériences menées en 2024. De nombreux candidats restent à tester.

Les matériaux altermagnétiques offrent de nouvelles possibilités en spintronique pour développer des dispositifs électroniques robustes et peu énergivores.

Le magnétisme dans la matière continue de surprendre les physiciens, qui ont découvert une configuration atypique, l'altermagnétisme.





Toutes les illustrations sont de Bruno Bourgeois

Une surprenante nouvelle forme de magnétisme

Paul McClarty

Subtilement caché dans certains matériaux magnétiques les plus simples, l'altermagnétisme amène à repenser finement la théorie et pourrait bénéficier à certaines technologies en électronique.

Depuis l'Antiquité et au travers des âges, le magnétisme a suscité l'émerveillement par sa capacité d'attraction à distance. S'il fait partie du savoir commun, jusqu'au siècle dernier ses origines ne faisaient l'objet que de spéculations. Aujourd'hui, le magnétisme est au cœur de notre compréhension fondamentale des phénomènes émergents dans la matière. De nouvelles découvertes dans ce domaine continuent de nous interpeller et les perspectives de technologies possibles fondées sur les phénomènes magnétiques continuent de motiver de nombreux chercheurs.

L'altermagnétisme est l'une de ces découvertes. Postulé pour la première fois en 2019 et confirmé peu après dans certains matériaux, il a suscité une certaine surprise et beaucoup d'intérêt au sein de la communauté des physiciens des solides. L'aspect le plus surprenant de ce nouveau domaine est peut-être que tous les ingrédients pour envisager cette forme de magnétisme inédite étaient disponibles dès les années 1950. C'est en considérant la théorie sous un angle original et en posant les bonnes questions que cette avancée inattendue dans la description des matériaux a été possible.

La construction de la théorie du magnétisme dans la matière n'a pas été évidente. Si le développement de la théorie classique de l'électromagnétisme au XIXe siècle a profondément contribué à notre compréhension de nombreux phénomènes naturels, notamment le comportement des électroaimants, il n'a toutefois pas suffi à expliquer l'origine des aimants permanents : le fait que certains matériaux ont une aimantation persistante et d'autres, non. Ce problème a notamment été mis en évidence par Niels Bohr et Hendrika Van Leeuwen, qui ont démontré que l'électromagnétisme classique était fondamentalement insuffisant pour expliquer le magnétisme spontané dans les matériaux.

L'une des premières avancées expérimentales majeures dans la compréhension du magnétisme est attribuée à Pierre Curie. En 1895, il a réalisé une observation cruciale : la magnétite (Fe_3O_4), connue depuis l'Antiquité, et la poignée de matériaux aimantés identifiés à l'époque perdent leur aimantation naturelle quand ils sont chauffés au-delà d'une certaine température, aussi brusquement que la glace fond lorsqu'on la sort du congélateur. Pour la magnétite, cela se produit bien au-delà de la température ambiante, à 570 °C. Ce seuil est nommé « température de Curie ».

Le rapprochement de ce phénomène avec la congélation de l'eau n'est pas anodin. Dans le cas de

Tous les ingrédients pour découvrir l'altermagnétisme étaient disponibles depuis les années 1950, il fallait cependant considérer la théorie sous un angle original

l'eau, nous sommes tous familiers avec l'idée d'une soupe désordonnée de molécules d'eau qui cristallise au point de congélation. Cette idée que la matière tend à s'ordonner, d'une manière ou d'une autre, à basse température s'avère être une caractéristique assez générale. Paul Langevin a suggéré, dès 1905, que l'aimantation d'un matériau serait la somme des moments magnétiques individuels de ses atomes. Son raisonnement, classique, permet de prouver la loi de Curie, indiquant que ces moments microscopiques, organisés à basse température, deviennent désorganisés au-dessus de la température de Curie.

Mais que sont ces moments magnétiques? Il faut attendre l'avènement de la mécanique quantique avec, en particulier, une meilleure description de l'atome, de la notion de spin et du principe d'exclusion de Pauli pour en avoir une bonne idée. L'atome se compose d'un noyau chargé positivement entouré d'un nuage d'électrons chargés négativement, dont chacun est doté d'un moment magnétique (ou spin). Les électrons se combinent par paire (avec des spins opposés en vertu du principe d'exclusion de Pauli, que l'on note «haut» et «bas»). Si le nombre d'électrons dans l'atome est impair, le moment magnétique de l'atome provient de l'électron non apparié, une combinaison de son moment magnétique et de son mouvement orbital (son moment cinétique). S'il est utile de savoir comment le magnétisme peut résulter de la physique microscopique, il suffit pour nous de savoir que chaque atome ou ion magnétique porte un moment magnétique représenté par une flèche centrée sur l'atome.

Si des atomes avec des spins non nuls composent un matériau, l'aimantation macroscopique de ce dernier est donc la somme de ces spins microscopiques. Mais la configuration est-elle unique, les spins sont-ils toujours orientés de la même façon les uns par rapport aux autres? La réponse est non: il existe des milliers de structures magnétiques possibles, résultant en des comportements très différents (*voir quelques exemples dans l'encadré page ci-contre*).

Des spins alignés

La structure la plus évidente est celle des matériaux ferromagnétiques, où les spins de tous les atomes sont identiques et alignés, résultant en une aimantation macroscopique permanente. Il est cependant beaucoup plus fréquent dans un matériau d'avoir les spins voisins qui pointent dans des directions opposées. Ces moments se compensent et il en résulte une aimantation globale nulle: ce sont les matériaux antiferromagnétiques. En 1936, Louis Néel a prédit l'existence d'une troisième forme de magnétisme, le ferrimagnétisme. Dans ce cas, deux types de moments cohabitent, ils sont de sens opposés mais leur amplitude n'est pas la même. Au total, il persiste une aimantation faible mais non nulle. Louis Néel a montré que la magnétite, que l'on pensait être ferromagnétique est en fait ferrimagnétique.

D'un point de vue expérimental, toutes ces phases ne sont pas simples à identifier. C'est notamment le cas de l'antiferromagnétisme. Même pour un observateur attentif, un tel matériau peut sembler magnétiquement inerte. Comment distinguer le cas d'un

L'AUTEUR

Paul McClarty
physicien au laboratoire Léon-Brillouin, du CEA Saclay et du CNRS

matériau dont les atomes ont un spin nul de celui où les spins s'opposent et s'annulent? Clifford Shull, alors au laboratoire américain d'Oak Ridge, a été le premier, en 1945, à utiliser un faisceau de neutrons pour étudier ces phases de la matière. Il s'est intéressé notamment à un antiferromagnétique présumé, composé de manganèse et d'oxygène (MnO). Les neutrons sont des particules massives et de charge nulle, ce qui leur permet de pénétrer facilement dans la matière. Ils sont cependant dotés d'un très faible moment magnétique, qui les rend sensibles au moment magnétique individuel des atomes dans un cristal. En analysant le signal des neutrons diffusés à basse température, Clifford Shull a montré que MnO était bien antiferromagnétique, ce qui lui a valu le prix Nobel de physique en 1994.

Après le MnO, l'un des premiers matériaux antiferromagnétiques à avoir été étudié à l'aide d'outils de diffusion des neutrons est le MnF_2. Comme le MnO, il possède une structure magnétique dont la moitié des spins pointe vers le haut et l'autre moitié vers le bas. Mais de la même façon qu'on a cru que la magnétite était ferromagnétique avant de découvrir qu'il s'agissait d'un matériau ferrimagnétique, MnF_2 appartient en réalité à une autre famille d'aimants: les matériaux altermagnétiques.

Cette phase magnétique récemment découverte repose sur des notions plus subtiles que la seule combinaison des spins microscopiques. Pour la comprendre, il faut d'abord s'immerger dans un cadre théorique incontournable de la matière condensée: la théorie des bandes. Celle-ci permet d'expliquer pourquoi certains matériaux sont conducteurs, isolants, semi-conducteurs ou présentent des comportements de conduction encore plus exotiques.

Le monde périodique du cristal

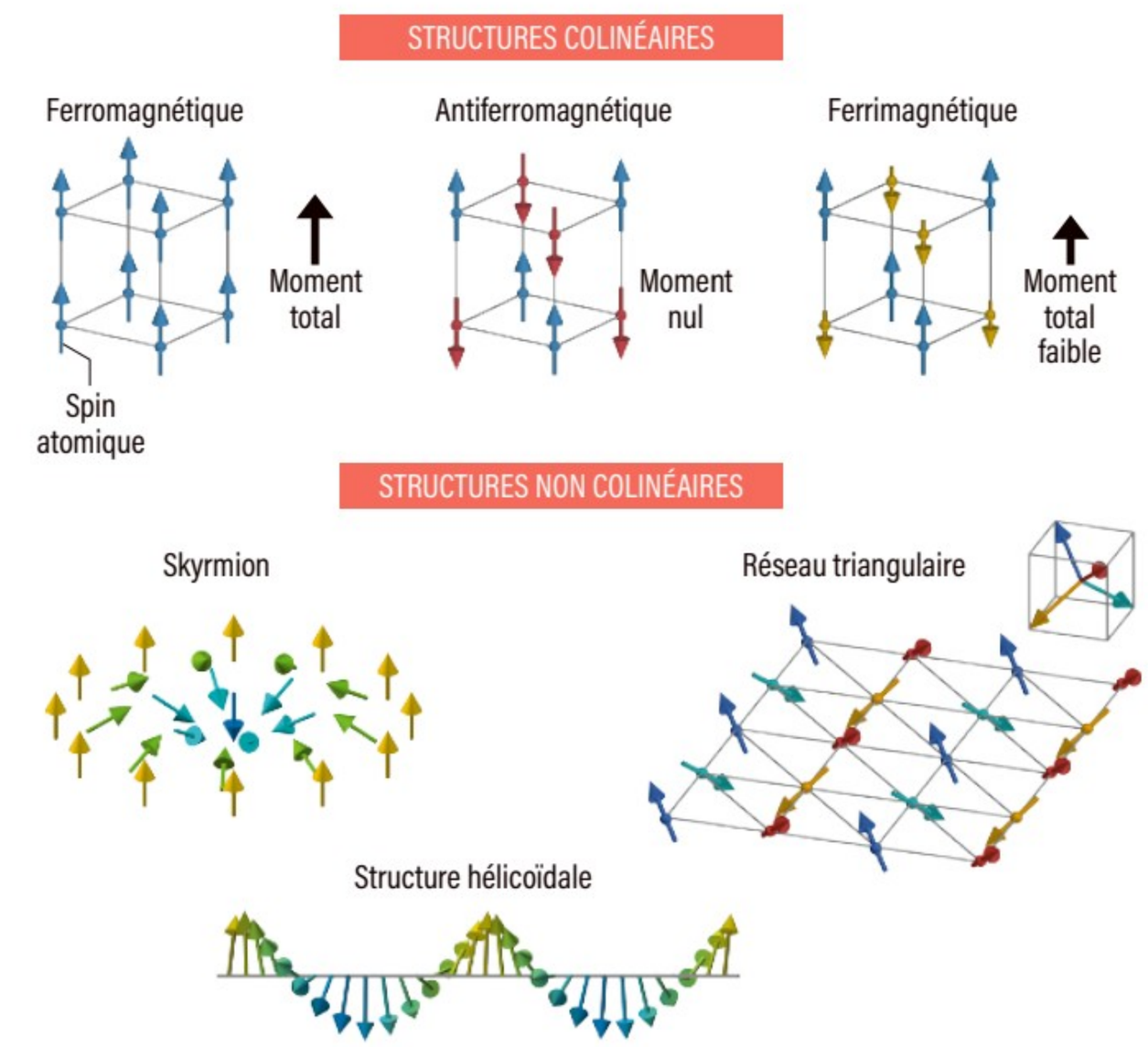
La théorie des bandes est une sorte d'extension de la description quantique d'un atome (avec son «spectre» discret en énergie) au cas où on a un très grand nombre d'atomes assemblés dans une structure cristalline (*voir l'encadré page 36*). Le point clé est, comme le stipule la mécanique quantique, que les électrons se comportent dans certains contextes comme des ondes, caractérisées par leur longueur d'onde (ou de façon plus commode par le nombre d'onde, l'inverse de la longueur d'onde). Dans un solide, cette description ondulatoire est soumise à des contraintes dues à la structure cristalline périodique: il existe une longueur d'onde minimale provenant de la distance minimale entre les atomes dans le cristal. Cela se traduit par un nombre d'onde maximal et signifie que le nombre d'onde peut prendre des valeurs comprises entre zéro et cette valeur maximale, ce qui définit la zone de Brillouin. La forme exacte de cette zone dépend des détails de la structure cristalline.

Ainsi, là où l'électron de l'atome était défini uniquement par son énergie et son spin, celui du solide est défini en plus par son nombre d'onde. Au lieu de remplir des niveaux discrets d'énergie pour l'atome, à raison de deux électrons de spin opposé par niveau, on remplit alors des bandes définies sur des intervalles d'énergie qui s'étendent sur des nombres d'onde dans la zone de Brillouin.

Dans un atome non excité, les électrons remplissent d'abord les niveaux de plus basse énergie, jusqu'à atteindre une énergie maximale occupée. Dans un solide, on retrouve cette même idée, à la différence qu'on remplit des bandes, en partant de la plus basse énergie, avec une densité d'électrons. L'énergie

Exemples de structures magnétiques

Le monde du magnétisme est une jungle pleine de structures curieuses. Les plus simples sont les ferromagnétiques et les antiferromagnétiques où les spins associés aux atomes sont tous égaux et, respectivement, coalignés ou antialignés.
Les contributions s'ajoutent dans les premiers et donnent une aimantation globale non nulle, tandis que les contributions s'annulent deux à deux dans les seconds.
Quand les amplitudes des spins antialignés sont différentes, on obtient un matériau ferrimagnétique, qui présente une aimantation globale non nulle mais faible.
Les spins peuvent aussi former des structures plus complexes, comme des spirales ou des textures que l'on nomme « skyrmions », dont certaines propriétés topologiques les rendent robustes aux perturbations et qui sont aussi des objets intéressants pour la spintronique. Cette liste est loin d'être exhaustive!



maximale occupée se retrouve dans une bande et dessine une courbe en fonction du nombre d'onde. Plus précisément, dans un solide tridimensionnel, comme le nombre d'onde peut se décomposer selon les trois axes de coordonnées, l'énergie maximale, nommée «énergie de Fermi», forme une surface, nommée «surface de Fermi» – tous deux nommés d'après le physicien italien Enrico Fermi (*voir la figure page ci-contre*).

Cette énergie de Fermi revêt une importance considérable en physique des solides. Si elle se situe au milieu d'une bande, cela signifie que la bande est partiellement remplie. Avec le moindre apport d'énergie (lorsqu'une tension est appliquée par exemple), certains électrons avec un nombre d'onde vont se déplacer vers une valeur de nombre d'onde différente. Et, alors que la somme de tous les nombres d'onde des électrons était nulle en l'absence d'une tension électrique, elle devient non nulle en présence d'une tension: les électrons se déplacent dans une direction privilégiée, il en résulte un courant électrique non nul. Le matériau est donc conducteur.

Si l'énergie de Fermi est telle que la bande est remplie au maximum, l'application d'une faible tension n'a pas d'effet car les électrons n'ont nulle part où aller, ils sont bloqués par une bande d'énergie interdite. Il leur faudrait sauter par-dessus cette dernière jusque dans la bande d'énergie autorisée suivante, mais cela demande beaucoup d'énergie. Il ne se crée pas de courant, on a là un matériau isolant. Ainsi, en appliquant les règles de la mécanique quantique aux électrons dans les cristaux, on

Du spectre discret de l'atome à la théorie des bandes

Quand un gaz est chauffé dans une enceinte, à partir d'une certaine température il commence à rayonner à des couleurs particulières, les raies spectrales. En 1911, Niels Bohr a montré que la longueur d'onde de ce rayonnement correspond à la différence d'énergie entre deux niveaux que les électrons des atomes du gaz peuvent occuper. Parce que ces niveaux d'énergie occupent des positions particulières, le spectre d'émission de l'atome est quantifié et ne forme pas un continuum.

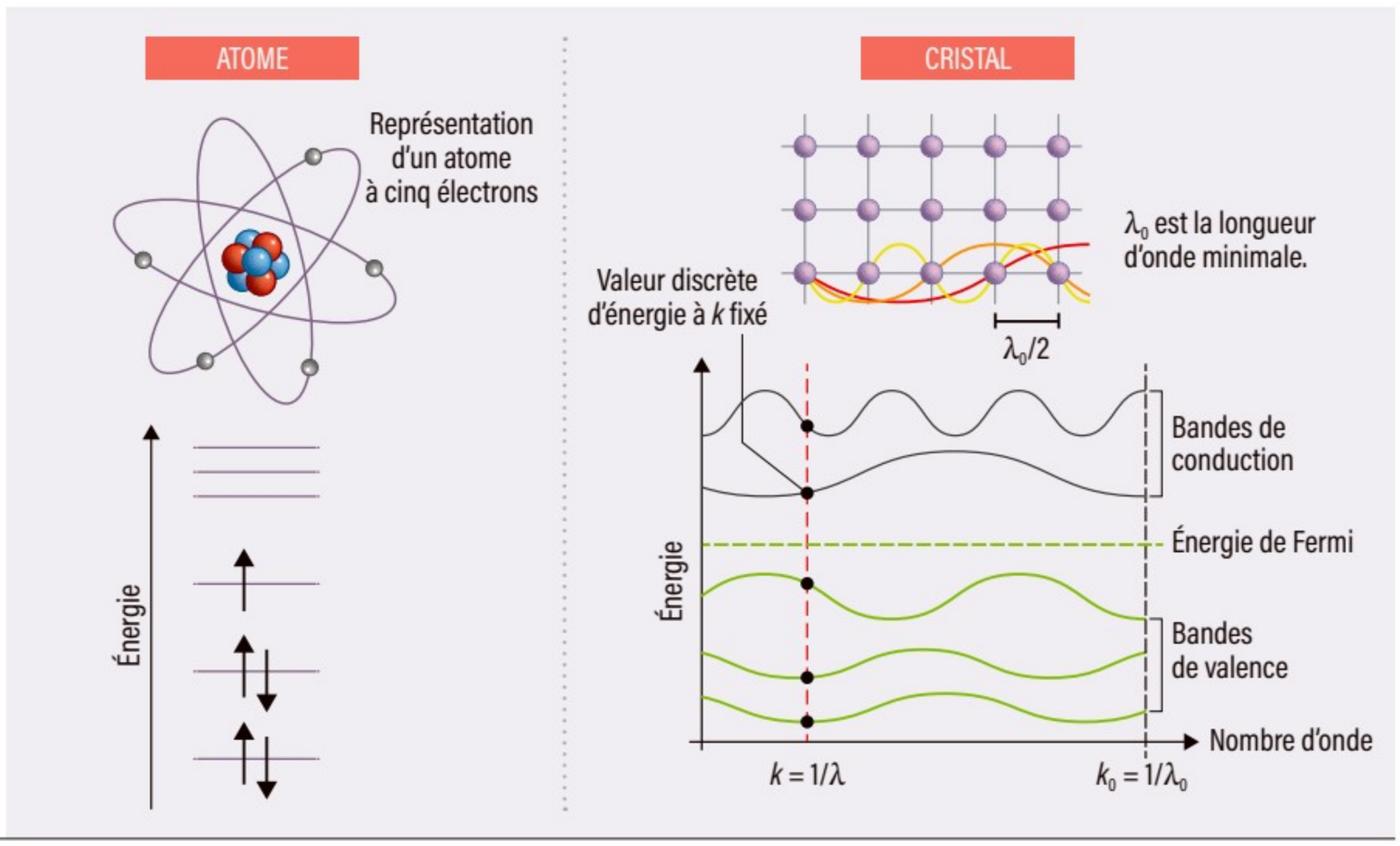
Alors qu'un cristal est composé d'un grand nombre d'atomes, son spectre d'émission n'est pas discret, mais continu. Le solide est spatialement étendu avec des noyaux atomiques fixes, mais des électrons mobiles sautent d'un site atomique à un autre. Or, à l'inverse de l'espace continu où tous les points sont équivalents, dans un cristal, les atomes sont disposés selon un schéma périodique. Les points dans l'espace n'y sont équivalents que lorsqu'on se déplace d'une distance spécifique, un pas discret, dans des directions particulières. Les cristaux sont donc spatialement étendus mais périodiques.

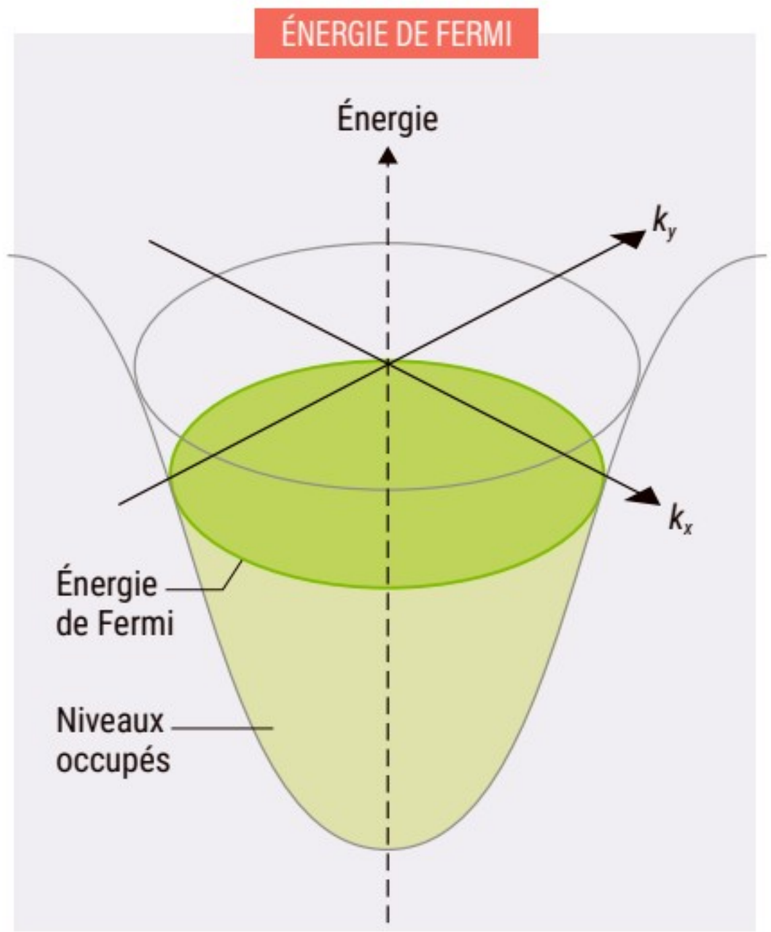
La mécanique quantique nous dit que les niveaux d'énergie dans un atome sont discrets, mais elle nous indique en outre que les particules, et ici les électrons, se comportent aussi comme des ondes. Autour d'un unique atome, ces ondes n'ont pas de contraintes. Mais dans un réseau cristallin périodique, la structure impose des contraintes sur les ondes, qui se traduisent par le fait que la longueur d'onde prend des valeurs sur un intervalle continu et que l'énergie varie avec la longueur d'onde.

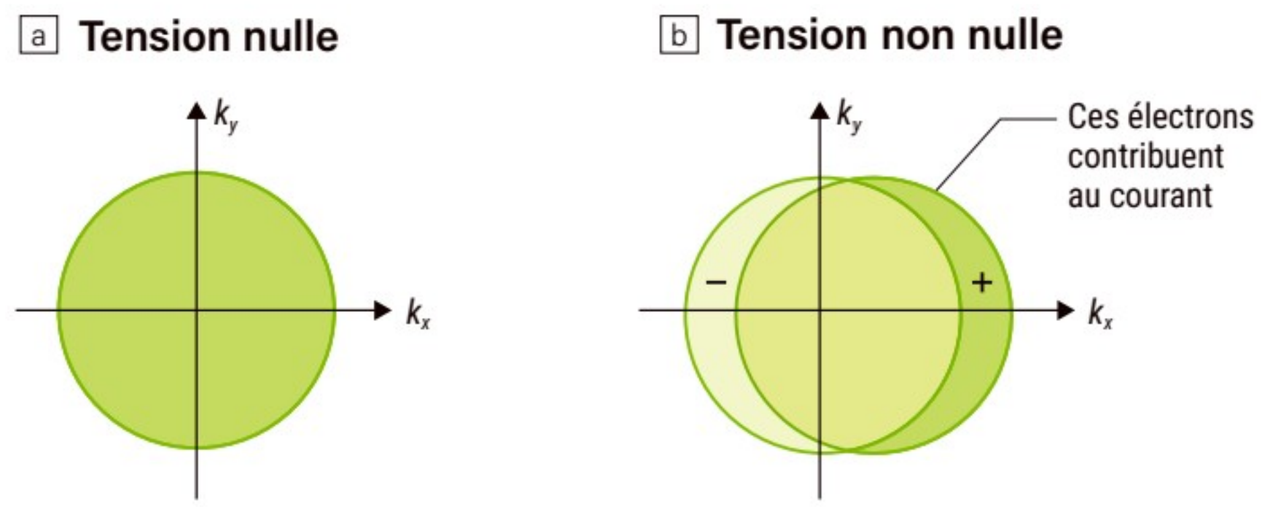
Qu'est-il arrivé aux niveaux discrets? Ils sont toujours là, mais maintenant chaque niveau discret balaie une surface d'énergie à mesure que la longueur d'onde des électrons qui circulent dans le matériau (les excitations) change.

Ces surfaces d'énergie sont appelées «bandes». En résumé, les atomes ont des niveaux d'énergie discrets et les solides ont des bandes discrètes, qui balaient des surfaces d'énergie en fonction de la longueur d'onde des excitations.

La périodicité des atomes dans les solides impose une contrainte à la longueur d'onde, qui ne peut pas être plus petite que le double de la distance entre deux atomes voisins et est ensuite un multiple de cette distance (et théoriquement jusqu'à l'infini). Les physiciens du solide introduisent généralement un nombre d'onde k qui, dans un solide tridimensionnel, a trois composantes k_x, k_y, k_z. Le nombre d'onde est simplement l'inverse de la longueur d'onde de l'excitation. La longueur d'onde minimale se traduit alors par un nombre d'onde maximal. Grâce à ce renversement, nous pouvons visualiser toutes les excitations ou la structure de bande du solide dans une région finie, dans l'espace des nombres d'onde. Sa limite étant définie par la longueur d'onde minimale. Au centre de ce volume se trouve le point où tous les nombres d'onde sont égaux à zéro. Il s'agit d'un mode uniforme correspondant à une excitation identique partout dans le cristal. Pour chaque nombre d'onde, il existe un ensemble discret de niveaux d'énergie.







Dans un matériau non excité, les électrons remplissent des niveaux d'énergie en partant de ceux de plus basse énergie. L'énergie maximale occupée définit une surface, l'énergie de Fermi, représentée ci-contre *(en vert foncé)* dans l'espace des nombres d'onde (k_x, k_y). Ces nombres d'onde indiquent le sens de déplacement des électrons. Selon que l'énergie de Fermi se trouve à l'intérieur d'une bande ou à la limite supérieure d'une bande, le matériau est un conducteur ou un isolant. Dans un métal, si on n'applique pas de tension électrique *(a)*, les électrons ne se déplacent dans aucune direction privilégiée, il n'y a pas de courant électrique. Avec une tension non nulle orientée vers la gauche *(b)*, les électrons se déplacent préférentiellement vers la droite. Ce déséquilibre constitue un courant électrique.

comprend les origines microscopiques des métaux conducteurs et des isolants.

Ce détour par la théorie des bandes n'est pas sans lien avec le magnétisme. En effet, les propriétés magnétiques du solide sont contenues dans la structure des bandes. Dans un solide non magnétique, les moments magnétiques des électrons sont toujours appariés – les spins haut et bas existent à la même énergie. Dans un solide portant un moment magnétique net, les bandes électroniques sont déséquilibrées. Il y a plus d'électrons avec un spin haut qu'avec un spin bas. Au lieu d'avoir une seule surface de Fermi, on en définit deux, une par orientation du spin. Et le volume délimité par la surface de Fermi «vers le haut» est plus grand (*voir la figure page 38*).

Courant polarisé

Cela a aussi des conséquences si on applique une petite tension électrique sur un métal présentant un moment magnétique net. Les surfaces de Fermi sont décalées, il se forme un courant comme précédemment, mais la densité d'électrons avec un spin haut est plus grande que celle avec un spin bas. Cela signifie que le courant aura une polarisation magnétique comme le matériau lui-même.

Un matériau antiferromagnétique classique, comme nous l'avons mentionné, est apparemment magnétiquement inerte et se comporte, à première vue, comme s'il n'y avait pas d'ordre magnétique du tout. Ce fait se reflète dans les surfaces de Fermi pour les spins haut et bas. Alors que dans les matériaux ferromagnétiques, ces surfaces étaient de tailles différentes, dans les matériaux antiferromagnétiques classiques, les surfaces de Fermi coïncident. Soumis à une tension électrique, le métal antiferromagnétique classique a donc un courant non polarisé.

L'origine de l'altermagnétisme vient d'une question très précise: «Est-il possible de rompre l'équilibre parfait des surfaces de Fermi dans un matériau antiferromagnétique?» Cette question est inspirée par des considérations applicatives.

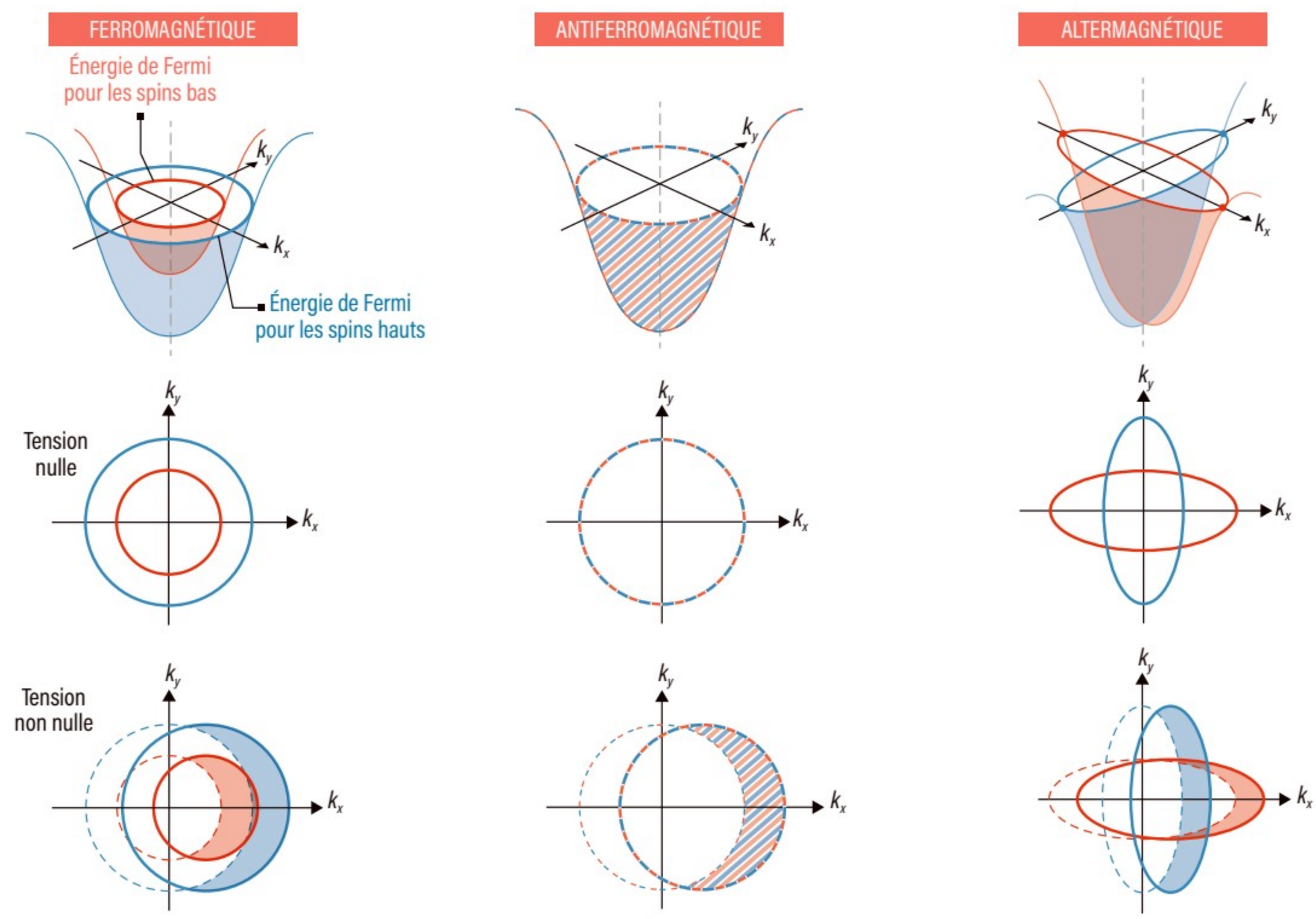
La spintronique est un domaine vaste, varié et bien développé, qui repose sur l'utilisation du spin plutôt que des charges électroniques pour stocker, transmettre et traiter l'information. L'un des principes fondamentaux de ce domaine est que les pertes résistives liées aux courants de charge sont bien plus importantes que celles liées aux courants de spin; le magnétisme constitue donc un support naturel pour la conception de dispositifs bien plus économes en énergie. Les dispositifs spintroniques traditionnels utilisent des aimants dotés d'un moment net, tels que les ferromagnétiques, car ceux-ci se prêtent particulièrement bien à la génération de courants de spin. En 1970, Louis Néel faisait remarquer dans son discours de réception du prix Nobel que les antiferromagnétiques présentent un intérêt théorique mais sont fondamentalement inutiles, car ils sont en grande partie magnétiquement inertes. Mais notre compréhension du magnétisme a beaucoup progressé depuis lors. On a remarqué depuis de nombreuses années que les antiferromagnétiques présentent malgré tout des caractéristiques pertinentes pour une nouvelle génération d'applications

spintroniques. Par exemple, les antiferromagnétiques sont beaucoup moins sensibles aux interférences indésirables des champs magnétiques externes que les ferromagnétiques et offrent la perspective d'une commutation magnétique plus rapide. C'est dans ce contexte d'intérêt porté aux antiferromagnétiques, mais en cherchant un compromis avec les propriétés des ferromagnétiques, que l'altermagnétisme a été découvert. L'idée étant d'augmenter les fonctionnalités des systèmes spintroniques.

En 2019, Tomas Jungwirth et Jairo Sinova étaient déjà bien connus pour leurs contributions au domaine florissant de la spintronique antiferromagnétique. Avec Libor Šmejkal, leur jeune collègue et ancien doctorant, ils cherchaient un matériau antiferromagnétique qui pourrait être particulièrement intéressant pour la spintronique. Ils se sont intéressés au dioxyde de ruthénium (RuO_2). Leurs calculs reposaient sur une structure magnétique dont le moment magnétique net était nul, en bon

Phase magnétique et courant polarisé

La théorie des bandes fournit également des informations sur la phase magnétique du matériau. On définit une énergie de Fermi pour les électrons de spin haut *(en bleu)* et une autre pour les électrons de spin bas *(en rouge)*. Dans un matériau ferromagnétique, les électrons portant un spin haut sont plus nombreux. Le volume délimité par la surface de Fermi associée est plus grand que celui des électrons de spin bas. Quand on applique une tension, tous les électrons changent de nombre d'onde et se déplacent dans une direction privilégiée. Un courant électrique émerge. Comme davantage d'électrons de spin haut contribuent au courant (la zone en bleu est plus grande que celle en rouge), le courant est polarisé. Dans le cas antiferromagnétique, les volumes de Fermise superposent exactement. Avec une tension électrique, un courant est créé mais il n'est pas polarisé, il y a autant d'électrons de spin haut que bas.
Dans un matériau altermagnétique, les volumes de Fermi ont la même taille (comme dans le cas antiferromagnétique) mais ils n'ont pas la même forme. Quand le matériau est excité, le courant produit est polarisé, pour la même raison que dans le cas ferromagnétique.



La zone bleue est plus grande que la rouge, le courant est polarisé.

Les volumes de Fermi sont identiques. Ils se décalent de la même façon. Le courant est non polarisé avec autant d'électrons de spin haut que bas.

Les volumes de Fermi ont la même taille. Le décalage, dû à la tension, crée une asymétrie avec un excès d'électrons de spin haut. Le courant est polarisé.

antiferromagnétique qui se respecte. Mais, de façon très étrange, en présence d'une tension électrique, les simulations prévoyaient l'émergence d'un phénomène d'effet Hall anormal, qui se traduit par la présence d'une tension perpendiculaire à celle qui est appliquée. Dans le cas standard, l'effet Hall nécessite un champ magnétique externe. Mais dans le cas anormal, c'est le champ magnétique intrinsèque au matériau qui agit, ce qu'on attend d'un ferromagnétique et pas d'un antiferromagnétique.

Les scientifiques ont par ailleurs remarqué une autre particularité. Dans les antiferromagnétiques, les deux surfaces de Fermi coïncident, alors que dans RuO_2, elles sont de même taille, mais ne se confondent pas (*voir les figures page ci-contre*). Elles contiennent donc autant d'électrons de spin haut pour l'une que d'électrons de spin bas pour l'autre. En appliquant une tension, les surfaces se déplacent dans une direction, et les électrons des deux spins aussi. Dans un matériau antiferromagnétique, les deux surfaces de Fermi se déplacent de la même façon et donc les contributions des électrons de spin haut et bas dans le courant sont identiques. Dans le matériau altermagnétique, du fait que les surfaces sont de formes différentes, les contributions au courant sont différentes et celui-ci devient polarisé. Grâce à ces observations, les trois chercheurs semblent avoir découvert une nouvelle catégorie de matériaux magnétiques qu'ils ont baptisée « altermagnétisme », en raison de la rotation alternée des spins sur différentes parties de la surface de Fermi.

Nous avons admis qu'il était possible de rompre l'équilibre entre les deux surfaces de Fermi et dans ce cas nous obtenons des matériaux altermagnétiques. Cela avait été prédit sur la base de calculs de structure électronique pour les matériaux. Mais quel est le principe sous-jacent qui provoque l'altermagnétisme ? Pour répondre à cette question, les symétries sont cruciales.

Un monde de symétries

De façon générale, une symétrie se réfère à une transformation qui laisse une caractéristique du système invariante. Par exemple, une boule de billard parfaite est inchangée si on lui fait subir des rotations autour de son centre. Dans un solide cristallin, une transformation naturelle est la translation avec un pas égal à la distance entre deux atomes identiques.

Dans un autre type de transformation, il est utile d'examiner ce qui se passe lorsque le nombre d'onde passe d'un signe positif à un signe négatif (ce qui physiquement revient à inverser la direction de déplacement des électrons). On parle de « transformation de parité », notée P. Cette symétrie est obtenue en inversant toutes les coordonnées de position dans le solide (les trois coordonnées (x, y, z) pour chaque atome), c'est-à-dire en inversant leur signe (x devient $-x$). L'aspect de nombreuses structures cristallines n'est pas modifié par cette opération, et ce sont les cristaux que l'on considère ici. Une autre opération importante est l'inversion du temps (T), où la coordonnée temporelle change de signe. Cette opération inverse le vecteur d'onde (la combinaison des trois composantes du nombre d'onde en fonction des trois coordonnées), mais aussi le sens du spin. Pour comprendre pourquoi il en est ainsi, il faut se rappeler qu'un spin est lié à une sorte de rotation, et le sens du spin indique le sens de rotation. Si on inverse le temps, la rotation s'inverse et donc le sens du spin aussi : un spin haut devient bas et inversement.

Dans certains matériaux altermagnétiques, le courant électrique est polarisé comme dans les ferromagnétiques, alors que les deux surfaces de Fermi sont de même taille, comme dans les antiferromagnétiques

Triple transformation

Prenons maintenant un cristal antiferromagnétique. Supposons que le cristal lui-même est invariant par parité. Supposons également que la structure magnétique reste inchangée lorsque les spins sont tous inversés et translatés dans l'espace (*voir la figure page 40, en haut*). Dans cette triple transformation, le nombre d'onde change de signe une première fois par P, puis une seconde fois par T, il est donc inchangé. L'aimant est alors complètement invariant par rapport à la parité, à l'inversion temporelle et à la translation. Cela a de profondes implications sur la structure des bandes de ce matériau. Comme l'énergie d'une bande est étiquetée par le vecteur d'onde, cela implique que les bandes de spin haut et celles de spin bas doivent être identiques. C'est cette symétrie PT combinée qui est si importante pour les propriétés des antiferromagnétiques ordinaires.

Comment lever cette dégénérescence dans les matériaux altermagnétiques (le fait d'avoir les mêmes bandes pour les deux spins conduit nécessairement à un courant non polarisé) ? Il faut une structure cristalline plus complexe, par exemple

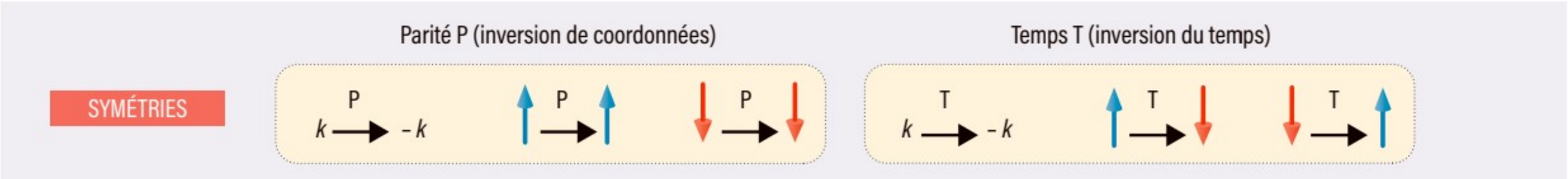
avec des atomes non magnétiques, ne portant pas de spin (*voir la figure ci-dessous, en bas*). Ici, les spins haut et bas ne sont reliés ni par une inversion ni par une translation. Au lieu de cela, l'opération de symétrie est une translation combinée à une rotation de 90 degrés. Cette nouvelle règle affecte la structure des bandes, car elle en assouplit les contraintes et surtout on constate qu'elle n'exige pas que les bandes, et donc les surfaces de Fermi, des électrons de spin haut et de ceux de spin bas soient identiques. La dégénérescence n'est plus obligatoire !

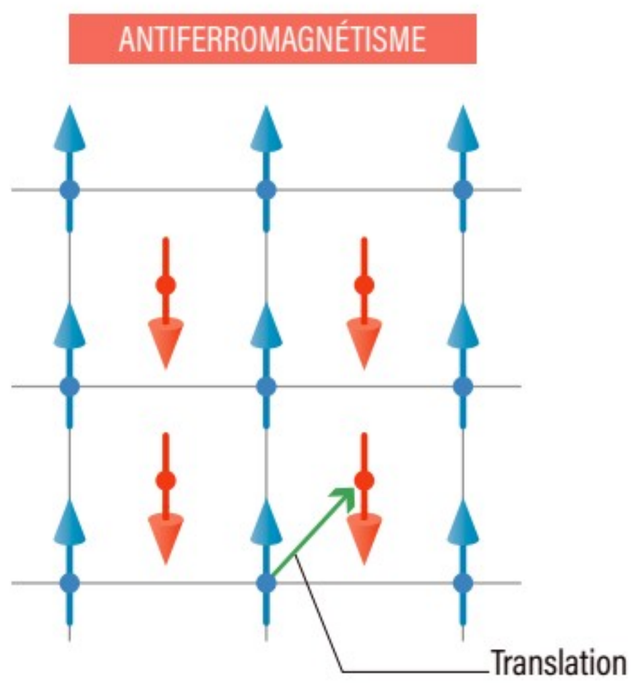
En fait, la symétrie reliant les spins haut et bas se reflète précisément dans la structure de bande, avec le lobe de la surface de Fermi du spin haut à 90 degrés par rapport au lobe du spin bas. Les symétries qui sous-tendent l'altermagnétisme forment également

Les symétries au cœur de l'altermagnétisme

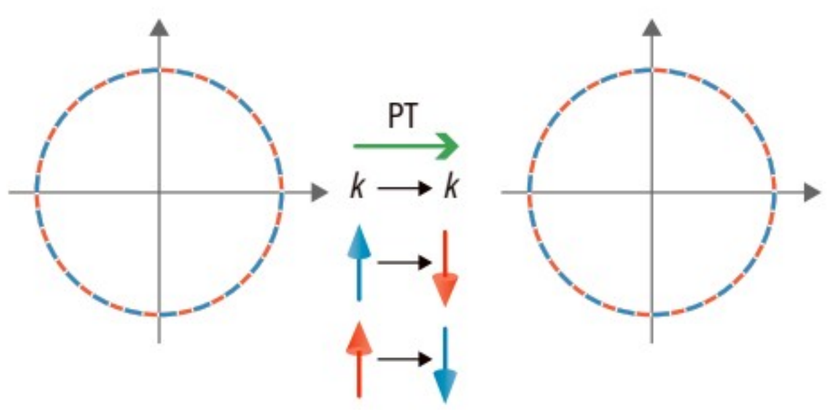
On peut comprendre les propriétés des matériaux magnétiques en analysant les transformations, ou symétries, qui laissent le système invariant. Les symétries pertinentes ici sont la parité (P), qui correspond à inverser les coordonnées (x devient $-x$) et l'inversion de la flèche du temps (T). Pour le vecteur d'onde, ces deux opérations inversent son sens. Pour le spin, la symétrie P ne change rien tandis que T inverse le sens du spin.

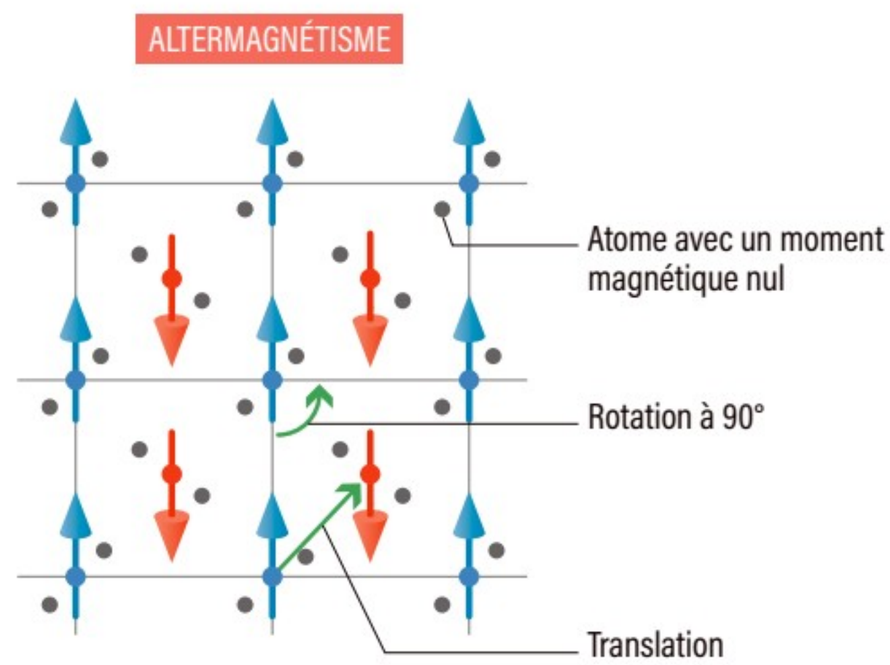
Dans un matériau antiferromagnétique, la structure est inchangée si on réalise successivement les opérations P et T (PT), puis qu'on opère une translation dans le réseau cristallin. Les surfaces de Fermi associées sont également symétriques par la transformation PT.
Dans l'exemple ci-dessous de matériau altermagnétique, des ions non magnétiques côtoient des ions magnétiques. De ce fait, le système n'est plus symétrique par la symétrie PT avec translation. Cependant, il reste invariant si l'on effectue une rotation supplémentaire de 90 degrés. Cette rotation induit les relations entre les surfaces de Fermi dépendantes du spin, caractéristiques de l'altermagnétisme. L'ensemble du phénomène résulte des différents environnements locaux des différents sites magnétiques.



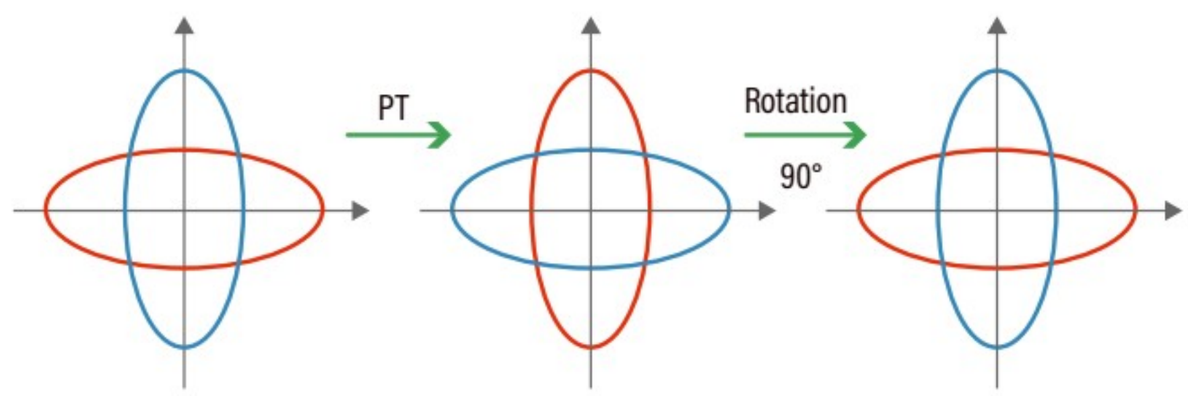


La structure est inchangée par une symétrie PT et une translation qui échange les sites hauts en sites bas. Cela se retrouve dans les surfaces de Fermi qui se superposent dans un matériau antiferromagnétique.





Dans un matériau altermagnétique, les atomes portant un spin non nul sont entourés d'atomes avec un moment magnétique nul *(en gris)*. La symétrie PT et une translation ne suffisent pas pour retrouver la configuration initiale. Il faut aussi opérer une rotation de 90 degrés. Cette rotation se retrouve dans l'analyse des surfaces de Fermi.



une nouvelle classe par rapport aux symétries des cristaux magnétiques généralement considérées. Ces symétries, dites «symétries de spin», ont été découvertes il y a plusieurs décennies, mais leurs caractéristiques sont restées longtemps ignorées. Lorsque quelques groupes, dont le mien, ont commencé à les étudier plus en détail, elles ont révélé notre compréhension théorique moderne de l'altermagnétisme. Les concepts étaient là, il suffisait de poser les bonnes questions pour comprendre leur rôle.

Et dans la nature?

La description qu'on en a faite jusqu'à présent est purement théorique, alors on peut se demander si ces matériaux existent dans la nature ou s'ils peuvent être synthétisés? Aucun argument fondamental ne semble l'interdire. Et pourtant, jusqu'à récemment, nous n'avions pas réussi à réaliser ce phénomène.

Les symétries cristallines et magnétiques qui lèveraient la dégénérescence de spin ne sont pas rares, de sorte que si la recherche d'un aimant altermagnétique reposait uniquement sur ces questions de symétrie, on en aurait sûrement découvert un grand nombre. Cependant, nous avons passé sous silence une petite subtilité. En étiquetant les bandes «haut» et «bas», il s'agit d'une approximation, parfois excellente, mais pas toujours valable. En termes techniques, nous disons que l'approximation est bonne dans la limite d'un couplage spin-orbite nul. Nous pensons que cette approximation est bonne lorsque les éléments présents dans le matériau sont légers, mais cela dépend vraiment des détails de la chimie. Une prise en compte de toutes ces subtilités pourrait drastiquement réduire les possibilités d'avoir des matériaux altermagnétiques.

Peu après que les théoriciens ont entrevu le potentiel du magnétisme exotique dans leurs calculs, plusieurs groupes expérimentaux ont relevé le défi de rechercher l'altermagnétisme dans des matériaux réels. Des résultats intéressants ont très vite été obtenus, les premiers indices d'altermagnétisme sont apparus dans le RuO_2, le MnTe et d'autres matériaux présentant les symétries magnétiques appropriées. Ces résultats constituent une première étape cruciale vers les applications spintroniques, mais l'un des principaux objectifs était d'obtenir directement une image de la structure caractéristique des bandes de spin séparées de l'altermagnétisme. Heureusement, les progrès réalisés au fil des ans en spectroscopie nous ont fourni des techniques puissantes.

Des mesures préliminaires avec la technique Arpes (abréviation en anglais pour «spectroscopie photoélectronique résolue en angle») avaient révélé la structure de bande des matériaux candidats à l'altermagnétisme. Elles ont exhibé des séparations de bandes intrigantes, mais il restait encore à démontrer qu'il s'agissait bien de séparations de spin. La percée a eu lieu en février 2024 dans un article sur le MnTe rapportant l'utilisation d'une technique similaire avec l'ajout d'une sensibilité au spin, Sarpes (le S initial pour «spin»). Il suffit de retenir que cette technique permet de sonder directement l'ensemble de la structure des bandes ainsi que l'orientation des spins associés aux bandes. Elle repose sur une version sophistiquée de l'effet photoélectrique, qui consiste à envoyer de la lumière à haute fréquence sur un matériau et à arracher des électrons. Si vous mesurez les électrons avec assez de soin, vous pouvez accéder aux caractéristiques des bandes d'où ils sont extraits.

En utilisant la technique Sarpes sur MnTe, l'équipe de Tomas Jungwirth, a révélé, outre la séparation des bandes, l'inversion du signe du spin lors du passage d'une bande séparée à l'autre. Elle a ainsi retrouvé toutes les caractéristiques essentielles de l'altermagnétisme dans des matériaux réels. Il s'agit d'un triomphe de la physique moderne de la matière condensée: celui-ci nous a permis de passer des premières indications théoriques d'un nouveau phénomène magnétique à la compréhension que ce phénomène n'était pas une anomalie isolée, mais une toute nouvelle classe de systèmes. Depuis l'utilisation de Sarpes sur MnTe, diverses autres techniques spectroscopiques ont été utilisées pour résoudre la séparation des spins, notamment la diffusion inélastique résonante des rayons X et la diffusion inélastique polarisée des neutrons, cette dernière impliquant des expérimentateurs de mon propre laboratoire.

Même si nous disposons désormais de matériaux altermagnétiques, l'histoire est loin d'être terminée. La course est désormais lancée pour trouver, parmi les centaines de candidats, les matériaux les plus adaptés pour des applications spintroniques. Nous n'en sommes qu'aux balbutiements dans ce domaine. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Krempaský *et al.*, Altermagnetic lifting of Kramers spin degeneracy, *Nature*, 2024.

O. Fedchenko *et al.*, Observation of time-reversal symmetry breaking in the band structure of altermagnetic RuO_2, *Science Advances*, 2024.

Z. Feng *et al.*, An anomalous Hall effect in altermagnetic ruthenium dioxide, *Nature electronics*, 2022.

L. Šmejkal *et al.*, Beyond conventional ferromagnetism and antiferromagnetism: A phase with nonrelativistic spin and crystal rotation symmetry, *Physical Review X*, 2022.

L. Šmejkal *et al.*, Crystal time-reversal symmetry breaking and spontaneous Hall effect in collinear antiferromagnets, *Science Advances*, 2020.

Xénogreffe

Il est temps de se pencher sur l'éthique

Ilona Bouvard

Face à la pénurie d'organes, la transplantation de l'animal à l'humain ne relève aujourd'hui plus de la science-fiction. Les avancées récentes, aux États-Unis et en Chine, rendent imminente leur entrée dans le champ clinique. Mais si la technique progresse, la réflexion éthique, elle aussi, doit suivre.

Contexte

En janvier 2026, le Comité consultatif national d'éthique a lancé les États généraux de la bioéthique, une consultation nationale réunissant citoyens, chercheurs et professionnels de santé en amont de la prochaine révision de la loi de bioéthique française, prévue après l'élection présidentielle de 2027. Cette législation, dont une mise à jour a lieu tous les cinq à sept ans, encadre en France les avancées biomédicales et la recherche scientifique qui y est associée. Les greffes d'origine animale, ou xénogreffes, sont un des thèmes abordés dans lesquels les recherches se sont particulièrement accélérées ces dernières années et qui sont donc au cœur des réflexions de cette édition.

Les chirurgiens Robert Montgomery *(à droite)* et Jeffrey Stern *(à gauche)*, du NYU Langone Health, aux États-Unis, se préparent à greffer un rein de porc génétiquement modifié chez un patient en mort cérébrale. L'organe, implanté en 2023, a fonctionné pendant 32 jours sans rejet – la plus longue période enregistrée alors. Les chercheurs ont récemment publié une cartographie détaillée de la réaction immunitaire qui a conduit au rejet.

© Joe Carrotta pour NYU Langone Health

L'essentiel

Les recherches sur la xénogreffe ont commencé dès la fin du XIXe siècle.

Depuis 2022, plusieurs essais de greffe d'un organe porcin chez l'humain ont eu lieu aux États-Unis et en Chine.

Aux États-Unis, des entreprises produisent des porcs génétiquement modifiés à proximité de centres de transplantation et commencent à recevoir l'autorisation de mener des essais cliniques de xénogreffe.

En France, en 2025, l'Académie de médecine a appelé à la mise en place d'un plan national en faveur de la transplantation d'organes animaux vers l'humain.

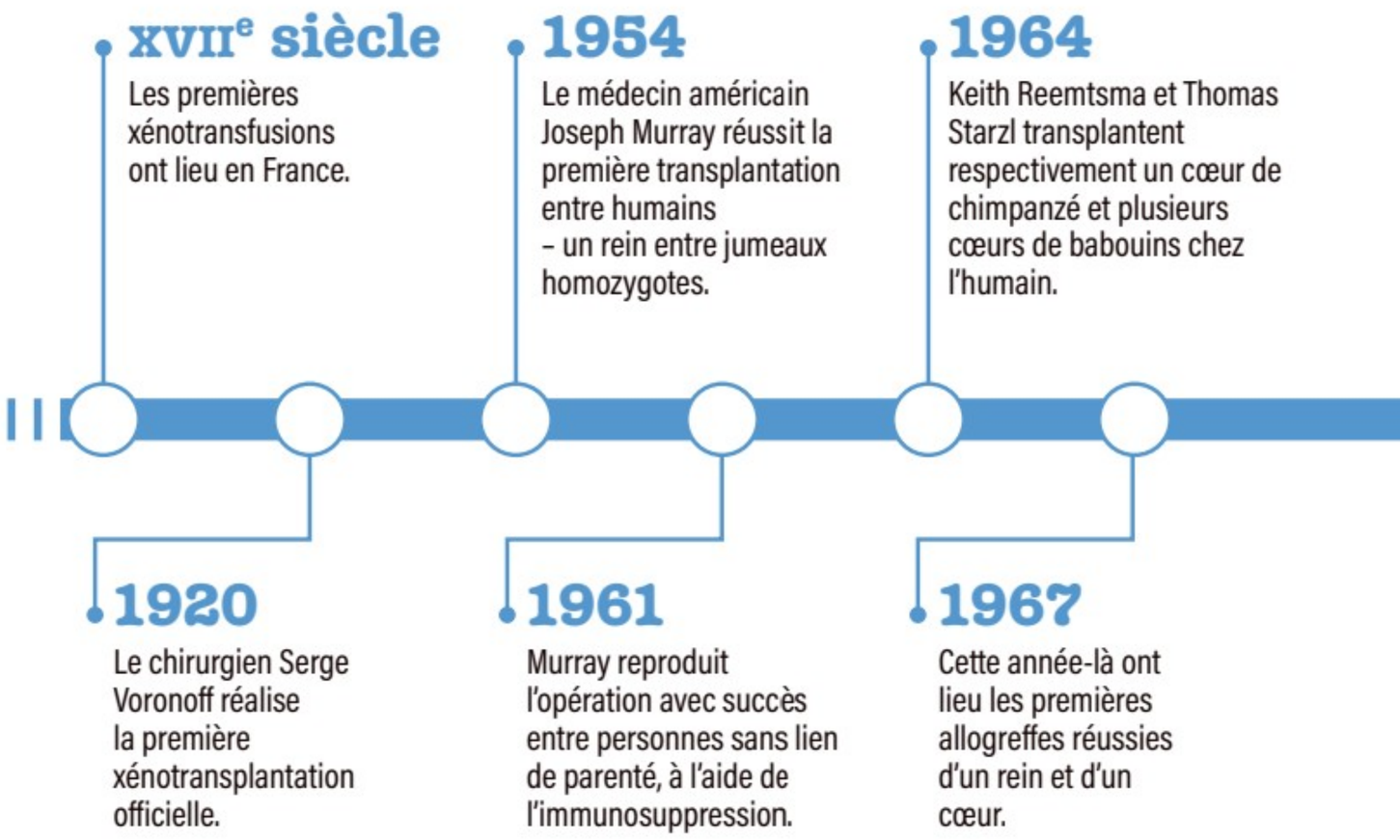
Partout dans le monde, les patients ayant besoin d'une transplantation sont confrontés à une difficulté majeure : la pénurie d'organes. En France, en 2025, l'Agence de biomédecine comptait 6 148 greffes d'organes, mais recensait 23 294 malades en liste d'attente. Et ce malgré le principe du consentement présumé. De fait, si près de 75 % des Français se disent favorables à un don d'organes, dans 37 % des cas, les proches du défunt rapportent une opposition du donneur. En Île-de-France, ce taux dépasse même 50 %.

En 2025, face à cette situation, et en s'appuyant sur les récents développements aux États-Unis et en Chine, l'Académie nationale de médecine a appelé à la mise en place d'un plan national « xénogreffes » en faveur de la transplantation d'organes d'origine animale vers l'humain. L'institution recommande de « faciliter la création en France de porcs transgéniques et d'une ferme "pharmaceutique" capable de les élever, dans le respect du bien-être animal, pour fournir des organes dans des conditions conformes aux exigences de sécurité sanitaire », tout en invitant à « définir un cadre éthique et sociétal » pour leur utilisation. L'enjeu des États généraux de la bioéthique est donc de taille dans ce domaine, qui n'a pas fait l'objet de nouveaux débats dans le cadre de la révision de la loi française depuis le moratoire européen sur les xénogreffes en 1999. Pour comprendre ce revirement, un retour en arrière s'impose.

Des débuts sous le signe de la controverse

Pendant des décennies, l'histoire de la xénogreffe a été jalonnée de tentatives et d'échecs. Elle a commencé au XVIIe siècle, quand le moine Robert Desgabets a décrit devant une assemblée savante le principe de la transfusion de sang animal dans le corps humain, et quand le médecin Jean-Baptiste Denis a annoncé avoir mis cette méthode en pratique, quelques années plus tard. En 1919, *Le Petit Parisien* publie un article sur les travaux de Serge Voronoff, chirurgien français d'origine russe, affirmant que « la race humaine tout entière trouverait son compte » dans ses projets consistant à greffer des glandes de singe à des hommes âgés pour leur rendre vigueur et vitalité. Inspiré par les expériences d'opothérapie (l'utilisation d'extraits de divers tissus ou organes d'origine animale à des fins thérapeutiques) menées à la fin du XIXe siècle par son confrère Charles-Édouard Brown-Séquard, Voronoff, alors directeur adjoint du département de physiologie au Collège de France, pratique la transplantation animale. En 1920, il opère la première xénotransplantation officielle en greffant des fragments de testicule de singe à un homme. C'est à la suite de l'observation des effets de la castration chez les eunuques en Égypte que Voronoff en vient à utiliser cette technique comme un moyen de restaurer la « vitalité humaine ».

Ces travaux suscitent à la fois enthousiasme et critiques de la part de ses pairs et du grand public. Les promesses de prolongation de la vie attirent plusieurs personnes, souvent des hommes aisés âgés de 50 à 70 ans, qui se font opérer par Voronoff ou par d'autres chirurgiens, comme Louis Dartigues. La xénogreffe est à l'époque guidée par une idéologie eugéniste, destinée à conserver et prolonger



« les plus beaux cerveaux », selon Dartigues. Les complications des opérations de l'époque sont peu documentées : les receveurs ne pensent donc pas encourir de risques particuliers en acceptant ces interventions. Les travaux de Voronoff et de ses collègues s'inscrivent dans une pratique médicale expérimentale peu réglementée, dans un contexte culturel marqué à la fois par une fascination pour les progrès scientifiques et par des inquiétudes liées au déclin physique.

Le malaise concerne plutôt les animaux. Confronté à de vives critiques antivivisectionnistes – un mouvement qui se développe en Europe depuis le XIXe siècle contre les interventions sur animaux vivants –, Voronoff se justifie dans son livre *L'Amour et la pensée chez les bêtes et les gens* (1936) en défendant une expérimentation menée avec compassion, précautionneuse face à la douleur de l'animal. Mais malgré un fond de réflexions émergentes sur l'identité du corps animal et de l'humain, ce sont surtout la variabilité des résultats cliniques et l'absence de preuves solides qui finissent par décrédibiliser la méthode dès la fin des années 1920. Les recherches s'interrompent alors pendant plusieurs décennies, durant lesquelles les travaux sur les allogreffes (transplantations au sein d'une même espèce) progressent : dans les années 1950, le chirurgien américain Joseph Murray effectue la première transplantation rénale réussie entre des jumeaux. Quelques années plus tard, il greffe aussi avec succès un rein entre deux personnes non apparentées, grâce à un traitement immunosuppresseur qui atténue le rejet immunitaire du greffon, et montre qu'il est envisageable d'utiliser les organes prélevés chez des individus récemment décédés. À mesure que les progrès de l'allogreffe avancent, les demandes de greffons augmentent.

De nouvelles tentatives aux États-Unis

Les années 1960 constituent un tournant pour la transplantation : c'est à cette époque qu'on reconnaît la mort encéphalique – ou coma dépassé – comme un critère pour déclarer la mort d'une personne et autoriser le prélèvement d'organes. Dans un premier temps, cela diminue la demande de greffons, puis celle-ci reprend et s'accentue. L'issue des greffes, cependant, demeure très incertaine et la mortalité qui y est associée est importante, ce qui entraîne un regain d'intérêt pour la xénogreffe. Les expériences reprennent aux États-Unis. Les motivations ont évolué et s'inscrivent désormais dans une logique thérapeutique. Néanmoins, un obstacle majeur demeure : le rejet immunitaire du greffon. Lorsqu'un organe provenant d'un autre organisme est transplanté, l'organisme du receveur le reconnaît immédiatement comme étranger, et c'est d'autant plus le cas lorsque l'organisme donneur est d'une autre espèce. Les

L'AUTRICE

Ilona Bouvard
journaliste scientifique
basée à Paris

1983
L'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux (FDA) approuve la cyclosporine, un médicament immunosuppresseur.

1984
La transplantation d'un cœur de babouin chez un nourrisson, Baby Fae, suscite l'émoi.

1991
La molécule alpha-gal, que nombre de mammifères, dont les porcs, produisent, mais pas l'humain, se révèle centrale dans la réaction de rejet immunitaire des xénogreffes.

1997
On s'aperçoit que les virus endogènes porcins sont susceptibles d'infecter les cellules humaines.

2002
Des porcs dépourvus d'alpha-gal sont produits.

2017
La technique CRISPR-Cas9 et le clonage permettent d'obtenir des porcs dont les virus endogènes sont inactivés.

2021
Des chirurgiens transplantent des cœurs et des reins issus de porcs génétiquement modifiés chez des personnes en état de mort cérébrale.

2022
David Bennett reçoit une greffe de cœur porcin.

2024
Towana Looney reçoit un rein porcin.

2025
Timothy Andrews reçoit un rein porcin. Des poumons porcins sont aussi transplantés. La FDA donne l'autorisation à l'entreprise Revivicor pour des essais cliniques de xénogreffe. En Chine, une femme reçoit un rein porcin.

Source : J. Cohen, The organ farm, Science, 2025

années 1980 voient l'arrivée de progrès pour empêcher ce rejet, comme l'introduction de la cyclosporine, un médicament immunosuppresseur majeur, qui améliore les perspectives de la transplantation. Cependant, les greffes de l'époque se soldent pour la plupart par la mort du patient receveur quelque temps plus tard. En 1984, en particulier, une tentative de xénotransplantation de cœur de babouin chez un nourrisson atteint d'une malformation cardiaque létale bouscule le domaine. L'enfant survit vingt et un jours. L'opération suscite de nombreuses réactions de militants antivivisectionnistes et de bioéthiciens.

De façon générale, les questionnements éthiques prennent une place croissante dans le débat. Le statut des chimpanzés et des primates utilisés, et le regard porté sur eux, ont évolué. Les critiques antivivisectionnistes gagnent en visibilité, et l'utilisation des chimpanzés et des primates pour le prélèvement d'organes est interdite. Les greffons issus d'humains restent une option viable, mais insuffisante. Les chercheurs se tournent donc vers un animal jugé assez proche sur le plan physiologique d'un point de vue évolutif, mais assez distant pour qu'on accepte de prélever ses organes: le porc, qui est toujours aujourd'hui l'animal privilégié pour les xénogreffes.

La transplantation d'organes fait encore face à de nombreux obstacles, avec le problème persistant du rejet immunitaire du greffon. Parmi les molécules impliquées dans ce phénomène, un sucre joue un rôle central: l'alpha-gal, que des chercheurs ont identifié en 1991 chez le porc. Présente chez la plupart des mammifères, mais absente chez l'humain, cette molécule induit le rejet immunitaire. C'est également à cette époque que les inquiétudes sanitaires commencent à être sérieusement soulevées: des chercheurs découvrent que certains rétrovirus endogènes porcins (Perv) sont capables d'infecter des cellules humaines. Ces rétrovirus, qui sont des séquences virales intégrées dans le génome des cellules porcines, sont en effet susceptibles de s'insérer dans le génome de l'hôte.

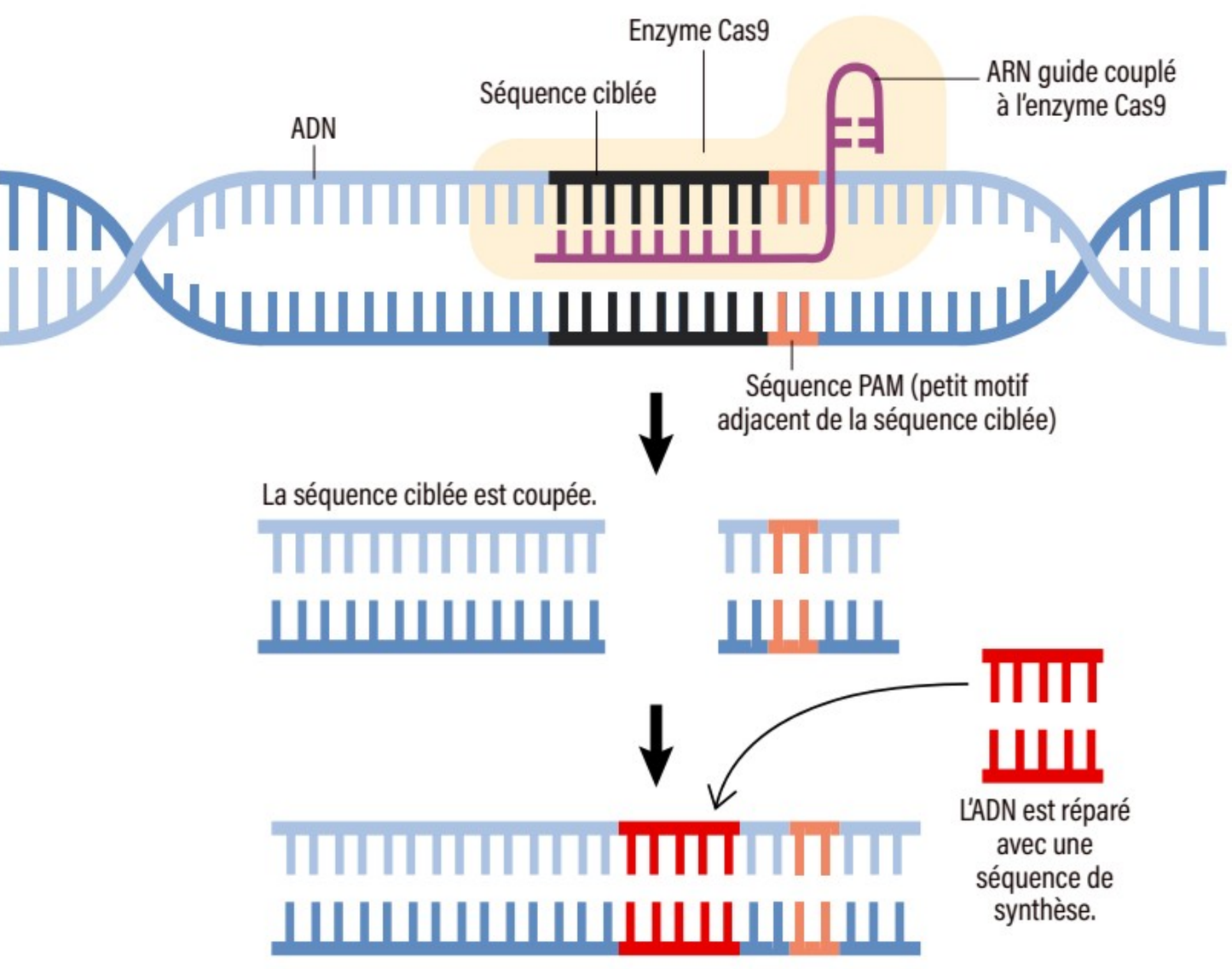
Le tournant CRISPR-Cas9

Les avancées en génétique des années 2000 marquent un tournant majeur pour le domaine, et en 2002, des porcs génétiquement modifiés, dépourvus de la molécule alpha-gal, sont produits. Surtout, l'arrivée des techniques du clonage et d'édition du génome CRISPR-Cas9 révolutionne le domaine à partir des années 2010. Il devient d'autant plus facile d'éliminer ou de modifier des gènes porcins, ou encore d'introduire des séquences humaines dans le génome des animaux. Les chercheurs s'efforcent désormais de trouver les combinaisons

57

C'est le nombre de pratiques de xénogreffe répertoriées dans le monde au 23 juillet 2026. Depuis 2021, il s'agit exclusivement de transplantations d'organes solides (et non de cellules ou de tissus), effectuées aux États-Unis ou en Chine.

Source: humanxenotransplant.org (Organisation mondiale de la santé et Association internationale de xénogreffe)



Inspirée d'un mécanisme de défense de bactéries contre des virus, la technique d'édition du génome CRISPR-Cas9 permet de remplacer une séquence d'ADN par une autre. Elle a considérablement accéléré les recherches sur la xénogreffe.

de modifications génétiques les plus à même de réduire le rejet du greffon. Cela est fait par le biais, par exemple, de l'élimination de certains gènes porcins exacerbant le système immunitaire humain ou de l'introduction de certains gènes humains qui régulent la coagulation, visant à empêcher la survenue d'événements comme la thrombose. Certains scientifiques proposent également d'ajouter des modifications pour éliminer les Perv ou réguler la croissance du greffon après sa transplantation.

Les essais chez l'humain sont encore préliminaires, mais avec des résultats de plus en plus probants. À la suite d'essais sur des personnes en mort encéphalique en 2021, David Bennett, atteint d'une maladie cardiaque en phase terminale, reçoit en 2022 la greffe d'un cœur porcin, dont dix gènes ont été modifiés. Revivicor, un acteur majeur de l'industrie aux États-Unis, effectue la greffe. Près d'un mois et demi après la transplantation, celle-ci cesse de fonctionner et Bennett décède au bout de soixante jours. En 2024, toujours aux États-Unis, Towana Looney reçoit un rein de porc, qui fonctionne pendant cent trente jours avant d'être rejeté, la contraignant à retourner à la dialyse. Et en 2025, Timothy Andrews reçoit lui aussi un rein porcin, cette fois-ci produit par la société eGenesis, qui fonctionne pendant une durée record de deux cent soixante et onze jours. À la suite du rejet du greffon, Timothy Andrews est placé sous dialyse et reçoit, en janvier 2026, une greffe de rein d'origine humaine. En Chine, ce sont un foie et un poumon qui sont transplantés en 2025 sur des personnes en mort encéphalique. Avec toutes ces tentatives, un certain espoir a désormais gagné les chercheurs du domaine quant à l'avenir thérapeutique potentiel de la xénogreffe, dans un contexte marqué par la pénurie persistante d'organes. Mais ce regain d'intérêt scientifique et médical s'accompagne aussi d'un retour des questionnements éthiques, qui obligent à réfléchir à l'avenir de cette pratique, à la place que la société souhaite lui accorder, et à sa mise en œuvre.

Organes transitoires ou xénogreffes optimales ?

Les avancées récentes rendent désormais plausible l'utilisation clinique des xénogreffes, mais leur rôle exact dans la médecine de transplantation reste encore à définir. Plusieurs scénarios sont aujourd'hui envisagés : celui de l'organe transitoire et celui de la xénogreffe optimale. Dans le premier cas, l'organe animal représenterait une solution temporaire, qui permettrait de maintenir un patient en vie en attendant la disponibilité d'un greffon humain. La xénogreffe optimale, elle, viserait à offrir une alternative durable à l'allogreffe en produisant des organes suffisamment compatibles pour fonctionner à long terme dans le corps humain. Les deux perspectives ne sont pas exclusives, mais soulignent la nécessité de réfléchir à la place qu'occuperont les xénogreffes dans la pratique médicale, bien qu'elles dépendent des avancées scientifiques à venir. Au-delà du statut de ces xénogreffes, d'autres questionnements éthiques s'imposent, allant du bien-être animal au risque de zoonose. Si la pratique continue d'évoluer et se concrétise, elle devra nécessairement justifier de ses méthodes à toutes les étapes, des expérimentations animales au lit du patient. Toutes ces interrogations sont au cœur des États généraux de la bioéthique et de la prochaine révision de la loi de bioéthique. ■

BIBLIOGRAPHIE

X. Li *et al.*, Organ transplantation : Current status, challenges, and future prospects, *MedComm*, 2026.

J. Cohen, The organ farm, *Science*, 2025.

A. Ali *et al.*, What genetic modifications of source pigs are essential and sufficient for cell, tissue, and organ xenotransplantation ?, *Transpl. Int.*, 2024.

V. Lamm *et al.*, Bridging to allotransplantation – Is pig liver xenotransplantation the best option ?, *Transplantation*, 2022.

J.-L. Fischer, Serge Voronoff (1866-1951) : l'ambiance parisienne biomédicale entre xénogreffes, querelle de l'interstitiel et néo-malthusianisme, *Bulletin d'histoire et d'épistémologie des sciences de la vie*, 2010.

F. A. Roux *et al.*, Xenotransfusions, past and present, *Xenotransplantation*, 2007.

© BigBearCamera/Shutterstock

Catherine Rémy
chargée de recherche au CNRS et à l'EHESS au sein du Centre d'étude des mouvements sociaux, à Paris

–Éthique–

Il faut se positionner et établir un cadre ensemble

La xénogreffe est un des nouveaux sujets débattus lors des États généraux de la bioéthique 2026. Utiliser des organes de porcs comme alternative à la greffe classique devient de plus en plus à notre portée, ce qui soulève de nombreuses interrogations. L'éclairage de la sociologue des sciences Catherine Rémy.

La xénogreffe modifie-t-elle notre manière de considérer les animaux ?

Dès la fin du XIXe siècle, les chirurgiens cherchent des organes sains pour remplacer ceux qui sont défaillants chez l'humain et se tournent vers les animaux, les considérant comme de potentiels «réservoirs d'organes». À cette époque, l'expérimentation animale s'est imposée en physiologie et en médecine, et l'idée d'utiliser le corps animal pour les greffes est directement liée à ce nouveau modèle.

La xénogreffe s'inscrit dans sa continuité mais franchit une étape supplémentaire en poussant le modèle à son paroxysme: il ne s'agit plus seulement de considérer l'animal comme un organisme comparable à l'humain permettant d'expérimenter. La proximité est jugée telle qu'un organe animal peut être substitué à un organe humain. La pratique repose sur l'idée que les corps humains et animaux sont suffisamment semblables pour qu'on puisse intégrer l'un à l'autre. Les avancées de la génétique accentuent encore cette logique.

Pour rendre les organes porcins compatibles avec l'organisme humain, les chercheurs modifient certains gènes, notamment en introduisant des gènes humains dans le génome porcin. Même si les scientifiques hésitent à parler d'«humanisation», il n'en reste pas moins que ces animaux deviennent en quelque sorte des organismes hybrides, différents des porcs élevés dans l'industrie agroalimentaire, par exemple. La question du statut de ces êtres et de notre rapport à eux se pose donc nécessairement.

Le développement de la xénogreffe implique-t-il un modèle industriel de production du type «usine à organes»?

C'est un des enjeux majeurs autour des xénogreffes aujourd'hui. Aux États-Unis, un modèle très industrialisé semble s'imposer: des groupes comme Revivicor s'inscrivent dans cette logique de «ferme-usine» produisant des greffons à proximité de grands centres de transplantation, avec tout un modèle économique organisé autour de cette production. Lorsque j'interrogeais les scientifiques en Europe pour mon enquête il y a quelques années, beaucoup exprimaient déjà une réticence face à ce modèle et évoquaient la possibilité d'un autre cadre de développement, en évitant une simple reproduction du modèle agro-industriel.

© Andrew Caballero-Reynolds / AFP

Cela ne signifie pas que la xénogreffe pourrait se passer d'élevages spécialisés. Il faudra produire des animaux génétiquement modifiés, élevés dans des conditions sanitaires extrêmement strictes, afin de limiter les risques infectieux pour les receveurs humains, ce qui peut entrer en tension avec les questions de bien-être animal. Des infrastructures existent déjà en Europe, comme la ferme d'élevage de l'entreprise de biotechnologie Xenothera, qui élève des porcs génétiquement modifiés en France, à Nantes, avec l'aide de vétérinaires.

Le domaine est encore dans une phase expérimentale, où il faut observer concrètement comment ces dispositifs vont évoluer. Nous sommes dans un moment de réflexion éthique intense, lors duquel nous pouvons penser des manières différentes de faire, qui ne vont pas vers une réduction de l'animal à un simple réservoir d'organes. Mais ces réflexions se déroulent dans un contexte globalisé : la course à l'innovation est lancée, et les États-Unis ainsi que la Chine ont déjà pris une avance importante. La question est donc aussi stratégique. Si on ne veut pas perdre la possibilité d'influer sur le modèle d'innovation, il faut se positionner, réfléchir et établir ensemble un cadre.

Du fait des avancées sur la xénogreffe depuis les années 2000 et de son déploiement aux États-Unis et en Chine, on commence à avoir un recul scientifique, éthique et sociologique suffisant pour légiférer sur la xénogreffe. Comment les chercheurs du domaine vivent-ils le retour de cette question dans le débat public et législatif ?

La xénogreffe connaît aujourd'hui un regain d'actualité, lié à des avancées scientifiques majeures, notamment grâce aux techniques d'édition génétique. Là où les chercheurs étaient encore pessimistes il y a quelques années, beaucoup sont désormais plutôt optimistes quant au devenir de la pratique. Mais la réception de cette innovation a toujours été complexe, oscillant entre enthousiasme, craintes et critiques. Les chercheurs en sont conscients. Ils savent aussi que pour éviter la reconduction des tensions passées, il est essentiel de faire un travail de diffusion et d'explication des enjeux autour de la xénogreffe. Il faut expliciter ces derniers, les modèles qui sont portés, les possibilités, intégrer les questions éthiques autour du bien-être animal, mais aussi de la question des patients, de la manière dont la thérapeutique va être mise en œuvre, les risques qu'elle comporte, pour les patients eux-mêmes comme pour la population générale.

Dans ce contexte, il ne faut considérer ni le grand public ni les scientifiques comme des blocs uniformes. Il y a évidemment des voix critiques qui s'élèveront, et tant mieux : les interrogations font partie du débat. Cette innovation s'inscrit aussi dans une transformation plus large de la médecine. On n'est plus dans un modèle strictement « soignant-soigné » où les patients seraient des réceptacles d'une pratique. Les associations de patients se saisissent du sujet, particulièrement confrontées aux problématiques de pénurie d'organes. Elles sont d'ailleurs auditionnées dans le cadre des États généraux de la bioéthique par le Comité consultatif national d'éthique. Le dialogue entre scientifiques, patients et société civile est donc particulièrement intéressant. Il offre l'occasion de réfléchir à la démocratisation de la médecine et de comprendre les enjeux du point de vue des patients et pas uniquement du côté du corps médical qui souhaite une thérapeutique efficace. ■

Propos recueillis par Ilona Bouvard

Ces porcs génétiquement modifiés, photographiés en 2024, sont élevés pour leurs organes dans une ferme de recherche de l'entreprise Revivicor, à Blacksburg, aux États-Unis.

C. Rémy, *Hybrides. Transplanter des organes de l'animal à l'homme*, CNRS Éditions, 2024.

La longue marche de l'astronomie chinoise vers la modernité

Thierry Montmerle, Yves Gomas et Yi Zhou

Au XXe siècle, la Chine quitta ses pratiques astronomiques ancestrales et se dota d'un observatoire moderne. À la source de cette métamorphose, une nouvelle génération d'astronomes – formés aux États-Unis et en France – née des cendres d'une insurrection étouffée, la révolte des Boxers.

Au cours de l'été 1900, la Chine bascule. Un soulèvement populaire armé, aujourd'hui connu sous le nom de « révolte des Boxers », est en action depuis plusieurs mois à travers le pays et vise notamment les étrangers et les Chinois chrétiens. Avec le soutien de l'impératrice Cixi, dont l'armée a rejoint le mouvement, des milices populaires assiègent les légations étrangères de Pékin (les ambassades) du 20 juin au 14 août, jusqu'à ce qu'une coalition de huit pays délivre finalement les sites attaqués. Les représailles sont terribles.

Quelques mois plus tard, le journaliste français Wilfrid de Fonvielle visite l'observatoire impérial. Son reportage, publié dans le *Bulletin de la Société Belge d'Astronomie*, raconte le pillage de ses célèbres instruments traditionnels, survenu le 2 décembre de la même année : « D'après les dépêches de Pékin aux journaux de Londres et de Washington, le général Chaffee, commandant le contingent américain en Chine, a adressé au maréchal Waldersee, commandant les forces allemandes, une lettre protestant contre le pillage de la zone de Pékin occupée par les Américains, dont il accuse les troupes allemandes et françaises. Il fait principalement grief à celles-ci d'avoir enlevé les appareils d'astronomie de l'observatoire de Pékin. »

Le journaliste précise que « sur des ordres venus de Paris, les troupes françaises ont renoncé à l'enlèvement des instruments astronomiques visés par la plainte du général Chaffee, instruments admirables d'ailleurs, merveilles d'art que le maréchal de Waldersee lui-même aurait ordonné d'envoyer, moitié à Berlin, moitié à Paris. »

Le pillage est honteux, cela ne fait aucun doute. Pour autant, a-t-il mis en péril l'astronomie chinoise telle qu'elle existait à l'époque ? En aucune façon. Le journaliste parle de « merveilles d'art » et un autre reportage d'un astronome britannique, Samuel Russell, paru dans le *China Times* en 1888, rapporte qu'à cette date ces instruments n'étaient déjà plus utilisés depuis longtemps. En 1900, aucun instrument moderne (c'est-à-dire fondé sur l'optique et utilisant des lentilles) ne les a remplacés.

La triste réalité est que l'astronomie chinoise demeurait alors prisonnière de la vision immobiliste du système impérial. Les astronomes (en réalité, des astrologues) devaient scruter le ciel en permanence à l'œil nu, enregistrer des « anomalies », déchiffrer

L'essentiel

Durant l'été 1900, les puissances étrangères écrasèrent la révolte des Boxers, un soulèvement paysan qui avait assiégé leurs ambassades à Pékin.

Les États-Unis et la France choisirent d'investir une partie de la compensation financière qu'ils avaient imposée à la Chine dans des programmes d'éducation pour les jeunes Chinois.

Certains devinrent astronomes et furent à l'origine du renouveau de l'astronomie chinoise, qui était restée prisonnière de traditions ancestrales.

L'un d'eux, Cheng Maolan, connut un destin singulier entre France et Chine, et fonda le plus grand observatoire de Chine malgré le chaos de la Révolution culturelle.

Cette sphère armillaire fabriquée en 1437, un des plus anciens instruments astronomiques chinois, est un des symboles de l'astronomie impériale qui furent pillés par les troupes allemandes lors de la révolte des Boxers, en 1900. Elle fut restituée en 1919 et est aujourd'hui visible à l'observatoire de la montagne Pourpre, à Nankin.

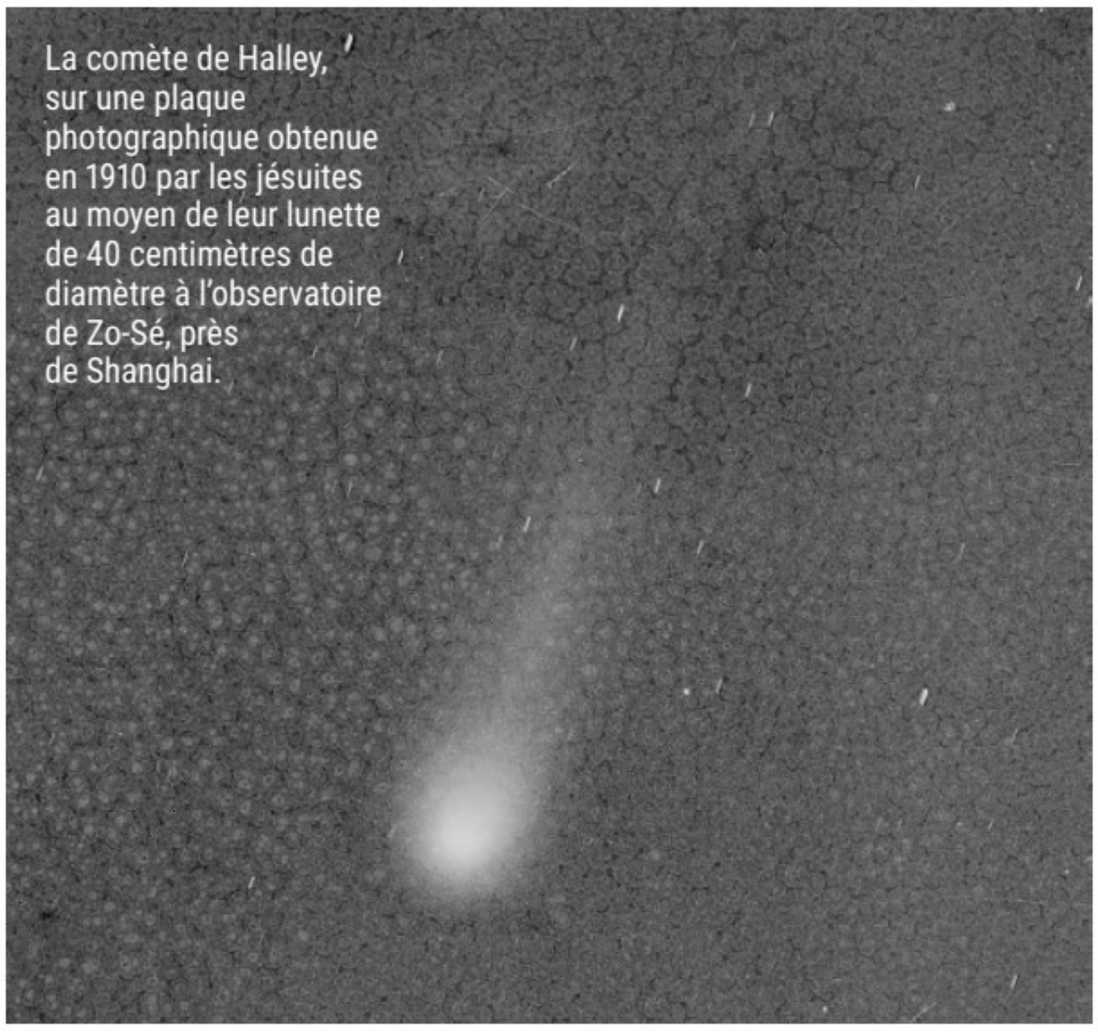
© Science Photo Library/Royal Astronomical Society

l'avenir et conseiller l'empereur. Si bien qu'au fil du temps, leur influence divinatoire déclinait, notamment depuis le contact avec les Occidentaux au XIXe siècle: les jésuites, revenus en Chine en 1842 (ils en avaient été bannis au XVIIIe siècle), avaient établi deux observatoires près de Shanghai, l'un muni d'une lunette méridienne, l'autre d'une lunette à monture équatoriale capable d'obtenir des clichés photographiques, alors que la fonction des astronomes chinois s'était peu à peu limitée à la confection des calendriers et à la prévision des éclipses. Leur nombre restait pourtant pléthorique: en 1888, Samuel Russell mentionne que l'observatoire de Pékin comptait 196 personnes… et que la mesure du temps se faisait toujours avec des horloges à eau (en Occident, on utilisait déjà des horloges de précision à balancier, réglées sur une seconde calculée à partir du mouvement de la Terre dans le système héliocentrique – système que les astronomes chinois ne prenaient pas en compte).

L'astronome Cheng Maolan (1905-1978) probablement dans les années 1950, en France, soit peu de temps avant son retour en Chine.

Une lacune dans l'histoire de l'astronomie chinoise

Ainsi, en dépit de sa brutalité, le pillage des instruments astronomiques traditionnels avait une valeur hautement symbolique: c'en était fini pour de bon des «4000 ans d'astronomie chinoise» qui avaient ébloui le monde entier. Pourtant, par un étonnant détour de l'histoire, c'est aussi (en partie) grâce à cet épisode tragique que l'astronomie chinoise, cette fois débarrassée de ses traditions impériales, a connu une véritable renaissance, au prix d'un long et douloureux cheminement en écho des bouleversements géopolitiques qui ont secoué la Chine au XXe siècle. En effet, un facteur essentiel de cette renaissance a été l'«indemnité des Boxers» que la Chine a consenti à payer sur trente-neuf ans sous forme d'une rente annuelle au titre des dommages causés aux légations étrangères.



La comète de Halley, sur une plaque photographique obtenue en 1910 par les jésuites au moyen de leur lunette de 40 centimètres de diamètre à l'observatoire de Zo-Sé, près de Shanghai.

Nous ne soupçonnions encore rien de cette histoire en 2012. En réalité, notre enquête a démarré presque par hasard cette année-là quand l'un de nous (Thierry Montmerle) a participé de près à l'organisation de l'assemblée générale de l'Union astronomique internationale (UAI) à Pékin. Cette union scientifique a été fondée en 1919, ainsi que d'autres, dans la foulée de la Première Guerre mondiale, à peu près au même moment que la signature du traité de Versailles (mais sans aucun rapport avec lui). La France et le Royaume-Uni, puis les États-Unis, ont joué un rôle essentiel dans sa création. Ses membres sont des sociétés savantes (académies des sciences, sociétés d'astronomie, etc.), et les adhésions sont ratifiées lors de ses assemblées générales, qui ont lieu tous les trois ans. En 2012, alors secrétaire général adjoint de l'UAI depuis 2009, Thierry Montmerle non seulement découvrait l'astronomie chinoise contemporaine et nouait des contacts à cette occasion, mais il s'aperçut qu'il existait une sorte de trou d'un siècle – le XXe – entre les présentations faites lors de l'assemblée générale de l'UAI sur l'astronomie traditionnelle et celles sur sa version moderne.

Source: documentaire chinois diffusé par la chaîne Hebei Satellite TV en 2020 (Cheng Maolan); © Avec l'aimable autorisation de Pierre Léna (comète)

Au fil des ans, il mena une enquête de plus en plus poussée dans les archives de l'UAI, mais aussi dans les publications chinoises, avec l'aide précieuse de Yi Zhou, qui devint un collaborateur essentiel.

Peu à peu, la transition entre astronomies traditionnelle et moderne se dessina, ainsi que l'histoire souvent extraordinaire de ses protagonistes. L'un d'eux retint particulièrement notre attention: Cheng Maolan, qui eut une destinée exceptionnelle et douloureuse, partagée entre la France et la Chine de Mao Zedong. C'est au cours des recherches sur ce personnage que nous a rejoints notre troisième compagnon de route, Yves Gomas, auteur d'une thèse sur Jean Dufay, directeur de thèse de Cheng Maolan. Voici le fruit de nos recherches: l'histoire d'une nouvelle génération d'astronomes née de la révolte des Boxers, qui jeta les bases de l'astronomie chinoise moderne en traversant guerres et révolutions.

À la suite de l'accord sur l'indemnité des Boxers, après plusieurs années de tractations géopolitiques, les États-Unis puis la France ont choisi d'utiliser les fonds reçus pour aider à la création d'une élite chinoise moderne, titulaire de diplômes universitaires et ayant vocation à irriguer les instances dirigeantes (*voir l'encadré ci-dessous*). Cette idée ne sortait pas du néant: au temps de l'Empire, des initiatives individuelles avaient déjà jeté les bases de formations à l'étranger. Par exemple, entre 1872 et 1875, 120 jeunes Chinois avaient été envoyés aux États-Unis se former jusque dans des grandes universités; et en France, un groupe d'intellectuels chinois autour de Li Shizeng, un jeune activiste politique venu étudier à Paris, avait fondé en 1908 le Mouvement travail-études, un programme grâce auquel des ouvriers chinois venaient s'instruire et travailler dans des usines françaises. Des centaines de jeunes, dont Deng Xiaoping, qui dirigera la République populaire de Chine de 1978 à 1990, profiteront de cette voie jusqu'à la Première Guerre mondiale.

C'est ainsi qu'également en 1908, le président américain Theodore Roosevelt a créé la bourse des

LES AUTEURS

Thierry Montmerle, directeur de recherche à l'institut d'astrophysique de Paris, ancien secrétaire général de l'Union astronomique internationale • **Yves Gomas,** historien des sciences au laboratoire S2HEP (Sciences et société, historicité, éducation et pratiques) à l'université Claude-Bernard Lyon I • **Yi Zhou,** journaliste à Radio-France International, à Paris, et écrivain

Un effet inattendu de la révolte des Boxers

Durant l'été 1900, des événements dramatiques ont eu lieu à Pékin : du 20 juin au 14 août, les Boxers ont fait le siège des légations étrangères – les ambassades occidentales, russe et japonaise – à deux pas de la Cité interdite, le cœur de l'Empire chinois. Ce sont les fameux *Cinquante-cinq Jours de Pékin*.

Les Boxers étaient issus d'une société secrète paysanne, les Poings de la justice et de la concorde. Depuis plusieurs mois, ils fomentaient une révolte armée contre les puissances étrangères, qui avaient le soutien de l'impératrice Cixi. Celle-ci chercha d'abord à mater l'insurrection, mais fit volte-face au printemps 1900 et libéra ses troupes pour qu'elles se joignent au mouvement, prenant au piège étrangers et Chinois chrétiens réfugiés dans les légations. Les provinces du nord-est furent aussi touchées et comptèrent de nombreuses victimes chrétiennes. En réaction, une alliance de huit nations étrangères débarqua de la mer de Chine et prit les assaillants à revers, libérant les assiégés après de furieux combats qui firent des dizaines de milliers de victimes, au prix de dégâts et de représailles épouvantables. Abandonnant la ville aux combattants, Cixi se réfugia avec sa cour à Xi'an, une très ancienne capitale de la Chine.

Le 7 septembre 1901, la Cour impériale signa un protocole de paix fixant ce qu'on appelle « l'indemnité des Boxers », que la Chine devait verser en compensation des dommages subis par les légations, répartie entre les différentes nations de l'alliance. La somme totale était littéralement… astronomique : 450 millions d'onces chinoises d'argent (une once – *liang* en chinois, « taël » pour les Occidentaux – pesant environ 40 grammes), à rembourser annuellement sur trente-neuf ans avec un intérêt de 4 %. Ce montant, équivalent à quatre fois le budget annuel de la Chine, faisait pratiquement doubler d'un coup le capital de la dette chinoise de l'époque, qui provenait essentiellement d'emprunts étrangers.

À la suite de négociations compliquées, la répartition fut la suivante : Russie 29 %, Allemagne 20 %, France 16 %, Grande-Bretagne 11 %, Japon 8 %, États-Unis 7 %, Italie 6 % et enfin Belgique 2 %. Cette fois, l'impératrice décida de ne pas recourir à l'emprunt, mais de puiser directement dans les recettes de l'État, et en premier lieu celles des douanes maritimes, autrement dit les taxes sur les importations de marchandises étrangères : des étrangers payaient des étrangers… Une mesure qui permit à la Chine de solder sa dette en 1940.

Au terme de longues négociations, les États-Unis, puis la France, choisirent d'utiliser cette rente dans le domaine éducatif. L'idée était de former de jeunes étudiants chinois qui, ensuite, retourneraient dans leur pays et faciliteraient les échanges commerciaux avec la nation qui les avait accueillis. Les principales initiatives de niveau universitaire furent la création de la bourse des Boxers par le président américain Theodore Roosevelt en 1908, et la fondation de l'institut franco-chinois de Lyon en 1921. C'est ainsi qu'une nouvelle génération d'intellectuels chinois est née des ruines de la révolte des Boxers.

En 1941, au moment où Cheng Maolan soutenait sa thèse à Lyon, démarrait, malgré l'Occupation, la construction d'un grand observatoire qui deviendrait l'observatoire de Haute-Provence, à laquelle il fut vite associé

Boxers, destinée à attirer des étudiants chinois dans des universités américaines, puis a contribué à la fondation de l'université Tsinghua à Pékin en 1911; en France, un institut franco-chinois, financé lui aussi, en partie, par l'indemnité des Boxers, fut fondé à Lyon en 1921 pour succéder au Mouvement travail-études (avec rang d'université chinoise). C'est dans ce contexte, paradoxalement favorable, que de jeunes talents ont pu saisir leur chance et devenir astronomes, parfois par le jeu du hasard. Cheng Maolan était de ceux-là.

A priori, rien ne laissait penser que celui-ci deviendrait astronome: il était né le 18 septembre 1905 dans une famille rurale de la plaine du Hebei, dans le village de Boye, près de Baoding, à 200 kilomètres au sud-ouest de Pékin. Cependant, bon élève à l'école, il eut la chance d'entrer en contact à la fin de ses études secondaires, en 1924, avec l'antenne chinoise de l'institut franco-chinois de Lyon. Il s'agissait d'une école préparatoire de six mois, basée à Pékin, que l'on suivait dans la perspective de partir pour la France et d'y poursuivre des études supérieures.

Sur cette photographie de la construction du futur observatoire en Haute-Provence prise en 1943, le seul véhicule de l'observatoire (une camionnette Citroën à gazogène, le cylindre visible sur le côté) transporte le miroir du télescope de 120 centimètres, dont la coupole apparaît en arrière-plan.

Cheng Maolan, de l'ombre à la lumière

Cette formation achevée, Cheng Maolan embarqua à Shanghai en décembre 1925. Il avait tout juste 20 ans. En arrivant à Marseille après plus d'un mois de traversée, il découvrit un monde entièrement nouveau. Ce n'était pas un cas isolé: en 1926, l'institut admit 14 étudiants, portant à 176 le nombre de jeunes Chinois (dont 15 femmes) inscrits depuis sa fondation en 1921. Dans le cursus habituel, les étudiants obtenaient différents certificats de licence de l'université de Lyon, suivis le cas échéant d'un diplôme d'études supérieures puis d'une thèse de doctorat, soit au total une durée de trois à cinq ans.

Normalement, au terme d'un tel cursus, Cheng Maolan aurait dû retourner dans son pays autour de 1931. Or sa vie en France fut tout sauf normale. Pour commencer, il ne se présenta pas au comité d'accueil de l'institut à son arrivée à Marseille, mais arriva à Lyon pour s'inscrire le 14 octobre... 1932! Que s'était-il passé pendant ces six ans sans donner de nouvelles? De quoi avait-il vécu? Nul ne le sait. Toujours est-il que lorsqu'il s'inscrivit, il était titulaire de deux certificats de licence en mathématiques de l'université de Rennes. Il obtint une bourse (peut-être financée en amont par l'indemnité des Boxers) qui lui assurait au moins le vivre et le couvert.

Malgré cette aide, ses années lyonnaises furent des années de galère, où il peina à obtenir

© Avec l'aimable autorisation de Michel Fehrenbach

ses autres certificats de licence : très vraisemblablement sans ressources familiales (notamment après l'invasion de la Chine par le Japon en 1937), il bénéficia du soutien de Jean Dufay, directeur de l'observatoire de Lyon, qui le prit sous son aile et le convainquit d'entreprendre une thèse en astronomie, qu'il soutint en 1941.

Ce fut sa chance : au même moment, et malgré l'Occupation, démarrait au pays des cigales la construction d'un grand observatoire sous la direction de l'astronome Charles Fehrenbach, qui deviendrait l'observatoire de Haute-Provence à la Libération. Pour étoffer son environnement scientifique, Jean Dufay réussit à obtenir pour Cheng Maolan une bourse du CNRS (créé en 1939), lui ouvrant ainsi la voie vers un poste permanent. Poste que l'expatrié obtint en 1945, avec en prime la même année un prix de l'Académie des sciences. C'était la fin des vaches maigres et la reconnaissance de sa valeur scientifique, qui se confirma avec l'attribution des palmes académiques en 1956.

En Chine, des premiers pas balbutiants

Pendant que Cheng Maolan entamait enfin une carrière prometteuse en France, l'astronomie chinoise commençait sa métamorphose sous l'impulsion d'un autre intellectuel parti se former à l'étranger quelques années plus tôt, Gao Lu. Né en 1877 à Fuzhou, un port du sud de la Chine qui abritait depuis 1866 un complexe naval dont la construction avait été supervisée par la France, le jeune homme y avait fait ses études supérieures avant de partir pour Bruxelles, où il avait obtenu un diplôme d'ingénieur en 1905. À son retour en 1909, il avait rejoint Sun Yat-sen. Celui qui deviendrait en 1912 le premier président de la République chinoise avait lancé quelques années plus tôt un mouvement de résistance avec d'autres jeunes intellectuels partis, comme lui, se former à l'étranger. C'était ce mouvement que Gao Lu avait embrassé (à l'instar de Li Shizeng) tandis que les soulèvements contre la dynastie Qing se multipliaient sans succès, la plupart à l'instigation de Sun Yat-sen.

Après la révolution de 1911, qui avait conduit à la chute de la dynastie impériale, le jeune ingénieur avait eu une brillante carrière dans le gouvernement de la jeune république, et plus particulièrement comme diplomate en France : il avait participé, entre autres, pour la partie chinoise, à la création de l'institut franco-chinois de Lyon et était devenu membre de la Société astronomique de France. Sun Yat-sen l'avait donc nommé directeur de l'observatoire de Pékin.

Quand Zhou Enlai battait le rappel

Premier ministre de Mao Zedong et ministre des Affaires étrangères (de 1949 à 1958), Zhou Enlai connaissait l'anglais, avait séjourné en France et parcouru l'Europe au début des années 1920. Dès l'installation de la République populaire de Chine, en 1949, il chercha à faire rentrer au pays des Chinois installés à l'étranger, du moins ceux qui étaient susceptibles de faire utilement bénéficier la nouvelle Chine de leurs compétences. Cheng Maolan fut de ceux-là, dans un contexte étonnant.

À l'époque, la Chine populaire n'était pas reconnue par l'Organisation des Nations unies. Chaque pays ne pouvait y avoir qu'une seule représentation. Or la Chine, membre dès sa fondation en 1945, était alors déjà représentée par la « République de Chine » nationaliste, c'est-à-dire Taïwan, qui, de plus, appartenait au Conseil de sécurité en tant que cinquième allié de la Seconde Guerre mondiale. En conséquence, il était impossible pour la Chine populaire d'envoyer des chasseurs de têtes à l'étranger en dehors des quelques pays l'ayant déjà reconnue (l'URSS en 1949, la Suisse et le Royaume-Uni en 1950). Pour obtenir des visas, il fallait constituer des délégations en invoquant des motifs officiels, acceptés au coup par coup par voie diplomatique.

C'est ce qui se passa en France en mai 1956, à l'occasion de la tournée européenne d'une délégation artistique, et, simultanément, d'une délégation commerciale à la Foire de Paris, au titre des échanges culturels. La délégation artistique comprenait une dizaine de membres : entre autres, les peintres Wang Xuetao et Zhang Ding, l'écrivain Li Jiye, et la musicienne Lang Yuxiu, déjà bien connus en dehors de la Chine, mais aussi des ingénieurs comme Mao Yisheng et Hou Debang, président de la délégation, ainsi que l'économiste Ji Chaoding, vice-président, qui avaient fait leurs études aux États-Unis. Zhang Ding et ce dernier visitèrent la Foire de Paris, où ils rencontrèrent un certain nombre de personnalités parisiennes.

Plus surprenant, la délégation artistique se rendit sur la Côte d'Azur, où elle fut reçue par Picasso dans sa maison-atelier La Californie, à Cannes ! Au-delà de l'anecdote, il est très probable que Wang Xuetao ait fait étape à Lyon pour passer voir Cheng Maolan et lui remettre une lettre que lui avait confiée Zhou Enlai en personne. Nous n'en avons pas de témoignage direct, mais nous savons, d'après des sources chinoises, que Wang Xuetao, à son retour d'Europe, se rendit spécialement à Boye, le village natal de Cheng Maolan, pour y rencontrer des membres de sa famille. Ce contact fut probablement un argument important pour le convaincre de retourner dans sa patrie l'année suivante.

Dans la délégation chinoise qui entoure Picasso *(en chemise sombre)* à Cannes sur cette photo prise en 1956, on distingue le peintre Wang Xuetao et le chimiste Hou Debang *(côte à côte à gauche)*.

Source de la photo : Autobiographie de Xu Jian, China Painting and Calligraphy Net, www.chinashj.com

Le premier souci de Gao Lu fut de remplacer les astronomes du régime impérial par une nouvelle génération. Mais il fallait entre-temps continuer d'assurer les services de l'observatoire, comme l'heure, le calendrier, la météo, etc. En attendant le retour des jeunes diplômés de l'étranger, il commença par envoyer des étudiants suivre des cours au département de trigonométrie du Bureau de topographie de l'état-major de l'armée chinoise, pour leur assurer un niveau suffisant en mesures, calcul et mathématiques. Il put ainsi jeter les bases de la Société chinoise d'astronomie, fondée en 1922, avec pour première ambition de créer un observatoire équipé d'un télescope moderne d'entrée de gamme d'environ 60 centimètres de diamètre, disponible sur commande.

Même modeste en apparence, il s'agissait d'un projet très ambitieux pour ces débutants, nécessitant un environnement institutionnel solide. Cela devint possible en 1928 avec la création de l'Academia Sinica (l'Académie chinoise des sciences) dans le sillage de l'arrivée au pouvoir de Tchang Kaï-chek, après la mort de Sun Yat-sen, en 1925. Dès lors, le projet d'observatoire fut rondement mené. La construction démarra en 1929 en haut de la montagne Pourpre, qui, du haut ses 267 mètres, surplombe le fleuve Bleu, à l'est de la ville de Nankin, alors la nouvelle capitale. Le télescope fut commandé à la très réputée société Zeiss, en Allemagne, et les observations démarrèrent en 1934. Les équipes se renforcèrent, avec notamment l'arrivée, dès 1929, de Zhang Yuzhe, qui avait fait sa thèse à l'observatoire de Yerkes, aux États-Unis, et de Li Heng en 1933, passé par l'institut franco-chinois de Lyon (où venait de s'installer Cheng Maolan) et l'observatoire de Paris. Ces efforts remarquables se virent couronnés par l'adhésion de la Chine à l'UAI en 1935.

Hélas, l'invasion japonaise en 1937 balaya les espoirs de progrès rapides. Le gouvernement et ses principales institutions se replièrent à Chongqing, dans le Sichuan. L'Academia Sinica put cependant installer un observatoire solaire de haute altitude à Kunming, dans les montagnes du Yunnan. Un récit héroïque illumina alors la communauté astronomique chinoise à l'occasion du passage d'ouest en est, sur 4000 kilomètres à travers toute la Chine, d'une éclipse totale de Soleil le 21 septembre 1941.

Malgré la guerre, une expédition, dirigée par Zhang Yuzhe et Li Heng, rejoignit un lieu d'observation propice situé près de Lanzhou, à la limite nord-est du plateau tibétain. Une douzaine d'astronomes, avec leur matériel, s'entassèrent dans un camion fourni par l'armée pour un voyage de 3200 kilomètres de routes de montagne vers le nord, à partir de Kunming, pour observer une éclipse de… trois minutes ! À leur retour, Zhang Yuzhe raconta ce périple de 45 jours « à l'ombre des bombardiers japonais » dans un article devenu célèbre paru dans la revue américaine *Popular Astronomy* en avril 1942. L'expédition fut couronnée de succès : un reportage fut retransmis par radio dans toute la Chine et au-delà, témoignant du courage du peuple chinois jusqu'aux États-Unis, désormais officiellement leurs alliés dans la guerre après l'attaque japonaise de Pearl Harbor.

Cheng Maolan, rattrapé par son pays

Dans les dernières semaines de la guerre civile entre nationalistes et communistes qui suivit la capitulation du Japon, le gouvernement donna pour instruction aux astronomes, revenus à Nankin, de se déplacer vers le sud, à Canton ou même à Taïwan. Mais Zhang Yuzhe et la plupart de ses collègues

Les principaux lieux en Chine liés au renouveau de l'astronomie du pays au XXe siècle et à la vie de Cheng Maolan. Notamment, l'expédition pour observer l'éclipse totale de Soleil le 21 septembre 1941 traversa en camion les 3200 kilomètres entre Kunming et Lanzhou, constamment à portée des bombardiers japonais.

© Pour la Science; © Rainer Lesniewski/Shutterstock

refusèrent. Ils voulaient rejoindre les instituts scientifiques de Shanghai pour y attendre la victoire des troupes communistes, qui arrivèrent sans coup férir le 25 mai 1949.

Les premières années de la République populaire, proclamée par Mao Zedong le 1er octobre suivant, furent remplies d'espoir. Avec l'aide de milliers de conseillers et d'ingénieurs venus d'URSS, la Chine populaire allait rapidement rattraper les pays occidentaux. La nouvelle génération d'astronomes était presque au complet. Il en manquait un: Cheng Maolan, bien connu en Chine grâce à Li Heng, devenu directeur de l'observatoire de Shanghai et qui suivait régulièrement ses travaux.

Il fallait donc le convaincre de revenir au pays. C'était loin d'être évident: titulaire de son poste de chargé de recherches au CNRS, reconnu par ses pairs, visiteur régulier de l'observatoire de Haute-Provence, où il suivait notamment la construction du grand télescope de 193 centimètres, Cheng Maolan était sur la voie d'une belle carrière d'astronome. Manifestement, bien qu'en relation avec Li Heng, il traînait des pieds. Ayant probablement été contacté par une délégation culturelle chinoise en visite en France en 1956, il reçut sans doute à cette occasion la promesse d'être nommé directeur de l'observatoire de Pékin, appuyée, selon certains témoignages, par une lettre de Zhou Enlai, compagnon de toujours de Mao et Premier ministre de son gouvernement (*voir l'encadré page 55*).

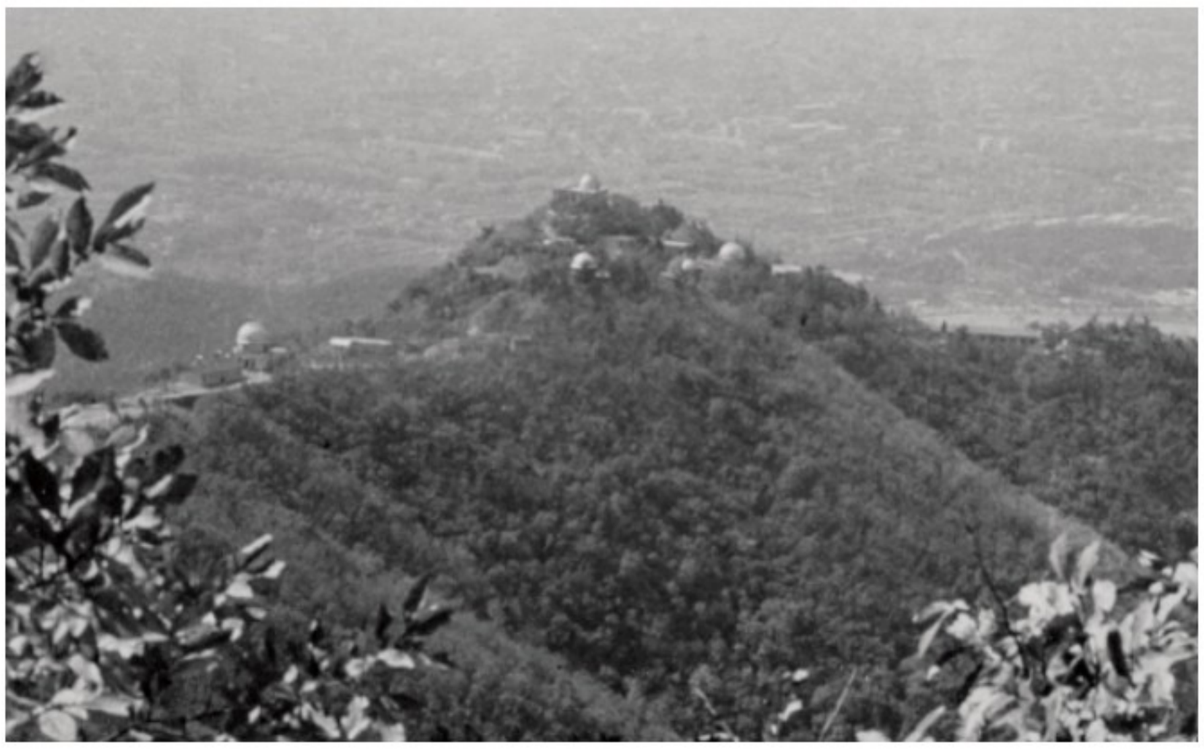
Cheng Maolan finit par céder. En juillet 1957, il prit le bateau du retour, après avoir vécu trente-deux ans en France sans interruption. Il fut rapidement mis à contribution. L'été suivant, l'UAI devait tenir son assemblée générale à Moscou et un poste de vice-président du Comité exécutif allait devenir vacant. En raison de ses contacts avec l'étranger, la délégation chinoise proposa son nom. Mais surgit alors un événement lourd de conséquences: la République de Chine (nationaliste, réfugiée à Taïwan) ou, plus exactement, la Société astronomique de Taïwan, envoya une demande d'adhésion à l'UAI.

Une Chine isolée du reste du monde

La situation devenait extrêmement délicate. Pour la Chine populaire, l'admission de Taïwan par l'UAI était inconcevable, car elle aurait entériné l'existence de «deux Chines». Mais selon ses statuts, l'UAI n'avait aucun motif pour refuser de se saisir du dossier de Taïwan, ce qui provoqua brusquement le départ de la délégation de Pékin, et bien sûr l'abandon de la candidature de Cheng Maolan au poste de vice-président. Après des discussions serrées, l'UAI accepta officiellement l'adhésion de Taïwan, entraînant le retrait de la Chine populaire en 1960. Cette séparation forcée entre les astronomes chinois de Pékin et leurs collègues étrangers allait durer plus de vingt ans.

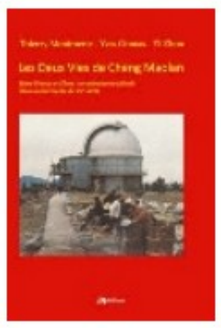
Juste après l'assemblée générale de Moscou, Mao déclencha le Grand Bond en avant: la Chine devait devenir autosuffisante et notamment s'affranchir de l'influence de l'URSS, devenue à ses yeux contre-révolutionnaire depuis la mort de Staline en 1953 et l'arrivée de Nikita Khrouchtchev au pouvoir. Ce fut la rupture: les experts soviétiques et leurs familles furent renvoyés dans leurs foyers.

Les astronomes chinois étaient désormais isolés. Auparavant, en 1956, une réunion (incluant notamment Zhang Yuzhe et Li Heng) avec des astronomes soviétiques avait jeté les bases d'un



Fondé en 1929, l'observatoire de la montagne Pourpre *(en haut, ici photographié en 1978)* dominait le fleuve Bleu (Yangzi Jiang, *en arrière-plan*) et la ville de Nankin, sur l'autre rive. Il est aujourd'hui cerné par l'urbanisation. L'observatoire de Xinglong *(en bas)* fut inauguré près de Pékin en 1989. Sur cette photo également prise en 1978, on le voit tel qu'il était à la fin de la vie de son concepteur, Cheng Maolan. La coupole du télescope de 2,16 mètres, bien visible à droite, était vide à l'époque.

À LIRE



T. Montmerle *et al.*, *Les Deux Vies de Cheng Maolan*, Z4, 2025.

© Avec l'aimable autorisation de Michel Fehrenbach

plan de collaboration de douze ans, comportant la construction d'un grand télescope de la classe des 2 mètres de diamètre. Évidemment, en l'absence d'une quelconque expérience dans la fabrication de miroirs, ce plan devenait caduc. Mais par une chance incroyable, ce ne fut pas le cas: en 1959, juste avant que les derniers ponts ne soient coupés avec leurs collègues soviétiques, ceux-ci proposèrent de leur vendre l'ébauche inutilisée d'un miroir d'un diamètre de 2,20 mètres. C'était l'essentiel, même s'il restait encore beaucoup de travail à accomplir jusqu'à l'installation (polissage, argenture, etc.). Marché conclu, ce miroir fut livré juste à temps...

Encore fallait-il trouver un site approprié pour construire la coupole, installer le télescope et des dépendances, et créer, *ex nihilo*, un véritable observatoire moderne. Compte tenu de son expérience à l'observatoire de Haute-Provence, Cheng Maolan avait été chargé, dès 1958, de cette mission essentielle mais difficile. Ce fut sa «longue route»: au prix de mille difficultés, en plein Grand Bond en avant, Cheng Maolan, avec son équipe d'une vingtaine de personnes, explora les montagnes (peu élevées) des environs de Pékin, à dos d'âne ou quelquefois en avion. Au bout de six ans d'acharnement, il trouva enfin, en 1964, le site qu'il cherchait, dans les montagnes de Xinglong, à 150 kilomètres au nord-est de Pékin et à 960 mètres d'altitude moyenne.

En 1956, un séminaire de prospective à douze ans réunit astronomes chinois et soviétiques. Parmi eux, on distingue Li Heng et Zhang Yuzhe *(deuxième et troisième à partir de la gauche)*, ainsi que Wu Youxun *(à droite)*, qui représente l'Académie des sciences chinoise. En costume clair, le Soviétique Aleksandr Aleksandrovitch Mikhaïlov, académicien et directeur de l'observatoire de Poulkovo, près de Leningrad (Saint-Pétersbourg aujourd'hui).

Un observatoire construit en totale autonomie

Contre toute attente, malgré l'absence d'une quelconque aide extérieure, les travaux d'infrastructure et d'installation de divers instruments astronomiques se poursuivirent – certes très lentement – pendant la Révolution culturelle, au point que l'observatoire de Xinglong put être officiellement inauguré en 1968. Mais faute d'ateliers adaptés, le miroir soviétique resta dans sa caisse jusqu'en 1977. Quant au télescope lui-même, d'un diamètre de 2,16 mètres, il ne reçut sa première lumière à Xinglong qu'en novembre 1989 – soit trente ans après la livraison de son miroir.

Malheureusement, Cheng Maolan ne vit jamais «son» télescope: tombé subitement malade, il décéda fin décembre 1978. Sa quête était restée inachevée. Néanmoins, les graines étaient semées. Un an après sa mort, la Chine réintégra l'UAI à la suite de l'arrivée de Deng Xiaoping au pouvoir et put reprendre ses collaborations internationales. Une nouvelle ère commençait pour l'astronomie chinoise.

Aujourd'hui, Xinglong est devenu le premier observatoire de Chine, mais évidemment sa faible altitude (comparable à celle de l'observatoire de Haute-Provence) ne permet pas d'envisager d'y construire de très grands télescopes comme au Chili. On y fait cependant de la spectroscopie simultanée de nombreux objets à l'aide d'un télescope grand champ (ou télescope de Schmidt) muni d'une grande surface collectrice: le Lamost (télescope spectroscopique multi-objets à fibres optiques grand champ), terminé en 2008, dont l'optique complexe (un arrangement de miroirs de 1 mètre de diamètre) le range dans la classe des 6 mètres. Toutefois, le site, proche de Pékin, tend à se dégrader à cause des pollutions atmosphérique et lumineuse, et Kunming, à 1 800 mètres d'altitude dans le Yunnan, redevient un lieu d'intérêt astronomique pour des télescopes spécialisés.

Cheng Maolan, quant à lui, est malheureusement tombé dans l'oubli en France. En Chine, en revanche, les astronomes ne l'ont jamais oublié et plusieurs hommages lui ont été rendus. En 2018, notamment, fut inauguré dans sa maison natale, près de Baoding, un musée astronomique, où sa statue, d'un blanc immaculé, accueille désormais les visiteurs. Et si vous vous promenez dans les montagnes du Hebei, non loin de la Grande Muraille à Simatai, peut-être y croiserez-vous son fantôme, continuant de rôder sur son âne... ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Montmerle *et al.*, *Les Deux Vies de Cheng Maolan*, Z4, 2025.

T. Montmerle *et al.*, Observer l'éclipse totale de 1941 : L'héroïque épopée des astronomes chinois, *L'Astronomie*, 2025.

T. Montmerle et Y. Zhou, *China and the International Astronomical Union : Divorce, separation and reconciliation (1958-1982)*, Springer, 2022.

H. Liang, La colonialité intellectuelle dans l'histoire de la Chine moderne : de la « Bourse scolaire de l'indemnité des Boxers » à l'institut franco-chinois de Lyon, *Transtext(e)s Transcultures* 跨文本跨文化, 2014.

© Wang Shouguan/Observatoire de la montagne Pourpre

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

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

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

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

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

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

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

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

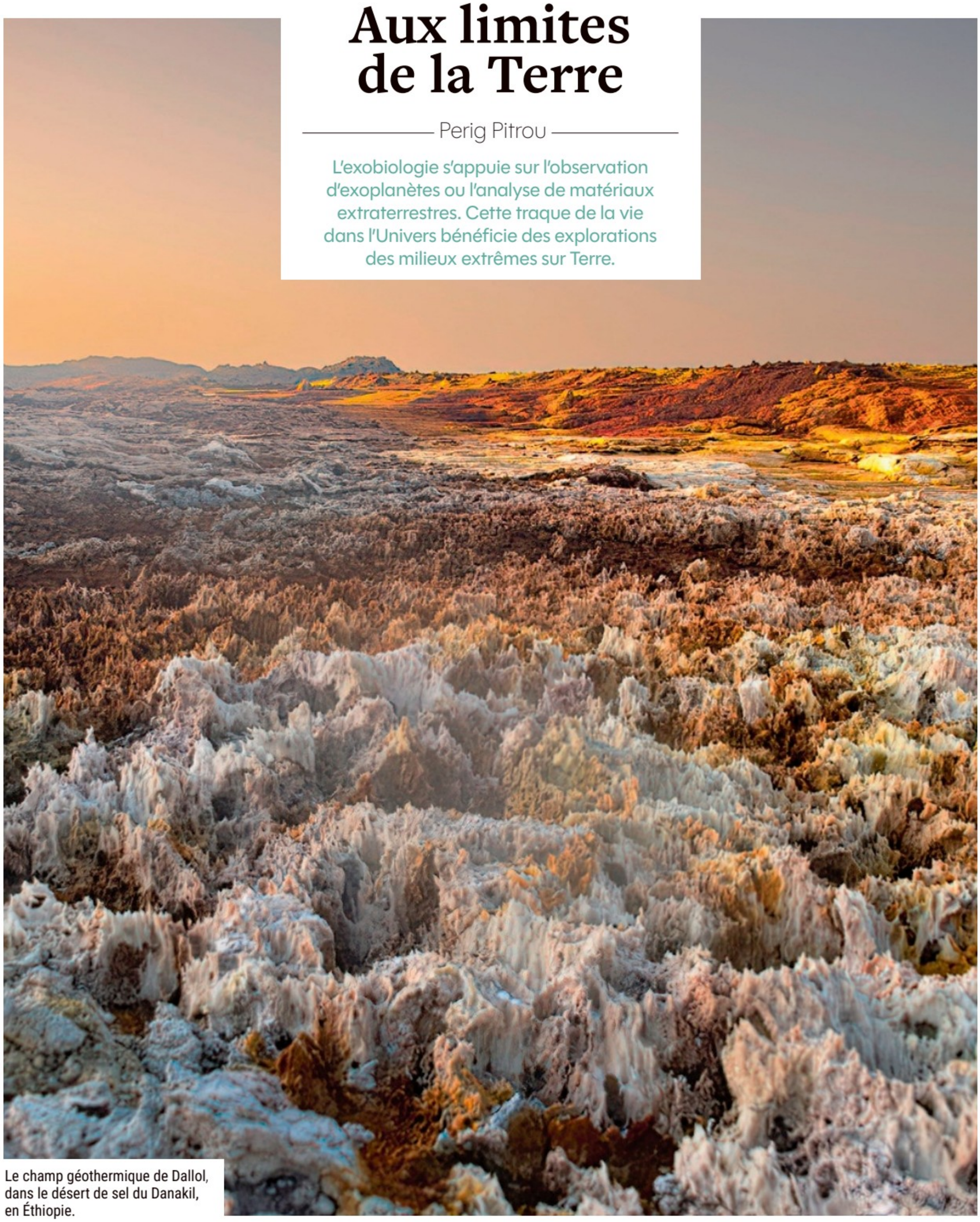
CONDITIONS TARIFAIRES ET RESERVATIONS
WWW.CONVERSATIONSSOUSLARBRE.FR - SEMINAIRE@DOMAINE-CHAUMONT.FR - 02 54 20 99 22

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

Aux limites de la Terre

Perig Pitrou

L'exobiologie s'appuie sur l'observation d'exoplanètes ou l'analyse de matériaux extraterrestres. Cette traque de la vie dans l'Univers bénéficie des explorations des milieux extrêmes sur Terre.



Le champ géothermique de Dallol, dans le désert de sel du Danakil, en Éthiopie.

© Erich Karnberger/Shutterstock

L'année universitaire 2025-2026 a été pour moi placée sous le signe de l'exobiologie et de la recherche des origines de la vie sur Terre et dans l'Univers, des domaines fondamentaux dans mon investigation comparatiste sur les conceptions de la vie élaborées par les humains. Tout en effectuant un séjour de recherche au Leverhulme Centre for Life in the Universe, fondé à l'université de Cambridge, en Grande-Bretagne, par l'astronome Didier Queloz, Prix Nobel de physique en 2019 (avec Michel Mayor) pour la découverte de la première exoplanète, et en m'impliquant dans les activités du programme national sur les origines de la vie dirigé par Maud Langlois, astrophysicienne au CNRS, et Alessandro Morbidelli, planétologue et professeur au Collège de France, j'ai participé aux congrès de la Société française d'exobiologie, de la société internationale d'études sur l'origine de la vie (ISSOL). À chaque fois, la fécondité du dialogue interdisciplinaire (astrophysique, biologie, écologie, chimie, géologie, minéralogie...) y fut remarquable.

Or, justement, pour l'anthropologie, science des comparaisons et des changements de perspectives, l'enjeu est de suivre comment la question de la vie dans l'Univers s'articule à des projets, certes divers, mais visant tous à mieux connaître les dynamiques d'émergence de la vie sur Terre. L'étude d'exoplanètes modifie le regard sur notre environnement envisagé comme la superposition de couches géologiques où se lit l'histoire de la Terre primitive. Du fait de mes expériences ethnographiques en Amérique latine, je me sens une forte affinité avec les expéditions vers des terrains s'apparentant souvent aux limites de la Terre.

Sylvain Bernard, géochimiste au CNRS, et Pierre Sans-Jofre, du Muséum national d'histoire naturelle, se sont ainsi rendus sur le site d'Isua, au Groenland. Ce fut un voyage dans le temps pour scruter dans le paysage les traces d'activités géologiques s'étant déroulées il y a plusieurs milliards d'années et tenter de déterminer l'origine des structures laminées de certains stromatolithes, soit sédimentaire, soit microbienne. Au laboratoire, les échantillons ont été comparés à des objets aux formes similaires produits expérimentalement par des processus abiotiques, afin de décider s'ils constituent des biosignatures probantes, c'est-à-dire des signes à même de trahir une éventuelle vie ailleurs.

Les investigations sur l'évolution microbienne de Purificación López-García et de David Moreira, de l'équipe «Diversité, écologie et évolution microbiennes» (DEEM: CNRS, Université Paris-Saclay, AgroParisTech), impliquent des missions dans des milieux tout aussi inhospitaliers, par exemple dans le champ géothermique de Dallol situé dans le désert de sel du Danakil, en Éthiopie (*voir page ci-contre*). Connu pour ses formations géologiques étonnantes, ce site réunit des conditions extrêmes qui devraient normalement empêcher le développement du vivant.

Pourtant, dans certains cas, l'analyse des échantillons et la découverte d'archées montrent la capacité de la vie à se propager dans des environnements très défavorables. En étudiant le génome de ces êtres et l'histoire évolutive de lignées microbiennes, l'équipe tente également de remonter le temps pour éclairer les origines de la vie sur notre planète.

Les images rapportées de ce genre d'expéditions procurent un profond dépaysement, en particulier le documentaire d'Olivier Grunewald *Dallol. Aux frontières du vivant*. Elles donnent l'impression d'une autre planète – tout comme celles d'Isua rendent sensible une autre Terre, ayant existé il y a quelques milliards d'années. Ces aventures intellectuelles et humaines participent donc à un exercice de comparaison et de distanciation, indispensable lorsqu'on se demande comment la vie a pu, ou aurait pu, apparaître ailleurs dans l'Univers.

Même si les sciences de la nature et les sciences humaines et sociales diffèrent par leurs objets et leurs méthodes, elles ont en commun de chercher à compléter l'approche théorique et l'expérimentation en laboratoire par des investigations empiriques. Dans cette démarche scientifique – où littéralement il faut marcher et «tâter [...] de la rondeur du monde», comme disait Marguerite Yourcenar –, l'engagement personnel et corporel nécessaire à l'appréhension subjective constitue parfois une expérience cruciale pour développer une connaissance de la vie. ■

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

BIBLIOGRAPHIE

P. Philippot (éd.), *Archean and Proterozoic Earth : Infancy and Adolescence of the Planet Earth*, Wiley, 2025.

PEPR Origins, https://pepr-origins.fr

Les expéditions de l'équipe DEEM, https://www.deemteam.fr/fr/outreach

Évalués par les pairs, oui, mais lesquels ? Et combien ?

Yves Gingras

Le choix des évaluateurs des articles soumis à des revues scientifiques est obscur. Or il est susceptible d'influer considérablement sur le processus de validation des connaissances.

L'évaluation par les pairs est au cœur du processus de validation des nouvelles connaissances. Souvent, même, on considère que dire d'une publication «elle a été évaluée par les pairs» signifie que son contenu est valide. Et, inversement, affirmer qu'une telle autre ne l'a pas été semble suffisant pour mettre (subtilement) en doute son contenu. Bien sûr, les personnes qui adhèrent aux conclusions de l'article utilisent la première stratégie rhétorique, et celles qui les mettent en doute et tentent de les discréditer, la seconde.

Une controverse récente aux États-Unis fait bien apparaître ces usages du mantra «évalué par les pairs». Depuis soixante-cinq ans, les Centres américains pour le contrôle et la prévention des maladies (CDC) publient chaque semaine une revue scientifique sur des sujets de santé publique, le «Morbidity and Mortality Weekly Report» (MMWR). La procédure menant à la parution d'un article dans cette revue est bien expliquée sur son site : l'acceptation des articles soumis relève de la responsabilité des rédacteurs du MMWR. Les auteurs ne travaillant pas aux CDC envoient d'abord leur article à des experts des CDC ; si au moins un auteur travaille aux CDC, et si l'institution a approuvé le rapport produit, il est soumis comme un rapport interne des CDC, même si l'interlocuteur principal n'y est pas employé. En clair, l'évaluation par les pairs se fait en interne.

La diversité institutionnelle et disciplinaire des regards sur les méthodes et résultats d'un article est toujours utile pour tester la robustesse des conclusions et éviter les biais

Cette procédure n'avait jamais été vraiment remise en question, mais en avril dernier, le directeur intérimaire des CDC, Jayanta «Jay» Bhattacharya (aussi directeur des Instituts américains de la santé, les NIH) bloqua la publication d'un article portant sur l'efficacité du vaccin contre le Covid-19 qui avait passé toutes les étapes, prétextant qu'il posait un problème méthodologique et que le «MMWR n'est pas, actuellement, une revue évaluée par les pairs». L'article confirmait l'efficacité du vaccin par la méthode dite du «test négatif», que les CDC utilisent couramment pour mesurer l'impact du vaccin contre la grippe. Les services de santé sous l'administration Trump étant sous la supervision de l'antivax Robert F. Kennedy, il y a tout lieu de croire que cet article a déplu.

Bien sûr, la réponse fut que l'article avait été examiné en interne par des spécialistes, qui l'avaient trouvé rigoureux, et que c'était donc bien une «évaluation par les pairs». La procédure suivie était conforme aux critères d'évaluation définis par les NIH et, en 2023, les CDC avaient même commandé un rapport sur l'opportunité d'utiliser des évaluateurs externes, lequel avait conclu que la diversité des expertises internes suffisait amplement et gagnait du temps.

Au-delà de la pertinence de la méthode, la question qui nous intéresse ici est de savoir si le fait que les pairs viennent tous de la même organisation constitue un biais dans l'évaluation. Une organisation pourrait devenir assez homogène dans ses

routines méthodologiques et conceptuelles pour que collectivement ses membres aient tous (consciemment ou non) les mêmes critères d'évaluation. De ce point de vue, répéter le mantra «évalué par les pairs» ne suffit donc pas et il devient nécessaire de se demander: quels pairs, de quelles organisations et disciplines, et combien?

On sait que la décision finale revient aux rédacteurs de la revue, lesquels vont parfois contre l'avis des évaluateurs, que l'évaluation en double aveugle a des limites et qu'il est de plus en plus difficile de trouver des volontaires. Mais on ignore à peu près tout de la manière dont ceux-ci sont choisis. Bien sûr, on imagine sans difficulté qu'on cherche des personnes qui connaissent vraiment le sujet de l'article à évaluer, mais au-delà de cette évidence les critères de choix restent opaques. En plus d'un possible biais institutionnel, des biais disciplinaires sont envisageables. L'histoire de la fusion froide me semble en fournir un bel exemple.

En 1989, deux électrochimistes, Martin Fleischmann et Stanley Pons, ont publié dans le *Journal of Electroanalytical Chemistry* un article annonçant que leur expérience d'électrolyse de l'eau lourde avec une électrode de palladium donnait lieu à une fusion des noyaux de deutérium dans le réseau du palladium. Il est probable que seuls des chimistes l'ont évalué, car des physiciens auraient sûrement fait observer que le niveau de neutrons détectés était trop faible pour le taux de fusion indiqué et l'auraient alors fort probablement refusé.

Un autre cas que j'ai connu en sociologie met en lumière l'importance stratégique du choix des évaluateurs pour le responsable éditorial de la revue. Un collègue avait soumis un article que je trouvais très original. Or les deux premiers avis étaient plutôt critiques et le rédacteur en chef de la revue – qui semblait plutôt favorable à l'article – a finalement trouvé au total cinq évaluateurs pour enfin conclure que le papier pouvait être accepté! On peut aussi aller à la chasse aux «bons» pairs en changeant de revue. L'article sur la fusion froide a-t-il d'abord été soumis à une revue de physique avant sa parution dans une revue d'électrochimie? Je l'ignore, mais une revue comme *Nature*, qui en 1988 a publié l'article de Jacques Benveniste sur la mémoire de l'eau malgré les réticences de ses évaluateurs, aurait sans doute été capable de l'accepter. Deux semaines après la parution de celui des deux électrochimistes, elle a d'ailleurs publié un article analogue provenant de l'équipe du physicien Steve Jones, qui était en compétition directe avec eux.

> On ignore à peu près tout de la manière dont les évaluateurs sont choisis

En somme, la diversité à la fois institutionnelle et disciplinaire des regards sur les méthodes et les résultats d'un article est toujours utile pour tester la robustesse des conclusions et éviter les biais. Et comme le notait un ancien membre de la direction des CDC, ces regards externes rendraient peut-être l'institution moins sujette à des pressions politiques. ■

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

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

Vis ma vie de dév en 2026

Thomas Gerbaud

Une journée comme une autre dans une entreprise de technologie. Les outils d'IA générative ont un impact direct sur notre métier. Témoignage d'une développeuse à peine fictive.

Hier j'ai passé deux heures à relire une *pull request* (PR) générée par le PM. Pas un dév, un *product manager*. Il a branché Cursor sur le *repo*, a décrit ce qu'il voulait, et il a ouvert une PR. Les tests automatiques avaient validé son code. Mais, surprise : le code ne faisait pas ce qu'il prétendait faire. Fatigant.

Dans ce code, une fonction de 80 lignes gérait à la fois la validation métier, l'accès à la base SQL et le formatage de la réponse HTTP. Aucune séparation de responsabilité, aucune réutilisation de code pré-existant. Le genre de truc qu'on corrige chez un stagiaire en semaine 2. Sauf que là, c'est en prod et c'est le PM qui a *mergé* sa propre branche sur *main* parce que les tests sont verts. Depuis quand son agent a les droits, déjà !? J'ai mis quarante minutes à écrire un commentaire de revue suffisamment diplomatique pour ne pas déclencher une n-ième réunion de crise. Enfin, moi j'ai écrit la version franche, Claude l'a rendue acceptable.

Les tâches de ce genre s'empilent. Mon *backlog* explose. Depuis janvier, un dév sort 7 PR par jour, c'est insensé. Je n'écris plus, je relis du code *vibe*-codé.

Un process, un agent. C'est le mantra du moment. Revue de PR ? Agent. Cohérence entre documentation et code ? Agent. Lien entre *specs* et implémentation ? Agent. Et tout ça dans un empilement de couches fragiles, qui tient tant que les serveurs d'Anthropic, Microsoft et Google tournent et que personne ne change le nom d'une variable globale dans un fichier que trois agents différents indexent indépendamment. La tour de Babel version IA. Mais les *dashboards* disent que tout va bien, alors on va les croire, non ? On sait comment ça a fini : mal.

Ce matin, le *pipeline* de compilation est cassé parce qu'Anthropic avait un incident à 3 heures du matin. Toute la CI bloquée. *Stand-up* réunion à 9 heures, personne ne comprenait pourquoi les *builds* étaient rouges. Incident ouvert depuis 4 h 47. Notre quota de *tokens* n'était pourtant pas atteint… J'ai vérifié la page Anthropic en trente secondes. Personne n'avait eu l'idée. Une boîte de cent cinquante personnes, dépendante des *SLA* semi-moisis d'une boîte californienne dont on n'est même pas client entreprise. On utilise la version gratuite de leurs interfaces de programmation (API) avec un plafond de *tokens* qu'on dépasse en milieu de mois. Le CTO appelle ça « optimiser les coûts ». Moi j'appelle ça « construire sur du sable ». Mais ça plaît beaucoup aux membres du conseil d'administration, alors on applique.

La semaine dernière un junior a posé une question à propos du comportement bizarre de SQLAlchemy ; ça sentait la session qui se ferme trop vite ou mal. Mon *tech lead* l'a interrompu en plein milieu : « T'as demandé à Claude avant ? » Le junior a ouvert une fenêtre de *chat*, a copié-collé son message et cinq minutes plus tard Claude lui a donné trois pistes dont deux fausses et une qui marchait par accident. Il a implémenté la troisième, sans trop

les mots du dév

Branche *main* : branche principale, état de référence du code. Ce qui part en production.

***Builds* :** résultat de la CI. Le programme compilé et testé. « Les *builds* sont rouges » = quelque chose est cassé.

CI/Chaîne d'intégration continue : système automatisé qui compile, teste et vérifie le code à chaque modification. Si ça passe, c'est vert. Si ça casse, c'est rouge.

Cursor : éditeur de code (*fork* de VS Code) avec intégration IA native, *vibe coding.* Permet de générer du code directement dans l'éditeur *via* un *chat* ou des raccourcis.

ETL : *Extract-transform-load. Pipeline* qui extrait des données d'une source, les transforme, puis les charge ailleurs.

***Harness* :** ensemble de règles et conventions données à un agent pour encadrer son comportement. Pratique de gestion d'agents IA à la mode.

MCP : *Model context protocol.* Standard qui permet à un agent IA d'appeler des outils externes (chercher dans une doc, faire une recherche web, interroger une base de données).

***Merger* :** fusionner une branche avec une autre. Intégrer le travail terminé.

***Product manager* (PM) :** responsable produit. Définit les fonctionnalités, hiérarchise le *backlog*, fait le lien entre le métier et l'équipe technique. N'est pas censé coder.

***Pull Request* (PR) :** demande de fusion de code. Un dév termine son travail sur une branche, ouvre une PR pour que ses collègues relisent avant d'intégrer dans la branche principale.

***Repository/repo* :** espace de stockage versionné du code source. En pratique, un projet sur GitHub, GitLab, etc.

***Skills* :** fichiers de connaissance semi-structurés fournis à un agent IA pour lui donner du contexte métier ou technique persistant.

SLA : *Service level agreement.* Engagement contractuel de disponibilité d'un service. Par exemple « 99,9 % d'*uptime* ».

***Specs*/spécifications :** document qui décrit ce qu'un développement doit faire, avant de le faire. Peut être fonctionnel (comportement attendu) ou technique (comment c'est construit).

TT : télétravail.

***Vibe coding* :** produire du code en le faisant écrire par des outils de génération IA.

comprendre. J'aurais pu lui répondre en quarante secondes, et lui expliquer pourquoi. Là, le code est « tombé en marche » et le junior n'a rien appris. Les communicants de StationF [une pépinière de start-up] appellent ça la « capitalisation des savoirs ». J'ai vingt ans d'expérience, et je sais voir la fragilité quand je la vois. C'est flagrant.

Les nouveaux n'ont pas de *full* TT. Les anciens l'ont gardé, sinon on démissionnait, mais je ne suis plus sûr que ce soit encore un avantage. On ne se parle plus vraiment. La communication d'équipe s'est restructurée autour d'un machin qui ne se souvient de rien d'une session à l'autre. Les décisions d'archi se prennent dans des fils de *chat* avec un modèle IA sous ecstasy. La semaine d'avant, on avait trois agents qui se contredisaient sur ce que la *spec* disait. Un pour les PR, un pour la doc, un pour les tickets de suivi. Aucun ne lisait le même état du *repo*. Le dév qui avait mis ça en place était fier. Il appelait ça du *harness engineering*. Je ne sais même plus ce que ça veut dire, je croyais qu'il fallait utiliser OpenClaw, du MCP et des *skills*.

Ah! Les *skills*. Que du bonheur. Ici, on en a cinq pour avaler du tableur et des csv, et trois pour ne pas écrire de requêtes SQL. La base de la base de l'ETL, pourtant. Je n'en peux plus. Plus personne n'apprend rien, personne ne progresse et je passe ma vie à débugger leurs… créations. La dette technique prospère, la dette cognitive enfle.

Il y a douze mois je faisais de l'architecture. Je participais à des décisions techniques. J'étais dans la conception. Maintenant je fais de la relecture de code que personne n'a écrit, dans des environnements que personne ne veut comprendre : Python 3.9, 3.11 et 3.13, pyenv ici, uv là, un venv qui traîne depuis deux ans, trois *containers* Docker régénérés toutes les nuits car personne ne veut s'attaquer à la conf, et des *specs* un peu partout qui ont été transformées en tickets par un agent et en code par un autre. On a automatisé la partie intéressante et gardé la partie pénible.

Je suis fatiguée. Pas du boulot, mais de ce que le boulot est devenu. Si je suis là encore en septembre, je remplace deux gars. Un dév sénior sur Reddit disait que l'IA amplifie ce qui est déjà là, les bonnes pratiques comme les mauvaises. Chez nous, elle a surtout amplifié le désordre. On a donné des outils pour pousser du code à des gens qui n'ont pas appris à en écrire. Je ne sais pas comment on va faire. Le web va-t-il tenir ? ■

L'AUTEUR

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

Les mondes extraterrestres, des paysages offerts à tous

Charlotte Bigg

La topographie de Titan, première lune extraterrestre à accueillir une sonde à sa surface, a été révélée au plus grand nombre par des amateurs d'imagerie spatiale.

Le 14 janvier 2005 à 17 h 19, les premières données provenant de l'objet le plus lointain qu'une sonde ait jamais examiné d'aussi près, Titan, la lune de Saturne, parvenaient au Centre européen des opérations spatiales (Esoc), à Darmstadt, en Allemagne. Au terme d'un périple de sept ans et de 3,5 milliards de kilomètres à travers le système solaire, le vaisseau mère *Cassini* avait éjecté *Huygens*, une sonde de 2,7 mètres de diamètre remplie de 318 kilogrammes d'instruments et surmontée d'un parachute. Pendant trois heures et cinquante-huit minutes, durant sa traversée de l'atmosphère de Titan et son atterrissage, *Huygens* avait transmis 474 mégaoctets. Les scientifiques étaient particulièrement curieux des vues de sa surface, normalement dissimulée par une atmosphère très poussiéreuse, rendant impossible l'observation télescopique.

Suivant l'exemple de la Nasa avec sa mission de 2004 vers Mars, *Pathfinder*, l'Agence spatiale européenne (ESA) a annoncé son intention de mettre pour la première fois à disposition sur son site web les données visuelles brutes fournies par *Huygens*. Moins de huit heures après la mise en ligne de ces données, avant même que l'ESA ne publie ses propres résultats, un réseau global d'amateurs d'imagerie spatiale affichait en ligne des topographies de Titan, en couleurs et en trois dimensions. Il faut dire que Titan occupe une place à part dans l'imagination collective, tant cette lune a inspiré les auteurs de science-fiction, de Kurt Vonnegut à Philip K. Dick.

Les compositions enthousiastes produites par ces amateurs d'imagerie planétaire ont entraîné une complicité et ont renforcé l'adhésion du public aux programmes spatiaux. Les responsables de la mission *Cassini-Huygens* ont admis pour leur part avoir été impressionnés par les qualités esthétiques de ces compositions, au point que l'ESA a alors cherché à recruter certains de leurs auteurs. ■

Paysage de Titan réalisé par Mike Zawistowski, amateur d'imagerie planétaire, alors réparateur informatique travaillant à son compte, à partir de données fournies par *Huygens* et à l'aide du logiciel Terragen (couleurs ajoutées).

L'AUTRICE

Charlotte Bigg
directrice de recherche au centre Alexandre-Koyré, autrice notamment de *Voir sans limites. Sciences, techniques et esthétiques des origines* avec Elsa De Smet et Kurt Vanhoutte (Mimesis, 2025)

© Mike Zawistowski

>>> 14 janvier 2005

Ces photographies ont été prises par la sonde *Huygens* lors de sa descente jusqu'à la surface de Titan, la plus grande lune de Saturne.

© ESA/Nasa/JPL/Université de l'Arizona

Un seul être vous manque, et tout est renversé !

Jean-Paul Delahaye

L'élimination d'un seul concurrent dans un tournoi sportif ou une élection peut bouleverser totalement les résultats… même si le concurrent éliminé est le dernier du classement initial !

De nombreux paradoxes sont connus dans le domaine des procédures de votes, et plus généralement des systèmes de classement. Celui que Nicolas de Condorcet a énoncé en 1785 est sans doute le plus célèbre. Certains théorèmes, comme le théorème d'impossibilité démontré par Kenneth Arrow au XXe siècle, contraignent celles et ceux qui cherchent à établir de bonnes procédures de vote à renoncer à certaines attentes, qui semblent pourtant naturelles mais se révèlent incompatibles (*voir l'encadré 1*).

Guillaume Chèze et Étienne Fieux, de l'institut de mathématiques de Toulouse, viennent d'obtenir un nouveau résultat déconcertant au sujet des méthodes de classement et des systèmes de votes. Leurs travaux s'inscrivent dans la continuité de recherches menées par Peter Fishburn en 1981. Ils y décrivent des situations dans lesquelles le retrait du plus mauvais candidat d'une compétition inverse totalement le classement final des candidats qui restent. Ce paradoxe de l'inversion survient bien plus fréquemment qu'on ne l'imaginait, notamment dans des systèmes classiques qu'on croyait robustes. Nous verrons en particulier qu'il est inévitable dès qu'un système vérifie trois conditions pourtant souhaitables et naturelles.

L'AUTEUR

Jean-Paul Delahaye
professeur émérite à l'université de Lille
et chercheur au laboratoire Cristal
(Centre de recherche en informatique,
signal et automatique de Lille)

Paradoxe de l'inversion

Imaginons dans un premier temps un tournoi de football dans lequel trois équipes *A*, *B* et *C* sont en compétition. Chacune rencontre les deux autres, et l'on suppose que cela produit les résultats suivants :

– Quand l'équipe *A* rencontre l'équipe *B*, l'équipe *A* marque 1 but, et l'équipe *B* en marque 2.

– Quand l'équipe *A* rencontre l'équipe *C*, l'équipe *A* marque 3 buts et l'équipe *C* n'en marque aucun.

- Quand l'équipe *B* rencontre l'équipe *C*, l'équipe *B* marque 1 but et l'équipe *C* en marque 2.

On peut synthétiser ces informations dans un tableau où l'on inscrit sur la ligne d'une équipe les buts qu'elle a marqués lors de ses rencontres avec les autres équipes.

Équipe \ Équipe rencontrée	A	B	C	Total
A		1	3	4
B	2		1	3
C	0	2		2

Le total des points d'une équipe est donné par le nombre total de buts marqués lors des rencontres. Ici, l'équipe *A* gagne donc 4 points, l'équipe *B* gagne 3 points et l'équipe *C* gagne 2 points. Le classement résultant indique donc que l'équipe *A* est devant l'équipe *B*, qui elle-même est devant l'équipe *C*, ce qu'on note : $A > B > C$.

Supposons que l'équipe C (la dernière du classement) se fasse éliminer à la suite de la découverte d'une tricherie. La nouvelle matrice de la compétition, avec seulement les équipes A et B, s'en trouve modifiée.

Équipe rencontrée / Équipe	A	B	Total
A		1	1
B	2		2

À présent, l'équipe A totalise donc 1 point et l'équipe B, 2 points : le classement devient $B > A$! L'élimination de l'équipe classée dernière a provoqué une inversion du classement pour les équipes restantes. C'est le paradoxe de l'inversion.

On peut assez facilement créer des exemples similaires avec n équipes (*voir l'encadré 2*).

Méthode Borda

Un autre exemple moins évident se produit avec la méthode de vote dite « méthode Borda », en hommage à Jean-Charles de Borda qui l'a formalisée et étudiée en 1770. Elle est utilisée aujourd'hui pour attribuer des prix sportifs aux États-Unis et pour le concours de l'Eurovision.

Avec cette méthode de vote, chaque électeur classe les concurrents (ou seulement certains concurrents) selon son ordre de préférence. Prenons l'exemple dans lequel n concurrents E_1, E_2, ..., E_n s'opposent, et où un électeur fait le classement $E_1 > E_2 > ... > E_n$. Cela attribue n points à E_1, $(n-1)$ points à E_2, $(n-2)$ points à E_3, etc. D'autres systèmes de points sont parfois utilisés, mais toujours avec l'idée d'attribuer des points de manière décroissante aux candidats en fonction de leur place dans le classement. Pour effectuer le classement final, on considère, pour chaque candidat, la somme des points obtenus dans l'ensemble des votes.

L'intérêt de cette méthode de vote est que chaque électeur peut exprimer finement ses préférences, contrairement à ce qu'il se passe quand on est contraint de choisir un seul candidat. Cela a par exemple pour conséquence que si le candidat qu'on préfère est globalement mal classé par les autres électeurs, celui qu'on propose en deuxième position est quand même favorisé par le choix que l'on exprime : notre vote n'est pas « perdu ».

Malheureusement, avec cette méthode d'élection, on peut dans certaines situations observer le paradoxe de l'inversion. Prenons l'exemple où trois candidats A_1, A_2 et A_3 sont en lice, et où il y a 7 électeurs qui produisent :

– 2 votes pour $A_3 > A_2 > A_1$;
– 2 votes pour $A_2 > A_1 > A_3$;
– 2 votes pour $A_1 > A_3 > A_2$;
– 1 vote pour $A_1 > A_2 > A_3$.

1. Déroutants systèmes de vote

Dans un livre publié en 1951, l'économiste Kenneth Arrow démontre qu'il est impossible de définir un système de vote parfaitement satisfaisant. Plus précisément, il démontre l'impossibilité de concevoir un système de vote dans lequel les électeurs classent les candidats deux à deux et qui soit à la fois universel (la méthode fonctionne quelles que soient les réponses des électeurs), non dictatorial (la méthode ne permet à aucun électeur d'imposer ses choix aux autres), conforme (lorsque tous les électeurs classent deux candidats dans le même ordre, alors le classement final restitue ce classement entre les deux candidats) et indépendant aux options non pertinentes (le classement final entre deux candidats ne dépend que des préférences exprimées par les électeurs entre ces deux candidats, et non des classements des autres candidats).

Avant cela, en 1785, Nicolas de Condorcet avait déjà énoncé un paradoxe concernant les systèmes de vote où les électeurs classent les candidats en lice.

Imaginons par exemple que, dans une élection soumettant trois candidats A, B, et C au vote de 60 électeurs, il y ait :

– 23 électeurs qui les classent $A > B > C$;
– 17 électeurs qui les classent $B > C > A$;
– 2 électeurs qui les classent $B > A > C$;
– 10 électeurs qui les classent $C > A > B$;
- 8 électeurs qui les classent $C > B > A$.

On en déduit que 33 électeurs préfèrent A à B, alors que 27 préfèrent B à A : dans l'ensemble, les électeurs préfèrent donc A à B. De même, 42 électeurs préfèrent B à C alors que seulement 18 préfèrent C à B : dans l'ensemble, les électeurs préfèrent B à C. Enfin, 35 électeurs préfèrent C à A, alors que seulement 25 préfèrent A à C : dans l'ensemble, les électeurs préfèrent C à A. Globalement on arrive donc à une sorte d'absurdité : A > B > C > A. C'est le paradoxe de Condorcet.

Pour le résoudre, Nicolas de Condorcet propose de considérer les écarts dans les classements et d'éliminer le vainqueur le moins net. Dans cet exemple, A ne gagne que par 6 électeurs contre B : c'est la victoire la moins nette de l'ensemble du classement. Une fois A éliminé, on a $B > C$, ce qui conduit à déclarer B vainqueur. Cette solution ne semble que moyennement satisfaisante, d'autant plus qu'ici un scrutin majoritaire à un tour aurait donné A gagnant avec 23 voix, alors que B n'en obtiendrait que 19 et que C serait choisi par 18 électeurs.

Supprimer le moins bon des concurrents peut perturber totalement le classement des autres, au point de le renverser. Mais tous les systèmes de classement ne sont pas sujets à ce paradoxe.

Avec la méthode Borda, A_1 obtient $2\times1+2\times2+2\times3+3=15$ points; A_2 obtient $2\times2+2\times3+2\times1+2=14$ points et A_3 obtient $2\times3+2\times1+2\times2+1 = 13$ points. On a donc $A_1 > A_2 > A_3$.

Si l'on retire A_3 du classement, on se retrouve avec:

– 2 votes pour $A_2 > A_1$;
– 2 votes pour $A_2 > A_1$;
– 2 votes pour $A_1 > A_2$;
– 1 vote pour $A_1 > A_2$.

Ainsi, A_1 obtient $2+2+4+2=10$ points et A_2 obtient $4+4+2+1=11$ points: on a maintenant $A_2 > A_1$. Le classement d'origine entre A_1 et A_2 est bien inversé.

Cet exemple se généralise au cas où n candidats $A_1, ..., A_n$ sont en lice, qu'il y a $(2n+1)$ électeurs et que les votes exprimés sont les suivants:

– 2 votes pour $A_n > A_{n-1} > ... > A_3 > A_2 > A_1$;
– 2 votes pour $A_{n-1} > A_{n-2} > ... > A_2 > A_1 > A_n$;
– 2 votes pour $A_{n-2} > A_{n-3} > ... > A_1 > A_n > A_{n-1}$;
– ...;
– 2 votes pour $A_1 > A_n > A_{n-1} > ... > A_3 > A_2$;
– 1 vote pour $A_1 > A_2 > A_3 > ... > A_{n-1} > A_n$.

On peut remarquer que la ligne 2 est obtenue par permutation circulaire de la ligne 1; de même que la ligne 3 est obtenue par permutation circulaire de la ligne 2, etc. La ligne $n+1$ est particulière et exprime un choix inverse à celui de la première ligne.

Si l'on ne prend en compte que les n premières lignes, chaque candidat ou option est une fois en position 1, une fois position 2, ..., une fois en position n. Les points attribués aux candidats par ces n premières lignes sont donc les mêmes pour tous les candidats: $2\times(n+(n-1)+(n-2)+...+2+1) = n\times(n+1)$. Il en résulte que le classement général donné par la méthode Borda provient de la dernière ligne, qui donne finalement: $A_1 > A_2 > ... > A_{n-1} > A_n$.

Or, si l'on élimine le dernier candidat de ce classement, A_n, alors les lignes 2 à n donnent une situation analogue à ce qui se passait juste avant pour $A_1, ..., A_{n-1}$: il y a les $(n-1)$ permutations circulaires de l'ordre $A_1 > A_2 > ... > A_{n-1}$, donc les candidats $A_1, ..., A_{n-1}$ reçoivent chacun le même nombre de points du fait de ces votes. Ce sont par conséquent les lignes 1 et $(n+1)$ qui départagent les candidats, ce qui donne finalement: $A_{n-1} > A_{n-2} > ... > A_2 > A_1$. Il y a bien inversion complète du classement précédent.

Notons que nous avons détaillé les calculs avec la convention consistant à attribuer n points au candidat classé premier, $(n-1)$ points au deuxième, etc. mais que le raisonnement reste valable pour tout système d'attribution de points décroissant.

Paradoxe impossible

Ces deux systèmes de classement pour lesquels le paradoxe de l'inversion est possible montrent que, même quand on ne s'y attend pas, supprimer le moins bon des concurrents peut perturber totalement le classement des autres, au point de le renverser. Mais tous les systèmes de classement ne sont pas sujets à ce paradoxe.

Le plus simple des systèmes de classement pour lesquels ce paradoxe est impossible est celui dans lequel chaque électeur ne choisit qu'un seul candidat, et où chaque candidat reçoit le nombre de points égal à la totalité des votes qu'il a cumulés. C'est le cas en France dans de nombreuses élections, dont l'élection présidentielle. Aucune inversion ne peut survenir par suite de l'élimination d'un candidat après le vote car chacun des candidats restants conserve le même nombre de voix, ce qui maintient le classement initial entre eux.

Un autre système, plutôt destiné aux tournois sportifs, ne peut jamais donner lieu au paradoxe de l'inversion. On considère de nouveau que chaque équipe rencontre toutes les autres. Cependant, on

ne compte pas le nombre total de points gagnés par chaque équipe, mais seulement le nombre de victoires remportées. On traduit cela en attribuant, par exemple, 2 points au gagnant de chaque rencontre, 1 point à chaque équipe en cas de match nul, et aucun point à l'équipe perdante. Ce système «2-1-0» était utilisé autrefois au football en France, il a maintenant été remplacé par le système «3-1-0».

Dans le système «2-1-0», si une équipe est éliminée du tournoi après les rencontres, les équipes restantes se répartissent en trois groupes:

– Les équipes qui perdaient contre l'équipe supprimée. Leur score final reste donc identique après l'élimination.

– Les équipes qui faisaient match nul contre l'équipe supprimée. Leur score final est diminué de 1 point après l'élimination.

- Les équipes qui gagnaient contre l'équipe supprimée. Leur score final est diminué de 2 points après l'élimination.

Au sein de chacun de ces trois groupes, le classement entre équipes reste strictement le même. Si le tournoi comporte n équipes, avec n un entier supérieur ou égal à 5, alors après élimination d'une équipe il reste au moins 4 équipes. Par conséquent, l'un des trois groupes comporte au moins deux équipes (c'est ce qu'on appelle le «principe des tiroirs»), dont l'ordre dans le classement ne peut donc pas être inversé. Une inversion complète est par conséquent impossible. Plus généralement, le même raisonnement montre que si le score d'une équipe ne peut prendre que k valeurs différentes, avec k un entier, alors dès que la compétition comporte plus de $k+2$ équipes, l'inversion complète du classement à la suite de l'élimination d'une équipe est impossible.

Un troisième exemple de classement qui ne peut donner lieu au paradoxe de l'inversion est celui utilisé en patinage artistique: les juges évaluent la performance de chaque patineur en lui attribuant une note qui ne dépend pas de la performance des autres concurrents. Ainsi, même si un patineur est éliminé, la note des autres concurrents ne change pas, et leur classement relatif non plus: le paradoxe de l'inversion est donc impossible.

Plus généralement, dans le cas d'un classement sur la base de notes individuelles, il n'y aura jamais de paradoxe de l'inversion. Le vote par approbation est de ce type: les électeurs placent un ou plusieurs noms dans une enveloppe, qu'ils déposent dans l'urne. Les noms des candidats placés dans l'enveloppe correspondent aux candidats soutenus par l'électeur. On compte ensuite le nombre total de soutiens obtenu par chaque candidat. Il n'y a pas d'inversion possible car ce vote revient à faire un vote par note où les candidats reçoivent la note 0 (pas de soutien) ou la note 1 (soutien).

Paradoxe inévitable

Le résultat publié en 2026 par les deux chercheurs de l'institut de mathématiques de Toulouse indique une condition suffisante pour que le paradoxe de l'inversion se produise. Plus précisément, il indique qu'une «méthode naturelle de classement» ne peut pas à la fois:

(a) Satisfaire la «propriété de long tournoi»;

(b) Satisfaire la «réductibilité par tournoi de Condorcet»;

(c) Rendre impossible le paradoxe de l'inversion.

Autrement dit, si une méthode de classement naturelle satisfait (a) et (b), alors le paradoxe de l'inversion est possible.

2. Paradoxe de l'inversion

Un tournoi oppose n équipes (avec $n \geq 3$ un entier) appelées $E_1, \ldots, E_n$, qui s'affrontent deux à deux. À chaque rencontre, chaque équipe marque un certain nombre de points (correspondant par exemple au nombre de buts marqués, dans un tournoi de football). On compile les résultats dans un tableau: la case située à la j-ième colonne de la ligne i indique combien l'équipe i a marqué de points quand elle a rencontré l'équipe j. Pour chaque équipe, le score total est obtenu en additionnant tous les points gagnés lors des diverses rencontres. Cela permet d'établir le classement final.

Avec cette méthode de classement, il est possible que l'élimination de l'équipe la moins bien classée conduise à un nouveau classement pour les équipes restantes qui soit exactement l'inverse du premier. C'est le cas lorsque les rencontres produisent le tableau ci-dessous.

		Équipe rencontrée									
		E_1	E_2	E_3	E_4	...	E_{n-2}	E_{n-1}	E_n	S	S'
Équipe	E_1	X	0	0	0	...	0	0	$2n-2$	$2n-2$	0
	E_2	1	X	0	0	...	0	0	$2n-4$	$2n-3$	1
	E_3	2	0	X	0	...	0	0	$2n-6$	$2n-4$	2
	E_4	3	0	0	X	...	0	0	$2n-8$	$2n-5$	3
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	E_{n-2}	n-3	0	0	0	...	X	0	4	$n+1$	$n-3$
	E_{n-1}	n-2	0	0	0	...	0	X	2	n	$n-2$
	E_n	n-1	0	0	0	...	0	0	X	$n-1$	X

Quand les n équipes sont prises en compte, le score total (indiqué dans la colonne S) donne le classement $E_1 > E_2 > E_3 > \ldots > E_{n-1} > E_n$. Si l'équipe E_n, la dernière de ce premier classement, est retirée, alors les nouveaux scores (indiqués dans la colonne S') deviennent $E_{n-1} > E_{n-2} > \ldots > E_2 > E_1$: l'ordre des équipes restantes est inversé !

Pour comprendre la signification et la portée de ce théorème, il faut en passer par une série de définitions un peu techniques, mais qui toutes reposent sur des idées intéressantes et naturelles.

Un tournoi est un ensemble de rencontres entre équipes. Une rencontre entre deux équipes A et B au cours de laquelle les équipes ont obtenu respectivement a points et b points est notée $[A, B, a, b]$. Une méthode de classement est une fonction qui associe à tout tournoi un classement des équipes (avec éventuellement des *ex aequo*).

Un tournoi entre n équipes $A_1, A_2, ..., A_n$ est dit «parfait relativement à l'ordre $A_1 > A_2 > ... > A_n$» si chaque équipe a rencontré une fois exactement chacune des autres équipes, et si la rencontre entre A_i et A_j est $[A_i, A_j, 1, 0]$ si et seulement si $i < j$ – autrement dit A_i gagne 1 point et A_j 0 point si et seulement si $i < j$. Un tournoi est dit «parfait» s'il existe un ordre O pour lequel le tournoi est parfait relativement à O. En moins formel (et très simplifié): un tournoi est parfait si l'on peut parfaitement ordonner les équipes entre elles.

Cela permet de définir la notion de «méthode de classement naturelle»: c'est une méthode qui, lorsqu'on l'applique à un tournoi parfait, donne le classement attendu (avec les notations du paragraphe précédent, ce classement serait $A_1 > A_2 > ... > A_n$). L'idée de cette définition est simple: quand les rencontres d'un tournoi montrent sans la moindre exception un classement clair entre équipes, alors une méthode naturelle de classement retranscrit cette hiérarchie.

La «propriété de long tournoi», évoquée dans le théorème, procède elle aussi d'une idée intuitive. On considère deux tournois parfaits T_1 et T_2, ne conduisant pas nécessairement au même ordre mais où la méthode de classement donne un ordre sans *ex aequo* pour T_2. En prenant les scores des rencontres de T_1 et k fois chacune des rencontres de T_2, avec k un entier, on obtient un tournoi noté T_1+kT_2. La propriété de long tournoi assure que dans une telle situation, l'ordre produit par la méthode de classement pour T_1+kT_2 est le même que celui pour T_2 à partir d'une certaine valeur de l'entier k. L'idée est que, lorsqu'une méthode de classement possède la propriété de long tournoi, alors l'ordre pour T_2 finit par s'imposer quand un tournoi se compose de manière suffisamment répétée des rencontres de T_2.

Enfin, un «tournoi de Condorcet» est simplement un tournoi composé de tournois parfaits et reproduisant la configuration utilisée plus haut dans le cas de la méthode de Borda: on opère une permutation circulaire sur un classement particulier, et

3. Inversion complète pour PageRank

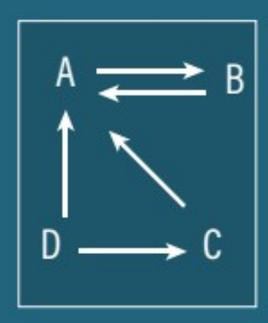
La méthode PageRank permet de noter les pages d'un réseau de type internet en prenant en compte les liens que chaque page contient vers d'autres pages. C'est une évaluation de la «popularité» de chaque page, qui est essentielle aux moteurs de recherche pour classer leurs résultats. On peut l'expliquer avec l'idée d'un surfeur aléatoire se déplaçant de page en page en suivant des liens, ou, de manière équivalente, on peut le représenter sous la forme d'un système d'équations à résoudre. Le PageRank $pr(p)$ d'une page p vérifie l'équation:

$$pr(p) = e / k + (1 - e) \times [n_1\, pr(p_1) / nl(p_1) + n_2\, pr(p_2) / nl(p_2) + ... + n_m\, pr(p_m) / nl(p_m)],$$

où k désigne le nombre total de pages; où $p_1, ..., p_m$ sont les pages qui mentionnent p et pour tout i compris entre 1 et m la page p_i mentionne n_i fois la page p; où e est le «coefficient d'échappement» (15 %, en général) qui correspond à la probabilité à chaque étape que le surfeur aléatoire reparte vers une page aléatoire du réseau; et où $nl(p_i)$ est le nombre de liens de la page p_i vers d'autres pages.

Pour un réseau comportant quatre pages A, B, C et D avec quelques liens, représenté sur le graphe ci-contre, les équations du réseau sont:

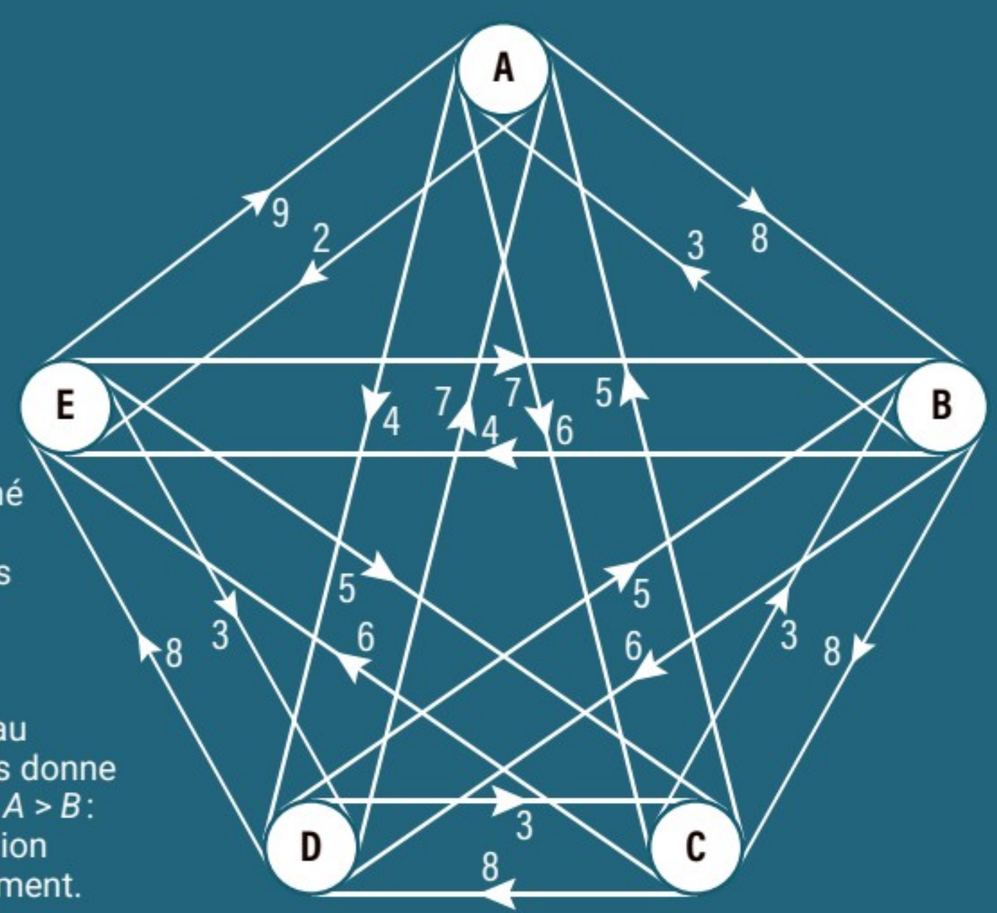
$pr(A) = 0{,}15 / 4 + 0{,}85 \times [pr(B) + pr(C) + pr(D) / 2]$
$pr(B) = 0{,}15 / 4 + 0{,}85 \times pr(A)$
$pr(C) = 0{,}15 / 4 + 0{,}85 \times pr(D) / 2$
$pr(D) = 0{,}15 / 4$



La solution du système donne $pr(A) = 0{,}4711$, $pr(B) = 0{,}4379$, $pr(C) = 0{,}0534$ et $pr(D) = 0{,}0375$, ce qui signifie qu'un surfeur aléatoire passera 47,11 % de son temps sur la page A, 43,77 % de son temps sur la page B, 5,34 % de son temps sur la page C et 3,75 % de son temps sur la page D. Ces pourcentages mesurent la notoriété des pages: la page A, citée par les trois autres pages, est la plus populaire. La page B, bien que citée une seule fois, est assez populaire, car elle est citée par la page A qui est elle-même beaucoup citée. En revanche, la page D ne l'est pas du tout et la page C ne l'est pas beaucoup car seule la page D, peu populaire, la mentionne.

Les chercheurs Guillaume Chèze et Étienne Fieux ont réussi à montrer qu'avec ce système de classement, pourtant considéré comme fin et robuste, le paradoxe de l'inversion pouvait advenir. Ils fournissent l'exemple d'un réseau représenté par le tableau ci-contre et le graphe ci-dessous.

	A	B	C	D	E
A	0	3	5	7	9
B	8	0	3	5	7
C	6	8	0	3	5
D	4	6	8	0	3
E	2	4	6	8	0



Le classement donné par la résolution du système d'équations associé est: $B > A > C > D > E$. Si l'on retire la page E du réseau, le nouveau système d'équations donne en revanche $D > C > A > B$: on a bien une inversion complète du classement.

l'on recommence. Dans un tournoi de Condorcet, aucune équipe n'est meilleure que les autres: elles se valent toutes car il y a une symétrie parfaite entre elles. Cette notion permet de définir la propriété de «réductibilité par tournoi de Condorcet». Une méthode de classement est dite réductible par tournoi de Condorcet si et seulement si pour tout tournoi parfait T, pour tout tournoi de Condorcet C et pour tout entier $k > 0$, le classement produit par la méthode pour $T+kC$ est le même que celui produit pour T. Autrement dit, ajouter un tournoi de Condorcet une ou plusieurs fois à un tournoi parfait ne perturbe pas le résultat général, car les tournois de Condorcet sont, en quelque sorte, neutres.

Notons que la méthode Borda, évoquée plus haut, est une méthode naturelle de classement qui satisfait la propriété de long tournoi et la réductibilité par tournoi de Condorcet. Il est donc cohérent qu'on ait pu exhiber des exemples donnant lieu au paradoxe de l'inversion avec cette méthode.

La démonstration du théorème n'est pas très compliquée: elle utilise une méthode proche de celle que nous avons détaillée dans le cas où n candidats sont classés avec la méthode Borda.

Implications concrètes

Ce théorème assure que plusieurs systèmes classiques sont sujets au paradoxe de l'inversion. C'est le cas, par exemple, des méthodes de classement de Kenneth Massey et de Wesley Colley, toutes deux utilisées dans le domaine sportif. Un autre exemple important de système de classement victime du paradoxe de l'inversion est la méthode «PageRank», aussi appelée «classement de Markov». Dans les premières versions du moteur de recherche de Google, c'est elle qui déterminait l'ordre dans lequel s'affichaient les pages en réponse à une requête.

L'idée est de considérer le graphe des liens entre les pages du réseau internet (ou de la partie du réseau qu'on veut prendre en compte). Chaque page est représentée par un nœud, et un lien d'une page A vers une page B est représenté par un arc orienté du nœud A vers le nœud B. On imagine alors un «surfeur aléatoire» posé au hasard uniformément sur l'une des pages du réseau, qui passe d'une page à une autre en choisissant au hasard uniformément parmi les liens de la page sur laquelle il est situé (ou qui, avec une faible probabilité, s'échappe de ce schéma pour se rendre uniformément au hasard sur l'une des pages du réseau). Il recommence indéfiniment, voyageant à toute vitesse. Quand le surfeur tombe sur une page sans lien, il se rend au hasard et uniformément sur une page quelconque du réseau. Au cours de son voyage, un tel surfeur se retrouve avec une forte probabilité sur les pages les plus citées, *a fortiori* si les pages qui les citent sont elles-mêmes abondamment citées par des pages elles aussi très citées, etc. C'est cette probabilité de présence sur une page qui détermine le classement de ladite page. Des méthodes efficaces de calcul sont connues pour calculer ce PageRank (*voir l'encadré 3*) qu'on peut voir comme mesure de popularité des pages d'un réseau.

Le théorème de Guillaume Chèze et Étienne Fieux n'assure pas directement que la méthode PageRank est sujette au paradoxe de l'inversion, car cette méthode ne vérifie pas la propriété de réductibilité par tournoi de Condorcet. Mais les deux chercheurs ont réussi à concevoir des exemples où le paradoxe se produit (*voir l'encadré 3*). Bien sûr, ces exemples sont très artificiels, mais ils établissent qu'il est possible que le retrait d'une page du web perturbe gravement le classement des autres pages dans certains moteurs de recherche.

Le paradoxe de l'inversion n'est donc pas seulement une curiosité improbable. D'ailleurs, lors du championnat du monde de biathlon féminin de la saison 2014-2015, une méthode à points (de type Borda) a été utilisée... et l'élimination pour dopage d'une athlète qui n'était pas sur le podium a modifié le classement final! En particulier, les deux premières compétitrices ont vu leur classement permuté.

La beauté théorique des cas généraux mentionnés dans cet article est certes le produit d'un jeu mathématique, mais elle explique aussi pourquoi, en pratique, de déconcertants et désolants changements de classement peuvent surgir à la suite d'éliminations de candidats, pour certaines méthodes de classement. ■

SUR LE WEB

Le paradoxe de Condorcet, sur le blog «Science étonnante» de David Louapre:

https://sciencetonnante.wordpress.com/2012/04/23/le-paradoxe-de-condorcet.

BIBLIOGRAPHIE

G. Chèze et E. Fieux, The inversion paradox and ranking methods in tournaments, *The American Mathematical Monthly*, 2026.

G. Chèze, *Histoire de partages et de mathématiques*, Ellipses, 2025.

J. B. Aubin et A. Rolland, *Comment être élu à tous les coups?*, EDP Sciences, 2022.

W. Gehrlein et D. Lepelley, *Voting Paradoxes and Group Coherence: The Condorcet Efficiency of Voting Rules*, Springer, 2011.

M. Balinski et R. Laraki, *Majority Judgment: Measuring, Ranking, and Electing*, MIT press, 2011.

P. Fishburn, Inverted orders for monotone scoring rules, *Discrete Applied Mathematics*, 1981.

J. C. de Borda, Mémoire sur les élections au scrutin, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1781.

Le fabuleux voyage de l'oiseau sans pattes

Loïc Mangin

En Europe, on a longtemps cru que les oiseaux de paradis n'avaient pas de pattes. Ce qui ne les a pas empêchés de faire le tour du monde… Un voyage auquel le musée du quai Branly consacre une exposition.

Le 10 août 1519, une flotte de cinq navires quitte le port de Séville pour ce qui sera le premier voyage autour du monde. À sa tête, Fernand de Magellan, qui ne rentrera pas : il meurt le 27 avril 1521, après une bataille contre la population de l'île de Mactan, aujourd'hui aux Philippines. De l'armada initiale, seule *La Victoria* parvient à retourner à son point de départ le 6 septembre 1522. À son bord, des épices et un cadeau destiné au roi d'Espagne Charles Quint par le sultan de Bacan (les actuelles îles Moluques) : deux dépouilles emplumées nommées *manucodiata*, du malais *manuk dewata*, signifiant « oiseaux des dieux ». Ce sont bien des oiseaux qui, dans leur région d'origine, sont décrits comme surnaturels, protecteurs des puissants au combat ou encore résidant au « paradis ». Et ce sont ceux que l'on connaît aujourd'hui sous le nom d'oiseaux de paradis, ou paradisiers.

De quoi parle-t-on ? D'une famille de passereaux, les *Paradisaeidae*, qui regroupe 45 espèces dont la plupart sont endémiques de la Nouvelle-Guinée, quelques-unes peuplant les îles voisines d'Indonésie (Aru, Yapen, Raja Ampat…) ou bien la forêt tropicale de l'est de l'Australie.

Et la fascination qu'ils suscitent doit beaucoup à leur beauté, au point que le biologiste Alfred Russel Wallace put dire en 1869 : « L'oiseau de paradis mérite véritablement son nom, et doit être compté parmi les plus beaux et les plus merveilleux des êtres vivants. » De fait, leur plumage haut en couleur est des plus exubérants, et va de pair avec les parades nuptiales particulièrement complexes et spectaculaires de certaines espèces.

> En Nouvelle-Guinée, les paradisiers sont les intercesseurs entre les humains et leurs ancêtres

Le musée du quai Branly, à Paris, consacre une exposition à ces fabuleux oiseaux où sont convoqués les savoirs de l'ornithologie, de l'écologie, de l'histoire des arts, des sciences, des cultures de Papouasie-Nouvelle-Guinée… et même de la mode pour rendre compte de la multiplicité des imaginaires qu'ont nourris ces « oiseaux comme nul n'en avait jamais vu, tant ils poussent l'idée même de beauté jusqu'aux confins de l'absurde », pour reprendre les mots du naturaliste David Attenborough. Et c'est aussi un voyage autour du monde, en écho à celui de *La Victoria*, qui est proposé au visiteur.

Des noms d'oiseaux

On découvre en effet que bien des cultures se sont entichées des prodigieux plumages, à commencer par celles de Nouvelle-Guinée, où l'on retrouve des plumes dans des coiffes et des parures qui se font marqueurs sociaux.

Là, les paradisiers sont des intercesseurs entre les humains et leurs ancêtres, entre les vivants et leur environnement, et sont convoqués à chaque événement important. Aujourd'hui encore, dans les différentes populations de l'île, on imite les parades, et les parents donnent à leur enfant un nom d'oiseau, comme une promesse de caractère, de beauté…

Marie Christine Ferdinande de Bourbon, princesse des Deux-Siciles, portrait officiel par Vicente López Portaña, peint en 1830.

© Museo Nacional del Prado, Dist. GrandPalaisRmn / image du Prado

Ailleurs dans le monde, les paradisiers sont devenus les symboles de richesse et de pouvoir; depuis plus de deux mille ans, ils ont emprunté les routes, surtout commerciales, et ont traversé les siècles pour devenir objets de prestige dans les cours des grands Empires moghol, safavide (en Iran), ottoman…

En Occident, l'engouement est le même et depuis l'arrivée des premiers spécimens au début du XVIe siècle, les oiseaux de paradis s'invitent dans les œuvres de Rubens (*L'Adoration des Mages*), Brueghel l'Ancien (*Le Jardin d'Éden*), Frans Snyders (*Concert d'oiseaux*) Jan Lievens (*Homme en costume oriental*)… Dans ces tableaux, les paradisiers deviennent parfois des messagers d'un paradis perdu et sont à tout le moins un signe distinctif de l'aristocratie.

Ainsi, dans un portrait de Marie Christine Ferdinande de Bourbon, princesse des Deux-Siciles, le peintre Vicente López Portaña représente la future reine (le tableau a été fait à l'occasion de son mariage avec Ferdinand VII) puis régente d'Espagne coiffée d'un paradisier dont le plumage éclatant, exotique et rare, constitue un insigne de souveraineté et de prestige dynastique (*voir la page précédente*).

Se nourrir de rosée

L'espèce est le paradisier grand-émeraude dont le nom latin, donné par le naturaliste Carl von Linné en 1758, est *Paradisaea apoda*, c'est-à-dire «sans pattes» (*voir la page ci-contre*). Pour quelles raisons? Parce que les Papous préparaient les peaux des paradisiers destinées à être vendues en supprimant les pattes et parfois les ailes, ne gardant que la tête, le bec, le corps, la très courte queue et, surtout, les plumes (les tectrices) des flancs agencées en masses vaporeuses et colorées, ceci afin de mettre en valeur la seule magnificence du plumage!

Aussi, aux XVIe et XVIIe siècles, sur la seule base de témoignages de marins et de marchands, on imagine ces oiseaux vivre en permanence dans les airs, où ils se nourrissent de rosée et de lumière. Ce sont vraiment des oiseaux de paradis! Et c'est de cette façon qu'ils sont figurés dans les premières représentations des savants comme Conrad Gessner en 1551 et Ulisse Aldrovandi en 1599 (*voir ci-dessous*).

L'historienne des sciences Valérie Chansigaud raconte dans le catalogue de l'exposition que ces premières descriptions seront rapidement contestées, notamment par Charles de L'Écluse, qui réfute dans ses *Exoticorum libri decem*, parus en 1605, l'idée d'oiseaux apodes. Mais celle-ci aura la vie dure, comme la désignation du paradisier grand-émeraude par Linné l'atteste, et la symbolique de l'intercesseur entre les cieux et la terre perdurera longtemps.

La description d'un paradisier par Ulisse Aldrovandi, dans *Ornithologiae*, publié en 1599.

© Gallica / BnF

Un paradisier grand-émeraude *Paradisaea apoda*.

Et selon les historiens, c'est à René Primevère Lesson que l'on doit d'en être venu à bout. Embarqué comme naturaliste en 1824 à bord du navire *La Coquille*, commandé par Louis Isidore Duperrey et Jules Dumont d'Urville, il sera l'un des premiers à décrire les paradisiers dans leur milieu naturel, mettant fin ainsi à la légende des oiseaux sans pattes.

Mon truc en plumes

La fascination pour ces animaux ne s'est pour autant jamais démentie, inspirant encore la haute couture et tout l'univers de la mode aux XIXe et XXe siècles. Cette effervescence s'est accompagnée du développement d'une industrie prospère, celle de la plumasserie. Et comme souvent, la demande mondiale en plumes de paradisiers fut telle qu'elle entraîna un risque d'extinction de ces espèces.

Aussi vit-on apparaître les premiers mouvements de défense de la faune sauvage et singulièrement des oiseaux, souvent à l'instigation de femmes. Par exemple, la philanthrope Emily Williamson créa en 1889 la Society for the Protection of Birds avec la ferme intention d'inciter les Anglaises à renoncer aux panaches exotiques. De l'autre côté de l'Atlantique, la naturaliste Olive Thorne Miller n'a pas hésité à dénoncer « la vanité des femmes américaines et leur cruauté » et s'est opposée à l'extermination des oiseaux servant aux ornements en plumes.

Le danger de la chasse semble écarté, mais c'est aujourd'hui l'environnement des paradisiers qui est menacé. Les Papous s'attachent désormais à préserver ce patrimoine qu'ils se réapproprient. Depuis l'indépendance en 1975 (de la moitié de l'île nommée Papouasie-Nouvelle-Guinée, l'autre étant indonésienne) l'oiseau est devenu l'emblème national et une source d'inspiration majeure pour de nombreuses œuvres d'art contemporaines. Car, comme le précisent les deux commissaires de l'exposition Magali Mélandri et Stéphanie Xatart : « Observer un oiseau de paradis, c'est éprouver le pouvoir de l'enchantement. » ■

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

« Plumes du paradis », au musée du quai Branly - Jacques-Chirac, à Paris, jusqu'au 8 novembre 2026 : www.quaibranly.fr/

© D. Chen

Entretien avec Bernard Lahire

Épistémologie

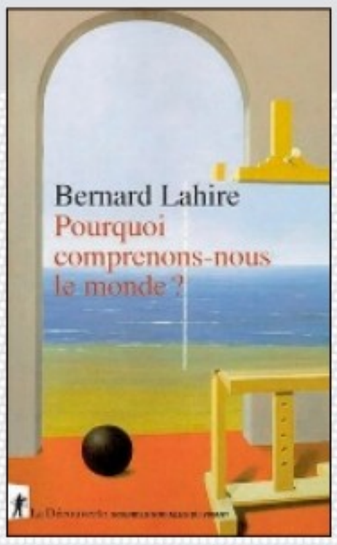
Nos savoirs sont connectés au réel

Votre livre interroge l'origine de la fiabilité des sciences. Dans l'introduction, vous évoquez les attaques de l'administration Trump. Est-ce ce qui vous a poussé à écrire?

Plus généralement, ce sont les thèses relativistes très présentes en sciences sociales, et qui ont fait le lit des positions de type trumpiste. Sous la houlette notamment de Bruno Latour, un certain nombre de sociologues des sciences ont ainsi affirmé que la science n'est qu'une représentation parmi d'autres, qu'elle a un point de vue arbitraire sur le monde, que ses conclusions s'imposent en raison de positions institutionnelles et de rapports de force, etc. Tout cela tend à couper la science de son rapport fondamental à la vérité. Mais en voyant à quel point Trump et les climatosceptiques tentaient de se débarrasser de celle-ci, Bruno Latour lui-même – qui ne se disait pas relativiste, contribuant à brouiller les pistes – a fait marche arrière et souligné l'existence de consensus: les liens entre réchauffement climatique et activité humaine, par exemple, sont avérés et documentés par de nombreux chercheurs.

Quels arguments appuient l'idée que nos savoirs ne sont pas arbitraires?

Ils ne sont pas arbitraires parce qu'ils nous permettent de nous orienter de manière pertinente par rapport à la réalité. Aucune espèce vivante ne pourrait survivre sans moyens fiables d'interagir avec ce qui l'entoure. Ces moyens peuvent passer par l'apprentissage de savoirs plus ou moins sophistiqués, par exemple à visées médicinales. Les ethnologues ont ainsi bien documenté le fait que toutes les sociétés humaines possèdent une pharmacopée et l'on sait que



Pourquoi comprenons-nous le monde?
Bernard Lahire
La Découverte, 2026
216 pages, 20 euros

les chimpanzés aussi pratiquent l'automédication: la primatologue française Sabrina Krief a notamment montré qu'ils mâchouillent des écorces renfermant divers principes actifs pour se débarrasser de parasites intestinaux.

C'est donc l'efficacité de ces savoirs pratiques qui prouve qu'ils ne sont pas déconnectés du réel. Cet argument s'applique aussi aux technologies. On oppose trop souvent nature et culture, mais de multiples chercheurs – je pense notamment aux ethnologues André-Georges Haudricourt et André Leroi-Gourhan – comparent l'évolution des techniques à l'évolution biologique, parce qu'elle représente également un processus d'adaptation (dont la vitesse est alors démultipliée).

Parfois, la technologie copie directement la vie (c'est le principe du biomimétisme, avec par exemple les combinaisons des nageurs inspirées de la peau des requins) ou nous aide à comprendre son fonctionnement. La pompe hydraulique a été inventée en Grèce au IIIe siècle avant notre ère, et deux mille ans plus tard, elle a servi de modèle pour expliquer comment fonctionnent le cœur et la circulation sanguine. La science ne fait souvent que dégager des principes de fonctionnement du réel qui ont déjà été mis en œuvre par la nature. Ou par les techniciens: pour identifier le mécanisme de la sélection naturelle, Darwin s'est inspiré du travail de sélection artificielle des éleveurs et des agriculteurs, pratiqué bien avant que la science ne s'y intéresse.

Cela semble vrai pour les sciences expérimentales, mais qu'en est-il des mathématiques?

Elles paraissent en effet particulièrement abstraites, mais elles finissent souvent par saisir des aspects très fins du réel, sans avoir été développées dans ce but. Le travail du mathématicien David Hilbert a par exemple aidé au développement de la théorie des gaz, de la théorie de la relativité et d'autres branches de la physique. Cela n'a pas manqué d'étonner bien des savants, comme le Prix Nobel de physique Eugene Wigner, qui évoquait l'«efficacité déraisonnable des mathématiques dans les sciences de la nature».

L'humanité ne cesse de chercher des choses qui lui font trouver, même involontairement, des éléments qui structurent le réel. Notez que si elle est la seule à avoir poussé aussi loin l'abstraction, à travers des savoirs langagiers et symboliques, elle n'a pas l'apanage du «sens pratique mathématique». Les recherches montrent que de nombreux animaux ont un sens de la numération – jusqu'aux abeilles, qui savent compter jusqu'à cinq, selon les expériences de l'éthologue française Aurore Avarguès-Weber.
Et le lien avec le réel est ici bien plus immédiat: les primatologues ont

Bernard Lahire
sociologue, directeur de recherche CNRS (Centre Max-Weber/École normale supérieure de Lyon) et membre sénior honoraire de l'institut universitaire de France

découvert que lorsqu'un groupe de chimpanzés en agresse un autre, il cherche toujours à être en surnombre, ce qui serait fort compliqué sans un sens numérique.

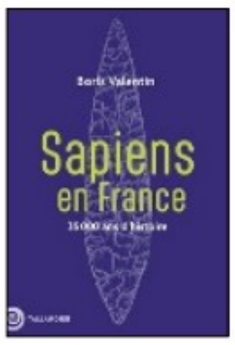
Comment cette adaptation au réel se traduit-elle dans notre cerveau?

Les travaux des sociologues convergent ici avec ceux des sciences cognitives. En sociologie, la tradition dispositionnaliste (à laquelle se rattachent notamment Émile Durkheim et Pierre Bourdieu) estime que nous formons des «dispositions», des habitudes liées à notre expérience du monde: nous développons une anticipation pratique de ce qui va se passer en observant des phénomènes qui se répètent – nous nous méfions du feu parce que nous l'avons senti brûler notre main ou vu détruire un arbre. De même, pour les chercheurs en sciences cognitives, le cerveau est un détecteur de régularité. Quand les enfants entendent les mots toujours utilisés dans un certain ordre, par exemple, ils finissent par incorporer la grammaire de leur langue.

Cette façon d'anticiper à partir de régularités est là encore un signe de l'ancrage des savoirs dans le réel. Comme disait le sociologue allemand Norbert Elias: si des groupes humains dotés de savoirs totalement inadaptés ont un jour existé, alors ils ont rapidement disparu, car incapables d'assurer leur survie. ■

Propos recueillis par Guillaume Jacquemont

Le choix de la rédaction



Paléontologie

Sapiens en France

Boris Valentin Tallandier, 2026 – 384 pages, 23,50 euros

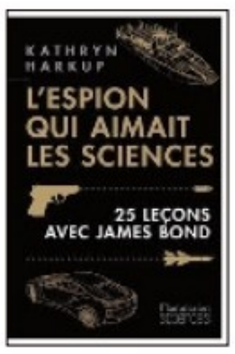
Il y a 42000 ans environ, *Homo sapiens* arrivait en Europe. Son périple revit ici sous la plume de l'archéologue Boris Valentin, qui embrasse plus largement l'histoire des «paléo-espèces» humaines depuis cette époque jusqu'à la néolithisation de la France. Un ouvrage très documenté, agrémenté de superbes illustrations, qui nous fait partager au passage les méthodes scientifiques permettant de reconstituer ces temps lointains.

Médecine

Placebo

Richard Monvoisin, Léo Druart, Nicolas Pinsault
Les Arènes, 2026 – 368 pages, 22 euros

Et si un «traitement» soignait uniquement par effet placebo, faudrait-il le prescrire? La notion de placebo a mauvaise presse, mais elle est en réalité aussi riche que complexe. Dans cet ouvrage, trois chercheurs décrivent son histoire et abordent les mécanismes en jeu. À travers cet angle, ils retracent également toute la mise en place des méthodologies modernes en médecine et s'interrogent sur l'éthique du soin. Une référence sur le sujet.



Science et fiction

L'espion qui aimait les sciences

Kathryn Harkup Flammarion, 2026 – 464 pages, 23 euros

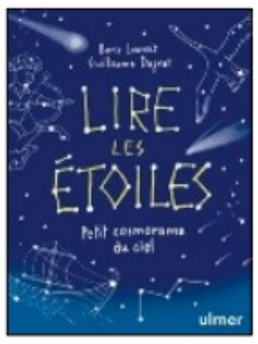
Un film de James Bond, c'est bien sûr de l'espionnage, de l'action et de la séduction un (gros) brin caricaturale. Ce sont aussi des poisons neurotoxiques, des lasers, des requins, des menaces atomiques... Autant de leviers sur lesquels s'appuie l'autrice, docteure en chimie et vulgarisatrice scientifique, pour distiller d'astucieuses bulles de science, qui nous font voyager entre les disciplines tout en nous invitant dans les coulisses des (vrais) services secrets britanniques.

Et aussi

Astronomie

Lire les étoiles

Boris Laurent et Guillaume Duprat
Ulmer, 2026
144 pages, 11,90 euros



Océanographie

Sur les sept mers du monde

Collectif
Éditions Ouest-France, 2026
120 pages, 25 euros

La plus vieille sangsue du monde

Hervé Le Guyader

Les paléontologues désespéraient de trouver une sangsue fossile. Ils viennent d'en découvrir une extraordinairement bien préservée qui remet en question l'origine de ces animaux… ainsi que celle des vers de terre.

Qu'ont en commun la sangsue médicinale et le lombric ? Mais aussi l'arénicole des pêcheurs, ou ver de vase, dont les tortillons de sable mouillé jonchent les plages de la côte atlantique européenne à marée basse, la gravette, un animal vermiforme plat au corps bordé de soies qui prospère dans les sédiments des estuaires vaseux, ou encore le ver tubicole géant, qui vit en colonies dans les grands fonds marins, notamment le long des dorsales marines de l'océan Pacifique est… Ils appartiennent tous au phylum des annélides, qui rassemble principalement des vers marins annelés – c'est-à-dire dont le corps est formé d'une succession de segments (on dit qu'ils sont « métamérisés »).

Ce groupe est très ancien : en 1979, le paléontologue britannique Simon Conway Morris en a décrit des fossiles datés de 505 millions d'années dans les schistes de Burgess, un gisement découvert en 1909 en Colombie-Britannique, au Canada, qui recèle des vestiges d'animaux mous du Cambrien particulièrement bien conservés. Et tout récemment, Xiaofeng Xian, de l'institut de géologie et de paléontologie de Nanjing, en Chine, et ses collègues ont exhumé dans le gisement de Zhangjiakou, vieux d'environ 535 millions d'années, des fossiles d'annélides millimétriques remarquablement conservés en trois dimensions (ceux de Burgess sont compressés en deux dimensions).

Dans ce phylum, un clade en particulier intéresse au plus haut point les biologistes : les clitellates. En effet, ce groupe rassemble une grande variété d'espèces qui ont une importance écologique considérable, que ce soit sur terre, en mer, ou en eau douce ou saumâtre. Il compte à lui seul tous les vers de terre et de boue (les oligochètes) – des organismes que l'on trouve dans à peu près l'ensemble des habitats terrestres et aquatiques de la planète –, ainsi que les hirudinées – les sangsues (hirudinidés) et leurs proches parents (branchiobdellidées et acanthobdellidés), qui peuplent un grand nombre de niches écologiques terrestres et aquatiques sous la forme de parasites, symbiotes ou prédateurs.

Évidemment, diverses équipes ont donc tenté de construire l'arbre phylogénétique des clitellates afin de comprendre comment ils ont émergé et se sont diversifiés. Or, une difficulté pour y parvenir est que, jusque très récemment, on connaissait très peu de fossiles de ce groupe, et notamment aucune sangsue fossile. Mais en 2025, Karma Nanglu, de l'université de Toronto, et ses collègues en ont trouvé une extraordinairement bien préservée… qui remet en question l'origine même du groupe.

Des fossiles rares

Les clitellates sont caractérisés par leur clitellum, un renflement particulier du corps qui, au moment de la reproduction, sécrète un cocon muqueux au sein duquel l'animal dépose ses œufs. Si les fossiles de ce clade sont si difficiles à dénicher, c'est parce qu'ils ne comportent presque aucune partie biominéralisée, plus

L'AUTEUR

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

Fossile : © D. de Carle et al., PeerJ, 2025 (CC BY 4.0) ; dessin : © Alexander_P/Shutterstock

Ce fossile remarquablement conservé est celui d'une sangsue archaïque vieille de 437 millions d'années découverte récemment dans un gisement du Wisconsin, aux États-Unis. L'animal ne présente qu'une seule ventouse *(à droite)*, située dans sa partie postérieure.

Les sangsues actuelles ou hirudinidés ont toutes deux ventouses. Celle antérieure est dotée de trois mâchoires munies d'environ 130 dents. L'animal l'utilise pour agripper ses proies – généralement des vertébrés –, dont elle suce le sang.

La plupart des sangsues vivent en eau douce. Néanmoins, on connaît au moins quatre espèces de sangsues terrestres, qui vivent en Asie du Sud-Est, où l'air tropical est saturé d'humidité, et qui trouvent leurs proies en tombant des arbres.

Macromyzon siluricus
Longueur: 51 mm
Largeur: 19 mm (au maximum)

***

27 134

C'est le nombre total d'espèces d'annélides répertoriées actuellement dans le registre mondial des espèces marines (Worms).

1/3

Environ un tiers des espèces d'annélides connues sont des clitellates (vers de terre et de boue, sangsues et proches cousins), dont plus de 930 hirudinées (sangsues et proches cousins).

***

45 cm

Si certaines sangsues ne dépassent pas 3 centimètres de long, la sangsue géante d'Amazonie, *Haementeria ghilianii*, atteint jusqu'à 45 centimètres de long et 10 cm de large.

***

susceptible de perdurer dans le temps que leur corps mou. De fait, leurs découvertes se comptent sur les doigts d'une main.

Ainsi, en 2015, l'équipe de Stephen McLoughlin, du musée suédois d'histoire naturelle, à Stockholm, a découvert dans un gisement antarctique du début de l'Éocène des spermatozoïdes fossilisés préservés dans des cocons datant de 50 millions d'années, qu'elle a attribués à des branchiobdellidées. Ces minuscules cousines des sangsues vivent en ectosymbiose avec des écrevisses d'eau douce (elles se fixent sur leur exosquelette et le nettoient en se nourrissant des microorganismes et des déchets qui s'y accumulent). Et en 2020, une équipe russe conduite par Andrey Zhuravlev, de l'université de Moscou, a décrit un « oligochète probable » au nord de la mer Caspienne, près de la frontière avec le Kazakhstan, dans des sédiments du Trias vieux de 250 millions d'années environ. Elle a aussi fait l'inventaire des fossiles de clitellates connus : quelques oligochètes, et surtout aucune hirudinée (l'équipe a rejeté les quelques candidats répertoriés).

Un arbre peu calibré

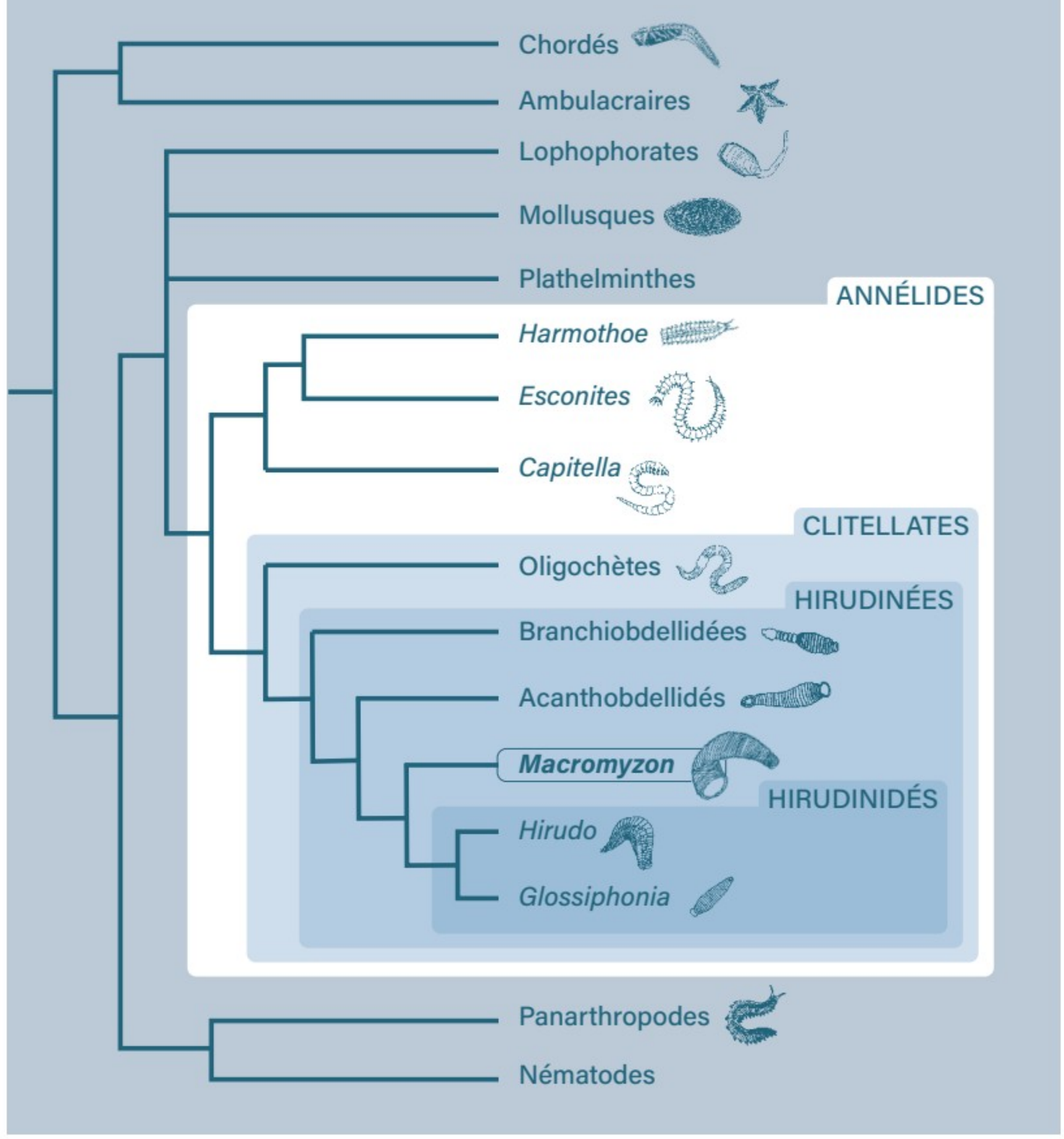
Parallèlement, Christer Erséus, de l'université de Göteborg, en Suède, et ses collègues ont construit une phylogénie moléculaire soignée des clitellates au sein des annélides. Selon cette étude, un ancêtre des clitellates aurait gagné l'eau douce pendant le Dévonien, il y a environ 400 millions d'années. Les hirudinées se seraient diversifiées dans le Trias, vers 230 millions d'années. Si l'on compare ces résultats avec ceux des phylogénies moléculaires antérieures, l'origine des clitellates se placerait entre le Silurien et le Dévonien tardif (entre 444 et 359 millions d'années), et la séparation entre oligochètes et hirudinées entre 300 et 200 millions d'années. Mais avec bien peu de fossiles pour calibrer l'arbre, difficile d'obtenir une estimation plus précise.

On comprend pourquoi la découverte d'une sangsue fossile fait sensation. L'équipe rassemblée par Karma Nanglu l'a trouvée dans la formation de Brandon Bridge, dans le Wisconsin, aux États-Unis, et l'a datée précisément – au million d'années près – entre 437,5 et 436,5 millions d'années, au Silurien. C'est certes cohérent avec l'origine des clitellates, mais cela recule d'au moins 200 millions d'années l'apparition des hirudinées par rapport à l'estimation de Christer Erséus et ses collègues !

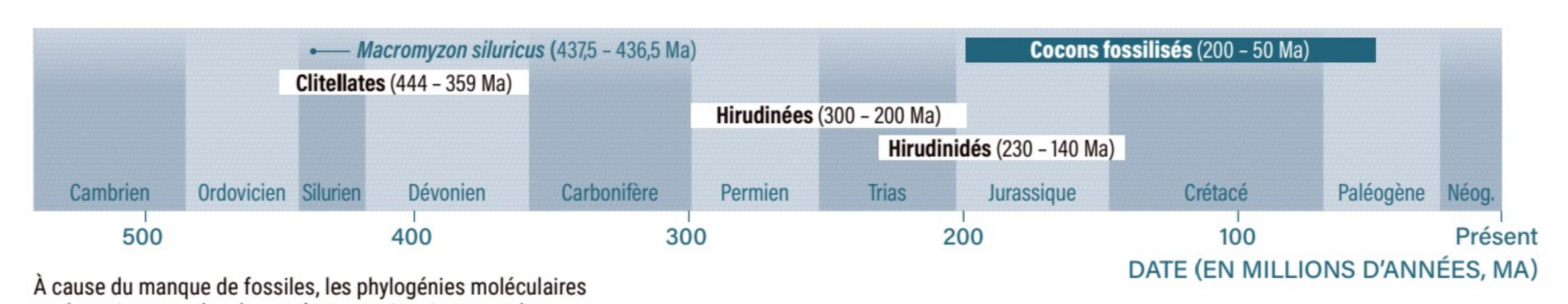
Macromyzon siluricus exhibe des détails d'un corps mou d'une exceptionnelle qualité : une grande ventouse sur la partie postérieure – mais pas de ventouse antérieure – et une segmentation bien visible. Pourquoi cette

Le fossile qui a rendu les lombrics à la mer

L'analyse phylogénétique du nouveau fossile indique qu'il s'agit très probablement d'une « sangsue souche », une espèce sœur de l'ancêtre des sangsues, les hirudinidés, et donc plus proche d'elles que des autres lignées connues des hirudinées, les branchiobdellidées et les acanthobdellidés, des animaux millimétriques d'eau douce qui ressemblent eux-mêmes à des sangsues. L'animal vivait dans un environnement marin, comme la plupart des annélides en dehors des clitellates, le groupe qui rassemble les oligochètes (lombricidés et autres vers de terre et de boue) et les hirudinées. Par conséquent, il est probable que les ancêtres des hirudinées et des clitellates étaient marins, et non d'eau douce comme on le pensait.



Arbre : © Pour la Science, d'après D. de Carle et al., PeerJ, 2025 ; animaux : © D. de Carle et al., PeerJ, 2025 (CC BY 4.0)



À cause du manque de fossiles, les phylogénies moléculaires ne donnaient que des dates très approximatives pour les origines des clitellates, des hirudinées et des hirudinidés *(en blanc)*. Quant aux cocons fossilisés connus, ils n'ont pas plus d'environ 200 millions d'années. Le nouveau fossile *Macromyzon siluricus* apporte un repère ancien et précis à cette chronologie.

sangsue est-elle si bien préservée? Trouvée dans un paléoenvironnement marin, sans doute intertidal (c'est-à-dire soumis aux marées), elle a dû être tout de suite protégée par un tapis de cyanobactéries. C'est donc très vraisemblablement une sangsue marine, ce qui est cohérent avec l'absence d'une cuticule protectrice contre les chocs osmotiques.

Marins d'eau douce

Karma Nanglu et ses collègues avancent trois scénarios (non exclusifs) pour expliquer la rareté des sangsues fossiles: selon le premier, l'origine du groupe se situe au début du Paléozoïque, mais leur pauvreté en diversité et en abondance réduit leur possibilité de fossilisation; dans le deuxième, les localités où les sangsues se diversifient ne permettent pas une bonne fossilisation – ce qui est cohérent avec une hypothèse de conquête du milieu d'eau douce; d'après le troisième, les traits cruciaux pour leur caractérisation ne sont pas visibles sur les fossiles collectés, ce qui empêche de les reconnaître comme hirudinées.

Ce n'est pas le cas pour *M. siluricus*, dont les caractères permettent de l'inclure dans une phylogénie. Suivant les traits pris en compte, l'espèce apparaît comme groupe frère des hirudinidés ou très proche de la base du taxon. Ce serait une «sangsue souche», c'est-à-dire proche de l'ancêtre hypothétique commun des hirudinidés.

Cette situation phylogénétique n'est pas anodine, car elle remet en cause le scénario écologique de l'origine du groupe qui faisait consensus jusqu'à présent. On pensait que l'ancêtre le plus récent des clitellates avait quitté l'eau salée pour l'eau douce. Par exemple, les cocons étaient interprétés comme une protection nécessaire pour éviter un choc osmotique aux œufs et embryons. Les quelques sangsues marines représentaient des retours à la mer, analogues aux cétacés chez les mammifères. Or le fossile est marin. Les auteurs passent en revue tous les scénarios possibles et concluent que le plus probable est vraiment une origine marine des hirudinées: les sangsues, mais aussi les branchiobdellidées et les acanthobdellidés, qui auraient conquis l'eau douce secondairement. L'hypothèse est d'autant plus plausible que les deux espèces connues d'acanthobdellidés sont des parasites de poissons d'eau douce de la famille des salmonidés, issue elle aussi d'une lignée marine; et les écrevisses qui servent d'hôtes aux branchiobdellidées ont aussi une origine marine. Ces deux groupes d'hirudinées auraient donc accompagné leurs hôtes dans leur transition vers l'eau douce. Quant aux clitellates, sans doute étaient-ils eux aussi d'origine marine et ont-ils conquis l'eau douce et le milieu terrestre indépendamment, à plusieurs reprises.

Ce n'est pas tout. Le type de parasitisme des sangsues est aussi remis en cause. On pensait que les sangsues, dans le milieu d'eau douce, se nourrissaient du sang des vertébrés. Or, dans la formation de Brandon Bridge, pas de vertébrés! Peut-être les sangsues étaient-elles des prédateurs de petits crustacés. La ventouse pouvait servir à les manipuler, ou bien à se fixer sur un support pour chasser à l'affût. Autre hypothèse: elles vivaient peut-être en ectosymbiose sur les trilobites ou autres grands arthropodes, comme les actuelles sangsues d'écrevisses. Bref, tout est à revoir! ■

BIBLIOGRAPHIE

X. Xian *et al.*, Polychaete annelids from the earliest Cambrian Period, *PNAS*, 2026.

D. de Carle *et al.*, The first leech body fossil predates estimated hirudinidan origins by 200 million years, *PeerJ*, 2025.

C. Erséus *et al.*, Phylogenomic analyses reveal a Palaeozoic radiation and support a freshwater origin for clitellate annelids, *Zool. Scr.*, 2020.

D. Shcherbakov *et al.*, A probable oligochaete from an Early Triassic Lagerstätte of the southern Cis-Urals and its evolutionary implications, *Acta Palaeontol. Pol.*, 2020.

B. Bomfleur *et al.*, Fossilized spermatozoa preserved in a 50-Myr-old annelid cocoon from Antarctica, *Biol. Lett.*, 2015.

S. C. Morris, Middle Cambrian polychaetes from the Burgess Shale of British Columbia, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 1979.

© Pour la Science, d'après D. de Carle et al., PeerJ, 2025

Une fluidité bien calculée

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

Les adeptes du parkour, les traceurs, ne sautent pas seulement plus loin ou plus haut : ils ont inventé de nouvelles façons d'évoluer qui répartissent mieux les contraintes sur leur corps. À la clé, des sauts spectaculaires.

Le traceur est immobile, les pieds joints au bord d'une terrasse. Soudain, il bondit sur un muret, situé 2 mètres plus loin et pas plus large que ses pieds, puis s'arrête net. Après une courte pause, il saute du mur, haut de 2 mètres, et après une réception souple, suivie d'une roulade, il est déjà debout et repart en courant. Le traceur, c'est un pratiquant du parkour, une discipline créée dans les années 1990 pour se déplacer avec fluidité et efficacité dans un environnement urbain, et popularisée auprès du grand public par le film *Yamakasi* en 2001. Découvrons, grâce à la physique, comment ces sportifs réussissent en toute sécurité des bonds que nous n'oserions pas tenter.

LES AUTEURS

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

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

Nous savons tous sauter, en tout cas nous connaissons la théorie : un peu d'élan, ou pas, une impulsion de jambe pour quitter le sol, un court instant en l'air, puis la réception. Selon les situations, il existe bien des façons de le faire. Pour franchir un fossé, nous courons, prenons appel sur un pied et tendons l'autre vers la rive opposée. Pour atteindre des mains le sommet d'un mur, nous partons de l'arrêt et faisons un appel à deux pieds. À partir de ces gestes élémentaires, différentes cultures ont développé une multitude de techniques pour se déplacer, franchir des obstacles ou exercer le corps.

S'arrêter net

Mais quand, dans les années 1990, un groupe de jeunes de la région parisienne commence à faire de la ville elle-même un terrain d'entraînement, toutes ces techniques ne suffisent plus. Murs, murets, escaliers ou rambardes offrent de nouvelles possibilités et imposent des contraintes inédites : autant d'occasions d'inventer de nouveaux déplacements et façons de sauter. Autour de David Belle et du groupe qui formera les *Yamakasi* naît ainsi le parkour.

Lorsque l'on saute au-dessus d'un ruisseau ou d'un fossé, la seule contrainte est de se lancer assez loin pour franchir l'obstacle. Mais quand il s'agit de sauter du sommet d'un muret à un autre, il faut non seulement franchir le vide qui les sépare, mais aussi s'arrêter net sur une surface de réception parfois à peine plus large que ses pieds. C'est tout l'objectif du saut de précision du parkour, ou « stick ».

Observons un traceur. Debout face à sa cible, les pieds joints, il fléchit les jambes en lançant les bras vers l'arrière, puis se détend en projetant les bras vers l'avant. En vol, il ramène les jambes devant lui puis les allonge pour que les pieds atteignent la cible. Il se réceptionne sur l'avant des deux pieds, fléchit profondément les chevilles, les genoux et les hanches tout en remontant les bras à l'horizontale pour enfin s'immobiliser.

Pour comprendre le rôle de tous ces mouvements, commençons par la fin quand le traceur s'arrête : il est totalement immobile. Cela signifie que sa quantité de mouvement et son énergie cinétique sont nulles. La réception donc doit permettre de

© Bruno Vacaro

***

David Belle

Considéré comme l'un des principaux initiateurs du parkour au début des années 1990 à Lisses (Essonne), il s'est inspiré des enseignements de son père, Raymond Belle, dont la formation était héritière de la méthode naturelle de Georges Hébert.

64,1 décibels

C'est le pic sonore des traceurs lorsqu'ils touchent le sol après une chute de la moitié de leur taille. Cette intensité acoustique est plus de quatre fois inférieure à celle des non-traceurs.

***

***

Travail excentrique

Cela correspond au travail des muscles lorsqu'ils s'allongent tout en restant contractés.

Le parkour consiste à se déplacer de façon fluide et rapide en enchaînant les acrobaties que permettent les éléments de l'environnement, le plus souvent urbain.

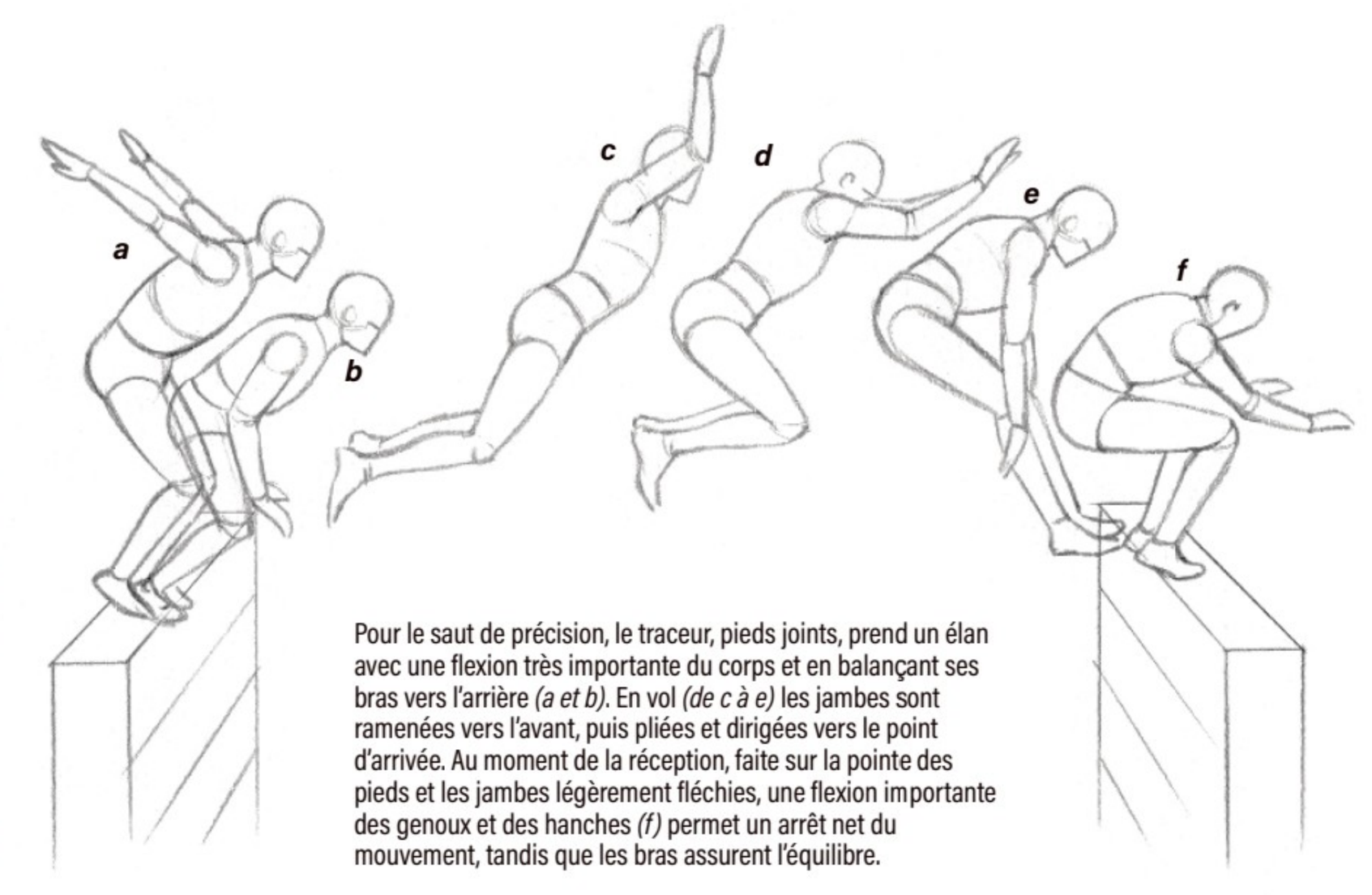
dissiper toute l'énergie cinétique qu'il avait à son arrivée, qu'il s'agisse du déplacement de son centre de masse ou du mouvement de ses membres par rapport à son corps. Ce sont les muscles qui transforment l'essentiel de cette énergie en chaleur en se laissant étirer tout en restant contractés – un travail dit « excentrique ».

C'est ce que nous faisons lorsque nous amortissons un saut d'une faible hauteur en fléchissant les jambes tout en gardant les quadriceps (les muscles des cuisses) contractés, ou lorsque nous redescendons d'une traction avec les bras, les biceps contrôlant le mouvement. La technique et l'entraînement des traceurs leur permettent cependant d'être beaucoup plus efficaces que les non-initiés. Leur secret est de fléchir énormément leurs articulations, notamment celle de la hanche et du genou.

On peut comparer grâce à des études de biomécanique, qui se sont multipliées ces dernières années, les performances des traceurs et celles d'individus lambda sur des sauts de petites hauteurs (par sécurité pour les seconds…). Les mesures de la flexion du genou effectuées lors d'un saut d'une hauteur de 60 centimètres sont particulièrement révélatrices. En moyenne, lorsque le non-traceur touche le sol, l'angle de flexion du genou est de 22° et lors de la réception, il augmente pour atteindre 84°. Pour un traceur, les valeurs sont respectivement de 34 et 129°. Autrement

dit, tandis que le premier termine jambes fléchies, le dernier termine quasiment accroupi.

Et même pour un saut d'une hauteur modeste de 30 centimètres, l'angle initial moyen de flexion du traceur reste presque le même, 32°, et l'angle final atteint 116°. Cela s'accompagne d'une durée totale de réception plus de deux fois plus longue: pour les deux hauteurs, environ 0,33 seconde chez les traceurs contre 0,15 pour les autres.



Pour le saut de précision, le traceur, pieds joints, prend un élan avec une flexion très importante du corps et en balançant ses bras vers l'arrière *(a et b)*. En vol *(de c à e)* les jambes sont ramenées vers l'avant, puis pliées et dirigées vers le point d'arrivée. Au moment de la réception, faite sur la pointe des pieds et les jambes légèrement fléchies, une flexion importante des genoux et des hanches *(f)* permet un arrêt net du mouvement, tandis que les bras assurent l'équilibre.

Préserver muscles et articulations

La conséquence, ce sont d'abord des forces exercées sur le sol bien plus faibles avec la technique du parkour. Des mesures effectuées sur les mêmes traceurs après des sauts de 75 centimètres donnent un pic de force de 3,2 fois le poids du corps avec une réception de précision, contre 5,2 fois avec une réception traditionnelle. Si l'on retranche le poids, la force nette maximale qui freine le corps est presque deux fois plus faible avec la réception de précision, mais comme elle s'exerce deux fois plus longtemps, elle permet aussi l'arrêt à partir de la même vitesse initiale. On sent déjà qualitativement l'avantage de la flexion.

Regardons plus en détail. Une jambe tendue transmet l'effort presque dans l'axe de ses segments. Le couple exercé sur les articulations est faible et les muscles sont peu sollicités. Si la jambe reste raide, elle se déforme peu et l'arrêt est brutal et potentiellement dangereux. Avec une jambe déjà fléchie, au contraire, la force subie tend à faire plier naturellement le membre. Les muscles sont davantage sollicités, mais peuvent céder progressivement tout en restant contractés: ce travail excentrique permet de freiner le mouvement sur une plus grande distance.

L'avantage est double: les forces sont moins brutales comme on l'a vu, ce qui limite les contraintes potentiellement traumatisantes, et le traceur dispose de davantage de temps et d'amplitude pour contrôler sa réception et maintenir son équilibre. La plus grande flexion initiale du traceur lui permet ainsi d'être, dès le contact, dans cette configuration favorable.

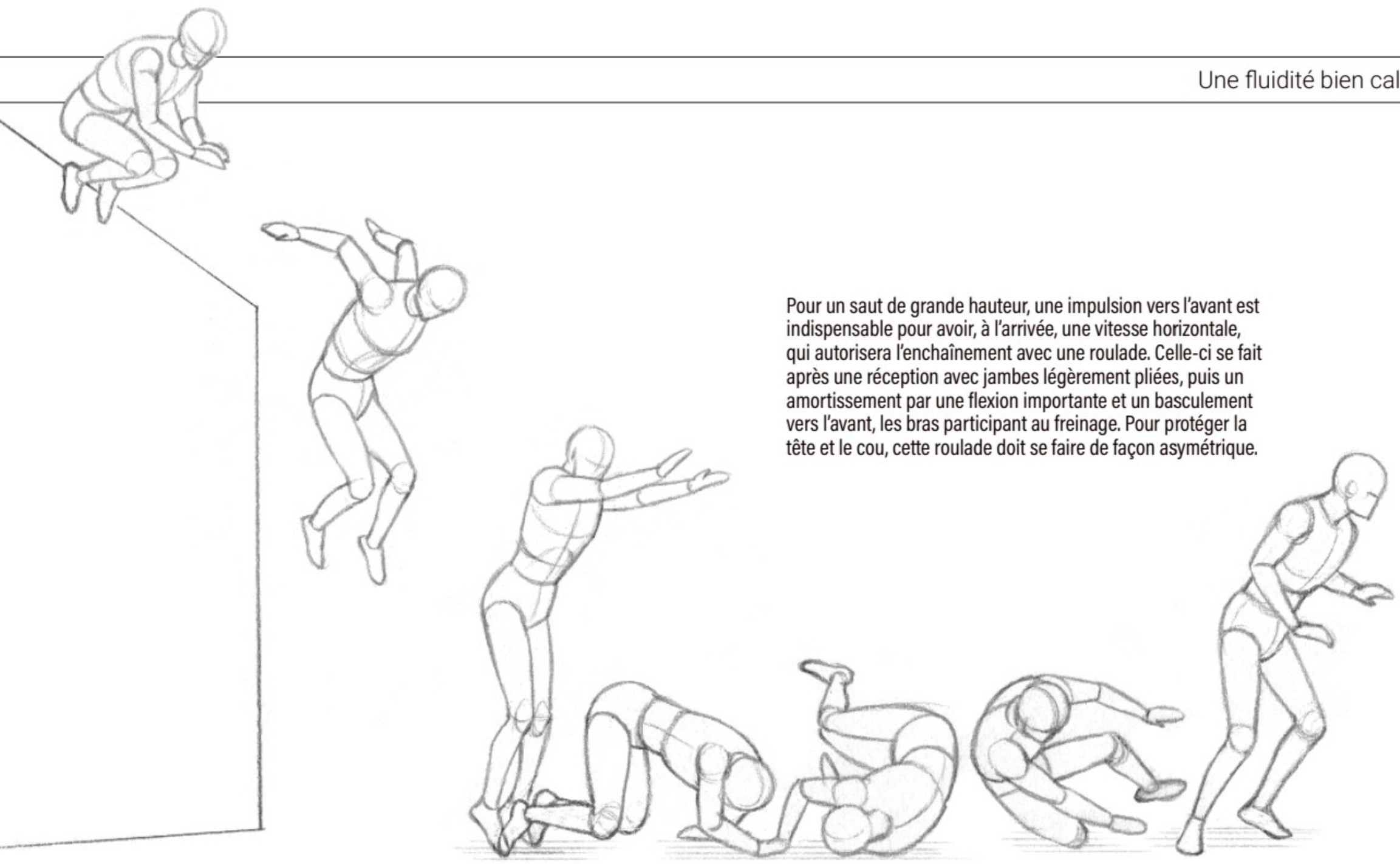
La flexion plus profonde qui suit met aussi davantage les hanches à contribution. Pour un saut de 60 centimètres, les genoux et les quadriceps assurent environ la moitié du travail de freinage pour les traceurs et les non-traceurs. Mais, en descendant davantage jusqu'à une position presque accroupie, les traceurs mobilisent davantage les hanches: elles assurent 22% du travail, contre seulement 13% chez les non-traceurs. Cela permet de réduire significativement les efforts des chevilles dont la contribution passe de 39 à 25%.

Après un saut, les forces exercées sur le sol sont bien plus faibles avec la technique du parkour

Le fait que les traceurs frappent moins brutalement le sol est même confirmé jusque dans le son qu'ils émettent lors de leur réception: pour les chutes correspondant à la moitié de leur taille, le pic sonore atteignait 70,4 décibels chez les non-traceurs, contre seulement 64,1 chez les traceurs. Cet écart de 6,3 décibels correspond à une intensité acoustique plus de quatre fois plus faible. Chercher à faire le moins de bruit possible est devenu un des marqueurs que les traceurs ont pour améliorer leurs techniques.

Mais pour stopper net sur un muret, il faut aussi annuler la composante horizontale de la vitesse. Pour se faciliter la tâche, les traceurs dirigent davantage leur impulsion vers le haut que les non-pratiquants. En effet, comme le montre un calcul de physique dans un cas simple (un saut parabolique entre deux points à la même hauteur), plus on s'élance vers le haut, plus il faut de vitesse initiale pour franchir la distance, mais plus le saut dure longtemps et donc plus la vitesse horizontale est faible. La réception est alors plus facile à contrôler. Et pour produire cette impulsion d'élan, comme pour la réception, les experts utilisent une plus grande amplitude de mouvement et font davantage participer l'ensemble du corps. Les bras participent ainsi à l'impulsion par un mouvement affirmé de l'arrière vers l'avant: leur contribution à la performance du saut a été estimée à 31% chez les experts contre 25% chez les débutants en parkour.

© Bruno Vacaro



Pour un saut de grande hauteur, une impulsion vers l'avant est indispensable pour avoir, à l'arrivée, une vitesse horizontale, qui autorisera l'enchaînement avec une roulade. Celle-ci se fait après une réception avec jambes légèrement pliées, puis un amortissement par une flexion importante et un basculement vers l'avant, les bras participant au freinage. Pour protéger la tête et le cou, cette roulade doit se faire de façon asymétrique.

Pour des points de réception plus en contrebas, à partir d'une certaine hauteur, la flexion ne suffit plus, on doit alors pratiquer un « saut de fond ». D'abord, parce que l'énergie à dissiper augmente avec la hauteur de chute, et ensuite, car la vitesse d'arrivée, et donc la rapidité des gestes à effectuer, croissent également. Aussi, à mesure que la hauteur augmente, les traceurs abandonnent progressivement la réception sur les deux pieds au profit de la roulade.

Une roulade après la chute

Cette technique repousse une limite physique de la réception sur les pieds, à savoir la distance disponible pour freiner. Dans la réception du saut de précision, une fois les jambes totalement fléchies, le centre de masse ne peut presque plus descendre. En posant les mains puis en engageant tout le corps dans la roulade, le traceur peut poursuivre sa descente et son mouvement. Le freinage vertical n'est donc plus limité à la seule course des jambes.

La roulade permet aussi de mobiliser d'autres muscles sur la fin du freinage, notamment ceux des bras dès que les mains touchent le sol. Une distance de freinage augmentée, c'est moins de force mobilisée. La roulade est efficace même pour des hauteurs modestes. Ainsi, après une chute de 75 centimètres, le pic de force verticale atteint 2,9 fois le poids du corps avec une roulade, contre 5,2 fois avec une réception traditionnelle.

Lorsque la hauteur augmente, cette stratégie devient indispensable, la hauteur à partir de laquelle rouler restant toutefois un choix personnel. Dans une expérience où onze traceurs choisissaient librement leur réception entre 60 centimètres et 2,30 mètres, la probabilité de rouler augmentait avec la hauteur et la masse du pratiquant. Ceux dotés des jambes les plus puissantes conservaient plus longtemps une réception sur les deux pieds.

Attention toutefois, car pour rouler, il faut le préparer. Avec une chute seulement verticale, il est impossible d'acquérir lors de la réception assez de vitesse horizontale pour enchaîner la roulade. Pour enchaîner naturellement ce mouvement vers l'avant, il faut déjà avoir à l'arrivée une vitesse horizontale. Lors de la roulade depuis un saut d'une hauteur de 2,7 mètres, les traceurs prennent ainsi un élan qui leur donne une vitesse horizontale à l'arrivée de 2,6 mètres par seconde. Qu'il s'agisse du saut de précision ou de fond, la leçon du parkour pour bien atterrir c'est : « Après être allé plus haut, il faut savoir aller plus bas. » ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Dai *et al.*, Kinematic analyses of parkour landings from as high as 2.7 meters, *Journal of Human Kinetics*, 2020.

G. Maldonado *et al.*, Strategies of parkour practitioners for executing soft precision landings, *Journal of Sports Sciences*, 2018.

S. Grosprêtre *et al.*, The adaptation to standing long jump distance in parkour is performed by the modulation of specific variables prior and during take-off, *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, 2018.

J. Croft et J. Bertram, Affordance boundaries are defined by dynamic capabilities of parkour athletes in dropping from various heights, *Frontiers in Psychology*, 2017.

D. Puddle et P. Maulder, Ground reaction forces and loading rates associated with parkour and traditional drop landing techniques, *Journal of Sports Science and Medicine*, 2013.

Lycopènes: une seule couleur – le rouge –, mais trois additifs différents

Hervé This

Les additifs alimentaires du groupe E 160d, qui donnent des teintes rouges, contiennent des variations moléculaires d'un composé présent dans les tomates. Il est temps que les instances réglementaires cessent de nommer d'un même nom des composés pourtant différents.

Si l'on trouve mention «du» lycopène dans les documents officiels de l'autorité européenne de sécurité sanitaire des aliments, c'est plutôt «des» lycopènes dont il faut parler: retenons les leçons de la terrible affaire «du» thalidomide. Ce médicament qu'on donnait aux femmes enceintes abritait en réalité sous un même nom deux formes de la molécule, comme une main gauche et une main droite: une version était sédative, tandis que l'autre induisait des malformations des fœtus. Pour les lycopènes, les possibilités ne sont pas limitées à seulement deux formes, mais à des dizaines, en pratique, et des milliers en théorie. Heureusement, ces modifications ne sont physiologiquement pas terribles.

Partons des tomates rouges (il en existe des jaunes, des violettes, des vertes...), qui le sont principalement du fait des lycopènes présents dans leur peau, et que l'on trouve aussi dans les abricots, la pastèque, le pamplemousse rose et la papaye.

Dans les tomates, environ 90% des lycopènes sont des isomères dits «tout E», alors que 25 à 70% des lycopènes présents dans les fluides et tissus corporels humains (plasma, prostate, peau...) sont de différentes formes dites «Z», selon la position des atomes d'hydrogène dans la chaîne carbonée (*lire «Propriétés»*).

Comme les lycopènes se trouvent dans plusieurs préparations différentes, le code E 160d s'est ramifié en 160d (i) pour celles qu'on obtient par synthèse moléculaire, 160d (ii) pour les lycopènes extraits de la tomate, et 160d (iii) pour celles qu'on produit par fermentation à l'aide du champignon *Blakeslea trispora* (*lire l'encadré «Origine»*).

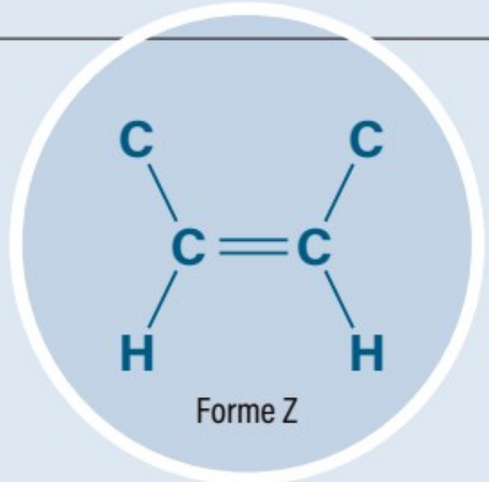
Ces divers additifs sont utilisés comme colorants ou sous forme de compléments alimentaires, en comprimés ou en capsules. On leur attribue des propriétés antioxydantes, captant des radicaux libres. Les lycopènes sont aussi parfois utilisés pour leurs effets potentiellement bénéfiques sur l'organisme, notamment en ce qui concerne les maladies cardiovasculaires, ainsi que dans certains cas de cancer (prostate, sein, estomac), mais la plupart des études ayant évalué leurs bienfaits sont de qualité faible ou nulle. ■

À LA TRACE

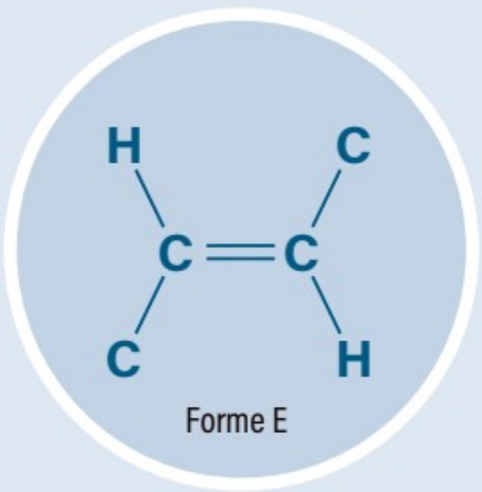
Destination

L'industrie ne peut utiliser les additifs autorisés que dans les conditions définies par les autorités sanitaires, afin que la dose journalière admissible ne soit pas dépassée. Et c'est ainsi que l'Efsa donne la liste suivante: boissons aromatisées non alcoolisées (elles contribuent jusqu'à hauteur de 66 % à la consommation totale des lycopènes – quels qu'ils soient – chez les adultes et de plus de 90 % chez les enfants d'âge préscolaire), fruits confits, moutardes, conserves de fruits rouges, bonbons, glaçages, viennoiseries, biscuits, fromages travaillés, glaces, desserts incluant des produits laitiers aromatisés, sauces et assaisonnements (par exemple, poudres de curry, tandoori, pickles, chutneys), confitures, gelées, pâtes de poissons et de crustacés, crustacés précuits, substituts de saumon, surimis, poissons fumés, biscuits extrudés, compléments alimentaires, potages et soupes, analogues de viandes et de poissons à base de protéines végétales, boissons alcoolisées, vins aromatisés, cidres.

Avec une formule brute $C_{40}H_{56}$, il y a de nombreux isomères possibles pour les lycopènes, selon la position des atomes d'hydrogène le long de sa chaîne carbonée. Ses onze doubles liaisons carbone-carbone conjuguées sont à l'origine de sa couleur rouge-orangé.



Forme Z



Forme E

Lorsque les atomes d'hydrogène sont opposés *(ci-contre)*, on parle de la « forme E » ; lorsqu'ils sont d'un même côté, on parle de « forme Z » *(ci-dessus)*. Dans les tomates, la forme E est prédominante.

Origine

Les « lycopènes d'extraction » partent de tomates ou de coproduits de tomates, qui sont broyés, avec une extraction qui se fait à chaud ou à froid par des solvants organiques autorisés (tels l'hexane, ou l'alcool éthylique bouillant), et avec une réglementation stricte sur les résidus admissibles.

Mais il existe d'autres méthodes d'extraction, comme celle qui emploie du dioxyde de carbone supercritique, une forme de dioxyde de carbone (sous pression) qui possède à la fois les avantages du gaz (qui diffuse bien dans toutes les parties des tissus végétaux) et du liquide (qui dissout les composés, tels les lycopènes). Dans tous les cas, les produits sont purifiés, notamment par des cristallisations, et stabilisés avec des huiles végétales ou des antioxydants afin d'éviter leur oxydation. Le produit final est souvent une oléorésine de tomate, utilisée comme colorant ou ingrédient nutritionnel.

Pour les lycopènes obtenus par fermentation, la biosynthèse se fait à l'aide de levures ou de champignons microscopiques cultivés dans des cuves contenant de l'eau, du sucre, des sels minéraux, de l'oxygène ; après plusieurs jours de fermentation, les cellules sont récoltées, rompues, puis les lycopènes sont extraits et purifiés.

Il est possible de fabriquer du lycopène par synthèse moléculaire, qui permet une production à grande échelle avec une qualité très constante.

Le lycopène extrait de tomates est chimiquement identique à celui présent naturellement dans les tomates, tandis que le lycopène de synthèse possède la même formule moléculaire, bien que la répartition de certains isomères puisse différer légèrement selon le procédé de fabrication.

© banu sevim/Shutterstock

PROPRIÉTÉS

Le composé qui fait l'essentiel des peaux des tomates rouges est le lycopène dit « tout E ». Dans la chaîne carbonée principale de la molécule des lycopènes, les atomes de carbone sont liés linéairement, avec des atomes d'hydrogène en nombre suffisant pour que chaque atome de carbone ait quatre liaisons, mais, surtout, avec de nombreuses doubles liaisons (des insaturations) alternées avec de simples liaisons pour une bonne partie de la chaîne. Cette alternance conduit les électrons des doubles liaisons à se répartir sur toute cette partie de la chaîne : on parle de délocalisation… et cela permet à la molécule d'absorber des photons, pour donner la couleur rouge.

***

La lettre E (de l'allemand *entgegen*, « opposé ») désigne le fait que, pour chaque double liaison, les atomes d'hydrogène sont opposés.

Lorsqu'il est produit par synthèse moléculaire, le lycopène possède la même formule moléculaire que celui extrait de tomates, mais la répartition de ses isomères peut différer.

Et l'on parle d'une « forme Z » (de l'allemand *zusammen*, « ensemble »), quand les atomes d'hydrogène sont d'un même côté *(voir ci-dessus)*.

***

Dans les tomates, environ 90 % des lycopènes sont tout E. Dans les fluides et tissus corporels humains (le plasma, la prostate, les testicules et la peau), 25 à 70 % des lycopènes présents se trouvent sous différentes formes Z, ce qui indique qu'ils sont plus biodisponibles ou que des doubles liaisons E ont été transformées en formes Z au sein de l'organisme.

***

La consommation quotidienne d'un repas à base de tomates, pendant plusieurs semaines, augmente la concentration plasmatique en lycopènes. La majeure partie (60 %) est alors présente sous forme d'isomères Z. Par ailleurs, on sait que l'activité antioxydante *in vitro* de certains isomères Z est plus forte que celle de la forme tout E.

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

L'auteur a publié
Inventions culinaires – gastronomie moléculaire (Odile Jacob, 2025).

Découvrez une recette ainsi que la bibliographie détaillée de cette chronique.

$$N = 2^{q-1}\left(\prod m_i\right)$$

Pourquoi le nombre 12 est sublime

Certains résultats de la théorie des nombres sont difficiles à croire tant ils semblent étranges. Les deux seuls nombres dits «sublimes» connus en représentent un parfait exemple.

En plus d'être omniprésent dans notre quotidien – pensez aux mois de l'année ou au cadran des montres –, le nombre 12 possède une propriété mathématique extrêmement rare: il est sublime. Cela signifie que le nombre de ses diviseurs positifs et leur somme sont tous deux des nombres parfaits.

Voyons ces qualificatifs élogieux plus en détail. Les diviseurs de 12 sont 1, 2, 3, 4, 6 et 12, soit 6 au total, dont l'addition donne 28. Pour qu'un entier naturel soit parfait, il doit être égal à la somme de ses diviseurs propres (c'est-à-dire de tous ses diviseurs positifs à l'exception de lui-même). C'est le cas de 6: quand on additionne ses diviseurs propres – 1, 2 et 3 –, on obtient 6. C'est également le cas de 28, dont les diviseurs propres sont 1, 2, 4, 7, 14. Ainsi, 12 est doublement parfait, et donc sublime.

À ce jour, nous ne connaissons qu'un seul autre nombre sublime, à savoir 6 086 555 670 238 378 989 670 371 734 243 169 622 657 830 773 351 885 970 528 324 860 512 791 691 264. Plutôt surprenant! Quel est le rapport entre 12 et un nombre aussi absurdement grand?

Ce nombre a été trouvé à l'aide de la formule ci-dessus, dont l'origine détaillée dépasserait le cadre de cette chronique mais qui repose sur deux piliers: tout nombre est décomposable en produit de facteurs premiers et tout nombre parfait pair peut être généré à l'aide de nombres premiers dits «de Mersenne» (qui ont la forme 2^k-1). En utilisant quelques autres résultats de la théorie des nombres, on obtient une méthode de construction des nombres sublimes. Dans cette formule, q et 2^q-1 doivent être des nombres premiers. Il faut en outre que q vérifie $q = 2^p-1$, où p est également premier. Enfin, $q-1$ doit pouvoir se décomposer en une somme de $p-1$ nombres premiers distincts $l_1, ..., l_{p-1}$, de sorte que pour tout i, $m_i = 2^{l_i}-1$ soit aussi premier. Si toutes ces conditions sont remplies, alors N est un nombre sublime.

Un peu déroutant? Prenons $p = 2$ par exemple. On a alors $q = 2^2-1 = 3$ et $2^q-1 = 7$. Jusqu'ici, tout concorde, et les conditions suivantes se vérifient également: $q-1 = 2$, ce qui donne $l_1 = 2$ puis $m_1 = 3$. Avec la formule ci-dessus, on obtient $N = 2^{(3-1)}\times 3 = 12$, soit le premier nombre sublime.

Sublime et démesuré

Qu'en est-il du nombre premier suivant, $p = 3$? q et 2^q-1 sont également premiers, mais pour que toutes les conditions soient remplies, il faudrait trouver deux nombres premiers différents ($p-1 = 2$) dont la somme est égale à $q-1$, soit 6. Or c'est impossible. Cette condition fait également défaut pour $p = 5$. En revanche, pour $p = 7$, la chance est de retour. Après un calcul un peu fastidieux, on obtient:
$N = (2^{126})\times(2^{61}-1)\times(2^{31}-1)\times(2^{19}-1)\times(2^7-1)\times(2^5-1)\times(2^3-1)$.

Et cela correspond au deuxième nombre sublime. Rien d'étonnant à ce qu'on n'en connaisse pas d'autre, car ces deux exemples montrent à quelle vitesse ils grossissent. L'effort de calcul devient vite démesuré et aucune autre méthode plus économe n'existe pour l'instant.

Les nombres sublimes n'ont par ailleurs aucune application concrète. Mais s'y intéresser, c'est un peu comme contempler le ciel étoilé, tant l'immensité de l'Univers et l'infini des mathématiques nous laissent pareillement émerveillés. Le qualificatif «sublime» n'a donc rien d'usurpé! ■

L'AUTEUR

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

PODCAST

Pour la Science

À l'écoute de la science

Quand la science en train de se faire se donne à entendre

Des scientifiques partagent leurs découvertes, dernières recherches, réflexions sur la science, et anecdotes de labo...

Découvrez le podcast de Pour la Science

DES ENTRETIENS EXCLUSIFS

LES DERNIÈRES AVANCÉES SCIENTIFIQUES

LE MEILLEUR DE LA SCIENCE

Disponible sur toutes les plateformes

Cocréé avec la Collège de France

GRÂCE AU 1%

Marie-Aline a aidé Boris à former 43 demandeurs d'asile au maraîchage biologique.

Marie-Aline verse chaque année 1% de son chiffre d'affaires
à des associations agréées 1% for the Planet dont La Terre en Partage.

onepercentfortheplanet.fr

1% FOR THE PLANET

CONCEPT ET CRÉATION : .yz PHOTO : FRANÇOIS AYME