



**NOS MONTAGNES** fondent... et s'effondrent!

L'éclairage de  
**Ludovic Ravanel**  
géomorphologue



# Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Science & fiction

**COMBIEN  
DE DIMENSIONS  
POUR L'UNIVERS?**

■ Archéologie

**UN «STONEHENGE»  
ALLEMAND  
MIS AU JOUR**

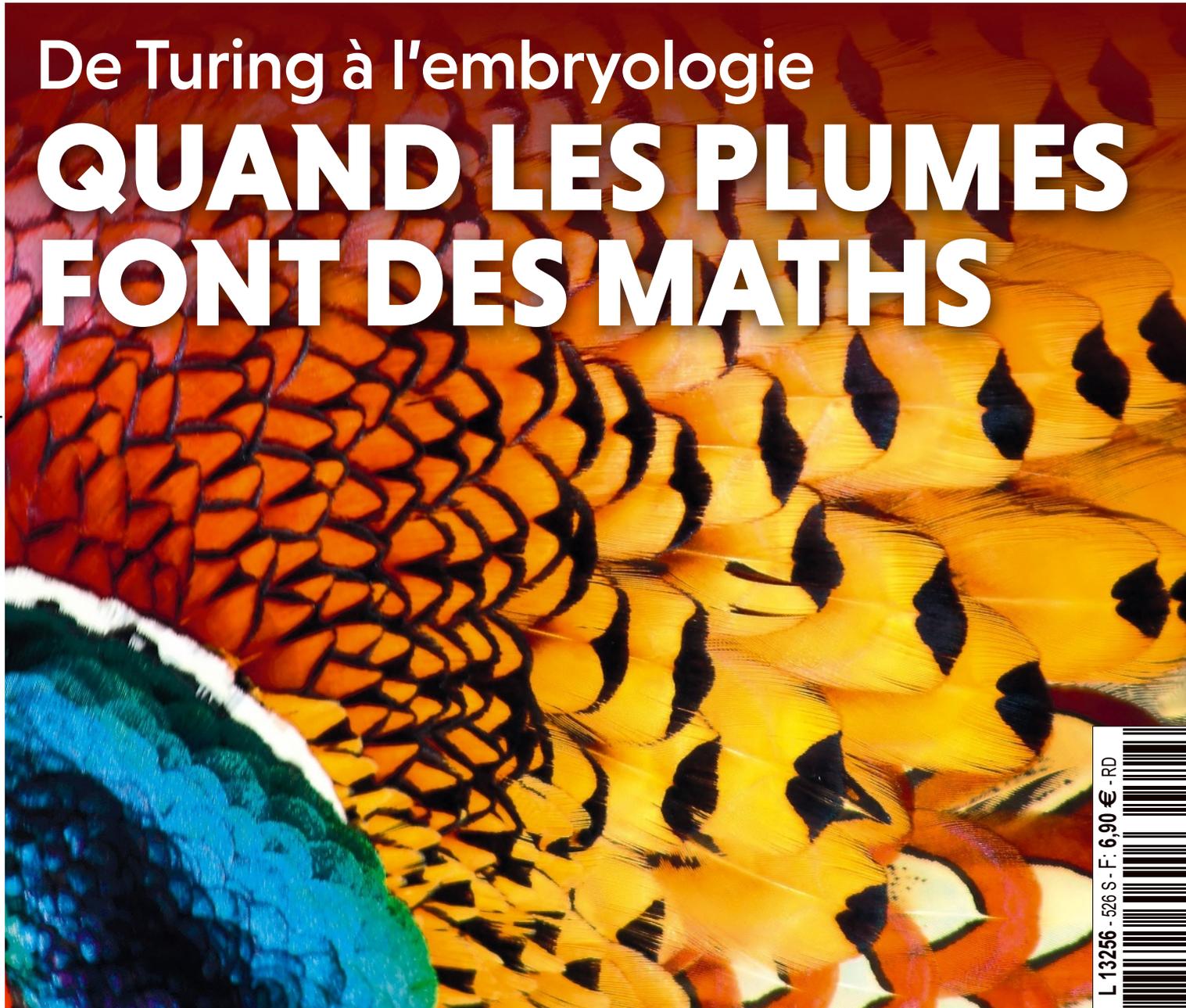
■ Astrophysique

**TRAQUER LES ONDES  
GRAVITATIONNELLES  
AVEC DES PULSARS**

08/21

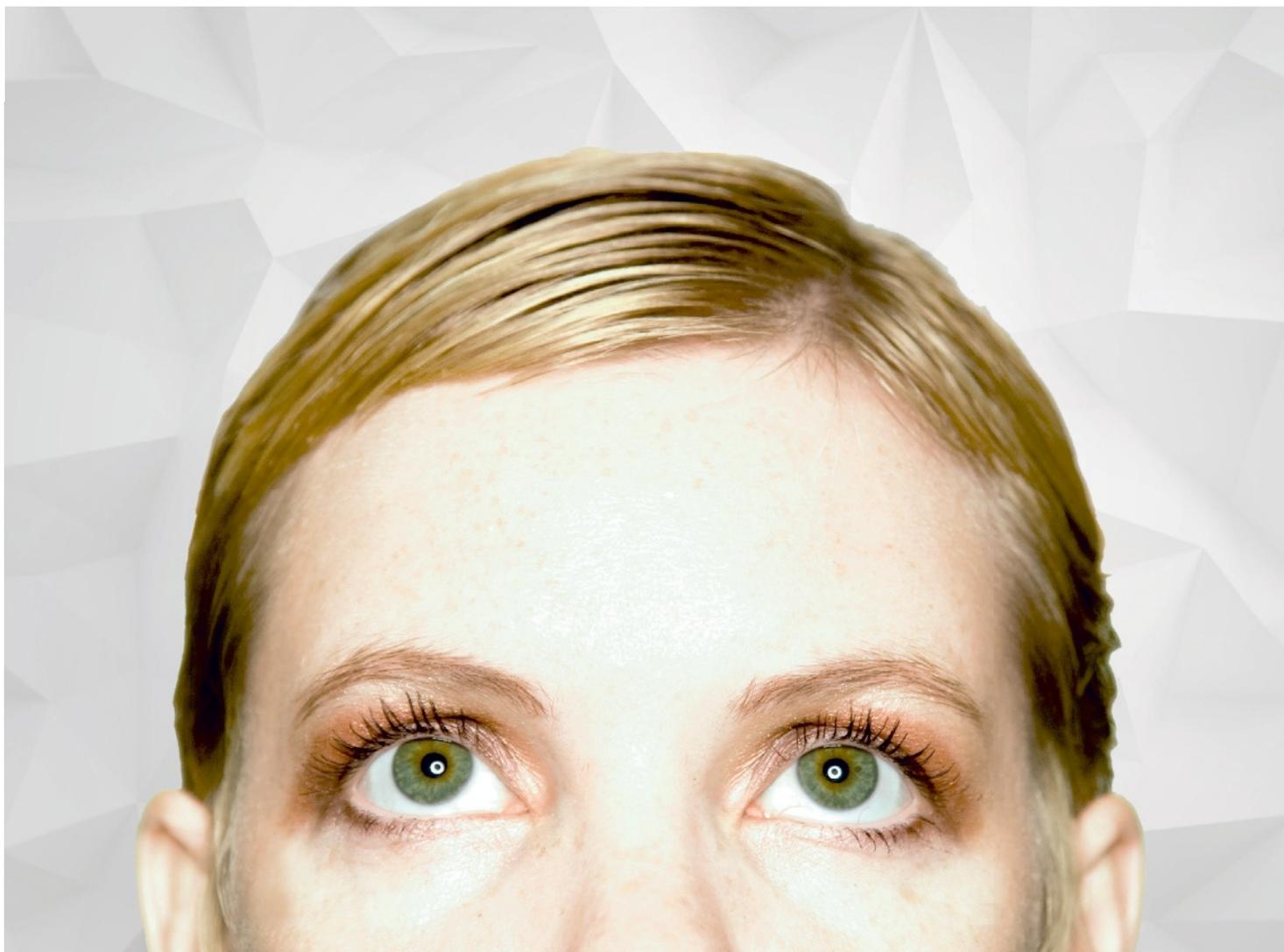
De Turing à l'embryologie

# QUAND LES PLUMES FONT DES MATHS



L 13256 - 526 S - F - 6,90 € - RD

Édition française de Scientific American - Août 2021 - n° 526  
DOM: 7,90 € - BEL/LUX: 7,90 € - CH: 12,70 CHF - CAN: 11,50 \$CA - TOM: 1,040 XPF



**AcademiaNet** offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

**AcademiaNet**, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil de plus des 2.300 femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème «Women in Science»

## Partenaires

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**nature**

**Pour la Science**



**Maurice Mashaal**  
Rédacteur en chef

# DES MOTIFS DESSINÉS AVEC OU SANS PATRON ?

**L**es taches de la robe du jaguar, les rayures du zèbre ou celles du poisson-clown, les carapaces en damier de certaines tortues, les spirales des coquillages, l'architecture arborescente des poumons, la mosaïque de couleurs du plumage du paon... : le monde vivant présente une variété quasi infinie de structures remarquables par leur ordre spatial. Ces motifs suscitent le plaisir des yeux, mais aussi l'étonnement et la curiosité. Comment se forment-ils? Comment expliquer leur diversité à travers le vivant? Et leur constance au sein d'une même espèce?

Les scientifiques se posent ces questions depuis longtemps. Il a fallu attendre le  $xx^e$  siècle pour qu'ils obtiennent de premiers éléments de réponse. On peut d'abord évoquer D'Arcy Thompson: dans son ouvrage *On Growth and Form* (1917), ce biologiste et mathématicien écossais soulignait l'importance des lois de la physique et de la mécanique pour comprendre les formes rencontrées chez les organismes vivants et leur genèse.

Il fallait cependant aller au-delà des analogies et des concepts descriptifs. Ce qui n'est advenu que dans les années 1950 avec le modèle proposé par le mathématicien britannique Alan Turing. Ce modèle et ses variantes ultérieures fournissent un mécanisme d'«autoorganisation», où des motifs stables peuvent émerger spontanément dans un système initialement homogène, à partir d'interactions locales des composants du système.

Une autre théorie, bien différente, a été proposée en 1976 par Lewis Wolpert, un biologiste d'origine sud-africaine. Selon cette approche, dite de l'«instruction», des signaux externes auxquels réagissent les composants du système sont responsables de la structuration de celui-ci.

Du modèle de l'autoorganisation ou de celui de l'instruction, lequel est le plus pertinent? Comme nous l'explique Marie Manceau, biologiste au Collège de France, chacun a ses forces et ses faiblesses; mais la conclusion à laquelle conduisent les travaux sur les plumages des oiseaux, et qui s'applique probablement à bien d'autres motifs du monde animal, peut surprendre (*voir pages 24 à 35*). Je vous laisse la découvrir! ■

# S

## OMMAIRE

N° 526 / Août 2021

CAHIER PARTENAIRE  
PAGES I À III (APRÈS LA P. 46)

Radiothérapie du cancer  
du sein. Mieux préserver  
le cœur

parrainé par

IRSN



POUR LA  
**SCIENCE.FR**

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS  
LA PARUTION DE  
VOTRE MAGAZINE  
GRÂCE À LA NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



Inscrivez-vous  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## ACTUALITÉS

P. 6

### ÉCHOS DES LABOS

- « Où vas-tu petit canard? », une question indécidable!
- La cohésion garantie malgré la mort de cellules
- Plier un livre, un modèle de frottements
- Des « plaques tectoniques » sur Vénus
- Plantes et champignons, une symbiose ancienne
- Les origines géologiques de Zélandia
- Deux systèmes de pluies pour le Sahara vert
- La sépulture de Mtoto, la plus ancienne d'Afrique
- La fusion qui manquait
- Jean Dalibard, Médaille d'or du CNRS

P. 18

### LES LIVRES DU MOIS

P. 20

### DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

Protéger 30% de la planète: une ambition équivoque

Catherine Aubertin

P. 22

### LES SCIENCES À LA LOUPE

Classer les classements... et les déclasser

Yves Gingras



En couverture:  
© Shutterstock.com/Piotr Krzeslak

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

## GRANDS FORMATS



P. 36

### ASTROPHYSIQUE

#### DES PULSARS POUR TRAQUER LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Gilles Theureau, Siyuan Chen et Antoine Petiteau

En mesurant avec précision les signaux radio périodiques de plusieurs dizaines de pulsars, les astrophysiciens comptent détecter les ondes gravitationnelles émises par des paires de trous noirs supermassifs. Les premiers résultats sont encourageants.



P. 50

### ARCHÉOLOGIE

#### UN « STONEHENGE » ALLEMAND

Karin Schlott

Sur les bords de l'Elbe, en Saxe-Anhalt, des archéologues ont retrouvé les vestiges d'un sanctuaire néolithique, siège de cruels rituels. Et fort similaire à celui de Stonehenge.



P. 58

### GÉOSCIENCES

#### LES MONTAGNES FONDENT... ET S'EFFONDRENT!

Ludovic Ravanel

Le réchauffement climatique a une conséquence spectaculaire. Il accélère un phénomène millénaire: la déstabilisation des parois rocheuses de haute montagne.



P. 66

### SCIENCE & FICTION

#### L'UNIVERS, COMBIEN DE DIMENSIONS ?

Roland Lehoucq et Jean-Sébastien Steyer

Notre monde semble avoir trois dimensions d'espace et une dimension de temps. Pourtant, les auteurs de science-fiction n'hésitent pas à emmener leurs lecteurs dans des univers déroutants où le nombre de dimensions est différent. Ils ne sont pas les seuls: la science conduit souvent les chercheurs sur de tels territoires exotiques.



P. 72

**HISTOIRE DES SCIENCES**

**PRÉDIRE LE TEMPS  
AU MOYEN ÂGE**

*Anne Lawrence-Mathers*

Y aura-t-il de la neige à Noël? La sécheresse va-t-elle durer tout l'été? Afin de répondre à de telles questions, les savants de l'Europe médiévale ont développé l'«astrométéorologie», avec des registres de données qui ont préparé le terrain à la science météorologique moderne.



P. 24

**BIOLOGIE**

**QUAND LES PLUMES  
FONT DES MATHS**

*Marie Manceau*

Répartition des plumes, striures, couleurs... D'où viennent la richesse et la régularité des motifs cutanés des oiseaux? Aujourd'hui, embryologie et mathématiques révèlent les mécanismes à l'œuvre. Et qui semblent transposables à bien d'autres motifs animaux.

**RENDEZ-VOUS**

P. 80

**LOGIQUE & CALCUL**

**DES NOMBRES  
PREMIERS ROBUSTES  
OU DÉLICATS**

*Jean-Paul Delahaye*

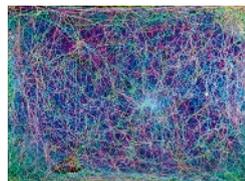
Manipuler les chiffres des nombres premiers est un jeu stimulant... qui réserve de nombreuses surprises.

P. 86

**ART & SCIENCE**

**Une harpe aux milliers  
de cordes**

*Loïc Mangin*



P. 88

**IDÉES DE PHYSIQUE**

**Mélanger, une opération  
pas si simple**

*Jean-Michel Courty  
et Édouard Kierlik*

P. 92

**CHRONIQUES  
DE L'ÉVOLUTION**

**Les crevettes à poigne  
du Cambrien**

*Hervé Le Guyader*

P. 96

**SCIENCE & GASTRONOMIE**

**Des suspensions  
en poupées russes**

*Hervé This*

P. 98

**À PICORER**

# A

## CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Disputes environnementales

P.22 Les sciences à la loupe

Quand 29 000 canards en plastique sont tombés en 1992 dans l'océan Pacifique, certains ont été retrouvés quinze ans plus tard sur les rives de l'Angleterre. Leur trajectoire était-elle prévisible ?

# « OÙ VAS-TU PETIT CANARD ? », UNE QUESTION INDÉCIDABLE !



**Une équipe de mathématiciens a prouvé que déterminer à long terme la trajectoire d'une particule de fluide est un problème indécidable.**

**L**e 10 janvier 1992, pris dans une tempête sur l'océan Pacifique, un bateau perdit une partie de sa cargaison : 29 000 petits canards en plastique tombèrent à la mer et partirent à la dérive. On retrouva quelques mois plus tard certains de ces Friendly Floatees sur les rives de l'Alaska, puis d'autres au Japon. Certains traversèrent le détroit de Béring, l'océan Arctique et finirent leur périple sur les rivages de l'Angleterre en 2007, soit quinze ans plus tard. L'océanographe américain Curtis Ebbesmeyer les a rendus célèbres en les utilisant pour analyser les courants marins.

Aurait-il été possible de déterminer la trajectoire des canards depuis leur point de départ ? L'exercice est difficile. Les courants océaniques font partie de ces systèmes dont la dynamique est décrite

par les équations de Navier-Stokes de la mécanique des fluides ; or les solutions de ces équations sont tellement sensibles aux conditions initiales qu'il est en pratique impossible de prévoir où les courants emporteront chacun des canards. Avec trois collègues, Eva Miranda, de l'université polytechnique de Catalogne, à Barcelone, et de l'observatoire de Paris, vient de montrer que cette impossibilité est bien plus fondamentale : il s'agit d'un problème indécidable.

Les questions d'indécidabilité sont intimement liées au concept de machine de Turing. Les travaux d'Eva Miranda et ses collègues s'inscrivent en effet dans un contexte plus large : est-il possible de simuler une « machine de Turing universelle » avec des systèmes physiques ? La réponse est oui pour certains systèmes optiques ou des réseaux de neurones

artificiels. Et dès 1991, Christopher Moore, de l'institut de Santa Fe, aux États-Unis, a posé la question pour les systèmes hydrodynamiques : sont-ils assez complexes pour servir à effectuer des calculs ? C'est cette question qui vient de trouver une réponse et qui conduit à la notion d'indécidabilité dans les trajectoires des fluides.

Imaginée par le mathématicien Alan Turing en 1936, une machine de Turing est une construction abstraite qui peut effectuer des opérations élémentaires afin de réaliser un algorithme. Munie d'instructions simples, la machine prend en entrée une séquence de 0 et de 1, et, après un certain nombre d'étapes, restitue une nouvelle séquence de 0 et de 1. Il est possible d'imaginer une machine de Turing dite « universelle », qui prendrait en entrée la description de n'importe quelle machine de Turing et pourrait simuler son comportement. Une machine de Turing universelle pourrait calculer tout ce qui est calculable. Elle est dite « Turing-complète ». Cette idée a donné naissance

à la réalisation, bien concrète, elle, des ordinateurs programmables. Mais un écoulement fluide peut-il aussi simuler une machine de Turing universelle?

En 2014, cette question a pris une tout autre dimension sous l'impulsion de Terence Tao. Ce mathématicien de l'université de Californie à Los Angeles a suggéré que si un fluide est Turing-complet, il serait possible de l'utiliser pour démontrer la régularité des équations de Navier-Stokes. Ces équations, qui régissent la dynamique d'un fluide, posent en effet un problème aux mathématiciens: il n'est pas démontré qu'elles sont régulières, c'est-à-dire que leurs solutions ne divergent jamais vers des valeurs infinies – ce qui serait physiquement inacceptable. La démonstration de la régularité mathématique des équations de Navier-Stokes est d'ailleurs l'un des «sept problèmes du millénaire» listés en 2000 par l'institut Clay.

Certaines tentatives de preuve reposent sur la conservation de l'énergie. Terence Tao a voulu construire un contre-exemple à partir d'un modèle-jouet pour montrer que ce critère n'est pas suffisant. Pour cela, il a cherché à montrer que si un fluide a un comportement assez complexe pour faire des calculs et constituer une machine de Turing universelle, alors on pourrait concevoir un algorithme fluide qui conserverait l'énergie mais la concentrerait en un point de façon à obtenir une

singularité. Si, par cette approche, on parvenait à prouver qu'on aboutit parfois à des singularités en un temps fini, cela signifierait que les équations de Navier-Stokes ne sont pas régulières.

Passer d'un modèle-jouet aux vraies équations de Navier-Stokes est cependant très difficile. «En 2018, en lisant le blog de Terence Tao, j'ai réalisé qu'avec mes

## Les fluides sont-ils assez complexes pour servir à effectuer des calculs?

collègues, nous avons développé des outils qui devaient nous permettre d'aborder ce problème», raconte Eva Miranda. Avec son équipe, elle a étudié le cas des équations d'Euler, qui correspondent à un cas particulier des équations de Navier-Stokes – correspondant aux fluides incompressibles et de viscosité nulle. Les chercheurs ont aussi restreint leur étude à des solutions stationnaires, c'est-à-dire indépendantes du temps. Ces chercheurs ont alors montré qu'il était possible de concevoir une machine de Turing universelle avec un tel fluide. Le système prend comme données en entrées un point de l'espace tridimensionnel. Puis la machine

de Turing suit la trajectoire du fluide passant par ce point et donne en sortie la position résultante.

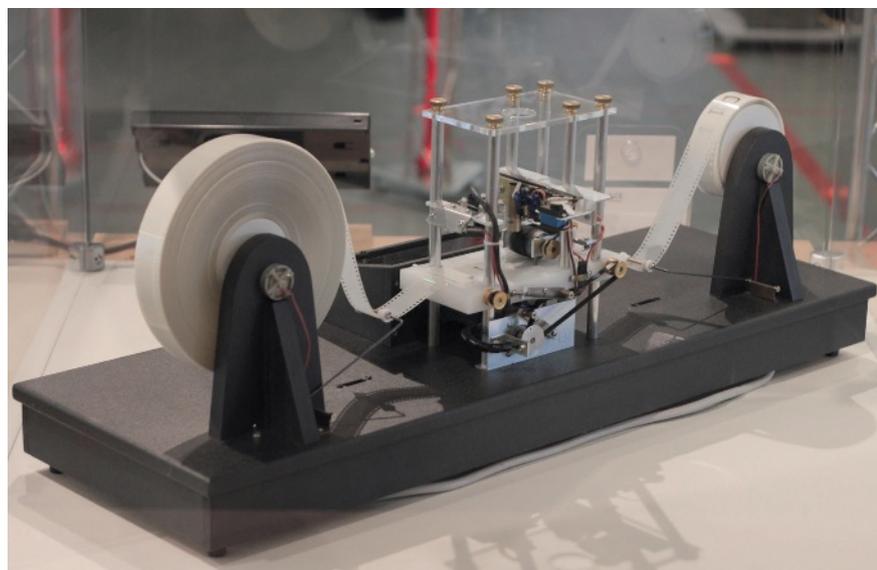
Ce résultat a une conséquence surprenante, car les machines de Turing sont associées à la notion d'indécidabilité. En 1931, le mathématicien autrichien Kurt Gödel a démontré que, dans un cadre axiomatique donné, certains énoncés mathématiques sont indécidables: il est impossible de prouver qu'ils sont vrais ou faux. Turing a transposé ce concept à certaines situations plus physiques. Il s'est intéressé au «problème de l'arrêt» qui consiste à déterminer, à partir de la description d'un programme et de ses données en entrée, si le programme terminera son calcul en un temps fini ou s'il tournera indéfiniment. Turing a démontré qu'il était impossible de concevoir un algorithme général qui résout le problème de l'arrêt quel que soit le programme donné. Le problème de l'arrêt est donc indécidable pour les machines de Turing.

Ainsi, Eva Miranda et ses collègues ayant montré que leur système fluide était capable de simuler une machine de Turing universelle, ce système doit présenter une part d'indécidabilité. Les chercheurs ont établi une correspondance précise entre le problème de l'arrêt et le calcul des trajectoires du fluide. À long terme, le comportement du fluide est donc indécidable: aucun algorithme ne peut garantir qu'une particule fluide, quelle qu'elle soit, passera ou non à un endroit donné en un temps fini.

Qu'en est-il du programme de Terence Tao pour prouver la régularité ou non des équations de Navier-Stokes? Eva Miranda et ses collègues ont montré que certains écoulements pouvaient en principe être utilisés pour concevoir une machine de Turing universelle. «Notre démonstration a un prix: elle fonctionne dans une géométrie particulière, où les distances sont déformées et qui ne correspond pas à la géométrie euclidienne de notre monde. Nous travaillons à alléger cette contrainte», souligne Eva Miranda. La conception d'une telle machine capable de concentrer de l'énergie en un point pour former des singularités dans notre monde réel reste une question ouverte... ■

Sean Bailly

R. Cardona *et al.*, *PNAS*, vol. 118(19), article e2026818118, 2021



Exemple de réalisation d'une machine de Turing. Elle lit les données sur le ruban et, selon les règles de l'algorithme implémenté, agira d'une façon spécifique.

## BIOLOGIE CELLULAIRE

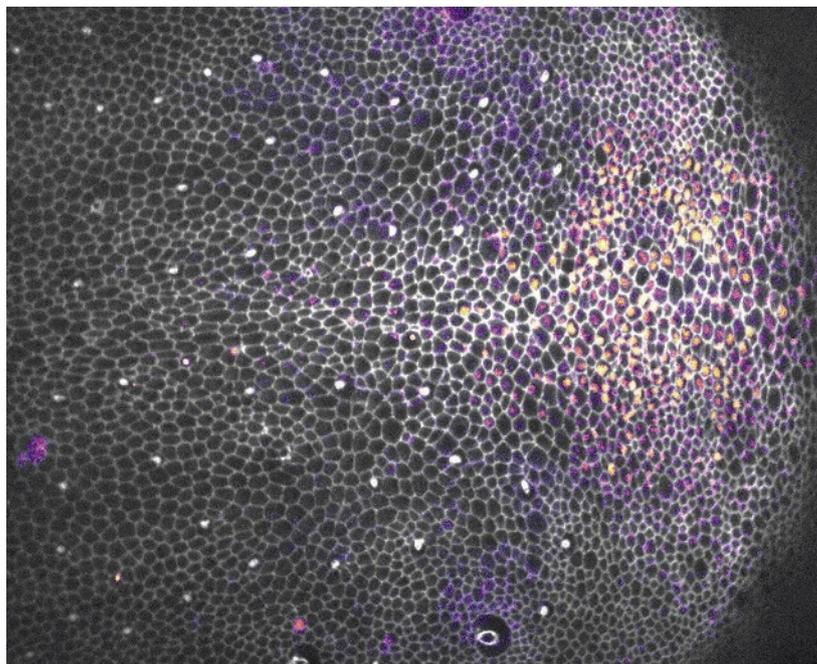
# LA COHÉSION GARANTIE MALGRÉ LA MORT DE CELLULES

Dans certains tissus, un mécanisme contrôle la mort des cellules voisines pour assurer la cohésion et l'imperméabilité tissulaire.

**P**lus de dix milliards de cellules mortes sont éliminées chaque jour dans l'intestin d'un adulte, sans qu'apparaissent des brèches qui compromettraient le fonctionnement et l'intégrité de cet organe. Pourtant, le maintien de la cohésion des épithéliums, tissus composés de cellules étroitement juxtaposées qui jouent un rôle de barrière physique et chimique dans de nombreuses parties du corps (comme l'épiderme ou des muqueuses internes), est encore mal compris. On savait que lors de la mort d'une cellule, celle-ci est expulsée par extrusion et de nouvelles jonctions se forment rapidement entre les cellules restantes. Léo Valon et ses collègues, de l'institut Pasteur, à Paris, viennent de montrer qu'au cours de ce mécanisme, les cellules en état de mort cellulaire protègent transitoirement leurs voisines. Elles les empêchent ainsi de connaître le même sort qu'elles, ce qui évite la formation d'un trou dans le tissu.

Grâce à un outil optogénétique permettant de déclencher l'élimination individuelle de cellules grâce à un signal lumineux, les chercheurs ont montré chez la pupe de drosophile qu'induire la mort simultanée d'au moins trois cellules voisines aboutit à une perte de cohésion de l'épithélium. Même si des mécanismes de cicatrisation se mettent en place, une perte d'imperméabilité a bien lieu. De tels événements à répétition peuvent par exemple conduire dans l'intestin à des inflammations chroniques. «L'étude de l'organisation de la mort cellulaire dans le temps et dans l'espace, dans un tissu en renouvellement, nous a permis de comprendre que la distribution spatiale de la perte cellulaire est cruciale», explique Romain Levayer, qui a conduit ces recherches. Or les éliminations groupées ne se produisent jamais dans l'organisme, contrairement à ce qui serait attendu statistiquement en l'absence d'un mécanisme protecteur.

Grâce à des marqueurs fluorescents donnant accès à des informations à l'échelle de la cellule, les chercheurs ont constaté que le mécanisme protecteur en jeu était lié à l'activation, dans les cellules adjacentes de la cellule morte, de la voie de signalisation EGFR-ERK (déjà connue pour son rôle dans la régulation



Dans ce tissu épithélial de drosophile en fausses couleurs, on distingue les contours des cellules (en gris) et l'activation de la voie EGFR-ERK (par un gradient jaune-violet), qui assure la cohésion du tissu.

des cellules souches dans l'intestin et dans la survie cellulaire). Cette activation serait effective pendant au moins une heure après l'extrusion, ce qui laisse le temps aux cellules restantes d'établir des jonctions, garantissant ainsi la continuité de l'étanchéité. D'après les expériences de Romain Levayer et ses collègues, l'allumage de cette voie de signalisation serait mécanique, dû à la déformation liée à l'extrusion de la cellule morte.

Ces résultats soulignent l'incroyable capacité d'autoorganisation des tissus biologiques, dans un processus qui semble avoir été conservé au cours de l'évolution. Ainsi, l'équipe d'Olivier Pertz, de l'université de Berne, en Suisse, a observé ce même phénomène de protection lié à une activation locale de la voie EGFR-ERK dans des cellules humaines en culture. Les chercheurs comptent étudier la piste d'un éventuel défaut d'activation de ce mécanisme protecteur local dans l'intestin de patients souffrant de maladies inflammatoires chroniques. ■

Noëlle Guillon

L. Valon *et al.*, *Developmental Cell*, vol. 56(12), pp. 1700-1711, 2021; P. A. Gagliardi *et al.*, *ibid.*, pp. 1712-1726

ASTROPHYSIQUE

## FILAMENTS EN ROTATION ?

Les filaments cosmiques sont parmi les plus grandes structures de l'Univers; ils s'étendent typiquement sur 100 à 250 millions d'années-lumière. En 1998, Christophe Pichon et Francis Bernardeau, de l'institut d'astrophysique de Paris, ont prédit théoriquement que les filaments présentent une structure interne en rotation, en raison des conditions de leur formation. Cela restait à confirmer par l'observation. Noam Libeskind, de l'institut Leibniz d'astrophysique, à Potsdam, en Allemagne, et ses collègues ont mesuré le décalage spectral moyen dû à l'effet Doppler des galaxies dans plus de 17000 filaments. Ils ont montré que la distribution et la dynamique des galaxies sont compatibles avec un mouvement de rotation autour de l'axe des filaments. ■ S. B.

P. Wang *et al.*, *Nature Astronomy*, 14 juin 2021

BIOPHYSIQUE

## Ô GUÉPARD, SUSPENDS TON VOL

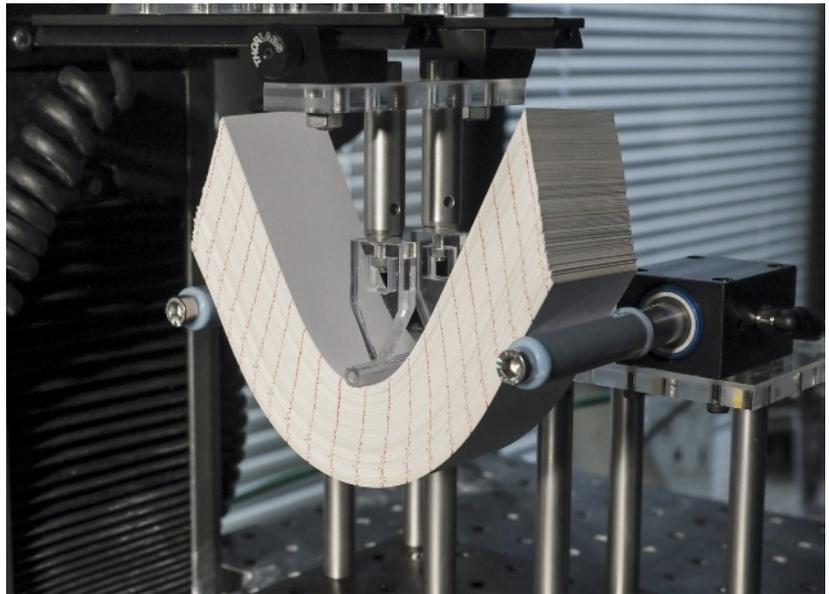
Avec ses pointes de vitesse à 110 kilomètres par heure, le guépard est le plus rapide des animaux terrestres. Tomoya Kamimura, de l'institut de technologie de Nagoya, et ses collègues ont passé au crible la course du prédateur, à travers un modèle mathématique tenant compte de ses caractéristiques physiques. La morphologie du guépard lui permet en effet de maîtriser une forme particulière de galop, dans laquelle l'animal se propulse successivement avec ses pattes avant et arrière. Entre ces propulsions, il se retrouve donc suspendu en l'air deux fois par foulée, contre une seule chez la plupart des quadrupèdes. La souplesse de la colonne vertébrale du félin serait l'élément crucial qui rend cette course redoutablement efficace. La grande amplitude d'incurvation de cette partie du squelette permet au guépard d'absorber plus facilement les chocs avec le sol, et donc de triompher de ses proies au sprint. ■

Valentin Rakovsky

T. Kamimura *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 11, article 9631, 2021

PHYSIQUE

## PLIER UN LIVRE, UN MODÈLE DE FROTTEMENTS



L'empilement de feuilles reposant sur deux supports est soumis à une flexion par une force appliquée au milieu de la pile par le dessus.

En 2015, Frédéric Restagno, du laboratoire de physique des solides, à Orsay, et ses collègues ont montré qu'en entrelaçant les pages de deux annuaires il était possible de créer un lien assez fort pour soulever une voiture avec une grue. Le secret de cette démonstration spectaculaire: les forces de frottements entre les pages en contact. Samuel Poincloux, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, et ses collègues ont modélisé ces forces de frottement quand on plie un livre. Cet objet présente *a priori* une certaine simplicité avec un empilement régulier de pages de même épaisseur. Une structure que l'on retrouve à de nombreuses échelles, des strates géologiques soumises à des déformations aux empilements de couches de graphène.

Les chercheurs ont d'abord étudié la réponse du livre en chargement et en déchargement (lors de l'application et du relâchement d'une force). Ils ont mesuré simultanément la force nécessaire à cette déformation ainsi que la forme que prend le livre. Ils ont ensuite modélisé ce système déformé afin d'estimer la quantité d'énergie dissipée par les frottements. Bien que ces forces soient très difficiles à calculer quand le système fait intervenir de l'élasticité, une géométrie non linéaire ou encore un nombre important de surfaces de contact, Samuel Poincloux et ses collègues ont réussi à décrire la réponse non linéaire de cet objet, en bon accord avec les expériences. La prochaine étape consistera à étudier la dynamique de cette structure, ses déformations au cours du temps ou sa réaction en cas d'un impact.

Grâce à ce modèle, les chercheurs comptent l'utiliser comme point de départ pour étudier et concevoir des objets plus complexes tels que des amortisseurs ou des matelas, dans lesquels les frottements jouent un grand rôle. ■ S. B.

S. Poincloux *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 126, article 218004, 2021.

# DES « PLAQUES TECTONIQUES » SUR VÉNUS

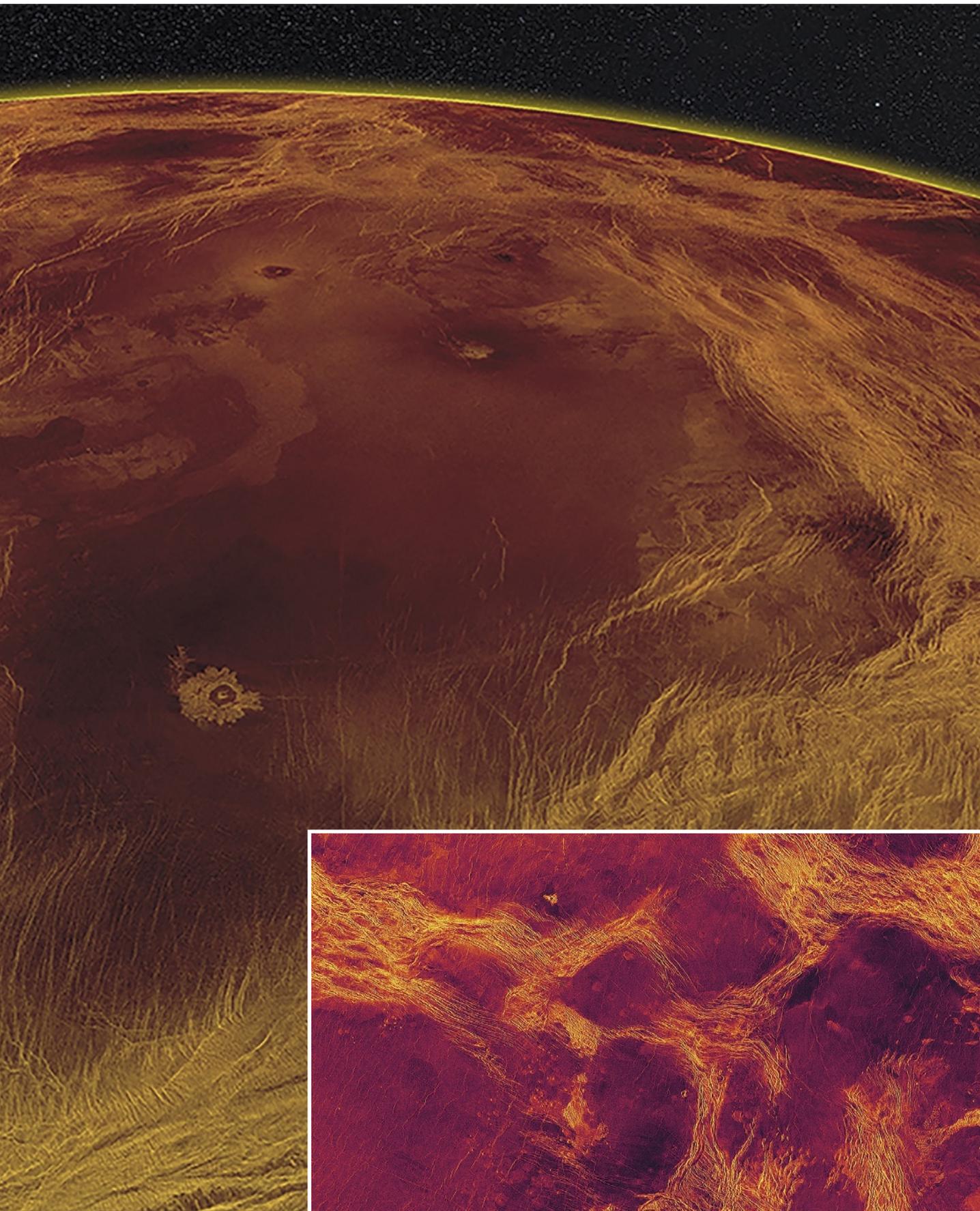
**E**n analysant les mesures radar effectuées entre 1989 et 1994 par la sonde *Magellan*, Paul Byrne, de l'université d'État de Caroline du Nord, aux États-Unis, et ses collègues ont identifié des structures qui ressemblent à de petites plaques tectoniques récentes. Ils ont observé des roches déformées, des sortes de crêtes ridées, délimitant de vastes régions larges de 100 à 1 000 kilomètres typiquement (*campus Niüwa ci-contre, et Lavinia Planitia en médaillon*). Ces structures rappellent celles de blocs de glace sur un lac gelé, qui frottent, s'entrechoquent et glissent les uns contre les autres. De la même façon que la glace subit sur les bords des contraintes mécaniques importantes, les blocs de croûte vénusienne seraient déformés sur leurs pourtours.

Grâce à des simulations numériques, les planétologues ont montré que ces observations s'expliquent parfaitement si l'on suppose que les blocs se déplacent sous l'influence d'une dynamique interne assez lente dans le manteau. D'après l'équipe, les mouvements de ces blocs pourraient être récents. En effet, certaines plaines de lave jeunes présentent ces déformations caractéristiques, qui sont postérieures à leur formation. Les chercheurs n'excluent pas que cette activité géologique soit encore à l'œuvre.

« Cette étude montre aussi que la "tectonique des plaques continue" sur Terre et la "lithosphère stagnante" de la Lune ne sont que deux cas limites d'un continuum de régimes dynamiques », note Anne Davaille, du laboratoire Fast, à Orsay. « Vénus nous offre une occasion unique d'observer et comprendre un autre régime, qui est peut-être celui du passé de la Terre, mais peut-être aussi celui de son avenir, si notre planète perdait son eau et la température clémente de sa surface. » ■ **S. B.**

P. K. Byrne *et al.*, *PNAS*, vol. 118(26), article e2025919118, 2021





© Paul K. Byrne et Sean C. Solomon

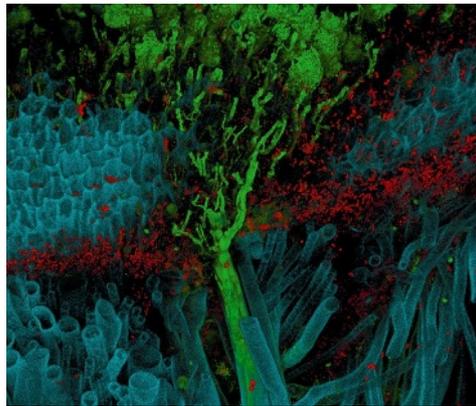
BIOLOGIE VÉGÉTALE

## PLANTES ET CHAMPIGNONS, UNE SYMBOSE ANCIENNE

Les plantes terrestres sont apparues il y a environ 450 millions d'années. Les biologistes soupçonnent que leur symbiose avec des champignons a joué un rôle crucial dans la sortie des eaux des plantes, mais le mécanisme qui a conduit à cette association reste encore mal compris. Mélanie Rich, de l'université de Toulouse, et ses collègues apportent un élément de réponse en révélant que les premières plantes terrestres fournissaient des lipides à des champignons.

L'association des plantes et des champignons se produit au niveau des racines. Les champignons exploitent pour la plante les ressources du sol en échange de sucres produits par photosynthèse et – on le sait depuis 2017 – de lipides. Pour déterminer l'ancienneté de ce transfert lipidique, l'équipe s'est intéressée à une hépatique, une plante terrestre très éloignée des plantes à fleurs.

Après lui avoir inoculé un champignon, les chercheurs ont analysé l'expression du génome de la plante au cours du temps. Ils ont ainsi observé que la symbiose déclenchait différents processus, dont la production de lipides. De plus, parmi les gènes exprimés, près d'une cinquantaine étaient très semblables à ceux de



Symbiose du champignon *Rhizophagus irregularis* (en vert) et de l'hépatique *Marchantia paleacea* (en cyan) ses cellules racinaires, en rouge ses chloroplastes, organites impliqués dans la synthèse des lipides.

plusieurs plantes à fleurs, signe que des mécanismes similaires sont à l'œuvre et existaient donc déjà il y a 450 millions d'années chez leur ancêtre commun.

Par ailleurs, chez cinq plantes à fleurs et l'hépatique, l'équipe a identifié un gène, *WRI*, qui intervient dans la régulation de l'échange de lipides. Ce gène étant par ailleurs absent du génome de toutes les algues testées, il serait apparu lors de la sortie des eaux des plantes et aurait été conservé tout au long de leur diversification ultérieure. ■

Isabelle Bellin

M. K. Rich *et al.*, *Science*, vol. 372, pp. 864-868, 2021

PHYSIQUE

## DES ÉLECTRONS À LA LOUPE

En 1909, l'Américain Robert Millikan mesurait la charge électrique élémentaire portée par un électron, ce qui lui valut le prix Nobel de physique en 1923. Son expérience consistait à pulvériser des gouttes d'huile ionisées dans un champ électrostatique. La modification de leur vitesse de chute due à la force électrostatique étant proportionnelle à leur charge, Millikan avait relevé que les valeurs d'ionisation des gouttes étaient toutes des multiples entiers d'une même charge unitaire. Cette expérience a été revisitée par Javier Marmolejo et ses collègues, de l'université de Göteborg, en Suède, pour voir à l'œil nu ce phénomène microscopique. Grâce à un piège optique qui maintient la goutte d'huile en lévitation et tandis qu'une lentille projette sur un plan gradué la lumière d'un laser traversant la goutte, les chercheurs

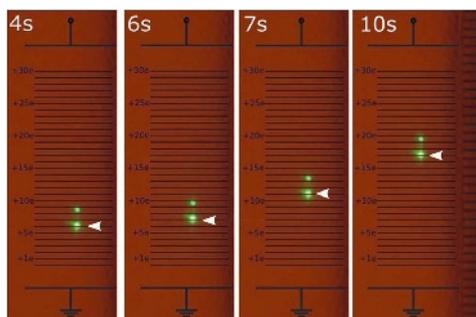


Schéma de l'expérience de la goutte d'huile de Millikan, revisitée par Javier Marmolejo et ses collègues. Dans un piège optique et électrostatique, la goutte d'huile est bombardée de particules alpha, et saute d'un état stable à l'autre, ses déplacements étant observés à la lentille.

ont observé la projection lumineuse se déplacer de quelques millimètres quand la goutte d'huile sautait d'un état stable à l'autre en absorbant des électrons un à un. ■ V. R.

J. Marmolejo *et al.*, *Scientific Reports*, vol.11, article 10703, 2021

EN BREF

### Le coelacanthe centenaire

Le coelacanthe, poisson rare des eaux de l'océan Indien, vivrait cent ans, et non pas une vingtaine comme supposé jusqu'ici. Kélig Mahé, de l'Ifremer, et ses collègues ont examiné des écailles appartenant à 27 spécimens et y ont relevé des marques suggérant qu'ils avaient vécu jusqu'à 84 ans. Cette espérance de vie est plus cohérente avec le cycle de vie et le métabolisme très lent du poisson, mais est aussi symptomatique des espèces vulnérables aux changements de leur écosystème.

*Current Biology*, 17 juin 2021

### L'exoplanète qu'on n'attendait pas

Laetitia Delrez, de l'université de Liège, et ses collègues ont été surpris en observant l'étoile Nu<sup>2</sup> Lupi. Le télescope spatial *Cheops* y scrutait deux exoplanètes quand une troisième est passée devant l'astre. On connaissait depuis 2019 l'existence de cette exoplanète grande comme 2,5 fois la Terre. Mais, plus éloignée de Nu<sup>2</sup> Lupi que les deux premières et accomplissant sa révolution en 107 jours, l'observation de son transit était peu probable. Un coup de chance qui permettra d'en savoir plus sur ce corps.

*Nature Astron.*, 28 juin 2021

### Mêmes couleurs sur tous les écrans

Finis les problèmes de fidélité des couleurs sur vos photos ? Min Qiu, de l'université du Lac de l'Ouest, en Chine, et ses collègues ont mis au point un algorithme pour les corriger. Sur nos écrans, les couleurs sont encodées comme un mélange de rouge, de vert et de bleu. Cet algorithme les convertit dans un système universel, celui de la Commission internationale de l'éclairage, qui tient compte des propriétés perceptives de l'œil humain et qui ne dépend pas de l'appareil utilisé.

*Optica*, 1<sup>er</sup> juillet 2021

## SE REPÉRER COMME LA CHAUVE-SOURIS

Les chauves-souris ou les cétacés s'orientent grâce à l'écholocation, fondée sur la réflexion des sons sur les surfaces environnantes. Mais cette technique peut aussi être maîtrisée par les humains, comme les Américains Daniel Kish et Ben Underwood, aveugles depuis leur jeunesse mais capables de faire du vélo ou des acrobaties. Lore Thaler et ses collègues, de l'université de Durham, au Royaume-Uni, ont testé l'aptitude de voyants et de non-voyants à se repérer grâce à l'écho du claquement de leur langue. Après des heures d'entraînement, tous étaient aptes à l'écholocation, indépendamment de leur cécité et de leur âge. Les chercheurs y voient une piste pour faciliter l'intégration dans la société des non-voyants, mais aussi des personnes dont la vue décline. ■

V. R.

L. Norman *et al.*, *Plos One*, vol. 16(6), article e0252330, 2021

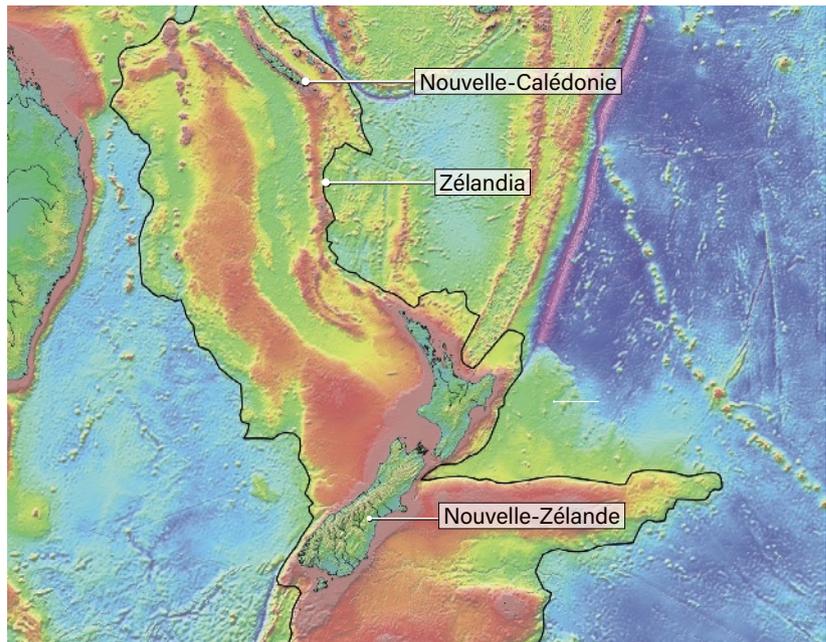
## TRUFFIÈRES INTESTINALES

Pour cuisiner la truffe, on manque rarement d'imagination. Mais il en faut aussi pour la faire se reproduire : ce champignon pousse sous terre, nourri par des racines d'arbres. Privées de vent, les spores de truffe profitent des animaux qui les consomment pour se disséminer dans la nature. Francesca Ori, de l'université de l'Aquila, en Italie, Marc-André Selosse, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et leurs collègues ont constaté l'efficacité d'un mycophage très discret, la limace. Les spores de truffes germent en effet bien plus facilement après un séjour dans l'intestin du gastéropode qu'après une digestion par une souris, autre consommateur de truffes bien connu. La limace aurait donc un rôle plus important qu'on ne lui prêtait dans le cycle de vie des truffes : elle diffuserait celles-ci à plus courte portée que les mammifères, et assurerait leur diversité génétique sur de petites distances. ■

V. R.

F. Ori *et al.*, *Fungal Biology*, en ligne le 15 mai 2021

## LES ORIGINES GÉOLOGIQUES DE ZÉLANDIA



Carte topographique du continent Zélandia.

En décembre 1642, à la recherche d'un continent mythique, l'explorateur néerlandais Abel Tasman est le premier Européen à apercevoir la Nouvelle-Zélande – habitée depuis le XIII<sup>e</sup> siècle par les Maoris –, mais repart sans avoir eu le temps de l'explorer. Sans le savoir, il venait bel et bien de poser les yeux sur un continent disparu. Il faudra attendre 375 ans, en 2017, pour qu'une équipe internationale le confirme : il existe un « huitième continent », baptisé Zélandia, ou Te Riu-a-Māui dans la langue maorie. Dans une étude récente, la géologue Rose Turnbull, de l'institut GNS Science à Dunedin, en Nouvelle-Zélande, et ses collègues ont montré que ce microcontinent est en partie constitué de roches âgées de 1 milliard d'années.

Depuis la découverte de Zélandia, les chercheurs estimaient l'âge de ses plus vieilles roches à 500 millions d'années. Mais les roches granitiques du Fiordland et de l'île Stewart, en Nouvelle-Zélande, livrent une tout autre histoire, bien plus ancienne. L'équipe de Rose Turnbull a étudié des grains de zircon contenus dans ces granits. Ce minéral est capable de résister à de nombreux événements géologiques pendant des milliards d'années et peut ainsi livrer des informations sur l'époque reculée et les conditions dans lesquelles il s'est cristallisé. La signature isotopique des zircons révèle ainsi la présence de roches vieilles de 1 milliard d'années en profondeur, dans la croûte située sous le Fiordland et l'île Stewart. Les géologues associent ces roches au supercontinent Rodinia, puisqu'il s'est formé il y a 1,1 milliard d'années avant de se disloquer il y a 750 millions d'années. Cela fait de Zélandia le lien manquant entre la Chine du sud, l'Australie et l'Amérique du Nord dans le puzzle géologique qu'était ce supercontinent. ■

William Rowe-Pirra

R. E. Turnbull *et al.*, *Geology*, en ligne le 12 mai 2021

## CLIMATOLOGIE

# DEUX SYSTÈMES DE PLUIES POUR LE SAHARA VERT

Il y a 6 000 ans, le Sahara était fortement végétalisé, ce que la mousson africaine ne suffit pas à expliquer. La région aurait aussi bénéficié des pluies d'un régime méditerranéen.

**D**e larges étendues de steppes, devenues en quelques millénaires le plus vaste désert du monde: il y a 6 000 ans, avant de subir le plus grand changement environnemental naturel de l'histoire climatique récente, le Sahara était recouvert de verdure. La mousson africaine, qui prend sa source dans le golfe de Guinée, remontait alors bien plus au nord qu'aujourd'hui. Mais aucun modèle jusqu'ici n'expliquait comment elle contribuait à la végétalisation de tout le Sahara à elle seule. Rachid Cheddadi, de l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier, et ses collègues ont proposé un nouveau modèle mêlant mousson et pluies provenant du bassin méditerranéen afin d'expliquer la pérennité du Sahara vert.

Les chercheurs ont commencé par retracer l'évolution du climat nord-saharien depuis 18 500 ans. Pour ce faire, ils ont étudié une carotte sédimentaire de 8,5 mètres de long, prélevée dans le lac Tisliit, dans l'Atlas marocain. Ce lac se trouve à 32° de latitude Nord, bien au-delà des 24° que la mousson africaine aurait atteints, au maximum, à l'époque du Sahara vert, il y a entre 12 000 et 5 000 ans.

Les grains de pollen contenus dans la carotte indiquent qu'à cette époque, la végétation était de type méditerranéen, et donc soumise au même régime de pluies que de nos jours au nord de l'Afrique, avec des précipitations en hiver et des étés secs. De plus, l'absence de traces de plantes tropicales ou subtropicales confirme que la mousson n'arrosait pas le nord du Sahara durant l'été. Les chercheurs ont donc développé un scénario climatique présentant une extension des pluies d'hiver vers le sud, qui engendrait une double saison de pluies dans le Sahara, et l'ont testé au moyen de plusieurs simulations. Celles qui n'incluaient que la mousson comme source d'humidité suggéraient des paysages semi-désertiques, dont la répartition de la végétation n'était pas compatible avec les données fossiles. Mais le scénario climatique à deux systèmes de pluies serait, lui, cohérent avec les observations disponibles.

D'après ce scénario, la mousson remontait jusqu'à 24° de latitude nord, et étendait



Au nord du Sahara, comme sur les rives du lac Tisliit, les pluies méditerranéennes descendaient suffisamment loin vers le sud pour laisser se développer une végétation stable il y a 6 000 ans.

## 325 millimètres

**C'EST LA QUANTITÉ DE PRÉCIPITATIONS ANNUELLES QUI ONT PERMIS DE VERDIR LE SAHARA (ELLES SONT AUJOURD'HUI DE 25 MILLIMÈTRES PAR AN). MAIS POUR QUE LA VÉGÉTATION SE STABILISE, LES PLUIES DEVAIENT ÊTRE ÉTALÉES RÉGULIÈREMENT DANS L'ANNÉE, ET NON CONCENTRÉES SUR UNE SEULE SAISON.**

jusqu'à le biome sahélien, tandis que les pluies venues de la Méditerranée maintenaient une certaine humidité durant l'année en pénétrant vers le sud jusqu'à une latitude de 18°. Il en a découlé une zone intermédiaire soumise aux deux sources de précipitations, avec une cohabitation des deux types de végétation. Avec des pluies en été, puis en hiver et au printemps, cette région bénéficiait d'une meilleure répartition des précipitations dans l'année, et de périodes de sécheresse bien plus brèves.

Ces deux types de pluies ont irrigué la région pendant quelques millénaires (leur intensité culminant entre 10 500 et 8 500 ans avant notre ère), puis ont décliné il y a 6 000 ans. Aujourd'hui, la mousson ne remonte plus qu'à 15° au nord de l'équateur, et les précipitations méditerranéennes ne fertilisent plus qu'une étroite bande de terre le long des côtes du nord de l'Afrique. Entre ces deux zones, désormais bien disjointes, le Sahara vert a depuis laissé sa place aux regs et aux ergs. ■ **V. R.**

R. Cheddadi *et al.*, *PNAS*, vol. 118(23), article e2024898118, 2021

## EN BREF

### Anticiper les formes sévères de dengue

Dans certains cas, une deuxième infection par le virus de la dengue provoque des formes graves. En étudiant les anticorps produits par le système immunitaire après la première infection, Stylianos Bournazos, de l'université Rockefeller, aux États-Unis, et ses collègues ont montré qu'il y aurait un lien avec un taux élevé d'anticorps dépourvus d'un sucre, le fucose. Ce critère permettrait d'évaluer les risques pour un patient de contracter une forme hémorragique de la maladie.

Science, 4 juin 2021

### Un nouveau type de supernova

Prédites depuis plusieurs décennies, les supernovæ dites « à capture d'électron », pour les étoiles 8 à 10 fois plus massives que le Soleil, n'avaient jamais été observées. C'est chose faite avec SN 2018zd. Daichi Hiramatsu, de l'observatoire de Las Cumbres, aux États-Unis, et ses collègues ont ainsi confirmé ce mécanisme où, lors de l'effondrement de l'étoile, la pression élevée conduit certains noyaux lourds à capturer des électrons, ce qui libère de grandes quantités d'énergie.

Nature Astron., 28 juin 2021

### Se réchauffer pour mieux nager

Quelques poissons marins, tels certains requins et thons, ont le pouvoir de réchauffer certaines parties de leur corps. Pour quel avantage ? Une nage plus rapide ou la capacité de vivre dans des eaux présentant de plus grandes différences de températures ? Les travaux de Lucy Harding, du Trinity College de Dublin, et ses collègues confortent la première piste : ces poissons se déplacent en moyenne 1,6 fois plus vite que des espèces apparentées à sang froid, un avantage certain pour la prédation.

Funct. Ecol., 1<sup>er</sup> juillet 2021

## PRÉHISTOIRE

# LA SÉPULTURE DE MTOTO, LA PLUS ANCIENNE D'AFRIQUE

Il y a 78 000 ans, un garçonnet de 3 ans, que l'on a surnommé Mtoto, a été enterré avec soin dans la grotte de Panga ya Saidi, au Kenya. Sa découverte illustre l'évolution d'*Homo sapiens* en Afrique entre 320 000 et 30 000 ans, période désignée sous l'abréviation MSA (*Middle Stone Age*, « âge de la pierre moyen ») : ce garçonnet était un *Homo sapiens*, mais avait des traits d'autres espèces humaines.

L'équipe menée par María Martín-Torres, du Centre national de recherche sur l'évolution humaine à Burgos, en Espagne, étudie la grotte de Panga ya Saidi. Ses datations montrent que des chasseurs-cueilleurs l'ont occupée depuis 78 000 ans et jusqu'il y a 500 ans. C'est dans l'une des couches les plus profondes que les chercheurs ont trouvé la tombe de Mtoto, qu'ils ont prélevée pour l'étudier en laboratoire.

Il en ressort notamment que le cadavre inhumé a été partiellement enveloppé dans un matériau périssable. Son anatomie osseuse en fait un enfant *sapiens*. Mais certains traits subtils de ses dents le rapprochent d'autres formes humaines. Le polygone occlusal – la surface de



Mtoto signifie « gamin » en Swahili. Cette restitution d'artiste illustre comment ce garçonnet, membre d'un groupe de chasseurs-cueilleurs africains, a été enterré.

broyage – de sa première molaire est par exemple de forme différente de celui observé sur des *H. sapiens*. Dans l'ensemble, les dents de Mtoto sont *sapiens*, sauf certaines qui se rapprochent des dents néandertaliennes.

La sépulture de Mtoto, celle d'un garçonnet *sapiens* doté de quelques traits archaïques, est la plus ancienne connue en Afrique. Elle prouve que dans ce continent, *H. sapiens* enterrait déjà des morts avec soin il y a 78 000 ans. Sans doute pour les protéger des charognards, mais aussi, imagine-t-on, dans le cadre de pratiques à caractère symbolique liées au deuil. ■

François Savatier

M. Martín-Torres et al., *Nature*, vol. 593, pp. 95-100, 2021

## HYDROGRAPHIE

# UN JOUR PAR AN À SEC

Tous les cours d'eau ne coulent pas 365 jours par an. Certains tarissent quelques jours dans l'année puis retrouvent du débit. Mathis Messenger, de l'Inrae et de l'université McGill, au Canada, et ses collègues ont réalisé une première cartographie mondiale des ruisseaux et rivières non pérennes. Cette étude montre que 51 à 60% des cours d'eau du globe seraient naturellement intermittents. Et même parmi ceux dont le débit dépasse 0,1 mètre cube d'eau par seconde, 41% s'assèchent un jour par an en moyenne. Dans de nombreux cas, ils ne tarissent pas chaque année, mais restent à sec plus d'un jour quand cela se produit. Ces cours d'eau intermittents sont présents sous tous les climats, y compris en amont de grands fleuves comme le Niger, le Nil ou l'Indus. Et comme les rivières non pérennes donnent naissance à des écosystèmes différents des rivières pérennes, les



La plupart des cours d'eau du monde cessent naturellement de couler au moins un jour par an en moyenne.

chercheurs espèrent que leurs données inciteront à une meilleure prise en compte du caractère intermittent des cours d'eau dans les politiques de gestion des ressources. ■ V. R.

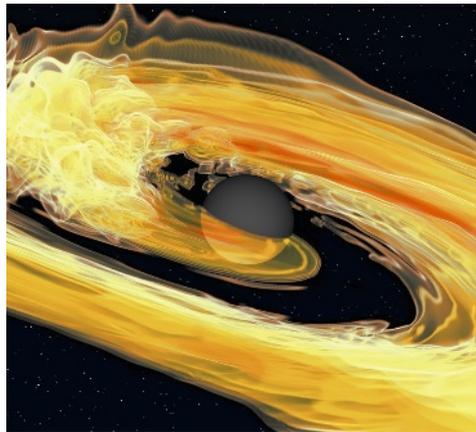
M. Messenger et al., *Nature*, vol. 594, p. 391-397, 2021

ASTROPHYSIQUE

## LA FUSION QUI MANQUAIT

Le 14 septembre 2015, grâce aux deux interféromètres laser géants de *Ligo*, aux États-Unis, la collaboration *Ligo-Virgo* détectait les ondes gravitationnelles émises par la fusion de deux trous noirs. C'était la première fois que l'on mettait en évidence directement ces vibrations de l'espace-temps, prédites par Albert Einstein cent ans plus tôt. Le 17 août 2017, les chercheurs enregistraient, grâce aussi à l'interféromètre géant *Virgo*, situé en Italie, un signal provenant de la coalescence de deux étoiles à neutrons. Mais jusqu'à présent, la détection d'une autre configuration manquait à l'appel: la fusion d'un trou noir et d'une étoile à neutrons. C'est désormais chose faite, et plutôt deux fois qu'une! Après un an d'analyse, la collaboration *Ligo-Virgo* a confirmé avoir observé une telle configuration le 5 janvier 2020 (avec un trou noir de 9 masses solaires et une étoile à neutrons de 1,9 masse solaire), et une seconde dix jours plus tard (avec des masses d'environ 6 et 1,5 masses solaires respectivement).

Cette configuration est d'autant plus intéressante qu'elle a été prédite théoriquement depuis des décennies mais qu'on ne connaît pas de système binaire composé de ces deux objets compacts dans la Voie lactée. «Autre intérêt, si



Simulation de la fusion d'un trou noir et d'une étoile à neutrons avec destruction par effet de marée.

l'étoile à neutrons tourne très vite sur elle-même, typiquement de l'ordre de 1000 tours par seconde, elle émet un faisceau de rayonnement avec une très grande régularité, un peu comme un phare (on parle de pulsar). On aurait donc une horloge ultraprécise dans l'environnement proche d'un trou noir, une sonde idéale pour tester la relativité générale», note Astrid Lamberts, de l'observatoire de la Côte d'Azur, à Nice. ■

S. B.

R. Abbott et al., *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 915, L5, 2021

CLIMATOLOGIE

## TOURBIÈRES ET BILAN CARBONE

Les tourbières sont de véritables éponges à carbone. En empêchant la matière organique de se décomposer complètement, ces milieux humides et acides stockent entre un quart et un tiers du carbone organique des sols de la planète, pour seulement 3% de sa surface émergée. Mais elles peuvent aussi relâcher ce carbone quand elles sont asséchées et converties en terres cultivables. Ce phénomène, mal quantifié, n'est pas inclus dans les modèles d'émissions mondiales de carbone, mais Chunjing Qiu, de l'université Paris-Saclay, et ses collègues en proposent une première estimation en reconstituant l'expansion des surfaces cultivées, dans l'hémisphère Nord et depuis 850. Les tourbières restées intactes auraient stocké 43 milliards de tonnes de carbone depuis le 19<sup>e</sup> siècle, mais d'après le scénario médian des chercheurs, celles



Les tourbières intactes ne compensent pas les émissions de carbone dues à celles converties en terres agricoles.

reconverties en terres agricoles en auraient relâché 72 milliards. Ce premier modèle inciterait donc à rehausser le bilan carbone des activités humaines liées à la transformation des sols. ■

V. R.

C. Qiu et al., *Science Advances*, vol. 7(23), article eabf1332, 2021

EN BREF

### Plus solide que le kevlar

Le carbone est friable et cassant dans une mine de crayon, mais Carlos Portela, du MIT, aux États-Unis, et ses collègues l'ont réagencé dans une structure tridimensionnelle très déformable. Grâce à une nanostructure précise, les chercheurs ont rendu une couche de carbone de l'épaisseur d'un cheveu résistante à des impacts de microparticules projetées à vitesse supersonique. Les concepteurs de ce nanomatériau comptent encore l'améliorer, mais il est déjà plus résilient et léger que le kevlar.

*Nature Materials*, 24 juin 2021

### Ces gènes qui protègent les arbres

Pour comprendre pourquoi certains arbres résistent mieux que d'autres à la sécheresse (outre le facteur génétique), Mamadou Dia Sow, de l'Inrae, et ses collègues ont comparé l'expression des gènes chez des peupliers soumis à différents niveaux de sécheresse. Ils ont constaté que ce stress induit des modifications épigénétiques qui influent sur l'expression de gènes liés à deux voies hormonales déjà connues pour intervenir dans la réponse des plantes à la sécheresse.

*New Phytologist*, 15 juin 2021

### Matins lumineux, matins heureux

Vous vous sentez déprimé quand le jour tarde à se lever l'hiver ? Les souris aussi. Iwona Olejniczak, de l'université de Fribourg, en Suisse, et ses collègues ont testé les effets de la luminothérapie sur ces rongeurs et ont constaté que l'exposition à la lumière deux heures avant le lever du jour avait sur eux un effet antidépresseur. Spécifiquement à ces heures, la lumière activerait le gène *Period1* du cycle circadien dans une région du cerveau liée à l'humeur.

*Plos Genetics*, 8 juillet 2021

## ÉTHOLOGIE

### UNE QUESTION DE CONFIANCE

**D**'autres espèces que la nôtre enseignent à leurs enfants à ne pas faire confiance aux inconnus. Filipe Cunha et Michael Griesser, de l'université de Zurich, ont observé que le mésangeai imitateur, un oiseau des forêts de Sibérie, apprenait aussi à se méfier de ses congénères. D'ordinaire, il crie pour avvertir ses proches de la présence d'un prédateur. Mais d'autres mésangeais mal intentionnés emploient ce signal pour effrayer leurs semblables, les faire fuir et voler leur nourriture. Cette espèce a alors appris à distinguer les cris de membres de son groupe, de voisins ou d'inconnus, et réagit moins promptement aux alertes des individus qu'il connaît peu. Chaque groupe développe donc son propre cri, ce qui pourrait conduire à une diversification progressive du « langage » de l'espèce. ■ **V. R.**

F. C. R. Cunha et M. Griesser, *Science Advances*, vol. 7(2), article eaba2862, 2021

## GÉOSCIENCES

### UNE HISTOIRE DE LAC

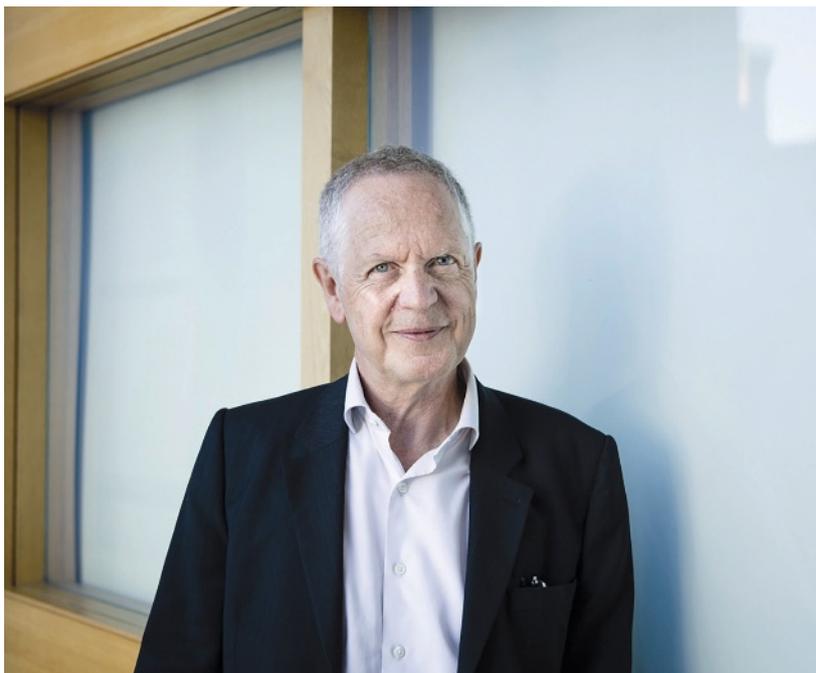
**D**urant le Miocène supérieur, il y a entre 11,6 et 6,7 millions d'années, un mégalac, le Paratéthys, s'étendait des Alpes orientales jusqu'au Kazakhstan. À son apogée, sa surface a atteint 2,8 millions de kilomètres carrés : il s'agit du plus grand lac dont on ait trouvé trace dans le registre géologique. Dan Valentin Palcu, de l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas, et ses collègues ont reconstitué les grandes étapes de l'histoire du Paratéthys. Celui-ci a connu une alternance de quatre baisses importantes entrecoupées d'augmentations. Grâce à un modèle 3D, les chercheurs ont montré qu'au cours de la dernière baisse, le mégalac s'est fragmenté en plusieurs bassins : des bassins périphériques alimentés en eau douce par les précipitations et un bassin central (au niveau de la mer Noire) dont la salinité a augmenté, car l'évaporation était plus intense que les apports en eau des rivières. ■

**Nicolas Butor**

D. V. Palcu et al., *Scientific Reports*, vol. 11, article 11471, 2021

## PHYSIQUE

### JEAN DALIBARD, MÉDAILLE D'OR DU CNRS

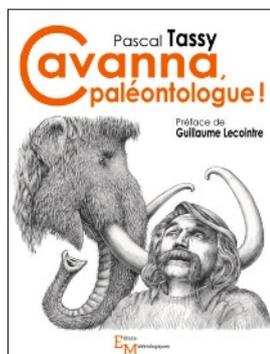
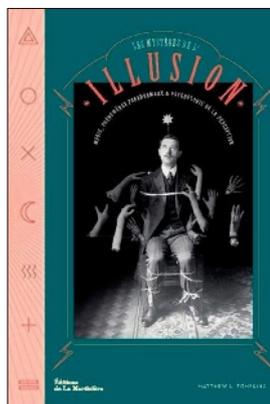
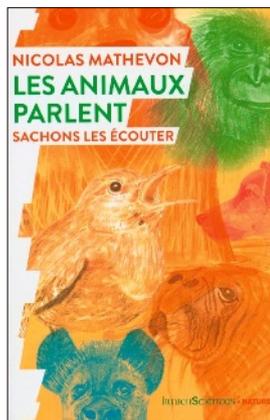


Jean Dalibard, physicien lauréat de la médaille d'or du CNRS pour 2021.

**C**hercheur au CNRS depuis 1982, membre du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, membre de l'Académie des sciences depuis 2004 et professeur au Collège de France depuis 2012, le physicien Jean Dalibard s'est affirmé au cours de sa carrière comme un théoricien remarquable et un expérimentateur hors pair. Il est récompensé cette année de la médaille d'or du CNRS pour son rôle de premier plan dans l'étude de la matière quantique ultrafroide. Il étudie notamment les condensats de Bose-Einstein : en refroidissant assez un gaz d'atomes, ceux-ci se retrouvent tous dans le même état de plus basse énergie, ce qui conduit à un comportement collectif particulier.

Jean Dalibard a activement contribué à développer les outils pour manipuler ces systèmes quantiques. Il a par exemple développé le principe du piège magnéto-optique, un dispositif permettant de confiner les atomes et de les refroidir à une fraction de degré au-dessus du zéro absolu. Il a aussi contribué à caractériser les propriétés des vortex qui se forment dans les condensats lorsque ces derniers sont mis en rotation. Dans un vortex, la vitesse de rotation est quantifiée et prend des valeurs discrètes en accord avec les règles de la mécanique quantique.

Les propriétés de contrôlabilité et de cohérence des condensats permettent aussi d'esquisser de nombreuses applications : lasers de résolution atomique, horloges de précision, instruments de mesure, etc. Une autre piste, explorée par Jean Dalibard et ses collègues, est celle du simulateur quantique. Un condensat peut être préparé de façon à servir de plateforme pour simuler des systèmes quantiques complexes, qui touchent à des disciplines aussi diverses que la physique nucléaire, l'astrophysique ou la physique des solides. ■ **S. B.**



**COSMOLOGIE**

**JUSQU'À LA FIN DES TEMPS**

Brian Greene  
Flammarion, 2021  
512 pages, 23,90 euros

On sait aujourd'hui que l'Univers est âgé d'un peu plus de 13 milliards d'années depuis ce moment particulier qu'on appelle Big Bang, et que les forces gravitationnelles, électromagnétiques et nucléaires sont à l'origine des phénomènes que nous y observons. On sait aussi que notre Soleil n'étant pas éternel, il finira en géante rouge, de sorte que dans quelques milliards d'années, la vie – si elle encore là – devra changer d'étoile. Et l'on sait que l'expansion du cosmos fera disparaître de notre vue presque toutes les galaxies, si bien que la Voie lactée sera le seul univers de nos descendants, comme c'était déjà le cas avant le xx<sup>e</sup> siècle.

Mais si l'on regarde beaucoup plus loin comme le fait le physicien Brian Greene, et on parle là de milliards de milliards d'années et bien au-delà encore, la suite n'est qu'une succession de déconvenues qui rendront la vie impossible. Les galaxies, qui tendront à se disloquer, deviendront des cimetières d'étoiles en panne de carburant. Ces cendres seront nettoyées en tombant dans les trous noirs supermassifs. Puis tous les trous noirs finiront par s'évaporer et par remplir un espace froid de particules à la dérive.

Brian Greene nous explique que le deuxième principe de la thermodynamique, à savoir l'augmentation irrémédiable de l'entropie totale, est la loi d'airain de cette apocalypse. La vie n'étant qu'une complexe machine thermique devant évacuer son surplus d'entropie, son existence même est compromise. Profondément réductionniste, Brian Greene ne croit pas au libre arbitre, et pourtant il ne verse jamais dans le nihilisme et nous livre passionnément sa philosophie optimiste de l'existence dans laquelle la pensée et la créativité sont les noblesses de l'être humain.

**CYRIL PITROU**  
Institut d'astrophysique de Paris/CNRS

**ÉTHOLOGIE**

**LES ANIMAUX PARLENT**

Nicolas Mathevon  
Humensciences, 2021  
528 pages, 23 euros

La même maison d'édition a déjà publié une série d'ouvrages de vulgarisation scientifique sur les animaux, dont le déjà best-seller de Jessica Serra *Dans la tête d'un chat*. Ce nouveau livre d'éthologie – domaine que le monde de l'édition avait plutôt négligé ces dernières années – porte sur l'étude bioacoustique des vocalisations animales, c'est-à-dire le lien entre leur forme physique et leur fonction biologique.

Ce volumineux ouvrage, qui comporte plus de 500 références, commence et finit par la traditionnelle question : les animaux parlent-ils au même titre que les humains ? À la différence de Descartes (et non de Montaigne), il répond plutôt positivement à cette question piège. Surtout, il entre dans le détail pour montrer qu'il s'agit d'un immense domaine comptant de multiples branches spécialisées. Il passe ainsi d'un animal et d'un site d'étude à l'autre, mêlant dans un style alerte et au fil de la plume beaucoup de recherches personnelles avec celles d'autres scientifiques, en particulier celles de son mentor du CNRS, le chercheur Thierry Aubin.

Enseignant et chercheur, Nicolas Mathevon s'est déplacé dans de multiples pays pour étudier expérimentalement les signaux sonores des crocodiles, des oiseaux et des mammifères. Il a donc dû déployer beaucoup d'énergie pour mener les deux activités de front et y ajouter encore ce gros livre qui vise un public non spécialisé. Il s'agit d'un ouvrage familial, ne serait-ce que parce que les illustrations sont dues au crayon du père de l'auteur. Sa lecture est passionnante, bien qu'elle suppose quelques connaissances préalables en sciences, et fait bien comprendre la démarche scientifique.

**PIERRE JOUVENTIN**  
Directeur de recherche émérite au CNRS

## PSYCHOLOGIE

### LES MYSTÈRES DE L'ILLUSION

Matthew L. Tompkins

La Martinière, 2020  
224 pages, 24,90 euros

Ce livre aurait pu s'appeler «La prestidigitation contre le spiritisme», tant sa plus grande partie porte sur les efforts des prestidigitateurs – surtout au début du xx<sup>e</sup> siècle – pour démystifier les spirites. L'auteur, lui-même un prestidigitateur américain, raconte comment, à la grande période d'engouement pour le spiritisme en Grande-Bretagne et aux États-Unis, des magiciens ont voulu montrer que les apparitions de fantômes, de communication avec l'au-delà et autres tables tournantes pouvaient être expliquées et reproduites par des prestidigitateurs.

L'ouvrage est atypique en ceci qu'il est avant tout fait d'images: les trois quarts des pages consistent en documents historiques comportant des photographies d'ectoplasmes et de spirites en action... Au premier abord, cette quantité de documents peut sembler lassante, mais dès qu'on se met à lire le texte, on prend un grand plaisir à voir incarné ce qui est raconté.

Le texte regorge d'anecdotes étonnantes. Il décrit par exemple comment l'un des plus grands magiciens de l'histoire, Jean-Eugène Robert-Houdin, est envoyé à la fin du xix<sup>e</sup> siècle en Algérie par le gouvernement français pour contrer l'influence des mystiques locaux. Il va dans les villages et fait des démonstrations de ce que la science occidentale peut produire. Ainsi, par exemple, par la puissance de sa pensée, «il enlève la force» d'autochtones, devenus brusquement incapables de soulever une malle métallique qu'une femme ou un enfant vient pourtant de lever... cela grâce à un électroaimant! On apprendra également que le magicien Houdini (dont le nom de scène est un hommage à Robert-Houdin), ennemi acharné des spirites qu'il juge être des charlatans, a entretenu une correspondance amicale et houleuse avec Conan Doyle, qui était un amateur passionné de spiritisme. Un très beau livre, à lire et à feuilleter.

ANDRÉ DIDIERJEAN<sup>(1)</sup> ET CYRIL THOMAS<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Université de Franche-Comté

<sup>(2)</sup>Université de Paris

## PALÉONTOLOGIE

### CAVANNA, PALÉONTOLOGUE !

Pascal Tassy

Éditions Matériologiques, 2020  
174 pages, 19 euros

C'est l'histoire d'une amitié qui dura quarante ans, entre François Cavanna, journaliste, écrivain et dessinateur, pilier de *Hara-Kiri* et de *Charlie Hebdo*, et Pascal Tassy, paléontologue férù de proboscidiens et de phylogénie. Une amitié qui commence lors de la soutenance de thèse du second en 1973 et se poursuit jusqu'au décès du premier en 2014.

Ce livre nous en présente un des aspects marquants, une longue et passionnante conversation à bâtons rompus au sujet de la paléontologie, étalée sur des décennies, au fil de repas dans des restaurants du Quartier latin, de balades dans le Jardin des plantes et de visites de la galerie de paléontologie du Muséum, à Paris.

La paléontologie qui intéresse Cavanna (auteur, ne l'oublions pas, de *L'Aurore de l'humanité. Et le singe devint con - le con se surpasse, où s'arrêtera-t-il?*, Hoëbeke, 2007) n'est évidemment pas celle, un peu puérile, que nous servent à longueur de temps certains médias, à grand renfort des répétitifs «plus grand dinosaure jamais découvert» ou «plus ancien ancêtre de l'homme». Les questions dont discutent les deux amis portent sur les grandes étapes de la diversification des êtres vivants, les extinctions, les mécanismes de l'évolution, la définition de l'espèce, les méthodes de classification, les méfaits du créationnisme...

Le livre à deux voix qui aurait pu résulter de ces échanges n'a jamais vu le jour, mais Pascal Tassy nous donne ici un aperçu de ce qu'il aurait pu être, mêlant rigueur scientifique et rigolade. On découvre ainsi un Cavanna qui, derrière son humour ravageur, a confiance en la science comme moyen non seulement de découvrir le monde mais aussi de libérer l'être humain. Un humaniste donc, dont on peut se demander comment il aurait ressenti la vague d'obscurantisme qui déferle aujourd'hui...

ERIC BUFFETAUT

Laboratoire de géologie, ENS-CNRS, Paris

## ET AUSSI



### LE VAR, TERRE DE GÉANTS

Stéphen Giner

Presses du Midi, 2021

154 pages, 29 euros

Un paléontologue de terrain nous fait connaître de nombreux paléoenvironnements varois, qu'ils soient du Permien, du Jurassique ou du Crétacé. En suivant ses pas, on découvrira non seulement des traces de théropodes au flanc d'une falaise dominant la mer, mais aussi, entre autres, les œufs de sauropodes d'«Egg-en-Provence» (*alias* Aix-en-Provence). On découvrira aussi les réalités des fouilles paléontologiques, au cours desquelles on utilise successivement la tractopelle, le marteau-piqueur, le burin et le marteau, puis l'aiguille et finalement les outils de dentiste.

### L'INDE, UNE SOCIÉTÉ DE RÉSEAUX

Sandrine Prévot

Éditions de l'Aube, 2021

280 pages, 24 euros

Comment l'Inde, pays de plus de 1,3 milliard d'habitants, peut-elle à la fois être une société traditionnelle et une société ouverte sur le monde? Une anthropologue passe en revue les facettes de cette société constituée de réseaux, dans laquelle la structure sociale centrale résulte du mariage au sein de la même caste. Tout y est patriarcal et hiérarchique, voire autoritaire. Les questions de statut sont au centre des transactions sociales, ce qui n'empêche pas les femmes d'être fortes... Très bien écrit, cet ouvrage permettra à quiconque s'intéresse à la société indienne d'interpréter son éberluante complexité.

### SOUS TERRE

Mathieu Burniat

Dargaud, 2021

176 pages, 19,99 euros

Cette bande dessinée réalisée avec les conseils scientifiques (et humoristiques?) de Marc-André Selosse, du Muséum national d'histoire naturelle, traite du sol. Réduite à la taille de 5 millimètres, Suzanne, une jeune aventurière désireuse de ramener à la vie son ami décédé, y découvre les «Enfers» véritables, c'est-à-dire le sol et sa vie grouillante. Trop petits pour être vus, les nombreux habitants de ce domaine remplissent plusieurs fonctions biologiques et écologiques essentielles, que détaille ce beau et instructif livre. Et la quête de Suzanne aboutit à une surprise...



La chronique de  
**CATHERINE AUBERTIN**

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

# PROTÉGER 30 % DE LA PLANÈTE : UNE AMBITION ÉQUIVOQUE

Pour préserver la nature, faut-il accroître la superficie des aires protégées ? Ou plutôt mieux associer les populations locales à la gestion des espaces naturels et agricoles ?



Soustraire des espaces naturels à l'activité humaine constitue le plus ancien outil des politiques occidentales de conservation. Un outil dont l'efficacité est parfois douteuse.

**E**n vue de la prochaine conférence de la convention sur la diversité biologique qui se tiendra fin 2021 à Kunming, en Chine, ONG et dirigeants multiplient les initiatives, comme la Coalition de la haute ambition pour la nature et les peuples, emmenée par la France et le Costa Rica, dans le but de protéger 30% des surfaces terrestres et marines en 2030.

Annoncer la création d'aires protégées semble être le moyen privilégié des États pour remplir leurs engagements internationaux en faveur de la biodiversité. La superficie des aires protégées a ainsi doublé depuis le sommet de la Terre de 1992. Elles couvrent aujourd'hui 17% des terres et 8% des mers.

Soustraire des espaces naturels à l'activité humaine est le plus ancien instrument des politiques occidentales de conservation. Mais on peut s'interroger sur son efficacité et, surtout, sur le postulat d'une nature isolée d'une humanité qui

poursuivrait une croissance économique fondée sur la surexploitation des ressources. S'agit-il d'un outil dépassé quand, au contraire, de nombreuses études plaident en faveur de la compatibilité des

## Deux modèles s'affrontent : agro-industrie contre agroécologie

systèmes sociaux et écologiques ? Ce débat s'étend au futur de l'agriculture (comment exploiter les 70% restants ?) et au statut des peuples autochtones et des communautés locales (où implanter ces aires protégées et comment les gérer ?).

Pour nourrir les 10 milliards d'individus prévus en 2050, la FAO estime qu'il faudrait augmenter la production alimentaire de 60%. Deux modèles s'affrontent : agro-industrie contre agroécologie.

Le premier sépare strictement les espaces de production et les espaces de conservation. Il défend l'intensification de l'agriculture, la production massive de produits bon marché grâce aux intrants de synthèse et à la technologie.

Le second s'appuie sur une écologie de la réconciliation entre nature et activités humaines, sur les interactions des humains et des non-humains au sein de systèmes agricoles complexes ayant recours à beaucoup de main-d'œuvre et d'espace. Les pratiques agricoles sont alors censées conserver les espèces et les services des écosystèmes.

Ces modèles font l'objet de diverses évaluations qui dépendent des choix alimentaires (où la viande est un enjeu central), du type de gouvernance et des relations à la nature.

Sans garantie sur la participation des populations au contrôle de leurs territoires, une gestion par l'État apparaît comme un retour en arrière. On comprend ainsi les protestations des défenseurs des peuples autochtones, comme Survival International, qui craignent un accaparement des terres et dénoncent un colonialisme vert. Ce sont en effet les zones peu peuplées, riches en biodiversité et où vivent des communautés autochtones, comme en Amazonie, qui sont les plus à même de devenir des aires protégées. Aussi les instances internationales, l'UICN, l'IPBES, la FAO, soulignent-elles l'importance des populations traditionnelles dans la conservation des écosystèmes et les dynamiques de l'agro-biodiversité. Plutôt que de sanctuariser leurs territoires comme aires protégées, il s'agirait avant tout d'assurer leurs droits sur leurs terres et de s'inspirer de leurs relations à la nature.

À Kunming, l'objectif de 30% devra répondre à la diversité des situations culturelles, car cette course au pourcentage nous oblige à nous interroger une fois de plus sur le grand partage de la modernité occidentale entre nature et culture. Comment interagir avec une nature dont nous dépendons ? ■

# Vaincre<sup>®</sup>

## LE CANCER

NOUVELLES RECHERCHES BIOMEDICALES

**PRENONS UNE LONGUEUR D'AVANCE SUR LE CANCER  
QUI RESTE LA 1<sup>ÈRE</sup> CAUSE DE MORTALITE PREMATUREE EN FRANCE**



Credit photo : @michelnguyen

Madame Anne Gravoin, musicienne et Présidente de Music Booking Orchestra  
Administratrice au sein de VAINCRE LE CANCER

Chaque année, 400.000 nouveaux cas de cancer, tout type confondu, sont dépistés.  
Statistiquement, il y a un peu plus de 1000 nouveaux malades par jour,  
parmi lesquels 600 vont guérir et 400 vont mourir.

**AIDEZ NOS CHERCHEURS À SAUVER VOS VIES**

Rejoignez le combat, donnez sur  
[vaincrecancer-nrb.org](http://vaincrecancer-nrb.org)

Vous souhaitez faire un don IFI : les dons  
au profit de la Fondation INNABIOSANTE C/i  
VAINCRE LE CANCER sont déductibles de l'IFI.

**VAINCRE LE CANCER - NRB**

Hôpital Paul Brousse  
12/14, avenue Paul Vaillant-Couturier  
94800 VILLEJUIF

[www.vaincrecancer-nrb.org](http://www.vaincrecancer-nrb.org)  
[contact@vaincrecancer-nrb.org](mailto:contact@vaincrecancer-nrb.org)

SERVICE MÉCÉNAT

**01 80 91 94 60**

Coût d'un appel local

RETROUVEZ-NOUS SUR





La chronique de  
**YVES GINGRAS**

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

## CLASSER LES CLASSEMENTS... ET LES DÉCLASSER

**Bien que très critiqués par les experts, les classements mondiaux des universités se sont imposés, avec des effets parfois pervers sur la gestion de ces établissements.**



**D**epuis le milieu de la décennie 2000, de nombreux dirigeants des universités, particulièrement en Europe, attendent chaque année avec une certaine nervosité l'annonce de leur position dans divers classements mondiaux. Les classements les plus connus sont celui dit de Shanghai, produit depuis 2003 par l'université Jiao Tong de cette ville (et depuis 2009 par Shanghai Ranking Consultancy, une organisation indépendante) et, en Angleterre, celui du *Times Higher Education*.

Les experts en scientométrie et en évaluation ont fortement critiqué ces classements dès leur apparition. Malgré cela, et pour des raisons obscures, bon nombre de présidents d'université continuent non seulement de les prendre au sérieux, mais se fixent même comme objectif de grimper dans ces classements, sans trop se soucier de comprendre ce qu'ils mesurent vraiment sur le plan académique.

Ayant été parmi ceux qui ont sonné l'alarme face à cette «fièvre de l'évaluation»

il y a près de quinze ans, je ne pouvais que me réjouir de lire enfin, en novembre 2020, un «point de vue» publié dans l'influente revue *Nature* et annonçant avoir évalué et classé les classements!



### Certains gestionnaires d'université veulent influencer sur les classements



L'autrice, Elisabeth Gadd, de l'université de Loughborough, au Royaume-Uni, et présidente du groupe de travail sur l'évaluation de la recherche de l'International Network of Research Management Societies, nous y apprend que leur équipe a analysé de près tous les classements et que, selon ses critères de transparence, gouvernance et validité des mesures, peu de classements sont bien classés. Se montrant ouvert à ces organisations, le groupe de

travail leur a demandé de s'autoévaluer, ce qu'elles ont toutes refusé, sauf l'équipe du CWTS, qui produit le classement de Leyde! Comme quoi les évaluateurs n'aiment pas être évalués...

L'article détaillant les travaux d'Elisabeth Gadd et ses collègues, paru en 2021, réitère et synthétise les critères auxquels devraient se conformer ces classements. De telles critiques finissent parfois par trouver des échos concrets. Ainsi, un rapport d'experts sur les universités en 2030 pour la Commission européenne affirme que l'enseignement supérieur devrait enfin aller au-delà de la manie d'évaluer sur la base de classements jugés «beaucoup trop simplistes».

Le rappel de ces critiques est bienvenu. Cependant, le texte d'Elisabeth Gadd dans *Nature* laisse de côté un aspect rarement discuté mais très important: les effets des classements sur les pratiques académiques. On sait que certaines universités modifient leur gestion pour se conformer aux critères des classements. Plus grave: certains gestionnaires veulent influencer sur les classements. Par exemple, ils écrivent aux professeurs de leur université en leur demandant des noms de contacts internationaux afin qu'ils puissent les intégrer à la base de données du classement du *Times Higher Education*, qui inclut une partie fondée sur un sondage d'opinion. Ces gestionnaires espèrent ainsi augmenter la probabilité que les personnes choisies pour classer les universités connaissent bien la leur.

On sait aussi que pour améliorer la position d'une institution dans le classement de Shanghai, il suffit que ses chercheurs indiquent tous la même adresse d'affiliation. Ainsi, la pseudofusion d'institutions diverses sous le nom de «université Paris-Saclay» s'est aussitôt traduite par la présence de ce label en quatorzième position du classement de 2020! Qui peut croire que les activités réelles des chercheurs ainsi «fusionnés» aient surpassé celles de leurs «concurrents» d'autres organismes après moins d'un an d'existence? ■





Striures, mouchetures, aplats de couleurs... Les motifs qui ornent les oiseaux sont à la fois d'une grande diversité et très reproductibles au sein d'une même espèce (ici, le faisán).

## L'ESSENTIEL

> Les motifs qui ornent les animaux sont d'une extrême diversité, mais présentent aussi des récurrences, parfois même entre espèces éloignées.

> Les chercheurs ont longtemps expliqué la formation de ces motifs par l'une ou l'autre de deux théories mathématiques : l'autoorganisation, fondée sur le « modèle de Turing », et l'instruction, fondée sur l'influence de signaux externes.

> Mais ces dernières années, l'idée d'une combinaison des deux théories s'est peu à peu imposée, notamment grâce à l'étude des motifs cutanés des oiseaux.

> La découverte des mécanismes conduisant à la répartition des plumes et à leur coloration montre que ces deux théories peuvent suffire à décrire à la fois la diversité des motifs d'une espèce à l'autre et la constance au sein d'une même espèce.

## L'AUTRICE



**MARIE MANCEAU**  
directrice de recherche du CNRS au sein du Centre pour la recherche interdisciplinaire en biologie du Collège de France, à Paris

# Quand les plumes font des maths

Répartition des plumes, striures, couleurs... D'où viennent la richesse et la régularité des motifs cutanés des oiseaux ? Aujourd'hui, embryologie et mathématiques révèlent les mécanismes à l'œuvre. Et qui semblent transposables à bien d'autres motifs animaux.

« **A** force de se tenir moitié dans l'ombre et moitié pas, et sous l'ombrage dansant, glissant et cabriolant des arbres, voilà que la Girafe devint tachetée, et le Zèbre rayé. » En 1902, l'écrivain britannique Rudyard Kipling contait en ces mots la formation des motifs pigmentaires qui habillent les animaux de la savane. Si cette magie de l'imaginaire ne reflète pas la réalité biologique, elle illustre une fascination universelle pour ces motifs naturels.

Répartition de la couleur, des poils ou des plumes, contours des antennes, cornes et becs, formes des empreintes digitales, dents et coquilles... Façonnés au fil de l'évolution, ces motifs sont en général vitaux pour les animaux. Depuis longtemps, les humains les observent, les représentent – de tels motifs ornent la grotte de Lascaux! – et cherchent à comprendre comment ils se forment.

Jusqu'à récemment, notre conception des mécanismes en jeu était restreinte à deux théories mathématiques opposées proposées au <sup>xx</sup>e siècle. Mais ces dernières années, les progrès dans la compréhension de l'embryogenèse, en particulier chez les oiseaux, et le développement de la génétique ont permis de montrer que non seulement les deux mécanismes existent, mais aussi que c'est leur combinaison dans l'espace et le temps qui assure aux motifs leur précision, tout en contribuant à leur évolution.

### UNE DIVERSITÉ EXTRÊME DE MOTIFS NATURELS...

Un motif est perçu comme un ordre visible dans la répartition spatiale d'éléments au sein d'un système; en biologie animale, il peut s'agir de caractères corporels, d'individus au sein d'une population ou d'espèces dans leur habitat. Une déambulation en campagne, sur la plage à marée basse ou dans les allées du Muséum national d'histoire naturelle sont autant d'occasions d'explorer la biodiversité des motifs animaux: plumages bariolés, crinières touffues, fourmis en files indiennes ou agrégats de bigorneaux, les formes et couleurs des animaux adoptent des géométries diverses, qu'il est possible de classer en grandes catégories.

Prenons les vertébrés, dont nous faisons partie: on constate tout d'abord des symétries par rapport à un axe ou à un point. Celle du corps est dite bilatérale, tous les organes externes étant répartis également de part et d'autre de la ligne formée par la moelle épinière. Ces symétries concernent aussi les comportements, comme ces parades nuptiales fréquentes chez les oiseaux dans lesquelles les partenaires en devenir effectuent une chorégraphie en miroir. Autre type de motif, les mousses et bulles, surfaces sphériques, sont souvent

présentes à petite échelle: les cellules et les compartiments intracellulaires, par exemple, entrent dans cette catégorie. Les fissures, discontinuités de surface, caractérisent les craquelures de la peau des crocodiles ou les lignes de la main.

Mais les motifs qui caractérisent le monde animal sont bien plus divers. Les motifs périodiques, produits par la répétition d'un même élément, sont très fréquents: pensez aussi bien aux doigts, vertèbres et dents qu'aux files de gnous en migration ou à la queue des acheteurs au supermarché! Parmi ces motifs, les fractales, géométries décrivant la reproduction à l'identique d'un motif à différentes échelles, se retrouvent dans les arborescences formées par les neurones ou les alvéoles des poumons. Les méandres et les vagues, sinuosités ou



## Les motifs des animaux varient de façon extrême tout en obéissant à des lois

déformations de surface répétées, caractérisent le déplacement du serpent ou les circonvolutions de l'émail des molaires. Les tessellations ou « motifs de Voronoï », dans lesquels les surfaces sont découpées en géométries régulières, s'observent sur le manteau des girafes ou la carapace des tortues. Les spirales se retrouvent dans la cavité de l'oreille interne ou les cornes de certains herbivores, et enfin les rayures et taches, disques ou droites périodiques plus ou moins déformées, ornent les félins ou caractérisent la répartition des troupeaux d'herbivores... Plusieurs de ces géométries sont parfois combinées en motifs complexes. À l'inverse, certains caractères semblent disposés de façon aléatoire, n'obéissant à aucun critère géométrique évident.

### ... MAIS PAS SANS LIMITES

Les possibilités semblent infinies, et pourtant. On note certaines tendances, des récurrences dans l'orientation ou la géométrie des motifs au sein de certains groupes ou même, plus étrangement, entre espèces éloignées. Les rayures dorsales noires et jaunes qui couvrent les poussins de volaille varient en nombre et en largeur, mais sont toujours longitudinales. Celles des zèbres ou des poissons-clowns sont,

elles, toujours transversales. Les membres antérieurs forment un bras, une aile ou une nageoire, mais sont toujours composés de trois grands segments.

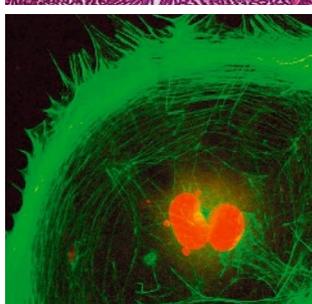
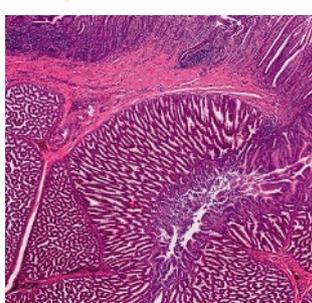
À l'échelle d'une seule espèce *a fortiori*, la reproductibilité des motifs est d'une précision méticuleuse, garantissant la fonction des organes ou la protection contre les attaques de l'environnement. Lorsque les variations existent, elles sont le plus souvent limitées à des modifications minimales de périodicité comme la variation du nombre de rayures sur le pelage des zèbres, sorte de code-barres qui permettrait la reconnaissance entre individus, ou de légères différences de régularité, comme chez l'astrild ondulé: l'uniformité des stries ornant le plumage de ce petit passereau africain est un gage de qualité pour d'éventuels partenaires.

On constate donc un étonnant paradoxe: les motifs qui ornent les animaux, souvent complexes, varient de façon extrême tout en obéissant à des lois sous-jacentes. Quelles sont ces règles qui régissent l'établissement des motifs dans la nature? Pour le comprendre, les chercheurs tentent d'identifier les mécanismes moteurs de variation et ceux qui créent des thèmes communs. Si certains travaux concernent la fonction écologique des motifs (pourquoi le zèbre possède-t-il des rayures?), d'autres s'attachent à comprendre leur formation (comment le zèbre acquiert-il ses rayures?). À cette dernière question, Kipling fournissait une explication magique. Les scientifiques s'y attellent depuis les années 1950 avec des outils non moins surprenants: mathématiques, embryons et oiseaux.

## DE L'HOMOGÈNE AU MOTIF

On peut considérer qu'avant son agencement en motif, un système est « naïf », c'est-à-dire que les éléments qui le composent, qu'il s'agisse d'individus ou de cellules, forment un ensemble homogène dépourvu de référentiel spatial. Le processus de formation d'un motif commence par l'acquisition d'un tel référentiel, l'installation d'un champ de coordonnées ou, pour l'imaginer plus simplement, d'une gauche, d'une droite, d'un avant, d'un arrière... Les éléments du système adoptent alors des destins ou comportements différents en fonction de leur position, ce qui crée des régions distinctes. Le système n'est alors plus homogène, mais composé de plusieurs domaines, eux-mêmes à l'état de systèmes *a priori* naïfs... et pouvant donc se subdiviser. Ainsi, un motif résulte d'une série de segmentations de plus en plus fines de l'espace jusqu'à un état stable.

L'embryon précoce des vertébrés, par exemple, est constitué d'une grappe de cellules identiques. Il se régionalise progressivement en hémisphères définissant les axes du corps, puis selon ces axes en trois feuilletés appelés



## DES MOTIFS À TOUTES LES ÉCHELLES

De haut en bas, nuée d'individus, plumage (ici de faisan), doigts (ici de faisan), cellules (ici de l'estomac glandulaire d'un poulet), cytosquelette (ici d'une cellule de la peau): dans un même groupe (ici les oiseaux), on observe des motifs aussi bien à l'échelle du groupe qu'à celle de la cellule.

«ectoderme», «mésoderme» et «endoderme». Ces derniers forment ensuite des organes distincts: l'ectoderme donne naissance aux tissus neuraux comme le cerveau et la moelle épinière, le mésoderme aux muscles, aux os, au cartilage et au derme de la peau, et l'endoderme aux organes internes des systèmes digestifs et respiratoires. Chaque organe poursuit sa compartimentation; par exemple, le squelette du bras se subdivise en trois segments principaux, le premier à l'origine de l'humérus, le second lui-même segmenté en cubitus et radius, le troisième se divisant en carpes, métacarpes, et phalanges, etc.

Des cascades d'activation de gènes contrôlent le déroulement graduel de ce processus. Si l'on connaît de mieux en mieux les gènes impliqués, le déclenchement du processus, en revanche, reste un mystère. Comment une direction, des coordonnées, peuvent-elles naître sans points de référence?

## L'AUTOORGANISATION, UNE THÉORIE TRÈS (TROP?) PLASTIQUE

Les premiers éléments de réponse ont émergé des travaux pionniers d'une poignée de mathématiciens, le Britannique Alan Turing en tête. En 1952, ce dernier formula un modèle mathématique décrivant au moins deux éléments qui s'inhibent et diffusent (voir l'encadré page 29). Le «modèle de Turing» et d'autres variantes formulées plus tard postulent que l'interaction locale d'éléments d'un système peut stabiliser et amplifier de façon spontanée des fluctuations stochastiques (aléatoires), et créer ainsi des dynamiques qui mènent à la formation de motifs stables. Autrement dit, les tissus peuvent s'«autoorganiser» à partir d'un «bruit biologique», sans recours à une référence spatiale préalable.

Dans les années 1970, en adaptant ces modèles mathématiques à des problèmes de biologie (les éléments mathématiques devenant des molécules, par exemple), les théoriciens allemands Hans Meinhardt et Alfred Gierer ont mis en évidence leur immense potentiel. En effet, lorsque les résultats des équations de Turing sont traduits en images par simulations numériques, on observe la production de motifs stables au sein d'espaces initialement homogènes. Rayures, taches, méandres... la ressemblance est frappante: les simulations peuvent reproduire presque toutes les géométries des motifs naturels.

Aujourd'hui, l'autoorganisation est considérée comme l'un des procédés majeurs de formation des motifs. La formation de nombreux motifs biologiques pourrait reposer sur des dynamiques «de Turing», qu'il s'agisse des trajectoires optimisées des fourmis ou des piétons, de l'agrégation des mollusques sur les

rochers pendant les marées, des mouvements coordonnés dans un essaim, des pois et zébrures périodiques, de la formation cyclique des vertèbres, des crêtes du palais et des empreintes digitales, ou encore de la polymérisation du squelette des cellules...

Devant un tel potentiel d'application, nombre de chercheurs se sont mis à étudier les propriétés mathématiques des dynamiques autoorganisées. Des mathématiciens ont ainsi proposé que l'autoorganisation suffirait à expliquer non seulement un grand nombre de motifs, mais également la diversité au sein d'une même géométrie. En effet, les résultats des simulations numériques sont extrêmement sensibles aux paramètres de départ dans le système homogène. Il suffit de modifier légèrement ces paramètres pour obtenir des résultats très différents, les stries devenant des pois ou des tessellations. C'est ainsi que depuis une quinzaine d'années, cette malléabilité permet aux chercheurs de recréer des variations observées dans la nature. Par exemple, modifier la taille du système initial reconstitue les différences de motifs pigmentaires entre espèces de serpents venimeux, l'évolution du nombre de barres colorées sur des poissons-anges tropicaux au cours de la vie, ou les variations de grosseur des taches des félins sauvages en fonction de leur âge, taille ou espèce.

Ainsi, l'autoorganisation pourrait être un mécanisme d'adaptation. Mais sa plasticité est aussi son talon d'Achille: il est en effet difficilement concevable que ce système stochastique produise des motifs avec la reproductibilité observée dans la nature. De plus, seule une fraction des dynamiques de Turing donnent lieu à des motifs: beaucoup de paramètres de départ produisent des résultats homogènes. De ces considérations sont nées différentes théories selon lesquelles l'autoorganisation doit être canalisée.

## DES SOURCES DE SIGNAUX EXTERNES

Puisque l'autoorganisation ne peut à elle seule recréer la précision nécessaire à la survie, les biologistes du développement ont longtemps ignoré cette théorie au profit d'une autre, formulée par le biologiste britannique d'origine sud-africaine Lewis Wolpert en 1976 et nommée « instruction » (voir l'encadré page 30). Dans ce modèle, une source de signaux externes crée un gradient d'information de position déchiffré par les éléments individuels du système, tels que les cellules. En fonction de leur position dans le gradient, les éléments adoptent alors des destins spécifiques. La force de cette théorie est qu'intuitivement, elle correspond bien au déroulement par étapes spatiales successives de l'embryogénèse. De plus, il y a trente ans, les premiers



# Seule, l'autoorganisation ne peut recréer la précision des motifs nécessaire à la survie



travaux de génétique fonctionnelle avaient effectivement lié la production de domaines distincts dans les tissus en développement à des gradients moléculaires formés par des facteurs appelés « morphogènes ».

La drosophile, modèle génétique classique, est un cas d'école. Avant même sa ponte, l'œuf de cette mouche présente une asymétrie antéro-postérieure. Sa fécondation a lieu au moment de la ponte. Dès lors, l'œuf fertilisé se divise rapidement et commence son développement, marqué par la segmentation du corps en zones qui deviendront les différentes parties de la tête, du thorax, de l'abdomen... Dans les années 1980, la biologiste allemande Christiane Nüsslein-Volhard et ses confrères américains Eric Wieschaus et Edward Lewis ont montré que le développement de ces différents segments démarre avant même la ponte et la division de l'œuf, par la formation d'un gradient d'ARN messenger du gène *bicoid* (l'intermédiaire de production de la protéine codée par ce gène) selon l'axe antéro-postérieur. Ce gradient « instruit » (selon le sens de Wolpert) une cascade d'expression de gènes en aval, dont les gènes *pair-rule* qui forment des rayures transversales, futurs segments du corps. Les trois chercheurs ont reçu le prix Nobel de physiologie ou médecine en 1995 pour ces résultats majeurs.

À la suite de ces travaux, diverses équipes ont découvert d'autres morphogènes tant chez les invertébrés que chez les vertébrés, ce qui consacra l'instruction comme un procédé phare régissant la production de motifs. Le modèle de Wolpert a un avantage clé par rapport à celui de Turing: la hiérarchie stricte et conservée des programmes génétiques mis au jour permet d'expliquer la reproductibilité et la précision de beaucoup de motifs observés dans la nature. Mais il a lui aussi une limite: l'instruction ne s'applique pas à trop grande ou trop petite échelle. Le modèle de Wolpert est donc difficilement compatible avec la formation des motifs comportementaux ou subcellulaires. En outre, cette stratégie à elle seule n'explique pas une



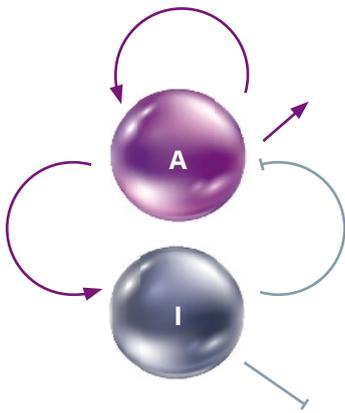
Si l'on modélise les trajectoires d'un groupe de fourmis en quête de nourriture seulement à l'aide de la théorie de l'autoorganisation, les trajectoires obtenues sont très variables. Il est nécessaire d'ajouter un signal extérieur dans la simulation pour contraindre le comportement des fourmis.

## LE MODÈLE DE TURING : UNE QUESTION D'AUTOORGANISATION

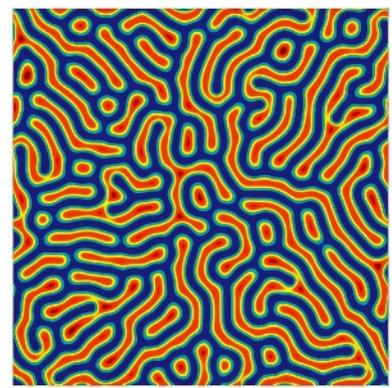
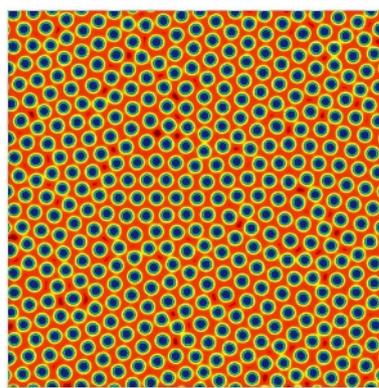
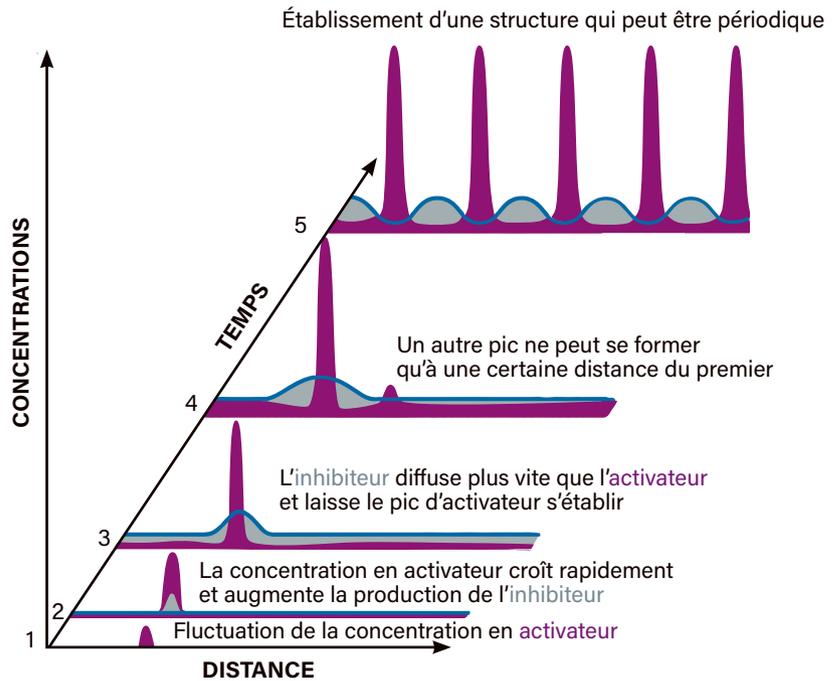
**L**e Britannique Alan Turing est surtout connu pour sa construction d'une machine ayant dévoilé le fonctionnement d'Enigma, système qui chiffrait les messages nazis durant la Seconde Guerre mondiale, ainsi que pour ses travaux sur l'intelligence artificielle, qui ont posé les jalons théoriques de l'invention des ordinateurs. Ses travaux de biologie théorique sont moins médiatisés. Pourtant, ils servent de fondement à des centaines d'études dans des domaines aussi variés que la médecine, l'épidémiologie, la météorologie, les études de comportement, l'embryologie ou la génétique.

S'intéressant à l'origine des formes de la nature, Turing imagina, en 1952,

un modèle mathématique permettant de passer d'un état homogène à un état organisé. Dans ce modèle, au moins deux substances diffusent avec des vitesses différentes dans un système, jouant respectivement le rôle d'activateur (A) et d'inhibiteur (I). Des équations dérivées partielles décrivent l'évolution de chaque substance et leur interaction au cours du temps : l'activateur stimule sa propre production, mais aussi celle de l'inhibiteur, qui diminue alors la production d'activateur. L'inhibiteur diffusant plus vite que l'activateur, il empêche la production de ce dernier sur une certaine zone autour de lui. Ainsi, de proche en proche, une structure dite « de Turing » se forme.



Une structure de Turing s'établit en plusieurs étapes : dans un système homogène contenant un activateur (A, en violet) et un inhibiteur (I, en gris), une fluctuation augmente légèrement la concentration locale de l'activateur (1). La concentration de l'activateur croît alors à cet endroit, entraînant la production d'inhibiteur (2). L'inhibiteur diffuse plus rapidement (3) que l'activateur, empêchant la concentration en activateur d'augmenter autour du pic d'activateur. D'autres pics d'activateur émergent à distance du premier (4) et ainsi de suite, jusqu'à former un motif stable qui peut être périodique (5).



Selon la valeur des paramètres des équations du modèle de Turing, les résultats obtenus varient. La structure produite peut être homogène, mais certains jeux de paramètres créent des motifs comme des pois ou des zébrures (à droite, ici obtenus à l'aide d'une variante du modèle de Turing), similaires à ceux observés dans la nature, par exemple sur des poissons (à gauche, un napoléon, et en haut, un chirurgien à voile indien).

évolution rapide et ne produit pas de motifs périodiques complexes...

## VERS UNE RÉCONCILIATION DES DEUX THÉORIES

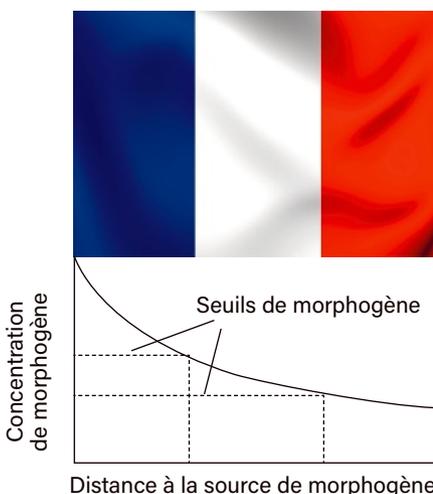
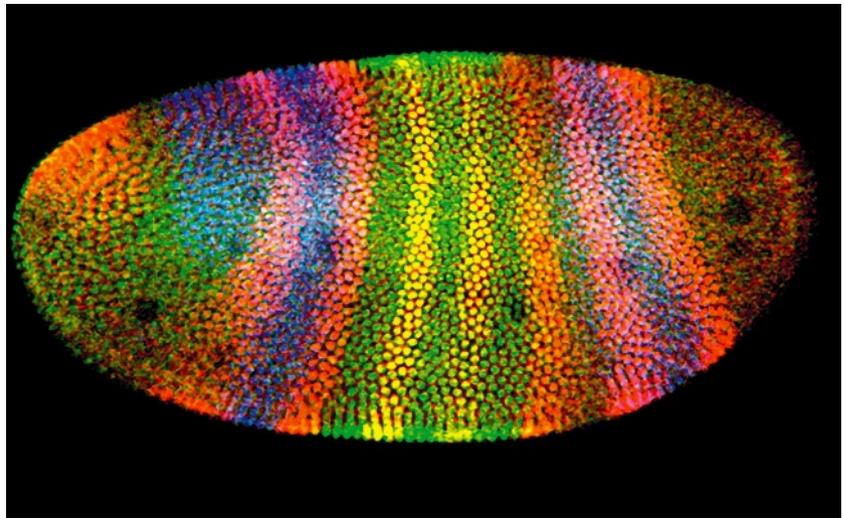
Longtemps, autoorganisation et instruction ont divisé partisans et détracteurs. Mais ces dix dernières années, les progrès de la biologie cellulaire et une meilleure compréhension de l'embryogenèse ont fini par les réconcilier. En effet, il est possible que ces deux stratégies agissent de concert, chacune apportant ses propres bénéfices au système. Par exemple, des signaux instructifs – c'est-à-dire fournis par un gradient de concentration d'une molécule – pourraient orienter l'autoorganisation. Ce serait notamment le cas lors de la formation des doigts, dont la répétition périodique est due à une autoorganisation du membre (voir la figure page ci-contre), mais dont la disposition radiale est contrôlée par un gradient d'une protéine nommée FGF, qui active la migration de certaines cellules.

On peut même extrapoler ce type de combinaison aux motifs comportementaux, par exemple des fourmis et des escargots de mer. En effet, plusieurs équipes françaises et anglaises ont montré que lorsque l'autoorganisation des fourmis en file indienne ou des escargots de mer en agrégats, créée par des fluctuations de leurs trajectoires ou de leurs recherches de nourriture, est simulée par ordinateur, les motifs obtenus sont très variables – un scénario peu souhaitable dans la nature (en trop petits groupes, les escargots de mer dessécheraient à marée basse, et désorganisées, les fourmis ne retrouveraient pas leur colonie). En revanche, si l'on ajoute des facteurs environnementaux comme la température pour les escargots de mer, qui influe sur le comportement des individus, l'autoorganisation se stabilise et reproduit les motifs observés en conditions naturelles.

Aussi, ces dernières années, on invoque souvent une combinaison de l'autoorganisation et de l'instruction dans le temps et l'espace pour

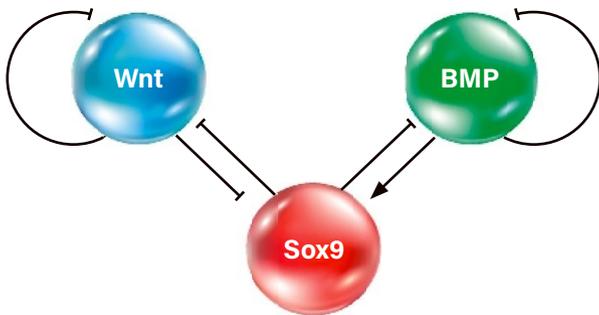
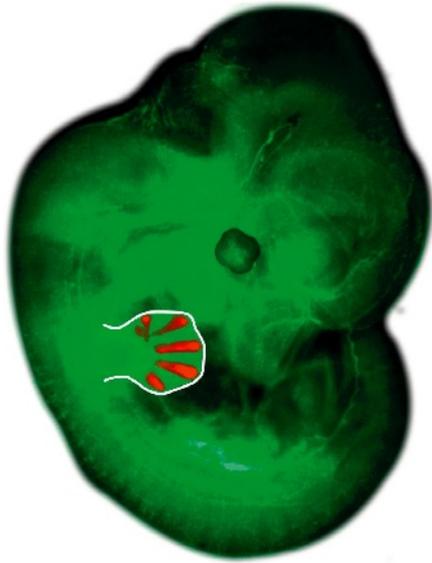
## LE MODÈLE D'INSTRUCTION DE WOLPERT

Le Sud-Africain Lewis Wolpert est à l'origine de certaines des plus grandes avancées de la biologie du développement. En 1969, il formula le « French Flag Problem », dans lequel le drapeau tricolore représente des régions ayant adopté une couleur différente en fonction d'une information de position (ci-dessous). Cette information peut provenir d'une autoorganisation similaire à celle du modèle de Turing (ce que Wolpert nomme le « balancing model » ou « modèle d'équilibrage ») ou d'une source externe – ce que l'on nomme aujourd'hui « modèle d'instruction ». Dans ce dernier cas, la source crée un gradient de signalisation (la quantité



de signaux est plus grande dans les régions proches de la source que dans les régions plus éloignées). Le gradient est « lu » par les éléments du système, par exemple les cellules d'un tissu, qui adoptent alors un destin (comme une couleur) en fonction de leur distance par rapport à la source. Ce modèle a servi de base théorique aux études d'embryologie précoce. En particulier, chez la drosophile, divers travaux ont montré que les segments de l'exosquelette sont formés par une série de gradients moléculaires que produisent des « morphogènes », comme l'avait prévu le théoricien. Notamment, à un

stade embryonnaire assez précoce, un gradient de la protéine Bicoid apparaît selon l'axe antéropostérieur de l'embryon et déclenche la production de plusieurs gènes de segmentation le long de cet axe (sur l'image ci-dessus, on distingue les gènes de segmentation hairy en rouge, krüppel en vert et giant en bleu). Ces gènes déclenchent à leur tour l'expression d'une autre classe de gènes de segmentation, les gènes pair-rule, toujours selon des bandes transversales, qui correspondront aux différents segments du corps de la mouche. Lewis Wolpert s'est tristement éteint cette année, de complications liées au Covid-19.



# Lors de la formation des doigts, autoorganisation et instruction agiraient de concert

différentes, une nécessité pourtant si l'on veut comprendre comment la formation des motifs régit leurs grandes tendances et leur diversité.

## LE PLUMAGE DES OISEAUX, UN MODÈLE IDÉAL

Face à ces difficultés techniques, les oiseaux se sont révélés de précieux alliés. L'embryon d'oiseau se développe en effet dans un œuf: on peut ménager une fenêtre dans un œuf fertilisé et observer, voire manipuler, l'embryon vivant, refermer l'œuf avec un petit scotch, le remettre dans un incubateur et, quelques heures plus tard, analyser le devenir des tissus! Dans les années 1970, la biologiste française du développement Nicole Le Douarin et ses collaborateurs en ont tiré profit et ont ainsi établi des techniques de greffe tissulaire qui ont révolutionné les études de lignage cellulaire, c'est-à-dire de suivi de la descendance d'une cellule (voir l'encadré page 32). Aujourd'hui, prenant sa suite, des dizaines d'équipes utilisent le poulet domestique ou la caille du Japon pour étudier le développement des membres, des doigts, des compartiments du cerveau, de la peau...

Les scientifiques exploitent les possibilités d'expérimentation *in ovo* pour effectuer de l'imagerie en temps réel ou des études génétiques – des cailles transgéniques exprimant la protéine fluorescente GFP sont nées il y a quelques mois à l'institut Pasteur! La malléabilité technique des systèmes aviaires permet également de sortir des sentiers balisés des animaux de laboratoire et de suivre aisément le développement de n'importe quelle espèce, pourvu qu'on puisse en récupérer des œufs fertilisés. Notre équipe au Collège de France a ainsi pu établir un véritable réseau de collaboration auprès d'éleveurs de volaille (nombreux en France!), de zoos comme celui de La Palmyre près de la Rochelle, ou sur le terrain en Australie pour certaines espèces de passereaux ou aux îles Malouines pour collecter des œufs de manchot. Les oiseaux offrent donc la possibilité unique de comparer le développement de motifs entre plusieurs espèces.

expliquer la formation de motifs. Cependant, il reste difficile d'étudier comment cette coordination peut jouer un rôle à la fois dans le maintien de la précision des motifs naturels et dans la production de leur diversité.

Premièrement, on connaît mal les acteurs biologiques des deux mécanismes, car ils agissent avant que le motif ne soit visible, c'est-à-dire en l'absence de toute référence spatiale. Les identifier exige donc une exploration à l'aveugle de l'embryon précoce.

Deuxièmement, on ne sait que rarement si certains acteurs biologiques identifiés, comme des signaux moléculaires, des dynamiques cellulaires ou des forces mécaniques intégrées et transmises à l'échelle des tissus, agissent effectivement dans les animaux sauvages. Il faut en effet pouvoir en collecter des embryons! Pour les mêmes raisons, il est encore plus difficile de comparer ces facteurs dans des espèces

En 2014, en combinant des expériences sur des souris (en haut, un embryon de souris) et des modélisations numériques (au centre), Jelena Raspopovic et ses collègues, de l'université Pompeu Fabra, en Espagne, ont montré que les doigts pourraient résulter d'un mécanisme d'autoorganisation de type Turing, fondé sur l'interaction de trois protéines impliquées dans le développement embryonnaire, BMP (en vert), Sox9 (en rouge) et Wnt (en bleu).

L'un de ces motifs – le motif cutané – possède les propriétés de variation idéales pour étudier les mécanismes de leur évolution: il est à la fois extrêmement variable d'une espèce à l'autre et se produit de façon très précise au sein d'une même espèce. Le motif cutané est constitué de deux éléments. Le premier est la répartition des plumes: un oiseau n'est en effet pas entièrement couvert de plumes; leur implantation est limitée à des régions spécifiques séparées par des zones glabres. Au sein de ces régions, les plumes sont orientées de façon à couvrir le corps. Cette répartition particulière assurerait la thermorégulation tout en accommodant les mouvements du vol.

Les plumes sont implantées dans des « follicules » – petits organes formant à la surface de la peau des invaginations reliées à un muscle érecteur et innervées, dont notre équipe a décrit l'arrangement géométrique (voir la figure page ci-contre). Chez une caille, un poulet ou un diamant mandarin, petit passereau australien souvent utilisé dans des études comportementales, les follicules sont disposés selon une géométrie hexagonale dont les éléments sont de taille et d'espacement variables. Chez les émeus

## LES CHIMÈRES DE NICOLE LE DOUARIN

Dans son laboratoire de Nantes, puis de Gif-sur-Yvette, la biologiste Nicole Le Douarin a développé, dans les années 1970, la technique qui a consacré les modèles aviaires. L'approche consiste à remplacer des tissus d'embryon de poulet domestique (ci-dessous un poussin) par ceux provenant d'une caille du Japon (ci-dessus un cailleteau) et d'analyser quelques heures plus tard le devenir des cellules provenant de la caille

donneuse dans les tissus de la chimère. Grâce aux « greffes caille-poule », on peut ainsi identifier l'origine des cellules composant un tissu en retraçant leur histoire embryonnaire. L'équipe de Nicole Le Douarin a par exemple démontré que les cellules pigmentaires – les mélanocytes – sont issues de l'ectoderme neural, le tissu embryonnaire qui produira aussi le système nerveux. Nicole Le Douarin est aujourd'hui membre de l'Académie des sciences et sa carrière est saluée mondialement, et ce en dépit des entraves liées aux inégalités de traitement auxquelles sa carrière, comme toutes celles des pionnières de la recherche, a dû régulièrement faire face.

# Chez une caille, les plumes sont implantées selon une géométrie hexagonale

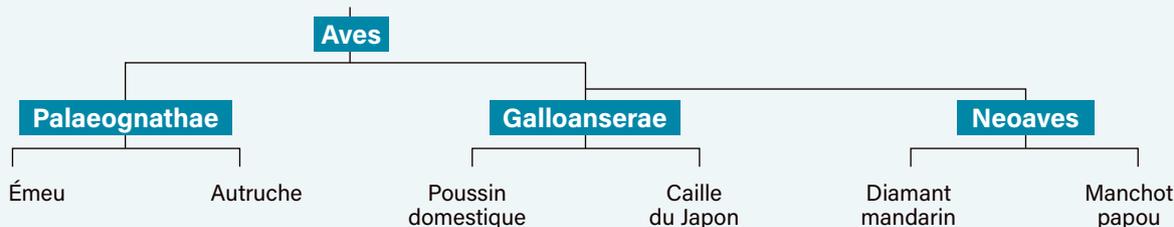
et les autruches, oiseaux qui ne volent pas, les follicules sont répartis de façon aléatoire. Cette irrégularité n'est pourtant pas toujours liée à l'absence du vol, car chez le manchot, lui aussi incapable de voler, les follicules forment un réseau extrêmement dense dont la régularité est presque... mathématique.

Le second élément du motif cutané est la répartition des couleurs, due en partie à la disposition des pigments sur les plumes. Les plumes peuvent ainsi arborer toute la palette du spectre visible ainsi que dans l'ultraviolet. Le principal pigment des vertébrés, désigné sous le nom générique de « mélanine », procure une couleur jaune-beige (phéomélanine) ou brun-noir (eumélanine) et est synthétisé par des cellules spécialisées dans la peau, les mélanocytes (les mêmes cellules dont Nicole Le Douarin a démontré l'origine neurale grâce à sa technique de greffe). Chez les oiseaux, d'autres pigments appelés « caroténoïdes » produisent les jaunes, roses et rouges vifs. Ces pigments ne sont pas synthétisés, mais proviennent de l'alimentation (si les flamants sont roses, c'est parce qu'ils se nourrissent d'une petite crevette elle-même dotée de caroténoïdes roses). Les plumes contiennent aussi parfois des grains de mélanine organisés à l'échelle nanométrique de façon à diffuser ou réfléchir la lumière, produisant des teintes bleutées dites « structurales » ou « iridescentes ».

Pigments et couleurs structurales sont souvent combinés. Un oiseau est vert? C'est probablement qu'il mêle bleus structuraux et caroténoïdes jaunes. Il est violet? Il possède des bleus structuraux et des caroténoïdes rouges... Les teintes varient à la surface du corps, formant des domaines distincts plus ou moins étendus sur le dos, le plastron, le ventre, la tête, etc. Elles peuvent aussi varier sur la longueur de la plume, créant des stries et des taches, parfois répétées de façon périodique.

Une telle diversité est, suppose-t-on, liée aux stratégies de camouflage, à des mécanismes de sélection sexuelle ou à la reconnaissance entre espèces. Si la fonction écologique des

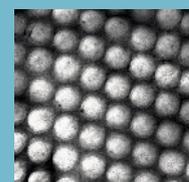
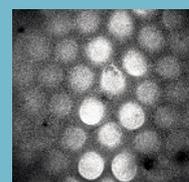
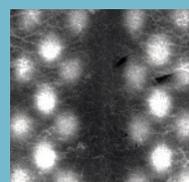
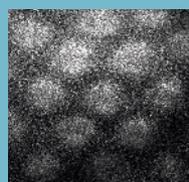
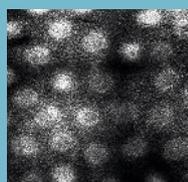
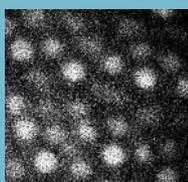




Oiseaux



Follicules



motifs cutanés n'est pas toujours intuitive, et encore moins souvent démontrée, leur diversité n'en est pas moins un outil de choix pour étudier les mécanismes contrôlant la formation et l'évolution des motifs, car elle est facilement quantifiable. C'est ainsi que récemment, après plus de cinquante ans de recherches, plusieurs équipes ont mis en évidence que ces motifs résultent eux aussi d'une combinaison d'ins-truction et d'autoorganisation.

### L'IMPLANTATION DES PLUMES : DÉTERMINÉE OU ALÉATOIRE ?

Les premiers indices dans ce sens ont concerné la formation des zones pourvues de plumes. La peau est composée de deux couches. L'épiderme est la surface externe en contact avec l'environnement et sert de barrière. Le derme, sous-jacent, est un « mésenchyme » innervé et irrigué, un mélange de fibres et de cellules plus éparses. Au cours du développement embryonnaire, certaines zones de la peau s'épaississent, devenant « compétentes » : ce sont les futures régions présentant des plumes.

Dès les années 1990, l'équipe de Danielle Dhouailly, à l'université Joseph-Fourier, à Grenoble, a étudié le lignage de ces structures chez l'embryon. Les travaux de l'équipe, qui se sont poursuivis jusqu'à la fin des années 2000, ont montré que ces zones deviennent compétentes pour former des follicules en réponse à des signaux provenant de deux tissus du méso-derme (le feuillet embryonnaire qui donne

La géométrie formée par les follicules – structures dans lesquelles les plumes sont implantées – varie d'une espèce d'oiseau à l'autre à la surface de la peau. Chez la caille, le poulet et le diamant mandarin, les follicules sont organisés selon une géométrie hexagonale, alors que chez l'émeu et l'autruche, ils sont répartis aléatoirement. L'absence de régularité n'est pourtant pas toujours liée à l'incapacité de voler : le manchot, lui, présente un réseau d'une grande régularité et densité.

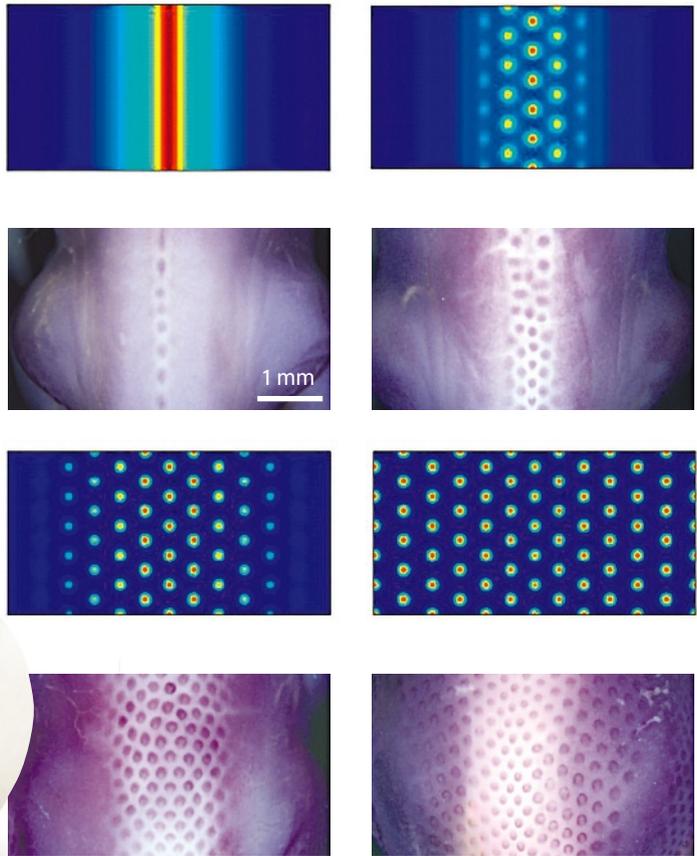
naissance aux muscles, aux os, au cartilage et au derme) : les régions compétentes dorsales sont instruites par des signaux provenant des somites – les tissus qui entourent la future moelle épinière et qui deviendront la colonne vertébrale, les muscles squelettiques et le derme. Les régions compétentes ventrales, quant à elles, sont instruites par la partie latérale du méso-derme (sur les « flancs » de l'embryon).

Au sein de chaque région compétente, les cellules de l'épiderme et du derme s'agrègent localement, formant des protubérances qui couvrent la surface de la peau : les précurseurs des follicules de plume. En étudiant leur formation, Danielle Dhouailly et d'autres chercheurs ensuite, dont Cheng-Ming Chuong à l'université de Californie du Sud, à Los Angeles, ont mis en évidence le rôle crucial de facteurs de croissance comme diverses protéines des familles FGF et BMP. L'identification de ces molécules a marqué un tournant dans l'étude des motifs cutanés aviaires. En effet, elles forment des gradients tout en interagissant localement, ce qui répond aux prérequis à la fois de l'instruction et de l'autoorganisation (voir l'encadré page 34).

Par ailleurs, grâce aux progrès de la génétique et de la modélisation mathématique, les chercheurs ont pu combiner études moléculaires et théoriques. Les résultats furent édifiants : lorsque l'autoorganisation des molécules exprimées dans la peau en développement est simulée numériquement, on

## LA VISION D'ENSEMBLE DE DANIELLE DHOUILLY

**B**asée à l'université Joseph-Fourier, à Grenoble, Danielle Dhouailly s'est démarquée dès les années 1990 en adaptant de façon systématique les outils techniques les plus modernes à l'étude de l'embryogenèse de la peau chez le poulet. Les travaux de son équipe ont permis de montrer que des morphogènes appartenant aux familles FGF et BMP forment des gradients de concentration (comme dans le modèle d'instruction de Wolpert) à la surface de la peau tout en régissant l'interaction locale des cellules du derme et de l'épiderme. De plus, lorsque l'équipe de Danielle Dhouailly a modélisé cette interaction dans un système d'autoorganisation de type Turing, elle a recréé visuellement les motifs périodiques des précurseurs des follicules de plumes (*ci-contre la modélisation obtenue, comparée aux motifs observés à différents stades embryonnaires du poulet*). Danielle Dhouailly est devenue non seulement une spécialiste mondiale des systèmes aviaires et du tissu cutané, mais également l'une des premières scientifiques ayant fait de l'utilisation de l'innovation technologique une règle, influençant grandement les approches actuelles de la biologie du développement en France.



obtient des motifs à pois ressemblant à ceux des follicules de plume à la surface de la peau. Ainsi, le motif des plumes impliquerait bien aussi une autoorganisation locale.

### UNE EMPREINTE GÉNÉTIQUE DES COULEURS

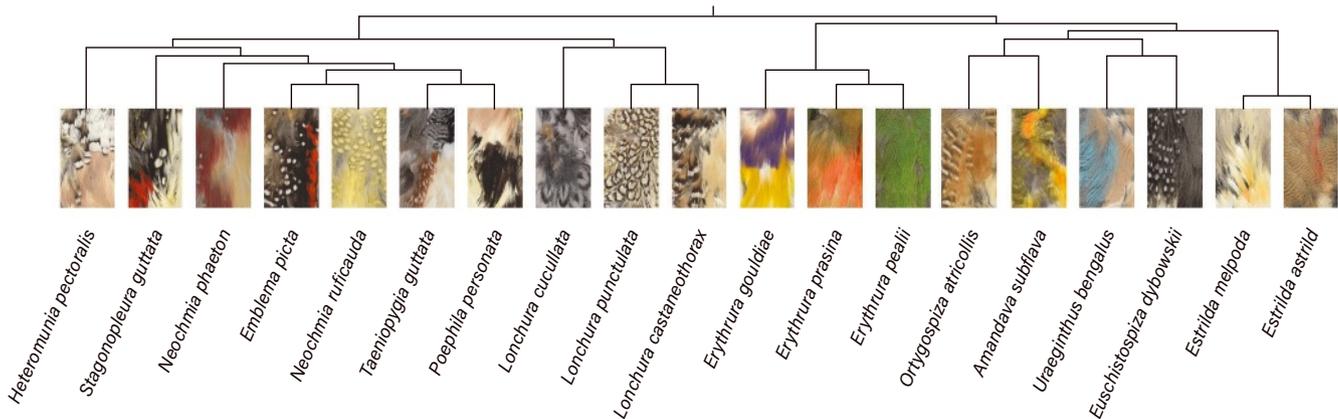
Concernant les motifs pigmentaires, les deux stratégies de formation des motifs sont, de même, compatibles avec les observations. Les poussins de volaille (poule, dinde, pintade, caille, faisán, perdrix) sont ornés de rayures longitudinales sur le dos. Il s'agit peut-être d'un stratagème de camouflage dans les buissons chez ces animaux dont la nidification au sol est plus exposée à la prédation. Les rayures sont noires et jaunes, résultant d'une alternance périodique de zones produisant de l'eumélanine et de la phéomélanine. En étudiant ces rayures, notre équipe a identifié une empreinte embryonnaire, véritable patron des futures rayures, formée par l'expression en bandes longitudinales d'un gène nommé *Agouti* sur le dos des embryons.

Le gène *Agouti* est connu depuis plusieurs dizaines d'années pour contrôler la répartition de l'eumélanine et de la phéomélanine sur les poils des mammifères et les plumes des oiseaux. Dans un premier temps, nous avons

## Chez les volailles, la position des rayures est conservée, mais pas leur largeur

montré que là où il s'exprime, les mélanocytes synthétisent, quelques heures plus tard, de la phéomélanine, ce qui donne les rayures jaunes, tandis que les rayures noires sont produites en l'absence d'*Agouti* (ainsi, par défaut, les mélanocytes synthétisent de l'eumélanine).

Pour comprendre comment l'empreinte du gène *Agouti* se met en place, nous avons revisité la technique de greffe interspécifique de Nicole Le Douarin: nous avons transplanté dans des embryons de faisans des tissus prélevés dans des embryons de caille et étudié le motif pigmentaire des chimères. Avaient-elles des rayures similaires



En examinant les domaines colorés de 38 espèces (ici seules 19 sont représentées) d'une famille de passereaux, les Estrildidés, Marie Manceau et son équipe ont montré que, malgré une extrême diversité visuelle, ces domaines (ici sur le ventre) présentent des régions conservées d'une espèce à l'autre, produites par instruction et dont la combinaison suffit à expliquer tous les motifs observés.

à celles de la caille donneuse? Oui, mais uniquement lorsque des somites étaient greffés. En d'autres termes, tout comme pour les précurseurs de plumes, dans le cas des motifs pigmentaires, les somites procurent une instruction, cette dernière contrôlant l'expression du gène *Agouti*.

Restait à comprendre quel mécanisme détermine la largeur et l'espacement des rayures. Nos expériences de gain et perte de fonction du gène *Agouti* ont montré l'effet de ce gène sur la largeur des bandes: le niveau d'expression de ce gène contrôle la largeur des bandes. Puis, en 2019, l'équipe de Cheng-Ming Chuong a mis en évidence une possible autoorganisation: en étudiant plus spécifiquement le rôle des mélanocytes, elle a montré que sous le contrôle du gène *Agouti*, ces cellules communiquent entre elles *via* leurs jonctions cellulaires, et que ce mécanisme crée une frontière plus ou moins nette entre chaque rayure. Les rayures des poussins de volaille sont donc également produites par une combinaison d'instruction précoce et d'autoorganisation locale.

## DES FONDATIONS COMMUNES DOTÉES D'UNE FLEXIBILITÉ PLUS TARDIVE

Cette étape franchie, il était enfin possible d'explorer la combinaison de l'instruction et de l'autoorganisation chez différentes espèces d'oiseaux afin de comprendre comment elle influence l'évolution des motifs cutanés. C'est ce que nous avons fait au laboratoire. Nous avons comparé les rayures chez dix espèces de volaille et montré que leur position est conservée, ce qui s'explique par le fait que leur installation résulte d'une instruction précoce, tandis que leur espacement et leur largeur sont propres à chaque espèce, traduisant peut-être des différences d'autoorganisation locale des mélanocytes.

L'instruction pourrait donc construire des fondations communes qui contraignent le

motif, tandis que l'autoorganisation, plus tardive, procurerait une flexibilité produisant des différences. De même, dans des simulations numériques d'autoorganisation qui produisent des pois ressemblant à la géométrie des follicules, si l'on ajoute des conditions initiales plus strictes comme une direction antéropostérieure ou un ajustement des simulations à la taille de la zone à plumes, on reproduit alors à l'identique les géométries propres à chaque espèce.

Il est possible que la plupart des motifs naturels soient régis de cette façon – une hypothèse qui ouvre de nouvelles pistes de recherche. Ainsi, au laboratoire, nous documentons la variation pour en trouver les points communs et donc les origines conservées. Récemment, nous avons également décrit le motif pigmentaire d'une quarantaine de passereaux de la famille des Estrildidés et, malgré leur apparente diversité, identifié des domaines communs dont la position est constante (*voir la figure ci-dessus*). Par des analyses comparatives d'expression des gènes et de génomique, nous avons créé une carte moléculaire permettant de visualiser les régions de la peau embryonnaire qui précèdent chaque domaine de couleur. Les résultats montrent que la peau est comme un tableau de peinture au numéro: l'évolution colore différemment chaque domaine, mais est contrainte par leur position.

Par ailleurs, les signaux moléculaires ne sont pas les seuls modeleurs du paysage de variation des motifs: en effet, nous avons montré que la forme des cellules de la peau – en particulier leur élongation selon certains axes – contribue à contraindre la régularité des géométries de follicules. Il s'agit maintenant de comprendre comment signaux moléculaires et cellulaires interagissent, et d'étendre ces observations à une échelle de diversité plus grande. Et si nous n'étions tous que des variations sur un même thème? ■

## BIBLIOGRAPHIE

M. Hidalgo *et al.*, **A conserved paint box underlies color pattern diversity in Estrildid finches**, prépublication *Biorxiv*, 2021.

C. Curantz *et al.*, **Cell shape anisotropy and motility constrain self-organised feather pattern fidelity in birds**, prépublication *Biorxiv*, 2021.

R. Bailleul *et al.*, **Symmetry breaking in the embryonic skin triggers directional and sequential plumage patterning**, *Plos Biology*, vol. 17(10), article e3000448, 2019.

M. Inaba *et al.*, **Instructive role of melanocytes during pigment pattern formation of the avian skin**, *PNAS*, vol. 116(14), pp. 6884-6890, 2019.

N. Haupaix *et al.*, **The periodic coloration in birds forms through a prepattern of somite origin**, *Science*, vol. 361, article eaar4777, 2018.

## L'ESSENTIEL

> Lors de la collision de galaxies, les trous noirs supermassifs qui en occupent les centres se rapprochent inexorablement et finissent par fusionner.

> Dans la phase qui précède la fusion, le couple de trous noirs émet des ondes gravitationnelles de très basse fréquence, que les interféromètres *Ligo* et *Virgo* ne sont pas en mesure de détecter.

> Le suivi de réseaux de pulsars pourrait mettre en évidence de telles ondes. Ces astres compacts émettent des ondes radio de façon très régulière. Des perturbations dans ces signaux témoigneraient du passage d'une onde gravitationnelle.

> Trois équipes internationales viennent d'annoncer de premiers indices de détection très prometteurs.

## LES AUTEURS



**GILLES THEUREAU**  
astronome au LPC2E (CNRS-Orléans) et à la station de radioastronomie de Nançay (observatoire de Paris)



**SIYUAN CHEN**  
chercheur postdoctorant au LPC2E et à la station de radioastronomie de Nançay



**ANTOINE PETITEAU**  
enseignant-chercheur au laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC), à l'université Paris-Diderot

# Des pulsars pour traquer les ondes gravitationnelles

En mesurant avec précision les signaux radio périodiques reçus de plusieurs dizaines de pulsars, les astrophysiciens comptent détecter les ondes gravitationnelles émises par des paires de trous noirs supermassifs. Cette démarche vient de livrer ses premiers résultats encourageants.

**L**orsque votre réveil s'allume le matin, il met en mouvement l'air ambiant sous la forme d'ondes acoustiques qui font vibrer vos tympans et vous incitent à sortir du lit. En appuyant sur l'interrupteur de votre lampe de chevet, ce sont des ondes électromagnétiques qui stimulent les récepteurs de la rétine. Notre quotidien est en permanence confronté à de telles ondes dont on étudie les propriétés depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Les ondes acoustiques correspondent par exemple à des vibrations d'un support matériel (l'air, l'eau, etc.).

En développant la théorie de la relativité générale en 1915, Albert Einstein a montré que l'espace-temps lui-même pouvait vibrer, parcouru par un nouveau type d'ondes : les ondes gravitationnelles. Ces dernières ont été mises

en évidence pour la première fois le 14 septembre 2015 grâce à des détecteurs géants, les interféromètres laser de la collaboration *Ligo-Virgo*.

Cette découverte a donné naissance à une nouvelle discipline : l'astronomie des ondes gravitationnelles. Le signal détecté en septembre 2015 avait été émis lors de la fusion de deux trous noirs de quelques dizaines de fois la masse du Soleil. Depuis, de nombreux autres événements du même type ont été détectés.

Le principe est simple. Lorsque les deux astres tournent l'un autour de l'autre, le système perd de l'énergie en faisant vibrer l'espace-temps. Les deux trous noirs se rapprochent en émettant des ondes gravitationnelles. Ces dernières contractent et dilatent l'espace-temps de façon alternée dans le plan perpendiculaire à sa direction de propagation. Ainsi, quand une



Sur cette vue d'artiste, deux galaxies entrent en collision. Les trous noirs supermassifs qui occupaient leur centre vont former un système binaire qui émet des ondes gravitationnelles. Celles-ci peuvent être détectées en étudiant les signaux très réguliers d'un ensemble de pulsars.

telle vibration traverse un interféromètre, les deux bras perpendiculaires de plusieurs kilomètres voient leur taille varier d'une longueur infime (de l'ordre du milliardième de la taille d'un atome). Ce changement est détectable par l'instrument.

Ces coalescences de paires de trous noirs de masse stellaire sont caractérisées par des ondes gravitationnelles dont la fréquence d'oscillation est de l'ordre de la centaine de hertz. Celle-ci est liée à la taille du système binaire et au nombre de révolutions qui s'opèrent par seconde. Il existe d'autres sources d'ondes gravitationnelles, par exemple la fusion de deux trous noirs supermassifs au centre de galaxies entrées en collision (voir l'image page 37). Mais pour mesurer l'émission gravitationnelle pendant la phase stable qui précède la fusion de telles paires d'objets, il faut chercher des signaux de très basse fréquence, car ces systèmes sont lents. Or, de la même façon que l'oreille est sensible à des ondes acoustiques de fréquences comprises en général entre 20 et 20000 hertz, les interféromètres laser comme ceux de *Ligo* et *Virgo* opèrent dans une gamme limitée de fréquences centrée sur environ 100 hertz, compatible avec les trous noirs de masse stellaire.

Pour traquer les autres sources d'ondes gravitationnelles, il faut se tourner vers des dispositifs différents. Différentes techniques sont à l'étude, tels les interféromètres à ondes de matière (à l'image du prototype français *Miga*, qui fonctionne entre 0,1 et 10 hertz) ou les interféromètres laser spatiaux (comme la

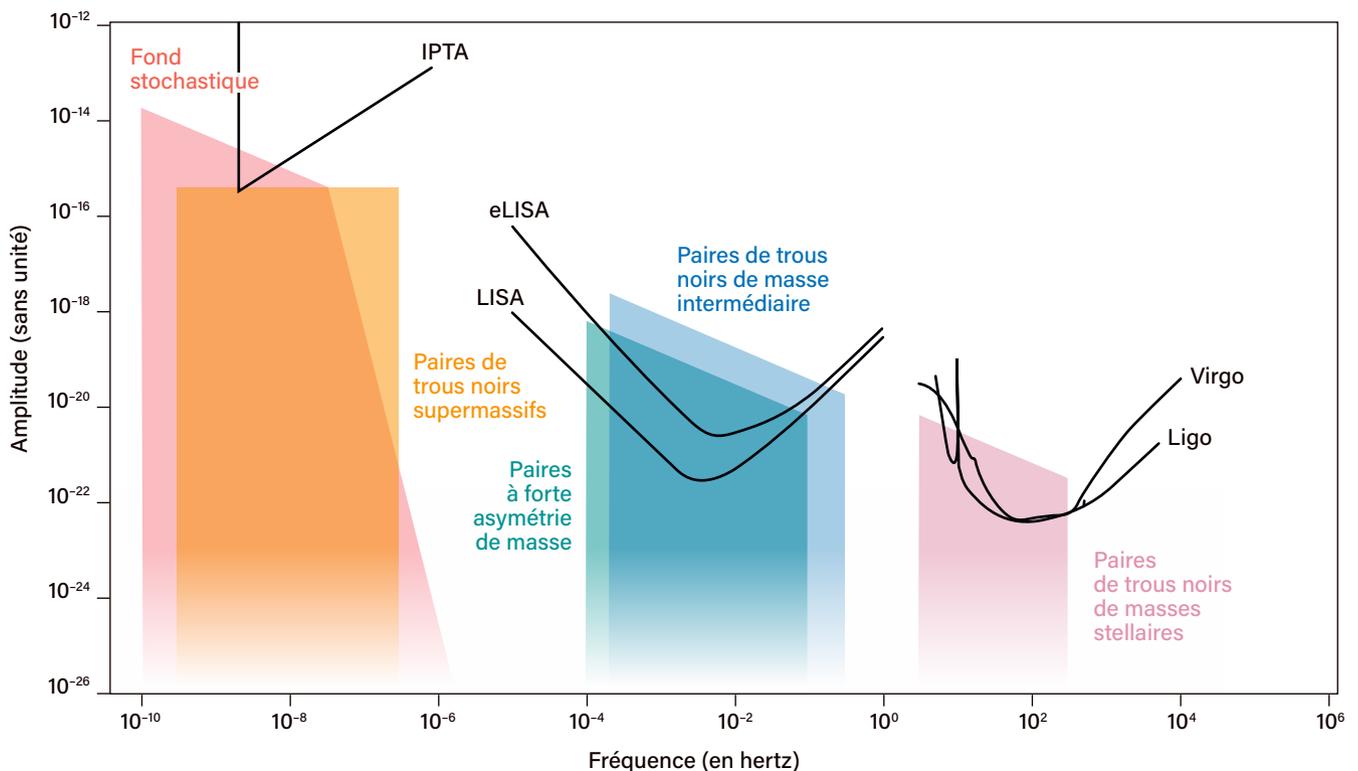
Selon le type de source d'ondes gravitationnelles, ces dernières n'ont pas les mêmes fréquences ou les mêmes amplitudes. Les interféromètres laser terrestres (*Ligo*, *Virgo*, *Kagra*, etc.), dont les bras font quelques kilomètres, sont sensibles aux coalescences de trous noirs de masses stellaires. Le futur interféromètre spatial *Lisa*, dont les bras ont une longueur de 2,5 millions de kilomètres, détectera les couples d'objets compacts dans la phase orbitale spirale qui précède leur coalescence, ou l'instant exact de la fusion de trous noirs très massifs (au-delà de quelques millions de masses solaires). Enfin, pour détecter les couples de trous noirs supermassifs (plusieurs milliards de masses solaires), on fait appel à des réseaux de pulsars répartis dans la Voie lactée.

future constellation *Lisa*, entre  $10^{-5}$  et  $10^{-1}$  hertz). Enfin, une idée étonnante consiste à exploiter un type particulier d'étoiles qui se comportent comme des horloges naturelles: les pulsars. En étudiant un ensemble de pulsars de la Voie lactée, il est possible d'obtenir un détecteur galactique sensible à une gamme de fréquences comprises entre  $10^{-9}$  et  $10^{-6}$  hertz. Les techniques dans ce dernier domaine ont progressé depuis vingt ans. Et trois grandes collaborations internationales ont, de façon indépendante, présenté en 2021 des indices très encourageants dans la traque des ondes gravitationnelles provenant de trous noirs supermassifs binaires.

## À L'ÉCOUTE DE LA GALAXIE

L'élément clé de cette approche est le pulsar. De quoi s'agit-il? Lorsqu'une étoile massive (8 à 10 fois la masse du Soleil) arrive en fin de vie, elle explose et son cœur s'effondre en formant une étoile à neutrons, un objet très compact de 1,5 à 2 masses solaires et tenant dans une sphère de 12 kilomètres de rayon.

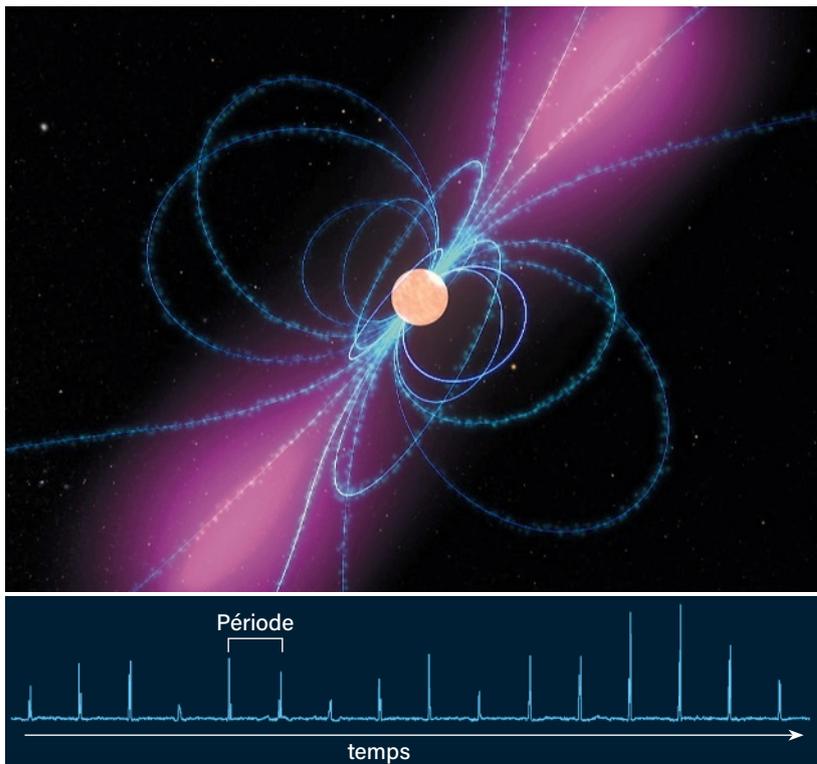
Selon les conditions de sa naissance, l'étoile à neutrons peut présenter une rotation extrêmement stable et rapide, de l'ordre de plusieurs centaines de tours par seconde. Elle crée un fort champ magnétique qui accélère des particules chargées. Ces dernières émettent un rayonnement intense au-dessus des pôles magnétiques de l'astre sous la forme de faisceaux non alignés avec l'axe de rotation. L'étoile à neutrons se comporte alors comme



un phare dont les faisceaux balayent l'espace avec une grande régularité, d'où le nom de pulsar. Un observateur sur Terre peut alors chronométrer les impulsions radio du pulsar avec une très grande précision.

Si une onde gravitationnelle passe entre nous et un pulsar, elle va induire une avance ou un retard sur les «bips» émis par l'étoile qui nous arrivent, habituellement, de façon très régulière. La mesure de ces fluctuations permet de détecter et caractériser l'onde gravitationnelle. Cependant, comme le signal est soumis à d'importantes perturbations et qu'il n'existe pas une source unique, mais un grand nombre d'émetteurs d'ondes gravitationnelles, l'idée est de suivre quelques dizaines de pulsars pour corrélérer leurs signaux et identifier une signature caractéristique à basse fréquence, commune à toutes ces étoiles (quoique modulée d'un pulsar à l'autre en fonction de leurs positions spatiales relatives).

En 1978, Mikhail Sazhin, de l'institut astronomique Sternberg, à Moscou, a été le premier à proposer d'utiliser ainsi les pulsars pour détecter des ondes gravitationnelles de basse fréquence. En 1979, Steven Detweiler, de l'université Yale, aux États-Unis, a estimé que la précision chronométrique obtenue sur la mesure de la période de rotation d'un pulsar permettait d'atteindre une limite de  $10^{-11}$  sur l'amplitude de l'onde gravitationnelle (il s'agit d'une valeur relative, donc d'un nombre sans dimension: le passage de l'onde produirait une variation d'un cent-milliardième de la période apparente du pulsar, ou une variation d'un cent-milliardième de toute mesure d'une longueur étalon sur Terre). Conjugée aux progrès des techniques de chronométrie et des capacités de calcul en temps réel, la découverte (en 1982) des pulsars «millisecondes», plus rapides mais surtout à la rotation cent mille fois plus stable que la moyenne des pulsars normaux, a permis de gagner cinq ordres de grandeur sur cette limite de détection, qui est aujourd'hui voisine de quelque  $10^{-16}$  (voir la figure page 43). Cela revient à détecter une contraction ou une dilatation des longueurs avec une précision de



Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide. Il présente un champ magnétique intense qui conduit à la formation d'un rayonnement radio émis suivant un faisceau très étroit au niveau des pôles magnétiques. Comme l'axe de rotation diffère de l'axe magnétique, le faisceau balaie l'espace comme celui d'un phare marin, et un radiotélescope en reçoit des «bips» réguliers. Ainsi, la séquence de 22 secondes en provenance du pulsar PSR B0301+19 (en bas) a une période de 1,38 seconde. On note que chaque pic est un peu différent, ce qui induit des perturbations lors du chronométrage effectué pour traquer des ondes gravitationnelles.

l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur la distance Terre-Soleil.

Le radiotélescope décimétrique de Nançay (voir la photo page 40), deuxième antenne européenne par sa taille, est équipé d'une instrumentation dédiée qui permet de dater avec précision des impulsions de pulsars à seulement quelques dizaines de nanosecondes près. Depuis 2004, l'équipe française qui opère sur ce radiotélescope observe plusieurs dizaines de pulsars très stables. Ces observations contribuent à près de 60% aux données du projet européen de réseau de chronométrie de pulsars (EPTA, pour *European pulsar timing array*) et donnent lieu à une participation active dans la collaboration mondiale de l'*International pulsar timing array* (IPTA), qui regroupe aussi une équipe américaine et une autre australienne.

La mesure est évidemment très difficile à réaliser et requiert une modélisation complète du système Terre-pulsar dans toute sa complexité. La première étape concerne le pulsar, une horloge pas aussi parfaite que nous le laissons penser. L'ensemble des particules accélérées dans la magnétosphère de l'étoile à neutrons produit une émission relativement stable, mais qui change malgré tout un peu d'un «bip» à l'autre (voir la figure ci-dessus). Il en résulte un «bruit» qui varie de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes selon le pulsar.

À cela s'ajoute un second phénomène perturbateur. Le pulsar perd de l'énergie par rayonnement et ralentit par conséquent au cours du temps. Ce ralentissement de la

## Nous datons un signal de pulsar avec une incertitude de quelques nanosecondes

rotation est mesurée très précisément pour chaque pulsar. Il faut aussi considérer d'autres variations très faibles dues à des raisons intrinsèques (réarrangements de la structure interne de l'astre) ou externes (présence d'une ceinture d'astéroïdes ou de débris qui perturbent gravitationnellement l'étoile).

En outre, le pulsar se trouve souvent dans un système binaire, associé à une étoile compagnon qui est en général un autre objet compact, une naine blanche ou une autre étoile à neutrons. Le mouvement orbital du pulsar autour du centre de masse du système module le signal émis, celui-ci arrivant alternativement en retard ou en avance du fait de l'éloignement ou du rapprochement de la source. La distance séparant les deux astres étant parfois très faible (avec une période orbitale de seulement quelques heures), la description de la paire nécessite l'évaluation de nombreux paramètres au moyen de la relativité générale, la théorie newtonienne de la gravitation étant insuffisante dans ces situations.

En particulier, le système binaire perd lui-même de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles; les deux corps se rapprochent donc progressivement l'un de l'autre, ce qui accélère leurs vitesses orbitales. L'étude de l'évolution de la période orbitale du système contenant le pulsar PSR B1913 + 16, découvert en 1974 par les radioastronomes Russell Hulse et Joseph Taylor, de l'université de Princeton, a d'ailleurs été l'une des premières preuves indirectes de l'existence des ondes gravitationnelles (résultat obtenu par Joseph Taylor et Joel Weisberg en 1982 qui a valu au premier et à Russell Hulse le prix Nobel de physique en 1993).

## UN LONG VOYAGE

À ces effets relativistes s'ajoutent en outre des corrections liées au trajet de la lumière dans le champ gravitationnel intense du compagnon compact: l'effet Shapiro et l'effet Einstein. Le premier correspond à un allongement du parcours du rayon lumineux émis par le pulsar. La trajectoire suivrait une ligne droite en l'absence du compagnon, mais comme celui-ci déforme l'espace-temps, le chemin s'en trouve plus long. Quant à l'effet Einstein, il consiste en un décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle, qui influe sur la fréquence apparente des pulsations de l'astre.

Une fois ces premiers obstacles franchis, le signal radio entame son long voyage à travers le milieu interstellaire. Il traverse des zones riches en plasma, du gaz ionisé dont les électrons ont un effet dispersif sur l'onde. L'effet est d'autant plus important que la fréquence radio est basse. Il en résulte un retard dit «chromatique», la date d'arrivée du signal sur Terre dépendant alors de la fréquence. À fréquence donnée, le retard est proportionnel au



**Vue partielle du radiotélescope de Nançay, en Sologne. Cet instrument participe aux observations des réseaux de pulsars en vue de la détection d'ondes gravitationnelles.**

nombre d'électrons rencontrés et donc à la distance du pulsar. Cependant, comme le pulsar et le Système solaire se déplacent tous les deux dans la Voie lactée, la ligne de visée change sans arrêt et le contenu électronique rencontré aussi. Cela induit une variation de ce retard chromatique sur des échelles de temps de quelques semaines à quelques années, variation qui est liée à la vitesse de déplacement des deux objets, mais aussi à la taille caractéristique des structures et de la turbulence dans le milieu interstellaire.

Ensuite, le signal parvient dans le Système solaire et rencontre un autre milieu électriquement chargé, celui entretenu par le vent solaire. Cela introduit de nouvelles perturbations, liées cette fois-ci à la structure et aux fluctuations de l'héliosphère qui entoure le Soleil. Nous modélisons finement ces effets de dispersion, en incluant par exemple le mouvement de la Terre au sein de l'héliosphère. Les paramètres de ce modèle varient pour chaque pulsar, puisqu'ils dépendent de la position du pulsar dans la Voie lactée et de sa position relative au Soleil vue depuis la Terre.

Quand le rayonnement du pulsar arrive enfin sur Terre, il est de nouveau perturbé par l'ionosphère, la couche supérieure ionisée de l'atmosphère qui nous entoure; mais généralement, cet effet reste très faible aux fréquences radio – de l'ordre de 1 à 2 gigahertz – auxquelles on effectue la chronométrie. On néglige donc cet effet la plupart du temps.

Pour calculer le temps de trajet, il faut considérer le mouvement de la Terre autour du barycentre du Système solaire. Or ce dernier dépend sensiblement de la position relative des différentes planètes. À ce stade, il faut aussi tenir compte de l'effet Shapiro et de l'effet Einstein dus au champ gravitationnel du Soleil. Pour corriger ces effets, on fait appel à un modèle d'éphémérides planétaires construit

par des spécialistes de mécanique céleste, modèle qui comporte lui-même des incertitudes. Il faut ensuite considérer la position instantanée du radiotélescope par rapport au centre de la Terre, des éventuels délais induits par le trajet optique dans le télescope, des éventuelles imperfections du récepteur, puis des délais induits par le passage du signal électrique dans les câbles.

On compare alors la forme temporelle de l'impulsion reçue à un modèle moyen de l'impulsion que l'on connaît *a priori* et on relie cette mesure à une horloge de référence. Dans le cas du radiotélescope de Nançay, il s'agit d'une horloge atomique au rubidium, qui est elle-même asservie, *via* un satellite GPS, à la référence de temps atomique international produite par l'observatoire de Paris. Avec un tel système, cette référence de temps est perturbée par un double passage à travers l'ionosphère, puisque l'information transite par un satellite pour relier temporellement Paris et Nançay.

Cette longue énumération semble insurmontable. Pourtant, grâce à un effort constant de modélisation des bruits et d'amélioration des instruments, nous avons atteint un niveau de précision suffisant pour exploiter un réseau

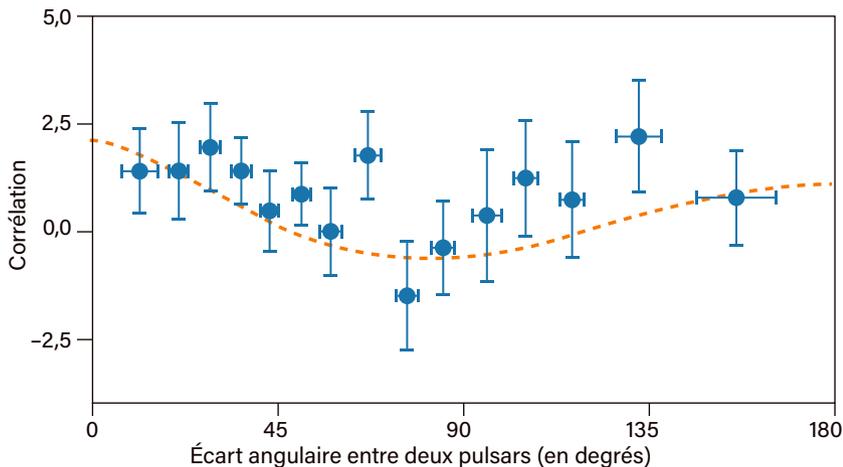
de pulsars afin de traquer des ondes gravitationnelles (voir la figure ci-dessous). En prenant en compte tous les effets mentionnés, nous sommes capables de dater un signal avec une incertitude de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes. Cette variabilité dépend de la saison et du moment de la journée, car l'activité et les perturbations de l'ionosphère sont liées à l'incidence du rayonnement ultraviolet venant du Soleil.

## UN SIGNAL DANS LE CHAOS

Au milieu de tout ce chaos de bruits et variations multiples se cache la signature de l'émission gravitationnelle que l'on cherche à mesurer. Celle-ci correspond à des oscillations entre retards et avances dans les signaux des pulsars d'au mieux quelques dizaines de nanosecondes. La détection du signal gravitationnel est possible grâce au fait que la plupart des autres sources de perturbations sont spécifiques à chaque pulsar, ou bien à un radiotélescope particulier, alors que le « bruit » gravitationnel est, lui, commun aux différents pulsars avec une signature attendue bien caractéristique. En corrélant les signaux des pulsars du réseau, il est possible d'exhiber cette



Schéma de principe d'un système de détection à base de réseau de pulsars. Les signaux des pulsars traversent un espace-temps courbé et arrivent sur Terre avec une grande régularité. Lors du passage d'une onde gravitationnelle, l'espace-temps est perturbé et induit une oscillation entre avance et retard pour le temps d'arrivée des signaux de chaque pulsar. Pour mettre en évidence cette perturbation, l'idée consiste à examiner les corrélations entre les signaux des différents pulsars du réseau.



signature. Notons cependant que le bruit des éphémérides planétaires et celui de l'horloge de la référence de temps internationale sont eux aussi partagés par tous les signaux que nous mesurons. Mais leur signature spatiale est différente du signal gravitationnel, et l'on sait *a priori* les séparer.

Qu'entend-on exactement par « signal gravitationnel commun » à tous les pulsars ? Si l'on avait une source unique d'ondes gravitationnelles, c'est-à-dire un seul couple de trous noirs supermassifs, on verrait apparaître pour chaque pulsar une modulation sinusoïdale dans les mesures du temps d'arrivée des pulsations. Les variations apparaîtraient d'autant plus grandes que la direction du pulsar dans le ciel est proche, angulairement, de la direction de cette source. D'un pulsar à l'autre, l'empreinte du signal gravitationnel dépend donc à la fois de la direction de la source (le couple de trous noirs) et des directions des deux pulsars vus depuis la Terre.

Or en réalité, les signaux des pulsars ne sont pas perturbés par une source unique, mais par toute une population de trous noirs binaires répartis de façon isotrope dans le ciel, avec autant de modulations sinusoïdales différentes (c'est-à-dire autant de fréquences gravitationnelles différentes) qu'il y a de couples de trous noirs. Dès lors, chaque pulsar est soumis au cumul de toutes ces perturbations. Vis-à-vis de ce signal isotrope, seul l'écart angulaire entre les directions des deux pulsars du réseau fait une différence dans nos mesures.

En 1983, Ronald Hellings et George Downs, de Caltech (l'institut de technologie de Californie), ont calculé pour la première fois la forme spécifique de la signature spatiale du signal gravitationnel en fonction de l'écart angulaire entre deux pulsars. C'est la « courbe de Hellings et Downs » (voir la figure ci-dessus). La reproduction de cette courbe à partir des données serait la preuve indiscutable de la détection d'une onde gravitationnelle grâce au réseau de pulsars.

Répartis de façon isotrope sur la voûte céleste, un grand nombre de couples de trous noirs supermassifs émettent des ondes gravitationnelles. Celles-ci perturbent les temps d'arrivée des signaux des pulsars en fonction de leurs positions relatives dans le ciel. Cela se traduit par une signature spatiale (axe vertical) qui dépend de l'écart angulaire (axe horizontal) entre les différents pulsars du réseau : la courbe de Hellings et Downs (courbe orange). Les points correspondent aux mesures de l'équipe NANOGrav avec douze ans et demi de données. Ils indiquent une tendance, mais ne permettent pas encore de trancher. Davantage de mesures sont nécessaires, mais la détection de la signature spatiale du signal sera la preuve ultime de la détection d'une onde gravitationnelle.

Comme nous l'avons dit, la population de trous noirs supermassifs qui forment des systèmes binaires au gré des épisodes de fusion entre galaxies est la source dominante des signaux auxquels sont sensibles les réseaux de pulsars. Ces trous noirs trônent au centre de la plupart des galaxies massives. Grâce à des études de dynamique galactique, leur existence ne fait plus aucun doute. L'exemple le plus notable est bien évidemment le cas de la Voie lactée. L'équipe de Reinhard Genzel, de l'institut Max-Planck de physique extraterrestre, près de Munich, et celle d'Andrea Ghez, de l'université de Californie à Los Angeles, ont commencé à suivre le mouvement des étoiles proches du centre galactique à partir du début des années 1990. Elles ont ainsi mis en évidence la présence du trou noir supermassif Sagittarius A\*, d'environ quatre millions de masses solaires.

Dans le cadre du modèle du Big Bang, avec un Univers dominé par de la matière noire froide et la constante cosmologique (responsable de l'accélération de l'expansion cosmique), les galaxies se forment par étapes. D'abord, des halos de matière noire s'agrègent et entraînent avec eux la matière ordinaire sous la forme d'un gaz froid qui se condense en leur cœur pour constituer les premières galaxies et les premières étoiles. Les plus petits halos de matière noire chutent vers les plus massifs, et les galaxies des premiers deviennent des satellites de leur nouvel hôte, avant de fusionner avec les galaxies les plus massives. Dans ce contexte, les collisions de galaxies conduisent dans la plupart des cas à la coalescence de leurs trous noirs centraux. Ainsi, de nombreux trous noirs supermassifs binaires se sont formés au cours de l'histoire cosmique (voir la figure page 44).

Lorsqu'un tel système binaire se constitue, ses membres devraient se rapprocher si lentement que la fusion n'opérerait pas en un temps inférieur à l'âge de l'Univers. De nombreux phénomènes contribuent à accélérer le processus : friction dynamique avec le gaz et les étoiles, interactions à trois corps avec une

## Il y aurait une fusion tous les 100 000 ans dans un volume comparable à celui du Groupe local

étoile voisine ou avec un troisième trou noir issu d'une autre collision galactique.

Quand les deux trous noirs sont assez proches, la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles devient dominante et conduit finalement à la fusion des deux corps. C'est dans cette phase que le système est observable par un réseau de pulsars. Les émissions gravitationnelles des différents systèmes binaires de trous noirs massifs se cumulent pour former un «fond d'ondes stochastique» dont on pourra caractériser l'amplitude et la distribution spectrale d'énergie avec les réseaux de pulsars. On s'attend aussi à détecter ponctuellement quelques systèmes doubles, très massifs ou très proches, émerger de ce fond et produire ici et là, dans le spectre, des signaux individuels à des fréquences précises.

La forme du fond stochastique est difficile à prévoir, car de nombreux paramètres entrent en compte : la distribution statistique de la masse des galaxies, le taux de fusion de celles-ci, la relation entre la masse du trou noir central et celle des étoiles de la galaxie hôte, les densités centrales des étoiles et du gaz susceptibles d'accélérer le rapprochement des composantes du système binaire, et enfin la distribution statistique de l'excentricité des orbites des trous noirs. Ces paramètres ne sont pas tous bien connus. En outre, ils ont évolué au cours de l'histoire cosmique.

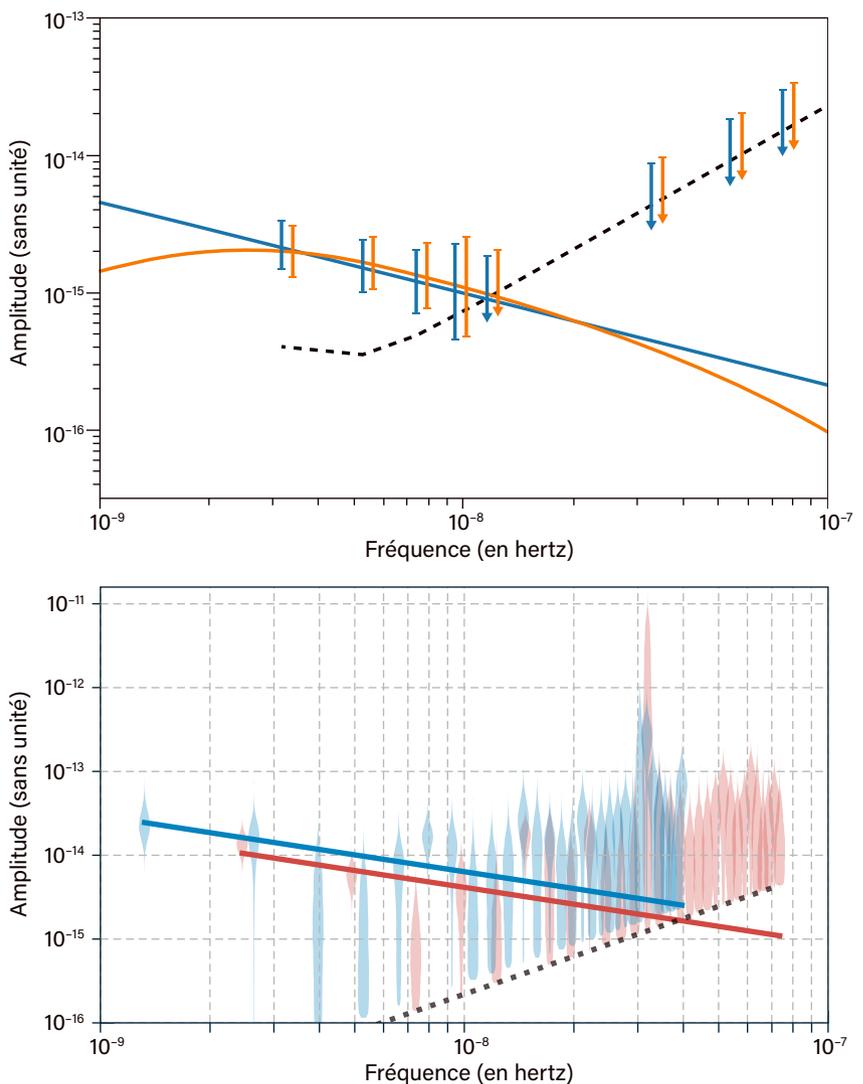
Dans le cas le plus simple d'une population de trous noirs binaires à orbites circulaires et n'interagissant que faiblement avec leur environnement, les simulations indiquent que la distribution spectrale du fond stochastique est décrite par une loi de puissance de la forme  $A f^{-2/3}$ , dont l'amplitude  $A$  se situe entre  $10^{-16}$  et  $10^{-14}$ , et où  $f$  est la fréquence de l'onde gravitationnelle (exprimée en années<sup>-1</sup>). Il est fort probable que la forme du spectre réel s'écarte de cette vue idéalisée.

## DE PREMIERS INDICES PROMETTEURS

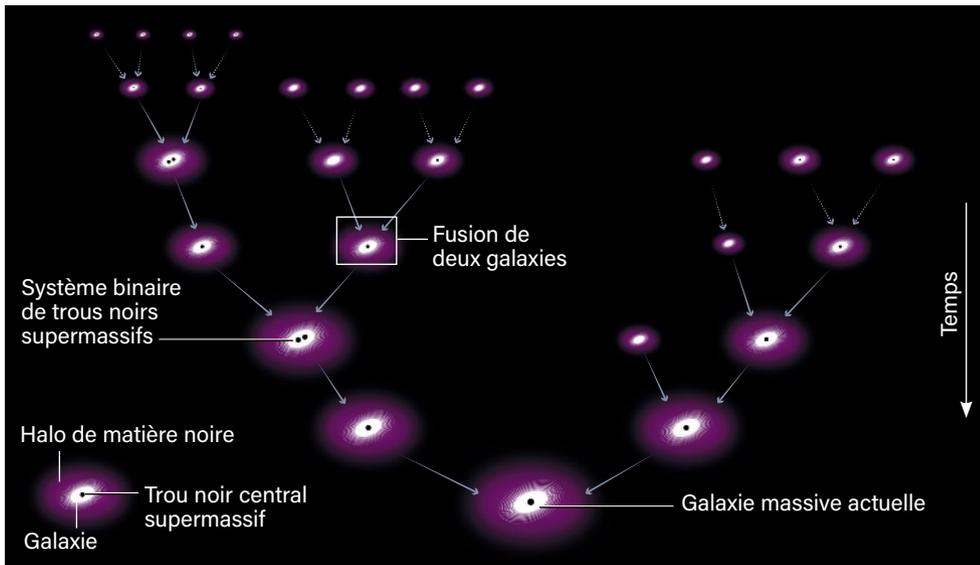
Nous pouvons tester différentes hypothèses grâce aux données observationnelles. On sait par exemple que la friction dynamique avec les étoiles et le gaz ou bien la présence systématique de plus grandes excentricités initiales des orbites accélèrent la coalescence des deux trous noirs et donc dépeuplent la zone des plus basses fréquences gravitationnelles, en créant un «coude» dans la distribution spectrale détectable par les réseaux de chronométrie de pulsars (voir la figure du haut ci-contre). Dit autrement, il y aurait moins de systèmes binaires en rotation très lente que prévu par le cas simple. Nous nous attendons aussi à une inflexion aux hautes fréquences avec une chute d'intensité qui reflète un nombre plus faible de sources très massives contribuant au fond stochastique.

L'amplitude moyenne  $A$  mesurée nous renseignera sur le taux de fusions des galaxies et sur le rapport de masse entre le trou noir central et la galaxie hôte.

Depuis la fin des années 2000, trois consortiums internationaux (européen *EPTA*, australien *PPTA* et américain *NANOGrav*) travaillent sur la détection des ondes gravitationnelles en collectant des données de chronométrie de pulsars sur le long terme, en améliorant l'instrumentation et la sensibilité des radiotélescopes et en développant des modèles d'analyse de plus en plus complexes, qui intègrent un maximum d'informations sur les effets systématiques et les biais potentiels.



Le spectre (*en haut*) indique l'amplitude du signal des ondes gravitationnelles en fonction de la fréquence de ces dernières. Le modèle le plus simple conduit à une droite (*en bleu*), tandis qu'un autre modèle prenant en compte divers effets physiques mène à une forme plus complexe (*en orange*). La ligne pointillée noire (sur les deux figures) représente le seuil de détection d'un réseau de pulsars millisecondes qui atteint une sensibilité de  $4 \times 10^{-16}$ . Lorsque cette ligne passe sous le spectre, il est alors possible de détecter le signal et d'estimer les paramètres du spectre. Sur la figure du bas sont représentées les données actuelles des expériences *NANOGrav* (*en rouge*) et *EPTA* (*en bleu*). Au-dessous d'une fréquence de  $6 \times 10^{-9}$  hertz, les points de mesure se détachent de la ligne pointillée (*à gauche de la figure*), comme attendu dans le cas de la détection d'un signal gravitationnel à basse fréquence. À des fréquences plus élevées, les instruments ont enregistré surtout du bruit.



Scénario de la formation hiérarchique des galaxies. Contenues dans des halos de matière noire qui fusionnent, les galaxies primordiales entrent en collision et produisent des structures de plus en plus massives. Les trous noirs qui occupent leur centre forment des systèmes binaires, sources d'ondes gravitationnelles jusqu'au moment de leur coalescence.

Jusqu'à présent, les études s'accordaient sur le fait que l'amplitude du fond stochastique d'ondes gravitationnelles ne dépassait pas  $3 \times 10^{-15}$ . Elles avaient ainsi établi des limites supérieures, mais pas encore enregistré de détections. En 2021, ces trois groupes ont annoncé des résultats concernant une possible première détection, sous la forme d'un signal commun à l'ensemble des pulsars utilisés, avec une amplitude comprise entre  $2,2$  et  $3,0 \times 10^{-15}$  et un spectre parfaitement cohérent avec celui attendu pour une population de trous noirs binaires supermassifs (voir la figure du bas page 43).

Ces résultats sont préliminaires et sont à prendre avec précaution. En effet, aucune des trois collaborations n'a encore mis en évidence la signature spatiale (la courbe de Hellings et Downs), preuve décisive d'un signal gravitationnel. Cependant, la concordance des résultats obtenus avec trois jeux de données indépendants, issus de radiotélescopes différents et avec des méthodes d'analyse concurrentes, permet d'exclure que ce signal soit d'origine purement instrumentale ou résulte par exemple d'un mauvais traitement de l'empreinte du milieu interstellaire.

D'éventuels effets systématiques dus aux références utilisées, le temps atomique international ou les éphémérides planétaires, ont aussi été écartés de façon robuste. Enfin, la mise en commun de toutes les données en un échantillon mondial unique dans le cadre de l'IPTA montre que la vraisemblance du signal augmente de façon importante, ce qui est encore un signe de sa cohérence. Les astronomes ont donc très envie d'y croire, mais restent prudents quant à la détection proprement dite d'un tel signal gravitationnel à basse fréquence.

En effet, la question ne pourra être tranchée qu'une fois que l'on aura détecté de façon convaincante cette fameuse signature spatiale.

Chaque collaboration espère fournir sa propre preuve indépendante d'ici à un an, soit pour l'été 2022. Pour le groupe européen, il s'agira de passer d'un échantillon constitué actuellement des 6 pulsars les plus stables (observés sur vingt-cinq ans avec cinq radiotélescopes différents) à un échantillon des 25 meilleurs pulsars sélectionnés de façon à offrir une couverture spatiale optimale. Avec un tel échantillon, si la détection d'un signal gravitationnel de l'ordre de  $2,5 \times 10^{-15}$  devait être confirmée, il sera possible d'identifier la signature spatiale tant attendue avec un haut niveau de confiance.

Si cette première mesure du fond d'ondes gravitationnelles se confirme, que nous apprendra-t-elle? Avant tout, elle ouvrira un nouveau champ d'investigation pour l'astrophysique des trous noirs binaires supermassifs. Comme nous l'avons vu, la forme du spectre dépend de nombreuses caractéristiques astrophysiques. Elle apportera donc des contraintes importantes sur les scénarios de formation et d'évolution des galaxies et des grandes structures de l'Univers. Les premiers chiffres donnent déjà potentiellement des limites sur le taux de fusion des trous noirs binaires, taux qui serait compris entre  $10^{-5}$  et  $2 \times 10^{-4}$  événements par mégaparsec cube et par an (1 mégaparsec est égal à environ 3,3 millions d'années-lumière), en accord avec d'autres observations. Cela correspondrait à une fusion tous les 100 000 ans dans un volume comparable à celui du Groupe local, l'amas de galaxies où se trouve la Voie lactée.

L'astronomie des ondes gravitationnelles a fait ses premières découvertes il y a à peine six ans et a déjà montré sa richesse pour explorer l'Univers. Elle devrait bientôt franchir une nouvelle étape en ouvrant la voie à l'étude de processus aussi vertigineux que la fusion de trous noirs supermassifs lors de la collision de galaxies. ■

## BIBLIOGRAPHIE

S. Chen *et al.*, **Common-signal analysis with 24-yr high-precision timing of the European Pulsar Timing Array : Inferences in the stochastic gravitational-wave background search**, *MNRAS*, en cours de publication, 2021.

H. Middleton *et al.*, **Massive black hole binary systems and the NANOGrav 12.5 yr Data Set : Search for an isotropic Stochastic Gravitational-wave Background**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 905, article L34, 2020.

Z. Arzoumanian *et al.*, **The NANOGrav 12.5 yr Data Set : Search for an isotropic Stochastic Gravitational-wave Background**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 905, article L34, 2020.

S. Bailly, **La détection des ondes gravitationnelles : une nouvelle fenêtre sur l'Univers**, *Pour la Science*, n° 462, avril 2016.

# PAS DE CHÂTEAU EN ESPAGNE MAIS JE FAIS PARTIE DU 1%

## FLORENCE BAITINGER

est co-fondatrice de Gobi,  
membre du collectif  
1% for the Planet.  
Chaque année,  
Gobi reverse  
1% de son chiffre d'affaires  
à la protection  
de l'environnement.

Rejoignez le mouvement sur  
[onepercentfortheplanet.fr](https://onepercentfortheplanet.fr)



FOR THE  
PLANET

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!**



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



À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – email : [serviceclients@groupepourlascience.fr](mailto:serviceclients@groupepourlascience.fr)

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

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

1<sup>re</sup> réf. \_\_\_\_\_ 01 x 10,40 € = 1040 €

2<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 10,40 € = \_\_\_\_\_ €

3<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 10,40 € = \_\_\_\_\_ €

4<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 10,40 € = \_\_\_\_\_ €

5<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 10,40 € = \_\_\_\_\_ €

6<sup>e</sup> réf. \_\_\_\_\_ x 10,40 € = \_\_\_\_\_ €

**TOTAL À RÉGLER** \_\_\_\_\_ €

Offre valable jusqu'au 31/12/21 en France Métropolitaine. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utilisons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls> Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse [protection-donnees@pourlascience.fr](mailto:protection-donnees@pourlascience.fr).

**2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES**

M.  Mme

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal \_\_\_\_\_ Ville : .....

Téléphone \_\_\_\_\_

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

**3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT**

Par chèque à l'ordre de Pour la Science en nous retournant ce bulletin complété

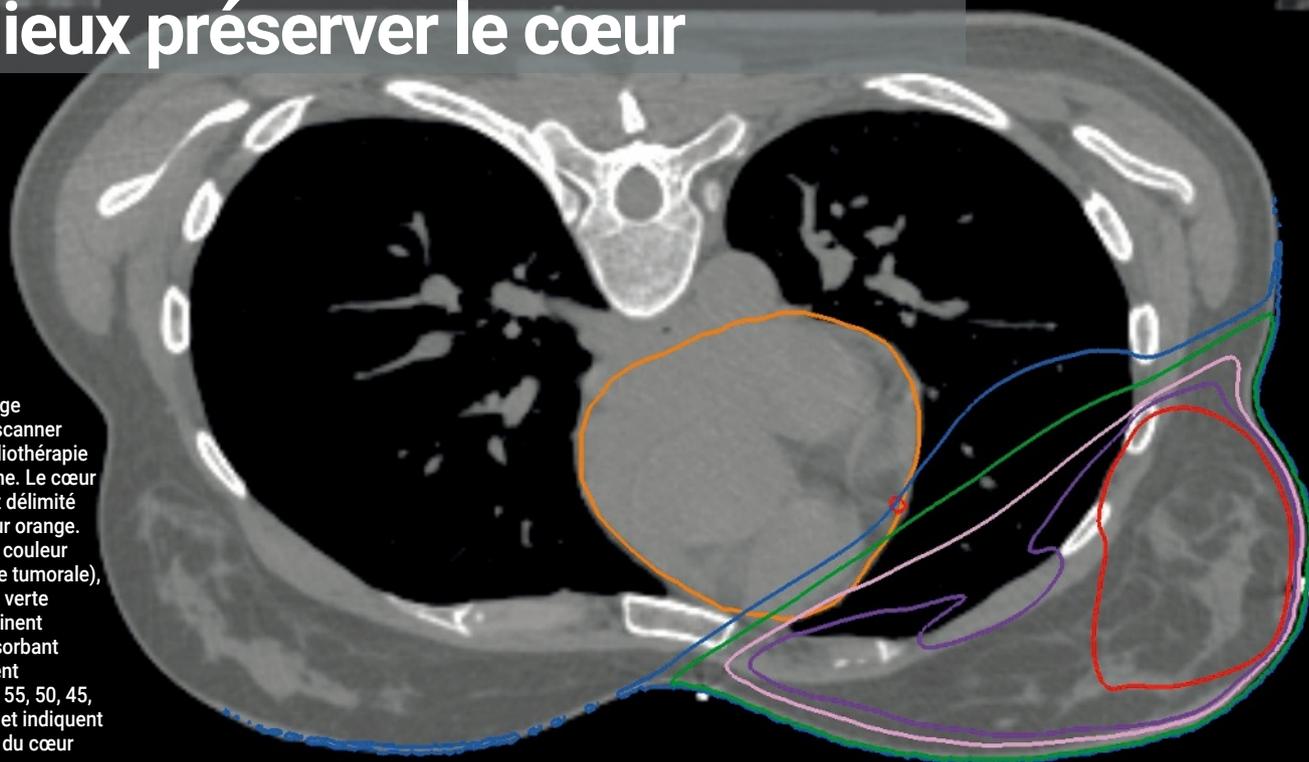


Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur [boutique.groupepourlascience.fr](http://boutique.groupepourlascience.fr)

# Radiothérapie du cancer du sein

## Mieux préserver le cœur

Sur cette image obtenue par scanner lors d'une radiothérapie du sein gauche, le cœur au centre, est délimité par un contour orange. Les lignes de couleur rouge (la zone tumorale), violette, rose, verte et bleue dessinent les zones absorbant respectivement des doses de 55, 50, 45, 15 et 6 grays et indiquent qu'une partie du cœur est irradiée.



### CONTEXTE

> Avec près de 60 000 nouveaux cas diagnostiqués chaque année en France, le cancer du sein est le type de cancer le plus fréquent chez les femmes. Dans près de 70% des cas, le traitement implique un recours à la radiothérapie. Mais, malgré les progrès techniques de ces protocoles et

un meilleur ciblage du rayonnement sur la tumeur, le risque d'effets secondaires cardiaques à long terme subsiste. Le programme Baccarat, piloté par l'IRSN, étudie pour la première fois les prémices de cette cardiotoxicité durant les vingt-quatre premiers mois qui suivent le traitement.

Cahier partenaire  
réalisé avec

**IRSN**

[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

**Entre 2015 et 2017, une centaine de femmes âgées de 40 à 75 ans, ayant toutes été soignées par radiothérapie pour un cancer du sein, ont fait l'objet d'un suivi inédit. Objectif : chercher à détecter des altérations précoces, signes avant-coureurs de complications cardiaques qui pourraient survenir à long terme à cause des rayonnements reçus, bien avant leur manifestation clinique.**

**L**a radiothérapie est l'un des traitements du cancer du sein les plus utilisés, qui suit en général l'intervention chirurgicale. Son bénéfice est incontestable pour les patientes, limitant considérablement le risque de récurrence. Néanmoins, le protocole thérapeutique d'irradiation n'est pas sans risque d'effets à long terme sur le cœur, car il expose partiellement ce dernier aux radiations. Dans les années 2000, plusieurs études ont montré que le risque d'insuffisance cardiaque, de coronaropathie, ou d'infarctus du myocarde à échéance de 10 à 15 ans était accru chez des femmes ayant subi une radiothérapie du sein. Parmi ces études, une méta-analyse publiée en 2005, réalisée sur 300 000 femmes soignées entre 1976 et 1991, fait référence. Elle estime que le risque de mortalité cardiaque 15 ans après le traitement est 1,27 fois plus élevé pour les patientes soignées par radiothérapie que pour celles du groupe témoin ne l'ayant pas été.

D'autres travaux ont ensuite cherché à mieux comprendre le lien entre cette cardiotoxicité et la dose moyenne de rayonnement absorbée par le cœur. Ainsi, en 2013, l'analyse de 2 168 cas de femmes traitées entre 1958 et 2001 en Suède et au Danemark a établi que le taux d'incidents cardiaques graves augmentait de 7,4% par gray\* absorbé.

Cependant ce sont toutes des études rétrospectives, qui étudient les effets *a posteriori*. De plus, elles portent sur des techniques de radiothérapie anciennes, datant des années 1990. Or depuis, grâce aux progrès de ces traitements, les doses absorbées ont considérablement été réduites. Elles ont diminué d'un facteur 5 entre les années 1970 et les années 2000. Aujourd'hui, les doses absorbées par le cœur sont en général de l'ordre de quelques grays pour les patientes traitées pour un cancer au sein gauche et de moins d'un gray pour celles traitées pour un cancer au sein droit.

> Pour autant, certaines zones du cœur reçoivent encore des doses non négligeables et la toxicité cardiaque de ces nouvelles radiothérapies reste mal connue. Ces irradiations partielles sont susceptibles d'entraîner des anomalies cardiaques non ressenties par la patiente, qualifiées « infracliniques », qui pourraient être à l'origine des maladies cardiovasculaires radio-induites.

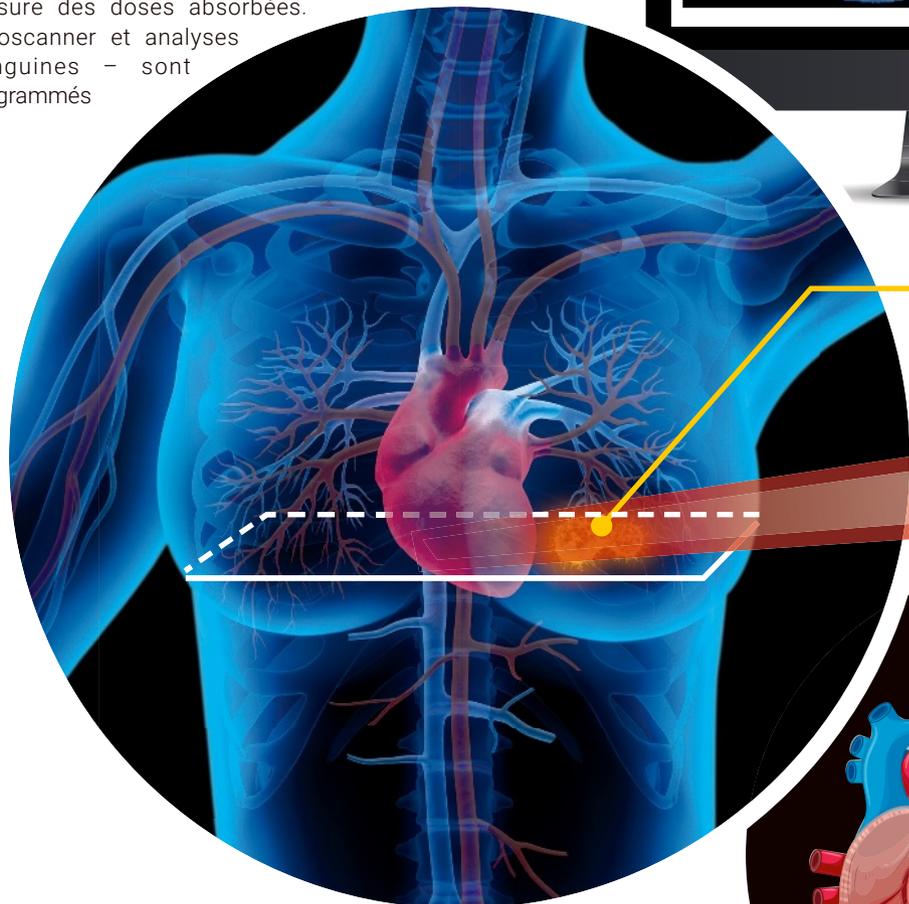
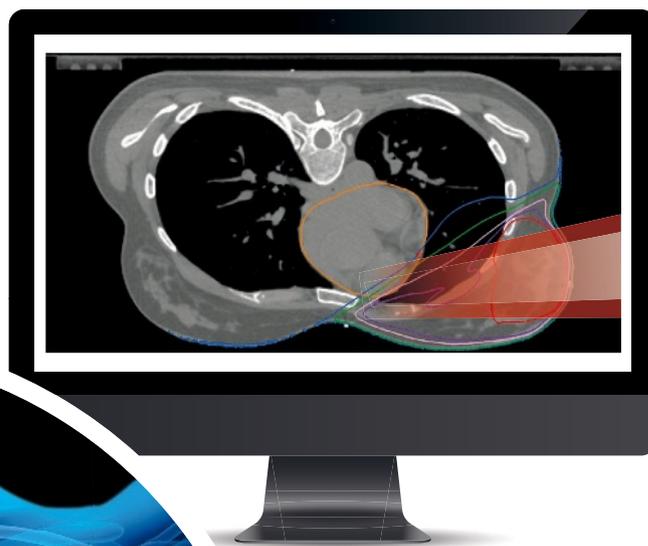
Peut-on détecter ces signes précoces pour anticiper la survenue des complications cinq, dix, quinze, vingt ans plus tard ? Quelles sont les lésions cardiaques à rechercher et comment ? Peut-on les relier directement à la dose locale reçue ?

C'est à toutes ces questions que cherche à répondre le projet Baccarat, piloté par Sophie Jacob, de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire en collaboration avec la clinique Pasteur de Toulouse, le CHU Toulouse Rangueil, l'équipe Épidémiologie cardiovasculaire de l'Inserm à Toulouse et avec le soutien de la Fédération française de cardiologie.

Le projet consiste à suivre durant deux ans une cohorte de femmes, recrutées parmi les patientes de la clinique Pasteur. Il s'agit cette fois d'une étude prospective dont le protocole prévoit pour chaque participante un bilan cardiaque initial avant la radiothérapie, un autre six mois plus tard et un troisième vingt-quatre mois après la radiothérapie. L'ensemble des examens – échographie, mesure des doses absorbées, coroscanner et analyses sanguines – sont programmés

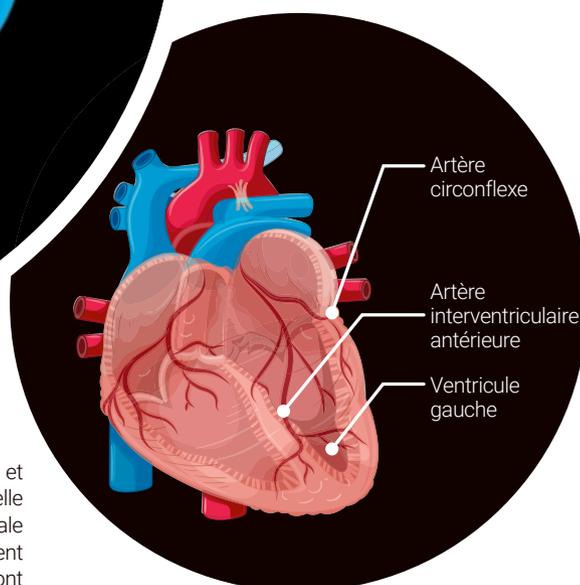
pour explorer plusieurs axes d'investigation : la détection d'effets précoces fonctionnels et structurels, la recherche de biomarqueurs sanguins et l'analyse de la relation entre les doses absorbées et la survenue de ces effets précoces.

Le recrutement des premières patientes a démarré en 2015 et s'est achevé en 2017. La cohorte rassemble une centaine de femmes âgées de 40 à 75 ans atteintes d'un cancer du sein, toutes soignées par radiothérapie, sans chimiothérapie pour écarter les effets liés à ce type de traitement. Dans une approche prospective



Tumeur

Radiation



Artère circinflexe

Artère interventriculaire antérieure

Ventricule gauche

## LES EFFETS COLLATÉRAUX DE LA RADIOTHÉRAPIE DU SEIN

La radiothérapie du cancer du sein consiste à envoyer des faisceaux de radiation sur et autour de la tumeur pour éliminer les cellules cancéreuses. La position du cœur est telle qu'il peut en absorber aussi. Les images réalisées au scanner (ici, une coupe horizontale du buste au niveau de la tumeur) combinées aux mesures des doses absorbées montrent que le ventricule gauche et plus particulièrement l'artère interventriculaire antérieure sont les structures cardiaques les plus exposées.

d'étude d'anomalies infracliniques assez fréquentes mais dont une faible proportion seulement se traduira par une complication à long terme, cette taille de cohorte est suffisante pour mettre en évidence des effets statistiquement significatifs.

L'équipe dirigée par Sophie Jacob s'est d'abord concentrée sur la mesure des doses absorbées par les différentes zones du cœur lors de la radiothérapie. En effet, cette cartographie restait mal connue. Et jusqu'ici, faute de données précises, les évaluations de la cardiotoxicité radio-induite se fondaient uniquement sur la dose moyenne reçue par le cœur.

## DOSIMÉTRIE INÉDITE

Dans ce nouveau cadre expérimental, les chercheurs ont utilisé une méthode innovante, développée par leur collègue David Broggio du service de dosimétrie de l'IRSN, jamais encore appliquée à l'échelle d'un groupe aussi important. Le principe est de combiner les informations du premier scanner cardiaque – coroscaner réalisé avant le traitement et qui fournit une description très précise des artères coronaires – avec celles du scanner qui sert à guider la radiothérapie, moins précis mais qui indique en chaque point, du cœur notamment, la dose absorbée.

Et cela pour chaque patiente! Le groupe examiné comptait 104 femmes, dont 89 soignées pour un cancer du sein gauche et 15 pour un cancer du sein droit, ayant suivi un protocole de radiothérapie qui consistait à délivrer une dose globale de 50 grays au niveau de la tumeur, fractionné sur 5 semaines à raison de 25 séances de 2 grays.

Les résultats de ce travail considérable montrent que la dose moyenne absorbée par le cœur ne reflète pas l'hétérogénéité de l'irradiation cardiaque. « Prenons l'exemple d'une patiente traitée pour un cancer du sein gauche dont le cœur reçoit une dose moyenne de 3 grays. La mesure ciblée sur le ventricule gauche indique, elle, 6 à 7 grays. Quand on se focalise plus précisément encore sur les artères coronaires, notamment sur l'artère interventriculaire antérieure la plus proche du faisceau de rayons, la dose atteint 15 à 16 grays. Et à la pointe du cœur, l'apex, cette artère coronaire, peut recevoir des doses proches de 40 grays », décrit Sophie Jacob.

Globalement, 55 % des patientes ayant reçu une dose moyenne inférieure à 3 grays, peuvent avoir été exposées localement à une dose de plus de 40 grays sur cette artère. Ce premier résultat très important incite donc déjà à tenir compte de cette répartition hétérogène et des structures cardiaques les plus exposées plutôt que de s'en tenir à la dose moyenne considérée jusqu'ici comme référence.

Cette cartographie dosimétrique réalisée, l'équipe de Baccarat a ensuite cherché à détecter les effets cardiaques infracliniques en lien avec les doses reçues. Deux types d'effets précoces, susceptibles de provoquer un accident cardiovasculaire grave à long terme, sont à rechercher. Des altérations de la fonctionnalité du myocarde, comme la diminution de la contractilité au niveau du ventricule gauche, bien connue des cardiologues mais dont le lien avec la radiothérapie n'était pas établi. Et des altérations plus structurelles des artères coronaires, en particulier de l'artère interventriculaire antérieure dont l'occlusion peut nécroser une partie du myocarde et endommager sévèrement le ventricule gauche.

Valentin Walker, qui a réalisé sa thèse d'épidémiologie à l'IRSN, s'est intéressé au premier type d'effet, *a priori* le plus rapide à apparaître. La capacité du ventricule gauche à se contracter se mesure à partir d'échographies cardiaques spécifiques. Et l'on considère qu'une réduction de plus de 10 % de la contractilité est un indicateur significatif d'un dysfonctionnement infraclinique. Pour cette étude, il a suivi un groupe de 79 patientes de la cohorte. Résultat,

l'échographie réalisée six mois plus tard, comparée à l'échographie initiale avant radiothérapie, révèle bien une dégradation qui coïncide avec les doses absorbées : une diminution de la contractilité supérieure à 10 % est plus fréquente chez les patientes dont la dose absorbée par le ventricule gauche est plus élevée. Elle a été observée chez 48 % des patientes traitées au niveau du sein gauche et, statistiquement, le risque de présenter une telle diminution augmente de 14 % par gray absorbé. Il restera à vérifier sur l'échographie suivante si cette altération détectée six mois après le traitement perdure deux ans plus tard. Et, le cas échéant, à suivre son évolution. Les résultats attendus prochainement devraient aussi servir à identifier les patientes les plus à risque, nécessitant un suivi cardiologique à long terme.

Quant au deuxième type d'effet infraclinique recherché, l'impact sur les artères coronaires, il est un peu plus lent à percevoir. Aucune des patientes n'avait d'antécédent de maladie cardiaque sévère. On cherche donc à détecter le tout début du développement de plaques d'athéromes, couche qui se forme sur la paroi interne de l'artère et l'obture peu à peu. Seule l'analyse de l'ensemble des coroscanners réalisés deux ans après le traitement permettra de conclure.

## BIOMARQUEURS SANGUINS

Enfin, l'étude de la piste des biomarqueurs sanguins, plus exploratoire, est en cours en collaboration avec Fabien Milliat et Georges Tarlet du Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales de l'IRSN. L'objectif est de comprendre les mécanismes biologiques qui sous-tendent le développement potentiel de ces effets secondaires. Et de suivre pour cela l'évolution de marqueurs qui reflètent une réaction en phase aiguë (dans les jours qui suivent la radiothérapie) ou plus tardive (dans les mois qui suivent la radiothérapie) après l'irradiation : marqueurs du processus inflammatoire, de dysfonction endothéliale, du système de coagulation ou de fibrose.

À terme, l'ensemble des résultats permettra de proposer de nouvelles pistes de recommandations pour, d'une part, améliorer les techniques de radiothérapie du cancer du sein en prenant mieux en compte l'irradiation cardiaque et, *in fine* limiter l'irradiation des artères coronaires, et d'autre part, développer le suivi et la prise en charge précoce des patientes présentant des signes infracliniques d'altération cardiaque.

Mais, d'ores et déjà, une première mesure paraît assez simple à mettre en œuvre avec les techniques actuelles : elle consisterait à optimiser l'exposition du ventricule gauche lors de la radiothérapie, grâce à un contourage spécifique, pour limiter autant que possible la dose absorbée localement. Ceci permettrait de réduire le risque de dysfonction infraclinique cardiaque. ■

## RÉFÉRENCES

- > Clarke M. et al., *Lancet*, 366(9503), 2087-106, 2005 ; Darby S.C. et al., *Lancet Oncol.*, 6(8), 557-65, 2005.
- > Darby S.C. et al., *New Eng J. Med*, 368(11), 987-98. 2013.
- > Jacob S. et al., *Radiation Oncology*, DOI 10.1186/s13014-016-0627-5, 2016.
- > Jacob S. et al., *Radiation Oncology*, doi.org/10.1186/s13014-019-1234-z, 2019.
- > Walker V. et al., *Radiation Oncology* doi.org/10.1186/s13014-019-1408-8, 2019.

\*Le gray (Gy) mesure la dose absorbée, c'est-à-dire la quantité d'énergie cédée par les particules radioactives à la matière exposée, par unité de masse. 1 gray correspond à 1 joule cédé par kilogramme de matière.

L'ESSENTIEL

> Entre le V<sup>e</sup> et le II<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, partout en Europe, les paysans néolithiques ont construit des enceintes pour y célébrer un culte solaire.

> Un sanctuaire complexe de plus de 4 000 ans découvert sur les bords de l'Elbe, non loin de Magdebourg, dans le Land de Saxe-Anhalt, en Allemagne,

a de nombreux points communs avec Stonehenge.

> Les fouilles qui s'y poursuivent depuis 2005 ont mis en évidence une utilisation multiséculaire en fonction d'événements solaires comme les solstices ou la nuit de Walpurgis (du 30 avril au 1<sup>er</sup> mai).

L' AUTRICE



**KARIN SCHLOTT**  
archéologue et rédactrice pour la revue *Spektrum der Wissenschaft*



En 2016, le service des monuments historiques et de l'archéologie de Saxe-Anhalt a fait reproduire à partir de pas moins de 1 200 poteaux de bois l'enceinte néolithique de Pömmelte.

# Un «Stonehenge» allemand

Sur les bords de l'Elbe, en Saxe-Anhalt, des archéologues ont retrouvé les vestiges d'un sanctuaire néolithique, siège de cruels rituels. Et fort similaire à celui de Stonehenge.



**S**tonehenge fascine. Implanté au bord de la rivière Avon, dans le sud de la Grande-Bretagne, le site consistait vers 2800 avant notre ère seulement en une seule enceinte grossièrement circulaire délimitée par un petit talus doublé d'un fossé; puis, à partir de 2600 avant notre ère, d'énormes mégalithes – les «pierres bleues» – ont été acheminées depuis le pays de Galles pour ériger un cercle de pierre, tandis que des maisons, des tombes, des chemins et d'autres enceintes se sont ajoutés au cours des siècles. Qu'est-ce qui a poussé des gens à construire un sanctuaire aussi gigantesque? Et quel sens avaient ses diverses structures? Implanté sur les bords du fleuve Elbe, en plein centre de l'Allemagne, un complexe néolithique comparable à Stonehenge, et qui lui est contemporain, pourrait aider à résoudre ces énigmes.

La plus importante structure du site allemand est une enceinte en bois et terrassements implantée sur une rive inondable de l'Elbe, sur le lieu-dit de Zackmünde, à Pömmelte, dans l'arrondissement de Salzwedel. Les curieux qui s'y rendent aujourd'hui ne découvrent pas un chantier de fouille, mais une structure faite de centaines de poteaux de bois entourant un grand espace central circulaire. Cette structure ne rappelle guère les portiques de pierre du Stonehenge actuel érigés pendant l'âge du Bronze vers 2000 avant notre ère. Toutefois, elle évoque le Stonehenge des «pierres bleues», plus ancien, dont l'implantation suit très exactement le plan du sanctuaire de Pömmelte dressé par les archéologues.

Ces derniers ont commencé à fouiller le site entre 2005 et 2008 et y sont à nouveau à l'œuvre depuis 2018. Les découvertes accumulées sont tout aussi spectaculaires que celles de Stonehenge: les chercheurs ont mis au jour les traces d'une agglomération, de sa nécropole et d'une enceinte de poteaux de bois, qui, d'après les datations par le radiocarbone, fut installée vers 2300 avant notre ère et perdura jusqu'au début de l'âge du Bronze ancien (vers 2200 avant notre ère). Toutefois, l'occupation du site de Pömmelte excède largement le Néolithique, puisque la découverte d'une nécropole d'urnes, typique de l'âge du Fer (800 à 500 avant notre ère dans le nord de l'Europe tempérée) montre qu'elle s'étend jusqu'à cette période culturelle.

Les Européens de la fin du Néolithique (5600 à environ 2200 avant notre ère) vivaient alors les changements drastiques entraînés par l'immigration de groupes yamna, une culture du Néolithique final originaire des steppes pontiques (la partie européenne de la grande steppe eurasiennne). Ces semi-nomades avaient migré vers l'Europe tempérée et y avaient établi la culture dite «à céramique cordée», ainsi nommée à cause des impressions de cordelette

sur ses poteries; d'autres migrants venus d'Europe de l'Est, eux aussi d'ascendance yamna, portaient pour leur part la culture campaniforme – nommée aussi «le Campaniforme» – d'après ses poteries en forme de cloche. Ces populations issues des steppes apportaient des innovations, tels le chariot, le cheval et des métallurgies du cuivre et du bronze avancées. Il y a environ 2300 ans avant notre ère, l'Europe tempérée était donc en train de passer du Néolithique à l'âge du Bronze.

D'un diamètre de 115 mètres, l'enceinte de Pömmelte contenait un espace ouvert intérieur d'un diamètre de 47 mètres. Entre ces deux cercles de 115 et de 47 mètres de diamètre, les archéologues ont mis au jour les traces de structures complexes: des entrées menaient vers

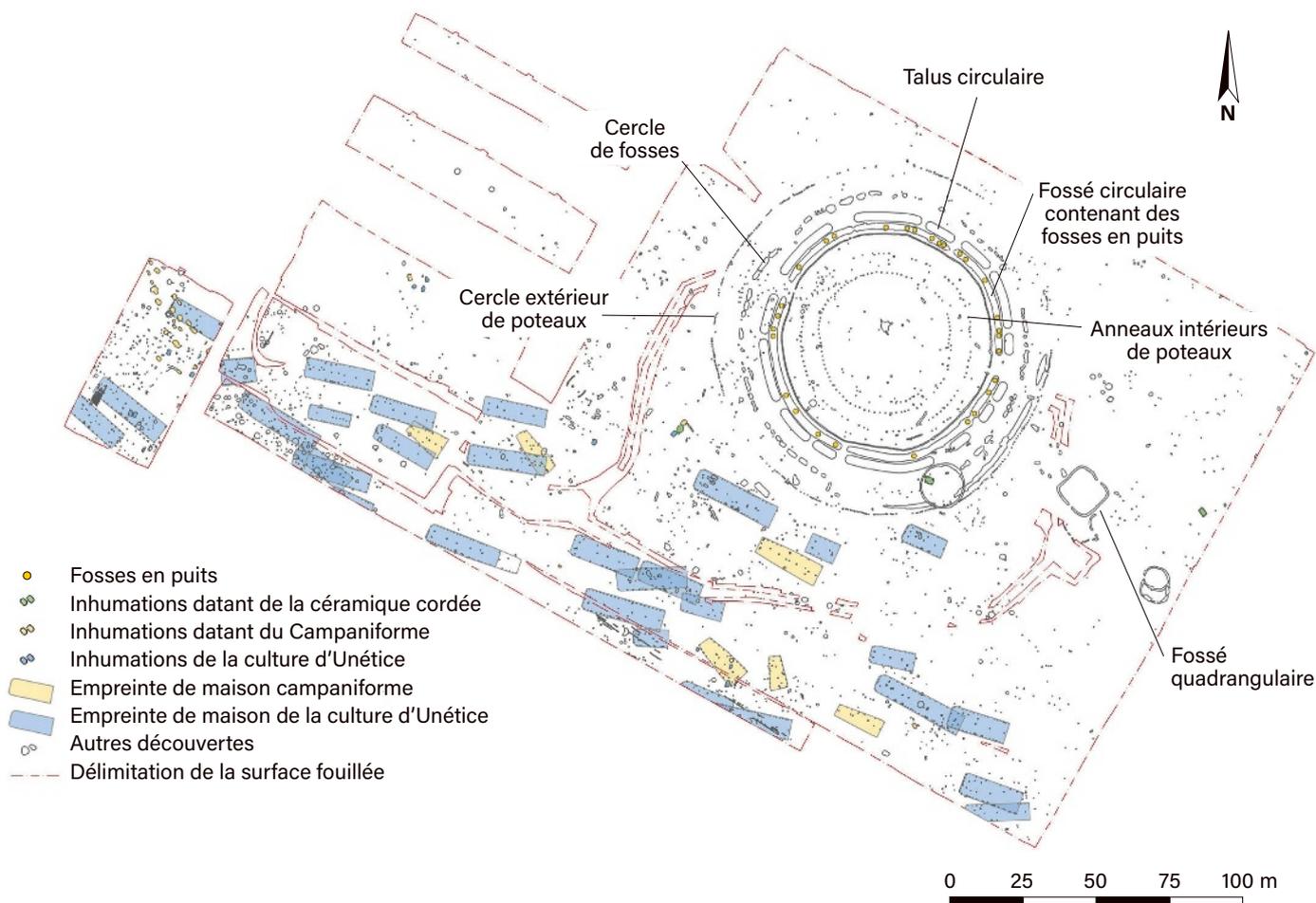


## Les jours à mi-chemin entre solstices et équinoxes, le soleil se lève dans l'axe des entrées principales

l'intérieur de l'enceinte depuis quatre directions opposées deux à deux; deux d'entre elles donnaient à voir l'intérieur de l'enceinte, de sorte qu'une personne les empruntant pénétrait successivement un anneau de poteaux partiellement entouré de fossés, un cercle de fosses isolées, un cercle en talus de terre, un anneau fossoyé et finalement l'intérieur d'une palissade circulaire; une fois dans la place centrale, elle découvrait encore deux anneaux concentriques de poteaux de bois plantés de manière quelque peu irrégulière (voir la photo page 56).

### UN CULTE SOLAIRE

Les constructeurs du complexe de Pömmelte se sont arrangés pour qu'à certaines heures de certains jours – les jours situés exactement au milieu entre solstices et équinoxes (ou équinoxes et solstices) –, le soleil se lève et se couche dans l'axe défini par les entrées principales. Les préhistoriens ont depuis longtemps remarqué la grande importance sociale de ces dates particulières dans les cultures postérieures au Néolithique. «Les Celtes célébraient par exemple la fête de Beltaine le 1<sup>er</sup> mai, connue



aussi sous le nom de nuit de Walpurgis», souligne François Bertemes de l'université Martin-Luther de Halle-Wittenberg, l'archéologue qui dirige l'étude du site. Les fêtes celtiques que l'on nomme en gaélique irlandais *Imbolc* et *Samhain* tombent aussi pendant ces dates intermédiaires et figurent toujours dans le calendrier chrétien sous les termes français de Chandeleur (le 2 février, le 33<sup>e</sup> jour de l'année) et de Toussaint (le 1<sup>er</sup> novembre, le 305<sup>e</sup> jour de l'année).

«Le site de Pömmelte fait clairement référence à des événements solaires», affirme François Bertemes, rejoint par André Spatzier, l'ancien directeur des fouilles, pour qui «le site est manifestement orienté en fonction de la course solaire.» À cet égard, François Bertemes souligne que la forme ronde de l'enceinte témoigne de sa vocation, puisqu'elle traduit le cycle du soleil au cours de l'année tout en étant aussi à l'image du disque solaire. «Les Néolithiques vivaient en fonction des cycles de la végétation et donc des cycles solaires, rappelle-t-il, de sorte que, de par leur récurrence, les tournants de l'année ne pouvaient que jouer un rôle essentiel pour eux.» Dans l'enceinte de Pömmelte, ces paysans, «dont seulement quelques-uns étaient aussi des guerriers» précise André Spatzier,

**Les trous de poteaux et restes de fossés découverts à Pömmelte ont livré le plan d'un vaste sanctuaire circulaire et ceux de nombreuses maisons.**

adoraient donc vraisemblablement le grand dispensateur de vie qu'est le soleil.

Dans toute l'Europe, les archéologues ont découvert des enceintes néolithiques circulaires comparables à celle de Pömmelte, qui datent de la période allant du V<sup>e</sup> au II<sup>e</sup> millénaire avant notre ère. On nomme «enceintes circulaires à fosse» les plus anciennes de ces structures, qui, comme à Pömmelte, étaient faites de fossés, de palissades et de murs circulaires en terre. Beaucoup d'entre elles sont mal étudiées ou mal conservées. Dans certaines, telle celle de Goseck en Saxe-Anhalt, les chercheurs ont pu établir que, comme à Pömmelte, l'axe des entrées s'alignait avec certains des événements solaires importants de l'année: les solstices et la nuit de Walpurgis. Érigé à partir de 2800 avant notre ère, le site de Stonehenge n'est donc pas un cas particulier, même si son enceinte se distingue par son architecture élaborée à base de matériaux durables qui tranche avec celles de Goseck ou Pömmelte, construites en bois et en terre.

Nous l'avons déjà souligné, toute la structure de Pömmelte – son orientation, sa forme circulaire, etc. – suggère que cette enceinte fut un sanctuaire remarquablement similaire à Stonehenge. Cette ressemblance n'est pas

seulement structurelle: le reste du site est aussi très comparable.

Ainsi, en 2011, une équipe dirigée par André Spatzier, alors au service des monuments historiques et de l'archéologie de Saxe-Anhalt, a mis au jour une deuxième enceinte à quelque 1500 mètres en aval de celle de Pömmelte: l'enceinte de Schönebeck. Là, des fossés et des anneaux de poteaux entouraient autrefois un espace ouvert circulaire. L'enceinte de Schönebeck mesure 90 mètres de diamètre environ. Les datations par le radiocarbone montrent qu'elle fut construite vers 2200 avant notre ère, donc un peu plus tard que celle de Pömmelte. Pour les chercheurs, les enceintes de Pömmelte et de Schönebeck fonctionnaient ensemble: «Elles appartenaient au même paysage rituel», résume Franziska Knoll, de l'université Martin-Luther de Halle-Wittenberg, qui, depuis trois ans, fouille les deux sites en coopération avec le service des monuments historiques et de l'archéologie de Saxe-Anhalt.

À Stonehenge aussi, plusieurs sanctuaires circulaires ont coexisté et fonctionné en même temps. En effet, des chemins et la rivière Avon reliaient l'enceinte de Stonehenge en pierres bleues à d'autres monuments. À environ 3 kilomètres de l'enceinte mégalithique, les Durrington walls et Woodhenge, deux enceintes circulaires, datent de 2500 avant notre ère environ. À proximité se trouvait un hameau d'une

**S'agit-il d'indices de sacrifices humains? Les squelettes d'une femme et d'un enfant dont les crânes et des côtes avaient été fracassés gisent ensemble au fond d'une fosse en puits. Des constatations impressionnantes, mais qui ne suffisent pas à prouver qu'ils ont été sacrifiés.**

dizaine de maisons qui, d'après les fouilles de Mike Parker Pearson, à l'université College de Londres, n'était habitée que lors des solstices. Quand arrivaient le jour le plus court et le jour le plus long de l'année, des centaines de personnes occupaient les maisons, où, d'après les amas d'os découverts, elles se nourrissaient de porc rôti – peut-être dans le cadre de banquets. Selon les archéozoologues qui les ont étudiés, ces porcs ont été élevés en divers endroits des îles Britanniques, puis amenés à Stonehenge pour y être abattus: manifestement, des pèlerins de toute la Grande-Bretagne venaient à Stonehenge en plein hiver célébrer la nuit la plus longue de l'année.

### DES TRACES DE RITUELS

Franziska Knoll, André Spatzier et François Bertemes sont d'accord: des rassemblements similaires se déroulaient vraisemblablement à Pömmelte et à Schönebeck, même si l'on n'y a pas encore trouvé de traces de consommation en masse d'animaux, comme à Stonehenge. En revanche, les archéologues ont découvert, autour des sanctuaires allemands, les indices de certaines pratiques rituelles. «L'espace intérieur de Schönebeck n'était pas isolé par une palissade de poteaux comme celui de Pömmelte, explique André Spatzier. Le regard y portait donc dans toutes les directions, sauf dans celle de Pömmelte, où se dressait une



dense palissade.» Les archéologues n'ont pas encore d'interprétation robuste de ce fait curieux. André Spatzier propose que chacune des deux enceintes ait été liée à un aspect opposé de l'existence: la vie et la mort, l'ici et l'au-delà, etc. Une impression qui repose sur le fait que Schönebeck ne recèle aucun des éléments découverts en abondance à Pömmelte (fosses, dépôts et tombes).

Les chercheurs ont en effet trouvé pas moins de 29 «fosses en puits» (fosses rondes) profondes de 2,5 mètres dans le fossé circulaire de Pömmelte. Trois siècles durant, ces fosses furent remplies de la même façon: d'abord, un grand panier plein de tessons de vaisselle à boire, d'os de bovins et de moutons était descendu dans la fosse; on pelletait ensuite assez de gravier pour former une couche sur laquelle des os, des meules ou des haches de pierre étaient déposés. Pour les archéologues, le dépôt renouvelé des mêmes objets, toujours de la même façon, constitue une signature claire de rituel.

L'étude du Néolithique et des périodes subséquentes nous offre nombre d'exemples de ce phénomène archéologique: on plaçait dans des fosses en puits ce qui avait été employé pendant la cérémonie – par exemple un banquet rituel – ou une fête sacrée et on le détruisait volontairement si son usage ne l'avait pas déjà fait. Manifestement, ce qui était employé pendant une fête sacrée ne devait pas réintégrer le circuit normal, celui du quotidien, et, si nécessaire, était l'objet de ce que les archéologues nomment un «abandon volontaire» ou une «destruction volontaire» (qui décourageaient d'éventuelles tentatives de pillage).

Il semble que cette logique pouvait s'étendre à des «biens vivants», à des animaux par exemple, voire à des esclaves. Cette possibilité explique peut-être les découvertes macabres faites dans certaines fosses. Les chercheurs y ont mis au jour les ossements d'enfants, d'adolescents et d'une femme portant des traces de violence périmortelle. Dans certains cas, une partie du squelette seulement est présente: les os d'un pied, d'une cuisse ou d'une main, par exemple.

Ces restes humains ont manifestement été enterrés sans respect aucun, c'est-à-dire jetés simplement au fond des fosses, où leurs corps sont restés dans la position résultant de la chute. Le squelette féminin, par exemple, se trouvait dans une position aberrante; celui d'un enfant, probablement jeté sur elle, le recouvrait; les crânes de la femme et de l'enfant étaient fracassés; leurs côtes cassées; et des chiens avaient eu le temps de s'attaquer au cadavre de la femme, tandis que l'enfant avait été ligoté. Les anthropologues qui ont étudié ces restes ont prouvé que peu de temps s'est écoulé entre la mort et le dépôt au fond d'une fosse.

Des sacrifices humains avaient-ils lieu? André Spatzier est prudent: pour lui, les preuves archéologiques montrent seulement que «les corps jouaient un rôle dans un rituel». Même attitude chez François Bertemes: «L'ethnologie nous a donné des exemples de rituels funéraires violents, de sorte qu'il est concevable que les crânes des deux personnes n'aient été défoncés qu'après leur mort.» Cette interprétation est soutenue par les constata-



## Ces restes humains ont été enterrés sans respect aucun, jetés au fond des fosses



tions des anthropologues Kurt Alt, de l'université privée du Danube, à Krems, en Autriche, et Marcus Stecher, de l'université Johannes-Gutenberg de Mayence, en Allemagne, qui ont constaté que dans la plupart des cas il n'est pas possible de déterminer la cause du décès; par ailleurs, nombre de squelettes gisaient tellement en vrac dans leurs fosses qu'ils n'ont pu y être jetés «que dans un état avancé de décomposition». Ainsi, les omoplates, les côtes, les os longs des jambes et des bras étaient souvent absents, ce qui implique que leurs propriétaires n'ont pas été placés dans leurs tombes sur le côté en position foetale, c'est-à-dire en suivant la pratique funéraire en vigueur entre 2300 et 2000 avant notre ère.

Toutefois, toutes les inhumations néolithiques ne sont pas identiques, car le côté du corps choisi ou encore la position de la tête varient d'une culture à l'autre: arrivés des steppes en Europe tempérée vers 2900 avant notre ère, les gens de la céramique cordée enterraient leurs morts le visage tourné vers le sud; arrivés vers 2500 avant notre ère, ceux de culture campaniforme enterraient les leurs la face tournée vers l'est. Dans les deux cultures, les hommes étaient couchés dans leur tombe sur un flanc du corps différent de celui sur lequel étaient couchées les femmes. «Il s'agissait clairement de sociétés très genrées, où les sphères féminine et masculine devaient rester séparées, même dans l'au-delà», commente François Bertemes. Les différences rituelles observables impliquent pour lui que les gens de la culture campaniforme et ceux de la céramique cordée n'avaient pas les mêmes conceptions religieuses.



La restitution de l'enceinte néolithique en bois de Pömmelte, en Allemagne, vue du ciel.

Les constatations génétiques et archéologiques suggèrent en outre que vers 2200 avant notre ère, un premier âge du Bronze est sorti du Campaniforme et de la céramique cordée: la culture dite «d'Unétice», le site tchèque où elle a été caractérisée pour la première fois. Dans cette culture aussi, on orientait les morts la tête au sud et le regard tourné vers l'est, mais sans distinction de sexe. Un peu plus tard, vers 2000 avant notre ère, la culture d'Unétice est devenue dominante dans la région de Pömmelte à la nuance près que le centre de sa sphère d'influence se trouvait à plus de 100 kilomètres au sud. Les archéologues du service des monuments historiques et de l'archéologie de Saxe-Anhalt l'ont identifié à Leubingen, Helmsdorf et Bornhöck, près de Halle-sur-Saale, dans une région où coulent la Saale (affluent de l'Elbe) et l'Unstrut, son affluent – trois sites où ils ont découvert de grands tumulus princiers.

Ils sont d'ailleurs persuadés qu'une relation existe entre les princes enterrés là et le célèbre disque céleste de Nebra. Orné de représentations d'astres, d'une barque et de deux cadrans réalisés

à l'aide de feuilles d'or, ce disque de bronze de 32 centimètres de diamètre datant de vers 1600 avant notre ère porte la plus ancienne représentation de la voûte céleste connue. Selon, certaines interprétations, il aurait servi à perpétuer des connaissances astronomiques essentielles, notamment celles dont on avait besoin pour construire des sanctuaires-observatoires circulaires, en d'autres termes des enceintes du type de celles de Stonehenge, de Pömmelte, de Schönebeck et de tant d'autres en Europe.

Le sanctuaire de Pömmelte fut construit plusieurs générations avant ces grands tumulus princiers et la réalisation du disque de Nebra. Pour autant, la société qui l'érigea comptait déjà des personnages assez insignes pour mériter des inhumations spéciales. Le long du fossé circulaire de Pömmelte, les chercheurs ont découvert treize tombes d'hommes âgés de 17 à 30 ans. Même si ces défunts furent inhumés quasiment sans mobilier funéraire, «la présence de leurs tombes dans l'enceinte suggère qu'ils avaient un statut particulier», estime André Spatzier.

## UN SANCTUAIRE À L'IMAGE D'UNE VISION DU MONDE

Ces tombes masculines se trouvent toutes dans la moitié orientale de l'enceinte, tandis que les restes de femmes et d'enfants n'ont été trouvés qu'au sein des fosses en puits du fossé circulaire. De grandes meules se trouvaient dans les fosses en puits de la moitié nord-est et des haches dans les tombes masculines de la moitié sud-ouest. «Ces meules symbolisaient peut-être le monde féminin et ces haches le monde masculin», avance André Spatzier. Apparemment, tant les rites funéraires que les sanctuaires étaient ordonnés en fonction du sexe. Une impression d'autant plus forte que l'on observe qu'à Pömmelte les sphères masculine et féminine étaient séparées par l'axe de visée solaire traversant l'enceinte. Pour André Spatzier, le sanctuaire de Pömmelte reflète sans doute les croyances et la vision du monde de ses utilisateurs.

Qui a construit Pömmelte? Des personnes de culture campaniforme d'après la céramique découverte. Une grande étude génomique publiée en 2018 «a révélé qu'ils relèvent du même bassin génétique que les constructeurs de l'enceinte de pierres bleues de Stonehenge», pointe François Bertemes. Cette constatation explique peut-être les parallèles constatés entre la structure de Pömmelte et celle de Stonehenge. Quoi qu'il en soit, cette possible connexion ancienne en a induit une actuelle: depuis 2018, Joshua Pollard, de l'université de Southampton, l'un des chercheurs de Stonehenge et du grand site néolithique d'Avebury, dans le Wiltshire, en Angleterre, participe aux fouilles en Saxe-Anhalt!



# Les tombes masculines se trouvent dans l'enceinte, les restes de femmes et d'enfants dans les fosses

En 2020, même si, à cause du Covid-19, ils ont dû travailler sans l'aide de l'expert anglais, les chercheurs ont fait des découvertes notables: ils sont tombés à Schönebeck sur un curieux fossé quadrangulaire aux angles arrondis de 11 par 11 mètres. Ils ignorent à quoi il servait, mais Franziska Knoll relève qu'«il s'agissait d'un espace protégé dont les deux entrées opposées se trouvaient dans l'axe des solstices d'hiver et d'été». Les quelques tessons de poterie trouvés à l'intérieur du fossé datent de la céramique cordée, donc après 2800 avant notre ère. «André Spatzier et son équipe ont aussi découvert à l'est de l'enceinte de Pömmelte un dispositif similaire, quoiqu'un peu plus grand», rappelle Franziska Knoll. Là encore, les datations pointent vers la céramique cordée.

Même si l'on ignore encore ce qui se passait dans ces quadrilatères, le fait de les retrouver en plusieurs endroits et leur alignement avec les solstices suggèrent qu'avant la construction de sanctuaires circulaires par les porteurs des cultures campaniforme et d'Unétice, les gens de la céramique cordée pratiquaient probablement déjà un culte solaire sur les bords de l'Elbe. Sans doute vénéraient-ils les astres à d'autres moments de l'année que leurs successeurs, dans des sanctuaires d'une autre forme. Des différences qui s'expliquent vraisemblablement par des systèmes de croyances et des cultes différents.

Nous voyons que les populations néolithiques – y compris celles originaires de la steppe – ont fait de ce morceau d'un méandre de l'Elbe un lieu sacré, qu'elles ont investi des millénaires durant. Et sans doute bien avant: en 2020, Franziska Knoll et son équipe y ont découvert un tumulus arasé depuis longtemps, mais autrefois visible de loin, entouré par un ancien fossé trapézoïdal, décelable aujourd'hui par la terre sombre qui l'a rempli. Or, le défunt qui y a été retrouvé et le mobilier funéraire qui l'accompagnait relèvent de la culture de Baalberge, c'est-à-dire entre 4000 et 3400 avant notre ère. Ce grand monticule était-il encore visible au Campaniforme? C'est possible, car un défunt a été enterré dans son fossé à cette époque.

## UN LIEU DE TRADITION

Il est temps de brosser une vision d'ensemble de l'histoire du sanctuaire: c'est au plus tard au début du IV<sup>e</sup> millénaire avant notre ère que des gens ont commencé à investir ces lieux particuliers que sont Pömmelte et Schönebeck. Ce n'est que vers 2300 avant notre ère que les gens de la culture campaniforme ont planté de premiers poteaux à Pömmelte, donc seulement quelques générations avant l'arrivée sur place de la culture d'Unétice. Selon André Spatzier, les céramiques découvertes sur le site suggèrent qu'«il ne s'agissait probablement pas d'une nouvelle population, mais de gens issus du même rameau humain».

Les dernières fouilles de Pömmelte confirment cette impression dans l'ensemble: Franziska Knoll et son équipe ont découvert au moins 67 maisons aux environs de l'enceinte, ce qui fait de Pömmelte «le plus grand site représentatif de la culture d'Unétice en Europe tempérée.» Certaines implantations de ces maisons – celles de plus de 20 mètres de long – datent du Campaniforme, mais deux d'entre elles sont plus anciennes. Les chercheurs les attribuent à la culture de Schönfeld, une ancienne culture des environs de l'Elbe de la fin du Néolithique, contemporaine de la céramique cordée à partir d'environ 2800 avant notre ère. Les datations indiquent toutefois que la majorité des maisons à charpentes de bois datent de la culture d'Unétice.

Les bâtiments des différentes cultures représentées à Pömmelte étaient différents: tandis que ceux de la culture de Schönfeld sont plutôt carrés, les maisons campaniformes sont trapézoïdales et celles de la culture d'Unétice rectangulaires et allongées. Il semble que des groupes d'origines culturelles différentes se soient installés dans cette région les uns après les autres sans discontinuité. «L'agglomération de Pömmelte comportait plus de quarante bâtisses, ce qui est énorme souligne François Bertemes. Si elle s'était trouvée dans une région méditerranéenne, on parlerait à son propos de phénomène proto-urbain.» Dans la zone fouillée, des maisons et des tombes bordent une étroite bande non aménagée. «Un chemin, sans doute, dont la direction pointe vers l'enceinte de Schönebeck», interprète Franziska Knoll. Il ressort de tout cela que vers la fin du III<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, Pömmelte était un sanctuaire d'importance suprarégionale. Pour Franziska Knoll, certaines maisons accueilleraient des visiteurs. «Quelqu'un devait s'occuper du sanctuaire et fournir le vivre et le couvert aux pèlerins», imagine-t-elle, ce qui explique peut-être la taille considérable de l'agglomération.

Le sanctuaire de Pömmelte a servi pendant trois siècles, puis sa fréquentation s'est interrompue. Vers 2050 avant notre ère, les poteaux ont été arrachés, empilés au milieu de l'enceinte et incendiés, avant que leurs restes carbonisés ne soient poussés dans le fossé circulaire. «Le sanctuaire était arrivé au bout de sa carrière semble-t-il, commente André Spatzier, de sorte qu'il a été démantelé rituellement.» Après cela, Pömmelte n'a plus connu beaucoup d'activité, même si des populations ont continué à vivre dans les environs. Les datations par le carbone 14 suggèrent en outre que vers 1975 avant notre ère, l'agglomération et le sanctuaire de Schönebeck voisins ont aussi été abandonnés. Après cela, le site a seulement servi de nécropole, ce dont témoignent des tumulus de l'âge du Bronze moyen et final et des champs d'urnes de l'âge du Fer. ■

## BIBLIOGRAPHIE

R. Madgwick *et al.*, **Multi-isotope analysis reveals that feasts in the Stonehenge environs and across Wessex drew people and animals from throughout Britain**, *Science Advances*, vol. 5(3), article eaau6078, 2019.

H. Meller et M. Zirm, **Neueste Ergebnisse am Ringheiligtum von Pömmelte, Salzlandkreis (Grabungskampagne 2019)**, dans H. Meller (dir.), **Siedlungsarchäologie des Endneolithikums und der frühen Bronzezeit**, Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, 2019.

M. Stecher et K. W. Alt, **Anthropologische Untersuchungen an den menschlichen Überresten aus dem Rondell Pömmelte-Zackmünde**, dans H. Meller et H. et F. Bertemes (dir.), **Mensch und Umwelt im Ringheiligtum von Pömmelte-Zackmünde, Salzlandkreis**, Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, 2019.

I. Olalde *et al.*, **The Beaker phenomenon and the genomic transformation of northwest Europe**, *Nature*, vol. 555, pp. 190-196, 2018.

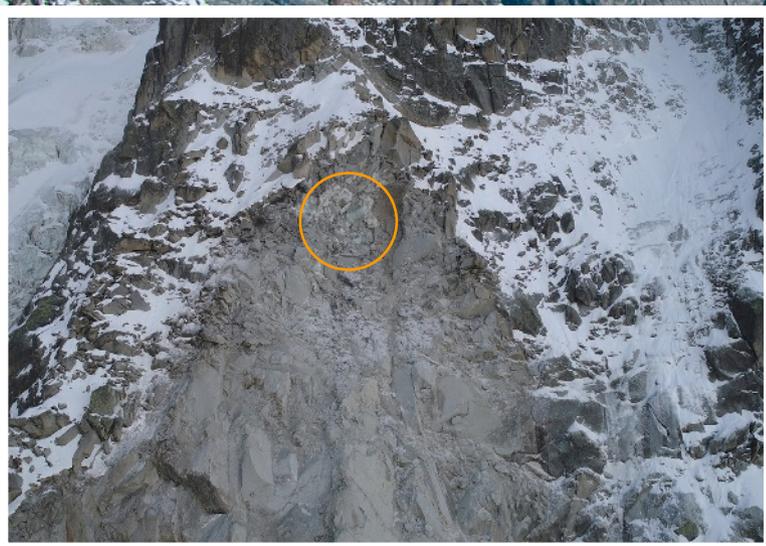
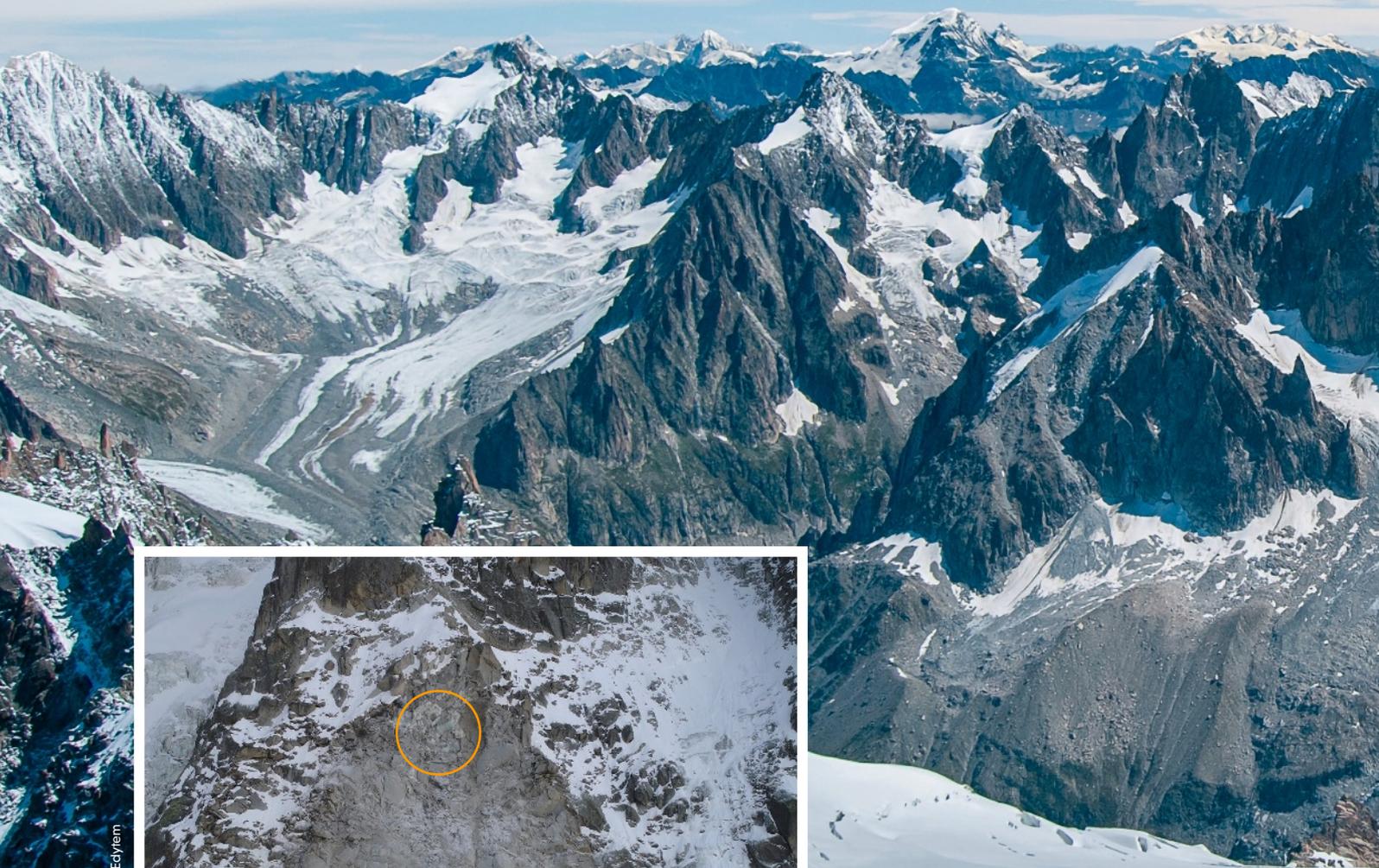
L'ESSENTIEL

- > Le pergélisol qui couvre les parties supérieures des hautes montagnes stabilise les parois.
- > Avec le réchauffement climatique, le phénomène s'accroît.
- > Ce sol gelé fond lors des épisodes de forte chaleur, d'où l'écroulement des roches.

L'AUTEUR



**LUDOVIC RAVANEL**  
chercheur CNRS au laboratoire Edytem (Environnement, dynamique, territoire, montagne) de l'université Savoie-Mont-Blanc et du CNRS.



Ce panorama alpin est celui que l'on voit depuis l'aiguille du Midi lorsqu'on regarde vers le nord-est. Sous le point d'observation, sur la face nord au niveau de l'éperon Tournier, un écoulement est survenu en 2017 (photo ci-contre). De la glace massive, visible dans le haut de la cicatrice après l'événement (dans le cercle), a été échantillonnée et datée: cela faisait plus de quatre mille ans qu'elle maintenait la cohésion de la montagne!

© L. Ravanel/Laboratoire Edytem

# Les montagnes fondent... et s'effondrent!

Le réchauffement climatique a une conséquence spectaculaire. Il accélère un phénomène millénaire : la déstabilisation des parois rocheuses de haute montagne.



**D**ans le massif des Écrins, un glacier domine le vallon du Grand Tabuc, proche du Monétier-les-Bains. Le jeudi 17 septembre 2020 vers 19 heures 45, tous les habitants de la commune entendent un énorme bruit, avant d'apercevoir un imposant nuage de poussière : un pan de montagne s'est effondré au-dessus du Tabuc.

Jean-Marie Rey, maire du village et guide de haute montagne, demande au PGHM, le peloton de gendarmerie de haute montagne, que connaissent et apprécient les montagnards, d'aller faire un état des lieux en hélicoptère. «Les gendarmes m'ont rapporté que les dépôts sont très importants, qu'il reste encore énormément de blocs en équilibre précaire et que dans les fissures qui subsistent, il y a de la glace, ce qui confirme que nous avons affaire à un cas de dégel du *permafrost*», déclare-t-il ensuite à Radio d'ici.

Dans la foulée, jugeant les risques d'écroulement trop importants, Jean-Marie Rey prend un arrêté interdisant l'accès au vallon à partir de 2100 mètres d'altitude. Bien lui en prend : le 20 décembre 2020 – en plein hiver! – un nouvel effondrement, semble-t-il quatre fois plus volumineux, achève de remplir le vallon d'énormes blocs de roche!

À l'échelle du monde, l'écroulement de tout un pan de montagne n'est pas rare aujourd'hui : dans le Caucase, dans les Alpes néo-zélandaises ou européennes, dans les Rocheuses, les Andes et l'Himalaya, de plus en plus de parois s'effondrent et engendrent des dépôts rocheux. Les géomorphologues emploient le terme d'«écroulement», dès que la déstabilisation d'une paroi produit au moins 100 mètres cubes de dépôt – soit le volume d'un cube de 4,6 mètres de côté. Ce qui est arrivé au Monétier-les-Bains – la zone du dépôt de septembre y couvre 15000 mètres carrés – illustre les proportions énormes qu'atteignent les grands écroulements et rappelle ceux qui se sont produits dans la décennie 2010 sur l'un des pics du massif de la Bernina, entre l'Italie et la Suisse.

Le pic en question, le piz Cengalo, est situé à côté du piz Badile (3308 mètres), célèbre chez les Alpinistes et proche du piz Bernina (4049 mètres), le point culminant des Alpes orientales. Ses faces nord-est et nord-ouest dominant le village suisse de Bondo, dans le canton des Grisons. En décembre 2011, un écroulement y produisit un dépôt de 1,5 million de mètres cubes. D'autres suivirent, moins volumineux, en 2012, 2016 et le 21 août 2017. Puis, deux jours après ce dernier, une avalanche rocheuse mobilisa quelque 3,1 millions de mètres cubes, engendrant une série de grandes coulées boueuses, qui atteignirent le village de Bondo (voir la figure page 61), heureusement déjà évacué grâce à un système d'alerte installé

après l'événement de 2011. Mais huit alpinistes et randonneurs, sortis dans la montagne, perdirent la vie.

Qu'est-ce qui déclenche ces écroulements de plus en plus nombreux depuis une vingtaine d'années? Pour des montagnards comme Jean-Marie Rey, leur cause principale est claire : c'est le réchauffement du pergélisol (ou *permafrost*, en anglais), cette partie de la surface terrestre qui reste gelée en profondeur. Encore faut-il le prouver et mieux comprendre le phénomène, d'où les travaux menés par l'équipe Morphodynamiques du laboratoire Edytem (Environnement, dynamique, territoire, montagne), de l'université Savoie-Mont-Blanc et du CNRS.

## LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL DÉSTABILISE LES PAROIS

C'est là en effet l'une des conséquences les plus directes, mais les moins connues du réchauffement climatique : il y a moins de pergélisol. Il se trouve surtout dans les régions polaires, où il couvre pas moins de 22,79 millions de kilomètres carrés – soit 23,9% des terres émergées! – mais les hautes montagnes du globe en recèlent aussi. Les conséquences de sa réduction deviennent plus sensibles chaque année, en termes d'émissions de méthane en Arctique, mais aussi d'altération de la lithosphère en montagne.

Plus précisément, le pergélisol correspond à tous les matériaux lithosphériques de surface – sol, roche, formations superficielles, etc. – dont la température reste négative pendant au moins deux années consécutives, en présence ou non de glace. Lorsque la température monte et selon le type de terrain et la pente, sa dégradation favorise nombre de processus géomorphologiques, tels l'accélération des glaciers rocheux, ou la déstabilisation d'éboulis et de moraines, etc. (voir la figure page 63). Certains d'entre eux sont rapides et donc potentiellement très destructeurs pour les installations humaines : c'est évidemment le cas des glissements de terrain ou encore des laves

  
**À l'échelle du monde,  
de plus en plus  
de parois montagneuses  
s'effondrent** 



Le 23 août 2017, une énorme avalanche rocheuse s'est formée au piz Cengalo, un sommet de 3 369 mètres d'altitude du massif de la Bernina en Suisse. En A, l'éroulement de 3,1 millions de mètres cubes de roche du versant nord-est du piz Cengalo sur le glacier Vadrec dal Cengal. En B, la même paroi après l'éroulement. En C, l'avalanche rocheuse a dévalé le fond du Val Bondasca. En D, le village de Bondo, situé à l'altitude de 800 mètres après le passage de la coulée boueuse et qu'une centaine de bâtiments ont été détruits ou endommagés.

torrentielles, ces avalanches de boues et de roches extrêmement puissantes qui se déclenchent brusquement en haut de certaines pentes déstabilisées. Dans l'Arctique, où le comportement du pergélisol affecte oléoducs, gazoducs, mines, installations militaires et autres infrastructures, son étude a commencé dès les années 1940, mais dans les Alpes, il a fallu attendre les années 1970.

C'est en effet pendant cette décennie que les recherches sur le pergélisol alpin ont débuté dans l'équipe de Wilfried Haeberli, de l'université de Zurich. À l'époque, on parlait peu encore de changement climatique, de sorte que l'idée d'une relation entre la dégradation du pergélisol et l'instabilité d'un versant paraissait osée. On s'attendait en effet *a priori* à ce que des parois rocheuses soient... solides. D'ailleurs les premières études des éroulements rocheux ne permirent pas de tirer des conclusions claires sur les processus à l'œuvre. Toutefois, plus le temps a passé plus l'impression que quelque chose de majeur était en train d'affecter les montagnes s'est renforcée partout dans le monde. En France, deux épisodes marquants déclenchèrent les recherches sur les processus géomorphologiques associés à l'évolution du pergélisol.

Le premier fut l'été caniculaire de 2003. Ses conséquences conduisirent en effet à une véritable prise de conscience, tant les alpinistes furent confrontés à de nombreuses chutes, à des crevasses bien plus ouvertes qu'avant sur les glaciers, tandis que le désenglacement des

faces nord entraînaient une multiplication dangereuse des éroulements...

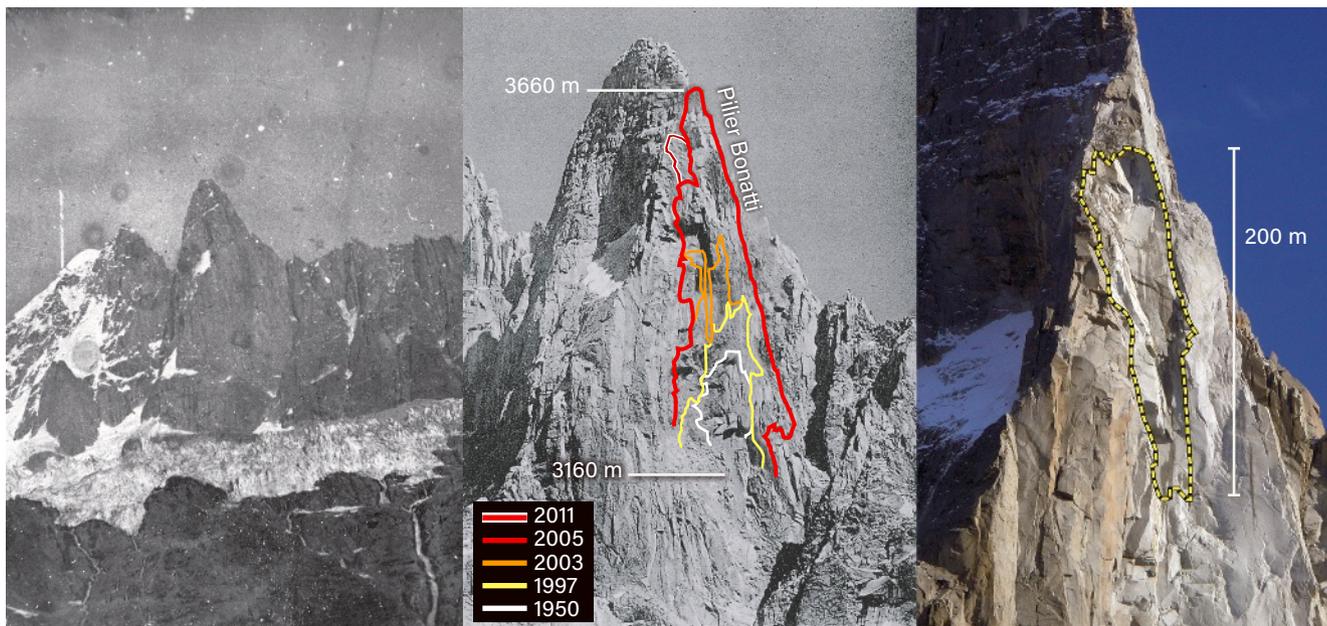
Le deuxième se produisit deux ans plus tard sur les Drus, deux célèbres pics du massif du Mont-Blanc. L'événement se déroula en quatre phases: à la fin de la matinée du 29 juin, un premier éroulement eut lieu, suivi de deux autres en début d'après-midi avant que, la nuit suivante, le pilier Bonatti entier ne s'effondre! Le 30 juin au matin, une poussière grise recouvrait le paysage sur des dizaines de kilomètres carrés, jusqu'au fond de la vallée de Chamonix, laissant à nu une grande cicatrice de 700 mètres de haut en lieu et place du célèbre pilier. En tout, huit itinéraires de courses classiques avaient disparu. À Chamonix, l'émotion fut forte, car, en alpinisme, cet énorme pilier granitique était emblématique depuis sa première ascension, en 1955, par l'Italien Walter Bonatti (voir la figure page 62, en haut).

Il fallait se rendre à l'évidence: une évolution notable de la haute montagne était en cours. Pour l'appréhender, l'analyse de larges corpus de données semblait nécessaire. Au laboratoire Edytem, avec Florence Magnin et Philip Deline, nous avons entrepris de réaliser cette tâche pour le massif du Mont-Blanc en recensant de la façon la plus complète possible les éroulements anciens et actuels afin de mieux évaluer la fréquence et l'intensité de ces événements.

## RECENSER LES ÉCROULEMENTS

À partir de 2005, nous nous sommes attachés à recenser quasi systématiquement les éroulements anciens et actuels dans le massif et nous nous sommes particulièrement intéressés à l'ensemble du versant nord des aiguilles de Chamonix, où se trouvaient les Drus. Visibles depuis le centre-ville de la capitale historique de l'alpinisme, ces aiguilles contribuent à son environnement grandiose et sont médiatisées depuis longtemps. Ce point est important, car il implique qu'elles sont documentées depuis les débuts de la photographie de montagne dans les années 1850 (voir la figure page 62, en haut). La comparaison de plusieurs centaines de photographies nous a ainsi permis de couvrir la période allant de la fin du Petit Âge glaciaire (vers 1860) à aujourd'hui. À partir des modifications de la couleur et de la topographie des parois, nous avons ainsi pu mettre en évidence plusieurs dizaines d'événements, établissant leurs dates, les lieux d'éroulement, la topographie des secteurs affectés et les volumes concernés.

De 1862 à 2010, se sont donc succédé quelque 75 éroulements de 500 à 65 000 mètres cubes (hors celui du pilier Bonatti de juin 2005). Une très bonne corrélation existe entre ces événements et la survenue dans les Alpes de périodes chaudes (voir la figure page 64, en bas).



Les glaciers rocheux sont un exemple de forme associée au pergélisol : ils consistent en une masse de blocs rocheux et de glace mélangés qui fluent le long de certains versants. Ici, celui du Laurichard, dans le massif du Combeynot, dans les Hautes-Alpes, qu'étudie le laboratoire Edytem.

Des écoulements rocheux se sont succédé sur la face ouest des Drus au cours du temps, avant l'effondrement du pilier Bonatti. À gauche, un daguerréotype montre l'état de ces pics en 1854. Au milieu, les derniers écoulements notables datés ; à droite, l'empreinte laissée par l'un d'entre eux.

systématiquement l'ensemble des écoulements survenus dans le massif du Mont-Blanc au cours du seul été 2003 en nous servant d'une image satellitaire datant de la fin de l'été (voir la figure page 64, en haut). Plus tard, à partir de 2007, nous avons documenté l'ensemble des écoulements se produisant tout au long de l'année dans les deux tiers centraux du massif à l'aide du réseau d'observateurs constitué de guides, de gardiens de refuges et d'alpinistes, que nous avions mis en place. En tout, 182 écoulements ont été décrits pour 2003 et plus d'un millier depuis 2007.

Ces écoulements concernent avant tout ce que l'on nomme la « couche active », c'est-à-dire l'épaisseur maximale de roche dégelant chaque année. C'est en tout cas ce que la comparaison des événements des étés caniculaires de 2003 et 2015 nous suggère. Exceptionnellement élevés, les nombres de déstabilisations de parois pendant ces étés furent assez similaires. Le volume total mobilisé en 2015 (170000 mètres cubes) est cependant environ la moitié de celui mobilisé en 2003 (304000 mètres cubes). De même, le volume moyen des écoulements de 2015 (1100 mètres cubes) est à peu près la moitié du volume moyen de ceux de 2003 (2000 mètres cubes).

Cette constatation s'explique aisément : la première canicule, celle de 2003, avait déstabilisé de nombreuses masses rocheuses, que la deuxième, celle de 2015, n'a, dès lors, pas pu affecter. En d'autres termes, les événements de 2015 se sont produits après le « nettoyage » des parois les plus instables en 2003.

La plupart se sont produits au cours des dernières décennies, celles de l'accélération du réchauffement climatique. Les étés très chauds – ceux de 1947, de 1976, de 1983 – furent accompagnés de nombreux écoulements. Mais c'est pendant l'été caniculaire de 2003 qu'ils se sont produits avec la plus grande fréquence, sans que de fortes précipitations ou des séismes ne puissent l'expliquer. Ces résultats renforçaient la théorie de Walter Haeberli attribuant un rôle central au pergélisol dans la déstabilisation des parois rocheuses.

Il fallait cependant le vérifier par une étude plus précise. Nous avons alors recensé

Les cicatrices laissées en 2003 indiquent que la couche active était particulièrement épaisse cette année-là d'après des mesures que nous avons faites sur l'aiguille du Midi (3842 mètres). L'épaisseur de la couche active est l'un des paramètres clés du phénomène d'écroulement, car son augmentation accroît les risques de déstabilisation des parois. Cette forme de dégradation du pergélisol a constitué le déclencheur des centaines d'écroulements des étés 2003 à 2015.

Comment exactement? Lorsque le pergélisol se réchauffe, la glace interstitielle vieille de plusieurs milliers d'années présente dans les fractures de la roche n'assure plus son rôle de ciment, ni celui d'obturation des fractures, ce qu'elle fait à plus basse température. Résultat: le «béton de glace» fracturé laisse circuler dans la roche de l'eau liquide, donc «chaude» (à plus de 0 °C). En 2015, cela pourrait avoir joué un rôle non négligeable en dégradant davantage la glace et en augmentant la pression hydraulique dans la roche. Comme les gendarmes du PGHM l'ont fait au Monêtier-les-Bains, on observe régulièrement la présence de glace dans les cicatrices des écroulements. Cela suggère que l'écroulement a emporté l'ensemble de la couche active du pergélisol, et s'est arrêté à une profondeur où la glace-ciment subsiste mais se dégrade.

## L'ÉVOLUTION DU PERGÉLISOL À L'ORIGINE DES ÉCROULEMENTS

Nous avons aussi montré que dans le massif du Mont-Blanc, le pergélisol occupe de 45 à 80% des 86 kilomètres carrés de parois ayant une pente supérieure à 40 degrés (valeur à laquelle la plupart des gens cessent d'être à l'aise debout). Il est sans doute présent dans les secteurs dont la structure le favorise à partir de 1900 mètres d'altitude en face nord et de 2400 mètres en face sud. Quoi qu'il en soit, sa présence est quasiment continue à partir de 2600 mètres en face nord et de 3000 mètres en face sud et totale au-delà de 3600 mètres, quelle que soit l'exposition au soleil.

Afin d'évaluer la répartition et l'évolution du pergélisol sous la surface, nous avons mesuré la température au fond des trois forages de 10 mètres de profondeur creusés en 2009 dans les parois de l'aiguille du Midi. Nous avons ainsi appris que les variations de la température de la couche active – qui mesure de 1,8 à plus de 6 mètres d'épaisseur – et du pergélisol – qui est «froid» ou «tempéré», sont en grande partie dues à la topographie, selon que celle-ci facilite plus ou moins l'écoulement des eaux; en revanche, les variations de la température profonde sont plutôt régies par les flux thermiques latéraux. Nous avons en outre noté qu'une couche de neige de plus de 60 centimètres refroidit les faces ensoleillées et réchauffe les faces à l'ombre; si en revanche elle est de moins de 60 centimètres, elle

## LE TÉMOIGNAGE D'UN ALPINISTE SUR LES CHANGEMENTS

Propos recueillis par François Savatier



**RÉGIS MERITAN**

ingénieur agronome à la Commission européenne, alpiniste chevronné et grand connaisseur du massif des Écrins

### Les chutes de pierres sont-elles plus fréquentes dans la perception des alpinistes ?

Leur fréquence a clairement augmenté, ainsi que celle des écroulements de parois. Pour autant, les études d'accidentologie en montagne nous ont appris que les avalanches et autres chutes de pierre n'entraînent qu'une faible proportion des décès en montagne, bien moins de 10 % des cas en général dans tous les massifs. La première cause d'accident en montagne a toujours été et reste l'erreur humaine, et la pire d'entre elles est sans doute de partir au mauvais moment. Et avec le réchauffement climatique, cela paraît de plus en plus délicat. Il m'est déjà arrivé de commettre une telle erreur : je m'étais retrouvé à la fin du mois d'août 2019 dans une voie rocheuse sur le versant sud de la Meije, réputée sûre, mais ce fut la terreur : tout bougeait ! Alors, tous les alpinistes diront la même chose : la situation en montagne a évolué et il est devenu vital de ne pas se tromper sur le moment de partir.

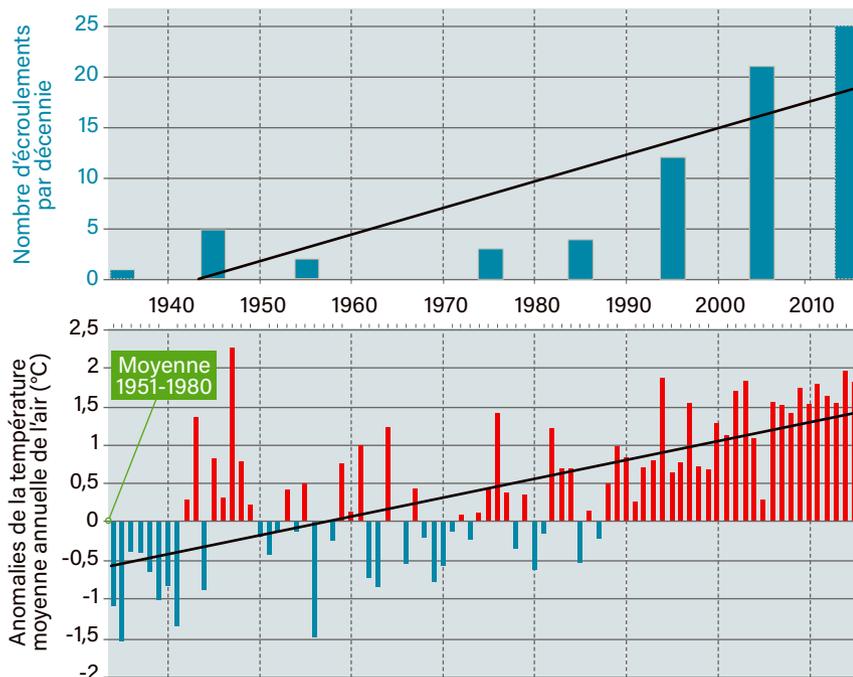
### Dès lors, comment fait-on ?

De la manière suivante : les courses classiques que l'on faisait en été doivent désormais être faites à des périodes plus froides. Par exemple, ce que l'on faisait en juillet-août, on le fait désormais en juin-juillet. L'exemple emblématique de ceci est la traversée de la Meije, l'une des plus belles courses du massif des Écrins et des Alpes, devenu quasiment impraticable en août, depuis qu'une partie du pic du glacier carré s'est effondrée durant l'été 2018. Autre exemple, la goulotte Berhault, en face est du Pelvoux, dans les Écrins, ouverte depuis juillet 1978,

ne peut plus être envisagée qu'en novembre-décembre ou alors au début du printemps, quand règnent les conditions que l'on avait naguère en été. Pendant ces périodes, notamment à l'automne, il fait non seulement froid, mais le soleil est moins haut dans le ciel, ce qui limite la fonte, surtout si l'on n'est pas sur une face nord.

### En novembre 2020, de retour justement de la goulotte Berhault, vous avez été projeté dans le vide par une chute de pierres et en avez réchappé de justesse. Cet accident est-il lié à l'effet du réchauffement climatique sur le massif des Écrins ?

Comment savoir ? Je guettais la goulotte Berhault depuis 2015, et, là, les conditions étaient idéales : il faisait – 10 °C, de sorte qu'a priori, les parois devaient être stables. Pourtant, ces pierres sont arrivées. Quelques jours avant, une autre chute de pierres avait causé un autre accident dans le couloir Chaud, une voie proche. La montagne a toujours été dangereuse et le reste de toute façon. Là, nous n'avions commis aucune imprudence, ni erreur de choix de notre fenêtre de présence en haute montagne. Il faisait très froid et nous étions trois alpinistes expérimentés. Mais l'accident est survenu... Est-ce lié aux effets du réchauffement climatique sur la montagne ? C'est impossible à dire, mais une chose est claire : les parois d'aujourd'hui sont moins stables que celles d'il y a trente ans.



L'évolution du nombre d'éroulements constatés sur la face ouest des Drus et sur le versant nord des aiguilles de Chamonix entre 1930 et 2010, mise en regard des anomalies de la température (par rapport à la moyenne 1951-1980) pendant la même période.

refroidit toutes les parois, quelle que soit leur exposition. L'enneigement influence donc l'épaisseur de la couche active!

Puisque nous connaissons mieux la distribution actuelle du pergélisol alpin, nous avons tenté de modéliser ce que pourrait être sa répartition d'ici à la fin du siècle compte tenu des scénarios climatiques proposés par le Giec en 2013 (ils seront certainement réévalués à la hausse dans le prochain rapport d'août 2021!). Nous avons utilisé pour cela la carte de la température probable à la surface des parois du massif du Mont-Blanc, afin de fixer les conditions initiales de la température de surface; ensuite, nous nous sommes servis d'une équation décrivant la conduction thermique dans la roche et avons pris en considération les processus de gel et de dégel dans les fractures du substrat rocheux afin de modéliser les séries climatiques allant de 1850 (connu) à 2100 (à prédire).

## UNE DÉSTABILISATION ÉCLAIRÉE PAR DES MODÉLISATIONS

Quelles conclusions principales ressortent de cet exercice? Pour commencer, le fait que la perturbation thermique induite par le changement climatique depuis la fin du Petit Âge glaciaire (du xiv<sup>e</sup> à la fin du xix<sup>e</sup> siècle) est, d'après notre modèle, sensible jusqu'à 60-70 mètres de profondeur, d'où la déstabilisation possible de pans entiers de montagne comme au piz Cengalo en 2018; ensuite le fait qu'à la fin du xx<sup>e</sup> siècle,



L'éroulement de la pointe du Domino pendant l'été 2003, sur le versant italien du massif du Mont-Blanc, reconnu à partir de son dépôt sur le glacier de Pré-de-Bar, visible sur une image prise par le satellite SPOT-5 le 22 août 2015.

seulement quelques secteurs à pergélisol subsisteront au cœur des sommets évasés au-dessous de 3300 mètres d'altitude avec toutes les modifications de morphologie des montagnes que cela suppose; finalement, selon le scénario le plus pessimiste du Giec (pour le moment!), le pergélisol disparaîtrait au moins jusqu'à 4300 mètres d'altitude dans les faces sud et dans les sommets étroits ayant moins de 3850 mètres d'altitude. Étant donné que le mont Blanc culmine à 4808 mètres, on voit bien que nos montagnes comportent beaucoup de parties hautes susceptibles d'être déstabilisées.

Or, dans les seules Alpes françaises, près d'un millier d'éléments d'infrastructures – refuges, remontées mécaniques, structures associées, etc. – sont implantés sur du pergélisol. Plusieurs d'entre elles ont déjà subi des dommages en contexte de paroi. En août 1998 par exemple, le refuge des Cosmiques, situé à 3613 mètres d'altitude dans le massif du Mont-Blanc, s'est vu déstabilisé après un éroulement rocheux ayant mobilisé 600 mètres cubes directement sous le refuge. Il a donc fallu se livrer à de nombreux travaux de renforcement de son assise.

Compte tenu du degré d'anthropisation élevé de certains massifs de haute montagne – au premier chef les Alpes! – et de l'accélération du changement climatique, l'intensification des recherches sur le pergélisol – indicateur pertinent du réchauffement climatique – est une nécessité. Pas seulement dans massif du Mont-Blanc: tous les massifs de haute montagne du monde connaissent des évolutions comparables. Or, pour le moment, très peu de travaux de recherche sont menés hors des Alpes sur les éroulements de parois. ■

## BIBLIOGRAPHIE

P.-A. Duviollard *et al.*, **Qualitative risk assessment and strategies for infrastructure on permafrost in the French Alps**, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 189, article 103 311, 2021.

J. Mourey *et al.*, **The effects of climate change on high mountain environments - Evolution of mountaineering routes and their conditions of use in the Mont-Blanc massif over half a century**, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, vol. 51(1), pp. 176-189, 2019.

X. Gallach *et al.*, **Timing of rockfalls in the Mont Blanc massif (western Alps). Evidences from surface exposure dating with cosmogenic <sup>10</sup>Be**, *Landslides*, vol. 15, pp. 1991-2000, 2018.

## LE TEMPS EXISTE-T-IL ?

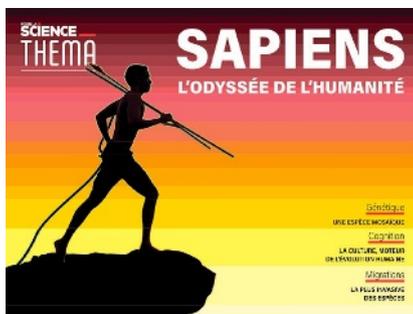
- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €



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

## Dans la collection *Thema* découvrez aussi



## L'ESSENTIEL

> Les chercheurs ne se limitent pas à étudier des systèmes à trois dimensions : les mathématiciens considèrent des systèmes de dimension  $n$  quelconque et certains processus physiques ne se manifestent qu'en deux dimensions.

> De nombreux arguments permettent de dire que le

monde réel a trois dimensions d'espace. Pourtant, la physique théorique suggère parfois d'autres possibilités.

> Ces idées ont inspiré les auteurs de science-fiction, qui aiment jouer avec les repères de leurs lecteurs. Ils ont ainsi vulgarisé des concepts parfois difficiles à se représenter.

## LES AUTEURS



**ROLAND LEHOUCQ**  
astrophysicien  
au CEA à Saclay



**JEAN-SÉBASTIEN STEYER**  
paléontologue au  
CNRS-MNHN, à Paris

# L'Univers, combien de dimensions?

Il semble évident que nous vivons dans un monde à trois dimensions d'espace et une dimension de temps. Pourtant, les auteurs de science-fiction n'hésitent pas à emmener leurs lecteurs dans des univers déroutants où le nombre de dimensions est différent. Ils ne sont pas les seuls : la science conduit souvent les chercheurs sur de tels territoires exotiques.

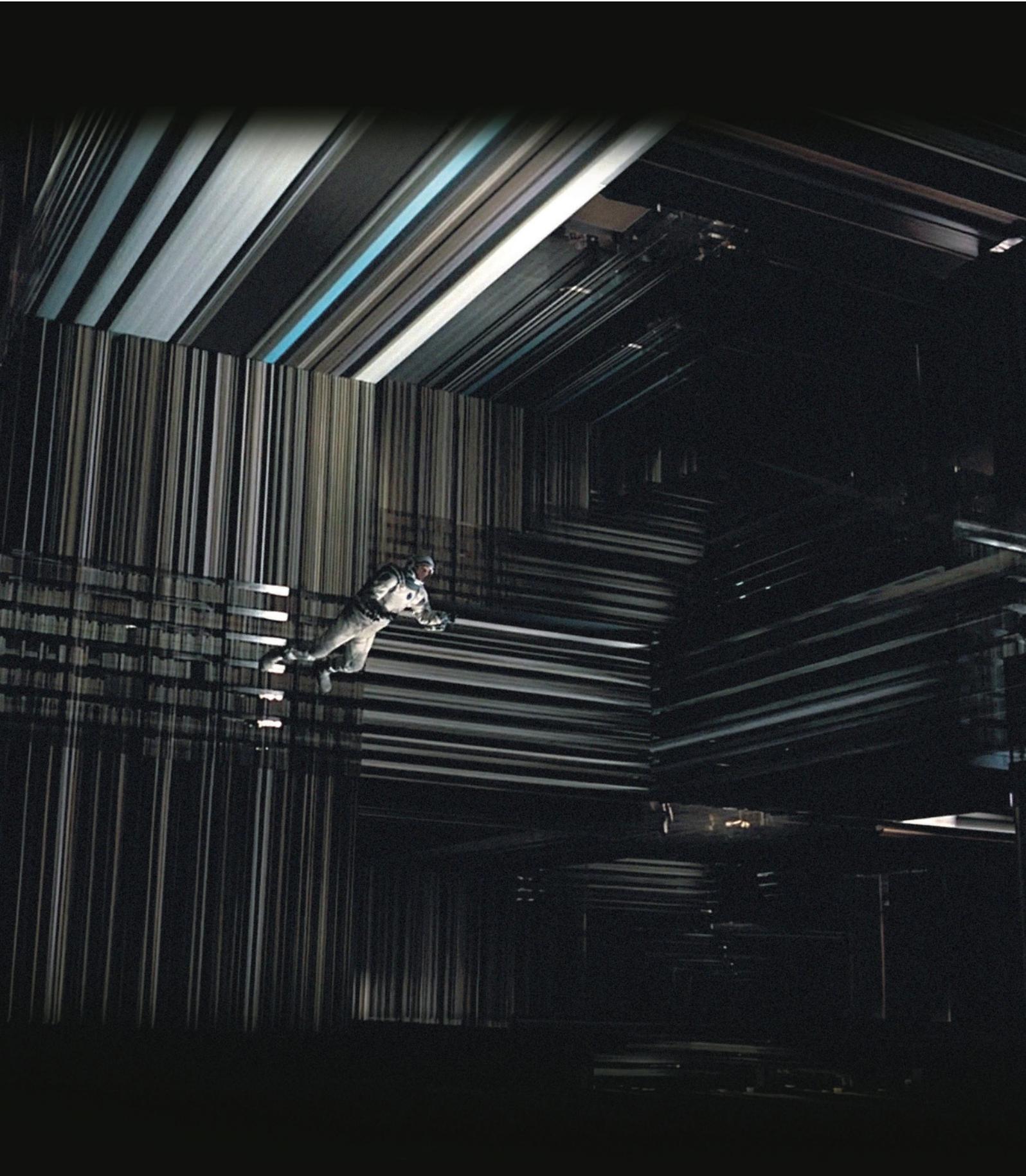
**P**our aller à un rendez-vous, rien de plus facile. Nous avons besoin du nom de la rue et d'un numéro (un segment et un point de ce segment) pour nous repérer sur une carte à deux dimensions et d'un étage pour la dimension verticale. Cela suffit-il pour dire que nous vivons bien dans un monde à trois dimensions d'espace? Rien n'est moins sûr...

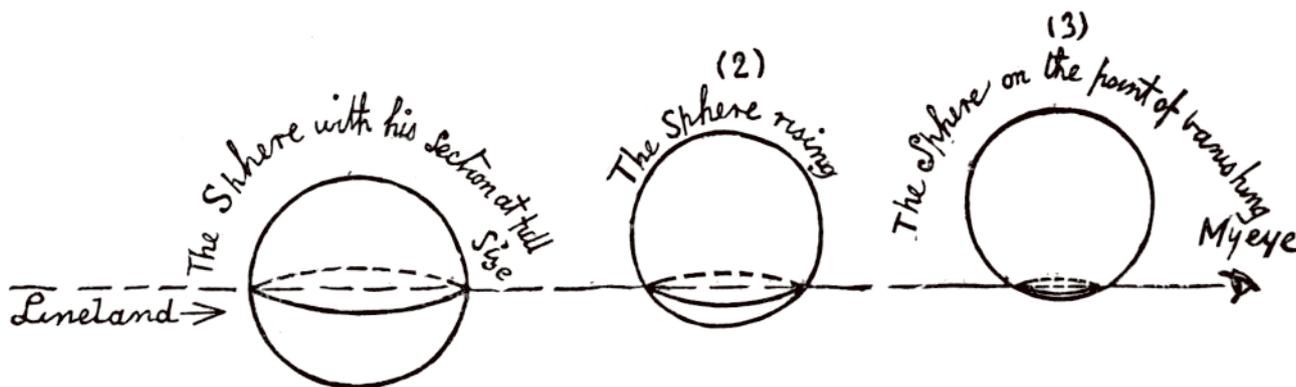
Les mathématiciens, toujours prompts à élargir le cadre de leurs études et à généraliser leurs théorèmes, n'ont pas hésité à envisager des espaces à plus de trois dimensions. Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'idée d'une quatrième

dimension est apparue sous les plumes de Jean Le Rond d'Alembert (qui l'a mentionnée en 1754 dans l'entrée « dimension » de l'*Encyclopédie*) et de Joseph-Louis Lagrange (dans sa *Mécanique analytique*, publiée en 1788). Cette quatrième composante est alors associée au temps (il faut bien convenir d'une heure pour notre rendez-vous!).

Cette avancée conceptuelle a pris toute son importance dans la théorie de la relativité restreinte d'Albert Einstein, dont le cadre géométrique est l'espace « inventé » par l'Allemand Hermann Minkowski (1864-1909), un espace non euclidien à quatre dimensions. On parle depuis d'« espace-temps ». Tout aussi

Dans le film *Interstellar*, le héros se retrouve dans un monde à cinq dimensions, qui lui permet de voir un même lieu à différents instants. Le traitement visuel des dimensions supplémentaires est ici assez classique, avec un effet kaléidoscopique et fractal.





Dans cette illustration extraite de *Flatland* (1884), une sphère qui traverse le plan (le monde de Flatland) apparaît comme un cercle qui change progressivement de taille. De la même façon, si elle traverse un monde à une dimension (Lineland), elle apparaît comme un segment dont la longueur varie au cours du temps.

déroutante, dès le XIX<sup>e</sup> siècle, la géométrie multidimensionnelle s'est développée, notamment sous l'impulsion du mathématicien allemand Bernhard Riemann, qui a publié en 1854 une thèse intitulée « Sur les hypothèses qui fondent la géométrie ». Les espaces étudiés ont alors un nombre arbitraire de dimensions.

Le mathématicien et philosophe anglais Charles Howard Hinton a été l'un des premiers à vulgariser ces idées nouvelles dans *Qu'est-ce que la quatrième dimension ?* (1880). Il y expliquait notamment la construction d'un hypercube, qu'il a nommé « tesseract », en généralisant la construction du carré par translation d'un segment et celle d'un cube par translation d'un carré. Hinton a aussi forgé les mots *kata* et *ana* (du grec) pour désigner les deux directions opposées d'une quatrième dimension spatiale, analogues à haut-bas, droite-gauche et avant-arrière.

En suivant les mêmes idées, dans son livre *Flatland*, publié en 1884, le théologien anglais Edwin Abbott invitait ses lecteurs à découvrir le mode de vie du peuple de Flatland, pays dont la particularité est d'avoir seulement deux dimensions d'espace. Il y narrait les aventures d'un personnage, nommé Carré, au milieu de ses congénères géométriques plats – triangles, carrés, pentagones et autres hexagones. Vers la fin de l'histoire, Carré rencontre un être jamais vu jusqu'alors : un cercle parfait dont la taille varie ! Il s'agit en fait d'une créature, Sphère, vivant dans l'espace tridimensionnel contenant Flatland. En traversant le plan de ce plat pays, elle se manifeste comme un cercle aux sens de Carré (voir la figure ci-dessus). Sphère fait alors découvrir à Carré les mystères de la troisième dimension et la véritable nature de son univers. Le voyage mental de Carré dans les dimensions supérieures est une sorte de métaphore décrivant l'expérience mystique vécue par l'accès à une réalité supérieure.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, l'astrophysicien allemand Johann Karl Friedrich Zöllner a repris cette même idée pour expliquer le phénomène des fantômes : il s'agirait de l'intersection temporaire d'un hypothétique être à quatre dimensions spatiales avec notre espace qui n'en a que trois. L'être apparaîtrait à nos sens quand son corps traverse notre univers, puis disparaît ensuite. Connu pour ses travaux sur l'effet Doppler et inventeur d'une illusion visuelle où des lignes semblent non parallèles alors qu'elles le sont bel et bien, Zöllner s'était aussi appliqué à trouver une interprétation scientifique au spiritisme. Il a proposé que la physique d'un espace à quatre dimensions expliquerait certains phénomènes paranormaux et il a tenté de prouver, sans convaincre ses collègues scientifiques, que les esprits sont des êtres à quatre dimensions.

Dans un essai intitulé *The Fourth Dimension: Toward A Geometry of Higher Reality* (1984), le mathématicien américain Rudy Rucker a décrit de façon humoristique quelques prouesses dont seraient capables des êtres quadridimensionnels agissant dans notre monde : s'évader d'une prison ou voler l'intérieur d'un coffre sans en ouvrir la porte. D'ailleurs, dans les œuvres fantastiques, les dimensions supplémentaires sont souvent peuplées de terribles monstres capables de pénétrer et de hanter notre monde, comme dans les œuvres de Howard P. Lovecraft, ou à l'exemple du démogorgon de la série *Stranger Things* (Matt et Ross Duffer, 2016).

## LE MONDE DE FLATLAND EST-IL POSSIBLE ?

Dans son roman, Abbott n'a donné aucune précision sur la physique de Flatland ni sur les techniques utilisées par ses habitants. Mais le défi a été relevé par Alexander Dewdney. À la fin des années 1970, cet informaticien canadien a publié plusieurs articles dans lesquels il a posé les bases du planivers, un monde

bidimensionnel plausible décrit en détail dans un ouvrage, *The Planiverse* (1984), qui met en scène toutes ses idées.

Le planivers de Dewdney est un véritable tour de force. Le chercheur y dépeint un monde complet avec ses propres lois de la physique, de la chimie (dont une classification périodique de 16 éléments) et de la biologie, le tout apparemment sans contradictions. On y trouve aussi les plans et le principe de fonctionnement d'incroyables machines bidimensionnelles allant de la serrure à la machine à vapeur. Dewdney y répondait aussi au cosmologiste britannique Gerald Whitrow, qui avançait un argument empêchant le développement d'une intelligence dans un espace bidimensionnel : à cause d'un problème topologique *a priori* insurmontable, deux neurones ne peuvent se croiser.

Whitrow écrivait qu'«à trois dimensions ou plus, n'importe quel nombre de cellules nerveuses peuvent être reliées par paires sans que leurs connexions se croisent, tandis qu'à deux dimensions cela n'est possible que pour quatre cellules au maximum». Dewdney a réfuté cette hypothèse en proposant un dispositif bidimensionnel d'intersection d'impulsions nerveuses sans interférences. Il a montré qu'un cerveau bidimensionnel aurait une complexité comparable à celle d'un cerveau à trois dimensions, mais que son rythme de fonctionnement serait plus lent à cause des nombreuses interruptions subies par les impulsions nerveuses. Cette possibilité théorique a été mise en pratique avec les automates cellulaires à deux dimensions, comme le jeu de la vie du mathématicien britannique John Conway, disparu en 2020, dont on a démontré qu'il pouvait simuler une machine de Turing universelle (c'est-à-dire capable de réaliser n'importe quel calcul).

Dans toutes les disciplines scientifiques, les chercheurs sont confrontés à des systèmes intéressants en deux dimensions. Pour utiliser les microscopes, les biologistes font des coupes bidimensionnelles, dont la superposition permet de reconstituer l'organe étudié en trois dimensions. En physique et en chimie, une question se pose : la nature se comporte-t-elle différemment dans le monde à deux dimensions ? La théorie de l'adsorption sur une surface, par l'Américain Irving Langmuir, en 1918, ou la solution du modèle d'Ising à deux dimensions, par l'Américain d'origine norvégienne Lars Onsager, en 1944, en sont deux exemples.

En 1980, le physicien allemand Klaus von Klitzing a découvert l'effet Hall quantique, dans lequel la conductivité transverse d'un matériau à basse température et soumis à un fort champ magnétique extérieur prend des valeurs quantifiées. La description de ce phénomène oblige à considérer un système d'électrons à deux dimensions. À la même époque, les spécialistes ont commencé à utiliser des

films de cristaux liquides épais de seulement quelques molécules pour étudier le comportement de matériaux bidimensionnels. Plus récemment, en 2004, les physiciens d'origine russe Andre Geim et Konstantin Novoselov, Prix Nobel de physique en 2010, ont réussi à



## Les propriétés du graphène sont toutes liées à sa bidimensionnalité

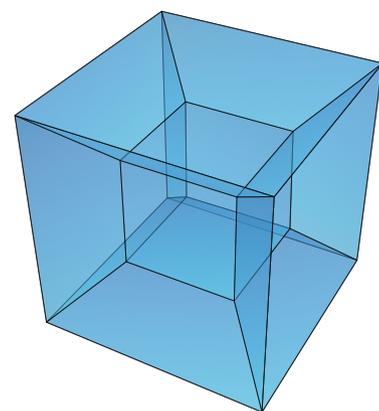


extraire, à partir du graphite, du graphène, un matériau cristallin bidimensionnel théorisé dès 1947. Les propriétés mécanique, thermique et électronique de ce matériau sont toutes liées à sa bidimensionnalité.

### DES ARGUMENTS POUR JUSTIFIER LE NOMBRE TROIS

La première discussion concernant le nombre de dimensions de l'espace remonte aux Pythagoriciens, dont Aristote a repris les considérations dans son *Traité du Ciel* en professant que «le monde et tout ce qu'il contient est déterminé par le nombre trois, puisque la fin, le milieu et le commencement forment le nombre de ce qui est un tout, et que le nombre donné est la triade». Dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde*, publié en 1632, Galilée a apporté un argument géométrique affirmant qu'il n'y a pas plus de trois dimensions car par un point ne peuvent concourir plus de trois droites perpendiculaires deux à deux.

Dans un de ses premiers écrits, Emmanuel Kant tenta vainement de démontrer que la tridimensionnalité de l'espace était une conséquence de la loi de gravitation universelle d'Isaac Newton qui stipule que les corps s'attirent en raison inverse du carré de leur distance. Cette remarque est d'importance car, pour la première fois, le problème de la dimensionnalité de l'espace est envisagé non pas du point de vue métaphysique ou géométrique, mais par une considération physique interprétant la relation liant la force entre deux corps à la distance  $r$  qui les sépare. La proposition de Kant peut être aisément démontrée, et même généralisée, grâce au théorème de Gauss : dans un espace à  $n$  dimensions, la force de gravitation varie comme  $1/r^{n-1}$ . Ainsi, la loi de



Ce cube de dimension quatre, ou hypercube, est obtenu en généralisant une opération simple. Quand on duplique un segment par translation et qu'on relie les segments par des arêtes, on forme un carré. De même, dédoubler un carré permet de former un cube. La transformation opérée sur ce dernier donne un hypercube. Celui-ci présente deux fois plus de sommets qu'un cube de dimension trois, et chaque sommet est connecté à quatre autres (trois pour le cube de dimension trois).

gravitation de Newton est une conséquence directe des trois dimensions de notre espace ; dans un espace à quatre dimensions, l'attraction gravitationnelle serait proportionnelle au cube de la distance.

Dans un article publié en 1917, le physicien autrichien Paul Ehrenfest s'est intéressé au mouvement gravitationnel des astres dans un espace à  $n$  dimensions. Il a montré que le problème ne possède des solutions stables et bornées qu'à deux ou trois dimensions. Et si l'on impose à l'énergie d'interaction des deux corps

de tendre vers zéro quand leur distance tend vers l'infini (ce qui est raisonnable, car deux corps infiniment distants interagissent infiniment peu), il ne reste plus que le cas tridimensionnel. Ainsi, c'est dans ce cas, et dans ce cas seulement, que les planètes peuvent avoir des orbites stables durant plusieurs centaines de millions d'années, une condition *a priori* nécessaire à l'apparition de la vie.

La dimensionnalité de l'espace a aussi des conséquences sur le monde des atomes. Nous constatons quotidiennement que la matière est

## UN MONDE À DIX DIMENSIONS !

Un des plus grands défis des physiciens est de réussir à unifier la relativité générale et la mécanique quantique, deux théories réputées incompatibles. Albert Einstein a développé la première en 1915. Elle décrit comment l'énergie et la matière déforment la toile de l'espace-temps à quatre dimensions (une de temps et trois d'espace) et, à l'inverse, elle indique comment la courbure de l'espace-temps détermine la trajectoire de la matière qui s'y déplace en « chute libre ». En d'autres termes, la force gravitationnelle résulte de la courbure de l'espace-temps. À peu près à la même époque, de nombreux physiciens ont découvert les lois qui régissent le monde microscopique. La mécanique quantique et ses développements ultérieurs décrivent les particules fondamentales et leurs interactions.

Certaines situations, tels les premiers instants du Big Bang ou les régions proches de la singularité d'un trou noir, nécessitent une formulation quantique de la gravitation, car les effets quantiques y sont *a priori* importants. Mais les tentatives de quantification directe de la relativité générale, suivant une procédure utilisée avec succès pour l'interaction électromagnétique, ont échoué. Les calculs dans ce cadre conduisent à des grandeurs infinies, non physiques, signes d'une défaillance de cette approche.

À partir de la fin des années 1960, des chercheurs ont découvert par hasard une piste prometteuse pour concilier ces deux théories. En remplaçant des particules ponctuelles par des petites cordes vibrantes, il était possible d'éliminer les infinis précédemment rencontrés. Le formalisme mathématique de cette théorie est très complexe et repose sur de nombreuses notions comme des symétries dites « conformes », où les transformations conservent les angles mais pas les distances. Les physiciens ont rapidement compris que pour avoir une théorie des cordes cohérente et préservant ces symétries, il fallait

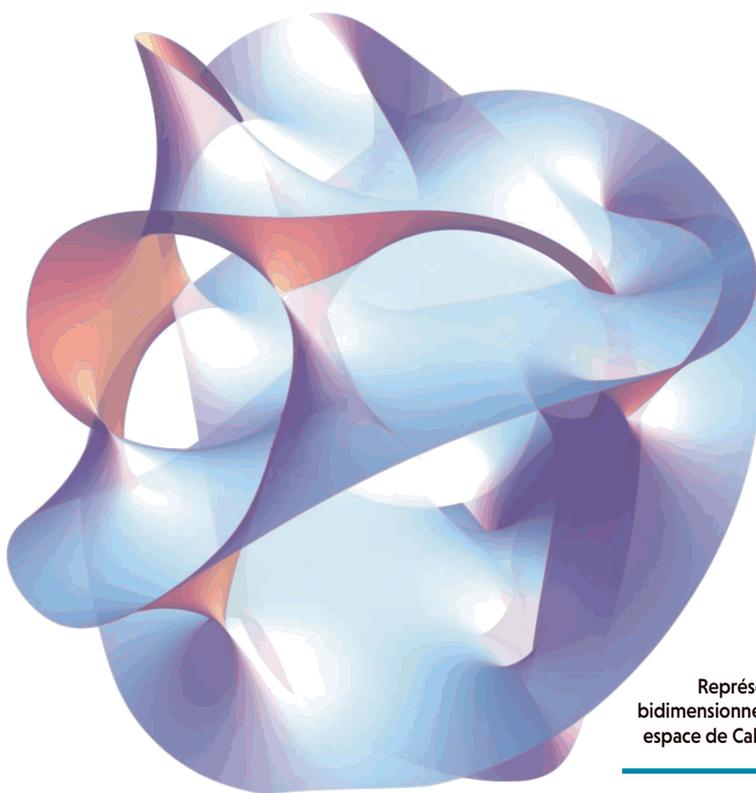
supposer que l'espace-temps contienne vingt-six dimensions !

Cette première version de la théorie des cordes était limitée, car elle ne permettait pas de décrire les particules présentant un spin demi-entier, tel l'électron. En 1971, Pierre Ramond, de l'université de Floride, puis André Neveu, alors au Laboratoire de physique théorique, à Orsay, et John Schwarz, de l'université de Princeton, ont modifié la théorie pour y introduire une nouvelle symétrie, la « supersymétrie », qui relie les particules de spin entier et celles de spin demi-entier. C'est la théorie des supercordes. La contrainte de cohérence imposait dans ce cas d'avoir un espace-temps à dix dimensions.

Comment passer d'une théorie à dix dimensions à une théorie à quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) ? Que faire des six autres

dimensions, où sont-elles ? La réponse consiste à les compacter. En chaque point de l'espace, les six dimensions supplémentaires sont enroulées sur elles-mêmes. Comme elles ne sont pas étendues, nous ne pouvons les percevoir directement. Ces six dimensions forment un objet mathématique nommé « espace de Calabi-Yau ». Chacun de ces espaces de Calabi-Yau conduit à un modèle d'univers avec ses propres propriétés. L'estimation du nombre de configurations possibles la plus souvent avancée est  $10^{500}$ , mais cela pourrait être beaucoup plus. Comment alors savoir quelle est la configuration qui correspond à l'univers réel ? Pour l'instant, les physiciens n'ont pas la réponse.

**SEAN BAILLY**  
journaliste à *Pour la Science*



Représentation bidimensionnelle d'un espace de Calabi-Yau.

stable. Cela signifie physiquement que le niveau fondamental d'un atome a une énergie finie: l'électron ne tombe pas sur le noyau ni ne s'échappe spontanément à l'infini.

Cette constatation permet de présenter un deuxième argument, de nature heuristique au regard des théories atomiques modernes, justifiant les trois dimensions de l'espace. En effet, en appliquant la théorie atomique de Bohr au cas d'un atome d'hydrogène évoluant dans un espace à plus de cinq dimensions, on démontre que le rayon de l'orbite électronique décroît quand son énergie augmente. En pratique, cela signifie que l'électron tombe sur le noyau! Dans un espace à quatre dimensions, la situation devient ambiguë car il n'existe plus d'échelle caractéristique de longueur dans le système, comme l'est le rayon de Bohr pour un atome d'hydrogène habituel. Cet argument peut être rendu plus rigoureux et permet d'affirmer que les atomes stables, et donc la chimie et les chimistes eux-mêmes, ne peuvent exister que si l'espace a au maximum trois dimensions.

Enfin, le domaine des ondes électromagnétiques fournit aussi un argument. Dans un espace à une ou deux dimensions, on montre que le signal peut se propager à n'importe quelle vitesse inférieure à celle de la lumière. En revanche, dans un espace tridimensionnel, les ondes électromagnétiques n'ont d'autres choix que de se déplacer à la vitesse de la lumière. En pratique, cela signifie qu'à deux dimensions des signaux émis à des instants différents peuvent être reçus simultanément, ce qui cause une réverbération. Et cet effet se généralise aux espaces de dimensions paires. Dans les espaces de dimensions impaires, seule la dimension trois permet une propagation sans distorsion à grande distance. En résumé, la propagation d'une onde électromagnétique dans un espace à trois dimensions se fait sans réverbération et sans distorsion, ce qui permet de transmettre un signal bien défini à grande distance.

Malgré les arguments précédents, l'espace pourrait compter plus de trois dimensions! En 1999, les physiciens américains Lisa Randall and Raman Sundrum ont proposé un modèle selon lequel notre Univers n'est qu'un sous-ensemble d'une structure ayant plus de dimensions. Leur motivation était d'expliquer la faiblesse de la gravitation vis-à-vis des autres interactions: à l'échelle microscopique, l'attraction gravitationnelle entre le proton et l'électron d'un atome d'hydrogène est  $10^{39}$  fois plus faible que la force électrique qui les lie.

Imaginons alors que notre univers tridimensionnel soit plongé dans un espace comportant une dimension spatiale supplémentaire et que toutes les interactions, sauf la gravitation, restent confinées dans les trois dimensions qui

# La stabilité de l'atome élimine certaines possibilités

nous sont familières. Pouvant s'exprimer dans toutes les dimensions, la gravité semble être, pour nous, observateurs tridimensionnels, victime de «fuites» qui se traduisent par son apparente faiblesse quand nous l'expérimentons dans les trois dimensions ordinaires. En théorie des cordes, ce n'est pas une quatrième dimension étendue, mais six dimensions supplémentaires compactées qui sont invoquées (voir l'encadré page 70)!

## BIENVENUE DANS L'HYPERCUBE

L'hypothèse de dimensions spatiales supplémentaires joue un rôle important dans le film *Interstellar* (Christopher Nolan, 2014). Vers la fin du film, Cooper, l'un des astronautes, pénètre dans le trou noir Gargantua, qui est au cœur de l'intrigue. Il se retrouve alors dans un espace-temps étrange à cinq dimensions spatiales, nommé «tesseract», d'où il peut voir la chambre de sa fille Murph démultipliée à l'infini mais avec des temporalités différentes (voir la photo pages 66-67). Il est alors capable de communiquer avec elle à travers le temps au moyen de signaux gravitationnels, lui fournissant les données dont elle a besoin pour résoudre l'équation qui sauvera l'humanité.

Par ses propriétés fascinantes, le tesseract apparaît dans bien d'autres œuvres. Ainsi, dans le film *Cube<sup>2</sup>: Hypercube* (2002), huit personnages sont piégés dans un tesseract qui est constitué d'un réseau de cubes connectés dont certains altèrent le déroulement du temps. Dès 1941 et sa nouvelle *La Maison biscornue*, Robert Heinlein décrivait une maison construite selon le patron tridimensionnel d'un tesseract. C'est ce même patron que Salvador Dalí utilisa pour sa peinture de 1954 «Crucifixion (Corpus Hypercubus)» suggérant que, tout comme le tesseract existe dans un espace quadridimensionnel inaccessible à l'esprit humain, Dieu pourrait résider dans une dimension qui nous est incompréhensible. À l'instar des pauvres hères, enfermés dans la caverne de Platon, ne serions-nous que des êtres confinés dans trois dimensions, totalement ignorants des dimensions supplémentaires qui nous englobent? ■

## BIBLIOGRAPHIE

A. K. Dewdney, **The planiverse**, Springer, 1984 (nouvelle édition 2001).

M. Tegmark, **On the dimensionality of spacetime**, *Classical and Quantum Gravity*, vol. 14, n° 4, pp. L69-L75, 1997.

J. D. Barrow, **Dimensionality**, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, vol. 310, p. 337-346, 1983.

P. Ehrenfest, **In what way does it become manifest in the fundamental laws of physics that space has three dimensions?**, *Proceedings of the Royal Academy of Amsterdam*, vol. 20, p. 200-209, 1918.

**L'ESSENTIEL**

> Au Moyen Âge, les prédictions météorologiques étaient fondées sur l'influence supposée des planètes et de la Lune sur le temps qu'il fait.

> Cette météorologie à caractère astrologique a été développée par les savants du monde islamique médiéval

puis, à partir du <sup>xii</sup> siècle, adoptée et affinée en Europe.

> L'« astrométéorologie » s'est appuyée sur des tables de données et d'observations de plus en plus nombreuses. Elle a perduré jusqu'au <sup>xviii</sup> siècle.

**L'AUTRICE**



**ANNE LAWRENCE-MATHERS**  
professeuse d'histoire  
à l'université de Reading,  
au Royaume-Uni



Ce texte est traduit de l'article « **Medieval weather prediction** » publié dans *Physics Today* (avril 2021, pp. 38-44), avec l'autorisation de l'American Institute of Physics.

# Prédire le temps au Moyen Âge

Y aura-t-il de la neige à Noël ? La sécheresse va-t-elle durer tout l'été ? Afin de répondre à de telles questions, les savants de l'Europe médiévale ont développé l'« astrométéorologie », avec des registres de données qui ont préparé le terrain à la science météorologique moderne.

Ross Castle, un château médiéval Irlandais du xv<sup>e</sup> siècle, sous un orage. À cette époque, on faisait des prédictions du temps fondées sur des hypothèses astrologiques, et non de véritables prévisions météorologiques.

**E**n août 1861, le quotidien londonien *The Times* publiait le premier « bulletin journalier de prévisions météorologiques » au monde. L'expression (en anglais *daily weather forecast*) est due à Robert FitzRoy, précurseur de la météorologie moderne (et officier de marine qui a été le capitaine du *Beagle*, à bord duquel Darwin a voyagé) qui voulait marquer la différence entre ses travaux et les « pronostications » astrologiques. Cela a conduit à l'idée répandue que les prévisions météorologiques sont une science entièrement moderne, et qu'auparavant les signes annonciateurs du temps ne relevaient que du charlatanisme ou du folklore.

Cependant, des recherches récentes ont montré que les astronomes et astrologues du monde islamique médiéval ont largement exploité les connaissances grecques, indiennes, perses et romaines pour créer une nouvelle discipline, l'astrométéorologie. Celle-ci se fondait sur la conviction universelle que les planètes et leurs mouvements agissaient sur les conditions atmosphériques et donc sur le temps qu'il fait. Les savants de l'Europe latine et chrétienne ont repris cette nouvelle science et l'ont développée.

Le souhait de produire des prévisions météorologiques fiables a mené les savants à la conclusion que l'astrométéorologie gagnerait en justesse s'ils s'appuyaient sur des observations précises et en conservaient des archives écrites. Ce type d'archives existe en Europe à partir du XIII<sup>e</sup> siècle. Leur corrélation avec les données astronomiques a ouvert la voie à l'approche systématique de FitzRoy.

Les astrométéorologues du monde islamique ont été les premiers à ne plus se contenter, comme dans le monde antique, d'observer les seuls signes immédiats, tels les nuages et le vol des oiseaux, pour prédire le temps. Ils fondaient leur approche sur l'hypothèse que la situation météorologique résulte du mouvement des planètes, du Soleil et de la Lune, à travers des conditions climatiques régionales et saisonnières. Cette astrométéorologie a bénéficié du perfectionnement des calculs des orbites planétaires et de la mise à jour des informations géographiques et météorologiques, avancées qui ont donné à la jeune science sa crédibilité.

Censée fournir des prévisions météorologiques fiables, indicatrices des futures tendances en matière de santé humaine et de production agricole, cette nouvelle discipline est devenue très attrayante pour l'Europe chrétienne également. Une grande fierté transparaît dans les écrits chrétiens médiévaux concernant les questions météorologiques auxquelles on pouvait désormais commencer à répondre. Au premier plan de ces questions figurait celle-ci, qui échappait aux météorologues classiques :

comment expliquer que le temps varie tant d'une année sur l'autre, alors que les saisons sont dues aux configurations régulières et répétitives produites par la forme sphérique de la Terre et ses interactions avec le Soleil ?

Au XI<sup>e</sup> siècle, Geoffroy V d'Anjou, le père du roi d'Angleterre Henri II, posa cette question au philosophe Guillaume de Conches. S'appuyant sur des traductions d'œuvres attribuées à l'astronome Māshā'allāh (VIII<sup>e</sup> siècle), au savant Constantin l'Africain (XI<sup>e</sup> siècle), et sur les discussions contemporaines d'Adélard de Bath, Guillaume invoqua les modèles ptoléméens des mouvements planétaires et les théories islamiques de leurs impacts sur les saisons et le temps qu'il fait localement.

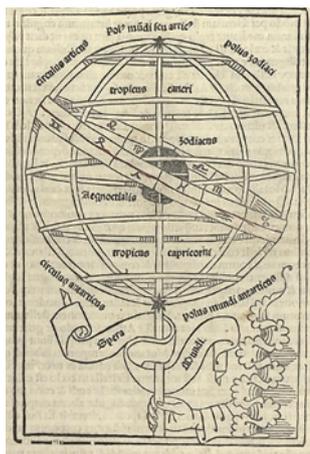
Le corpus de documents scientifiques traduits de l'arabe a continué à s'étoffer aux XI<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles. À cette même époque, l'accroissement de la population a stimulé l'urbanisation, le commerce sur de longues distances et la prospérité. Avec des prévisions censées être meilleures, les dirigeants étaient mieux à même d'aborder des préoccupations sociétales pratiques, comme la stratégie militaire et le ravitaillement des populations, qui dépendent fortement de la météo. Les banquiers et les commerçants étaient prêts à payer pour ces pré-



## L'astrométéorologie s'est développée et n'a été discréditée qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle

cieuses informations. En conséquence, l'astrométéorologie a continué à se développer aux XIV<sup>e</sup> et XV<sup>e</sup> siècles, et a atteint un public de plus en plus large aux XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles. Elle n'est tombée en disgrâce qu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, quand les prévisionnistes ont commencé à discréditer l'astrologie.

Les prédictions astrométéorologiques étaient-elles satisfaisantes ? Nous savons aujourd'hui que la théorie sur laquelle elles s'appuyaient est complètement erronée. Il est cependant difficile de mesurer leur inexactitude : la plupart des prédictions qui nous sont parvenues portent sur des jours particuliers et l'on ne dispose que très rarement de registres météorologiques détaillés. Toujours est-il que les contemporains leur accordaient un certain



Cette illustration du livre *De sphaera* de Joannes de Sacrobosco (1195-1256 environ), imprimé en 1488, montre le cercle du zodiaque et ses divers signes entourant plusieurs lignes latitudinales qui démarquent l'équateur, les tropiques et les régions polaires. Pour les savants du Moyen Âge, les zones climatiques et les divisions célestes étaient à la base des prédictions astrométéorologiques.

crédit; et les savants s'efforçaient d'améliorer leurs prédictions en essayant d'identifier des corrélations entre les données planétaires et les situations météorologiques.

## UNE MÉTÉOROLOGIE INSPIRÉE DE L'ASTROLOGIE

L'astrométéorologie puise ses sources dans l'Antiquité. Les savants hellénistiques, en particulier Claude Ptolémée d'Alexandrie, avaient réalisé des avancées considérables. Ptolémée a produit des modèles géométriques et mathématiques des mouvements planétaires fondés sur des observations consignées par écrit au fil des siècles ainsi que sur de nouvelles observations qu'il effectuait lui-même. Ses œuvres fondamentales (*l'Almageste* et le *Tetrabiblos*) fournissaient les moyens de calculer les positions planétaires, avec des instructions quant à la manière d'interpréter les données.

À chaque planète étaient attribuées des qualités spécifiques qui exerçaient leur influence sur la Terre. Saturne, caractérisée comme lointaine, lente et de couleur froide, était associée aux éléments froids et secs de la Terre. Mercure, petite planète rapide, habituellement proche de Vénus et de la Lune, était associée aux éléments chauds et humides de l'air. La façon exacte dont ces qualités planétaires influençaient sur le temps était matière à débat, mais le mécanisme le plus largement admis était que des rayons imperceptibles étaient émis par les planètes et transportaient leurs qualités jusque sur Terre.

Le Soleil et la Lune étaient les deux corps astronomiques les plus importants. L'effet du Soleil sur le temps et le climat par sa lumière et sa chaleur était établi de longue date, et l'influence de la Lune sur les marées des océans, les fluides corporels et la croissance des plantes était largement reconnue, du moins parmi les personnes instruites.

Pour faire une prédiction, il fallait dans un premier temps calculer, pour une date choisie, les positions de toutes les planètes par rapport à la ceinture zodiacale et à l'écliptique (la trajectoire apparente du Soleil sur la sphère céleste). Toutes deux étaient considérées comme circulaires, le zodiaque étant divisé en douze secteurs égaux, ou signes (*voir la figure ci-dessus*). Ptolémée avait systématisé les divisions du ciel et expliqué que chaque secteur avait ses propres caractéristiques, qui agissaient sur toutes les planètes qui le traversaient.

Pour les astrométéorologues, les relations angulaires entre les planètes déterminaient en grande partie leurs effets mutuels. Les planètes opposées, de part et d'autre du zodiaque, étaient négativement liées; un angle de 45 degrés était également problématique et très susceptible d'entraîner une perturbation atmosphérique. En revanche, les planètes

formant des angles de 60 ou 120 degrés interagissaient plus favorablement et produisaient un temps plus clément. Quand les planètes étaient proches l'une de l'autre, l'intensité de leurs effets augmentait selon la nature et la position des planètes impliquées. Les prévisionnistes devaient également prendre en compte la zone climatique du lieu choisi et la saison en cours. Par exemple, une augmentation de la chaleur atmosphérique aurait un certain ensemble d'effets l'été près de l'équateur, et un autre l'hiver près du tropique du Cancer. À partir d'un ensemble apparemment simple de principes, les prévisionnistes devaient faire preuve de jugement pour déterminer les résultats de tous les facteurs en jeu.

Les calculs intervenant dans une prévision reposaient sur l'acquis des astronomes du monde islamique, qui avaient construit des modèles précis et des tables de référence remises à jour des structures et des mouvements célestes. Ces travaux avaient eux-mêmes été rendus possibles par les progrès des mathématiques ainsi que par des outils et instruments scientifiques plus performants. Les astronomes ont testé et révisé les instructions de Ptolémée relatives aux prédictions météorologiques, et nombre d'entre eux ont produit leurs propres traités sur le sujet. Ces écrits spécialisés donnaient non seulement des indications sur les techniques de base, mais s'appuyaient également sur les données planétaires actualisées et les nouveaux modèles cosmographiques. Le résultat était un corpus d'ouvrages sophistiqués, séduisants et complexes.

## UN HÉRITAGE DES SAVANTS DU MONDE ISLAMIQUE

Les avancées scientifiques du monde islamique ont été remarquées dans l'Europe latine à partir du XI<sup>e</sup> siècle. Elles ont suscité curiosité et émulation plutôt que rejet. Les conquêtes territoriales dans la péninsule Ibérique d'al-Andalus ont mis à la disposition des nouveaux gouvernants chrétiens des bibliothécaires, des érudits et des traducteurs connaissant la langue arabe. Ainsi est né l'un des plus grands mouvements de traduction savante et d'assimilation culturelle de l'histoire de l'Europe.

Les textes d'astrométéorologie y avaient une place honorable. Par exemple, les savants de l'Occident chrétien ont traduit et exploité avec enthousiasme les versions actualisées des tables des mouvements planétaires de Ptolémée, même si cela nécessitait de travailler avec un calendrier et un système de dates étrangers, ainsi qu'avec les chiffres indo-arabes et des concepts mathématiques sous-jacents peu familiers.

Plusieurs savants du monde islamique ont ainsi acquis une autorité dans l'Europe



chrétienne (mais souvent avec une version latinisée de leurs noms). L'une de ces figures était Abou Ma'shar (Albumasar), qui a passé l'essentiel de sa carrière à Bagdad, où il a écrit au IX<sup>e</sup> siècle une série de manuels de référence. Une autre était Māshā'allāh (ou Messahalla), de Bagdad lui aussi, auteur au VIII<sup>e</sup> siècle d'un influent traité d'astronomie et d'astrologie, où six de ses douze chapitres sont consacrés à l'astrométéorologie.

Mais le plus célèbre de tous pour son expertise météorologique, au moins dans le monde latin, était certainement al-Kindi. Des traités sur les prévisions météorologiques, extraits de ses ouvrages plus longs et circulant dans leur traduction latine, sont restés populaires jusqu'à la Renaissance. Le cadre conceptuel d'al-Kindi et l'idée centrale de ses traités, à savoir que la force motrice de la météo serait la chaleur engendrée par les mouvements planétaires, sont aristotéliens, c'est-à-dire liés à la théorie des quatre éléments qui composent la zone sublunaire (terre, air, feu, eau) et à leurs connexions intrinsèques avec les qualités élémentaires de chaud, froid, sec et humide. Les astrologues croyaient que les planètes et les étoiles fixes, dont celles formant les constellations auxquelles sont liées les divisions du zodiaque, avaient des affinités particulières avec des éléments et qualités spécifiques. Ces qualités déterminaient les effets que chaque planète aurait sur le monde terrestre lors de son voyage sur la voûte céleste.

**Les astrolabes du Moyen Âge étaient fondés sur des modèles provenant du monde islamique. Cet exemplaire anglais date du XIV<sup>e</sup> siècle et est conservé au British Museum. Il fournit une carte des étoiles et des planètes qui est calibrée pour une latitude choisie, avec des pointeurs vers des étoiles nommées.**

La première étape de la méthode de prévision d'al-Kindi, typique de l'astrométéorologie, consistait à calculer les positions et directions planétaires pertinentes. Ensuite, il fallait prendre en compte la position et l'intensité du Soleil. Dans le modèle d'al-Kindi, la Lune avait un pouvoir particulier sur les éléments terre et eau qui, pour chaque jour considéré, étaient donc tous deux modulés en fonction de sa position par rapport au Soleil. Les prévisionnistes devaient évaluer cette interaction afin de prédire les vents, parce qu'ils croyaient que l'influence conjointe du Soleil et de la Lune déterminait si l'air d'une région particulière serait chaud ou froid. Ils prenaient ensuite en compte les cinq autres planètes connues et calculaient les facteurs affectant chacune, avant d'incorporer les groupements et interactions planétaires.

Les techniques de la méthode d'al-Kindi exigeaient des prévisionnistes d'évaluer avec confiance quels facteurs auraient les plus grands effets et pendant combien de temps. L'expérience était pour eux un paramètre crucial pour faire une prédiction réussie. Les spécialistes consignaient par écrit leurs méthodes éprouvées pour que d'autres en bénéficient. Une méthode particulièrement influente était l'application par al-Kindi d'un concept nommé «ouverture des portes». Les traités n'expliquent pas cette expression, mais suggèrent que la pluie résultait d'un changement de l'atmosphère lié à des combinaisons particulières de planètes et de leurs mouvements relatifs.

## DES « MAISONS » POUR LA LUNE

Le moment prévu des précipitations et leur quantité étaient des informations très importantes dans le monde islamique, au point que l'on appelait souvent les traités de prévisions météorologiques «livres de pluie». Un autre ajout précieux au modèle de base ptoléméen était le concept de «maisons de la Lune». Attribuées aux astrologues indiens, elles étaient fondées sur 28 étoiles (ou groupements d'étoiles) fixes, dont chacune occupait un secteur de la trajectoire de la Lune à travers le zodiaque. Chaque «maison» était caractérisée par son degré d'humidité, qui se répercutait sur la Lune.

L'effet de la maison dans laquelle passait la Lune était particulièrement important pour les prévisions quatre fois par mois. Le schéma météorologique mensuel général pouvait être prédit en traçant des cartes et tables pour chacune des quatre occasions. Par exemple, si la Lune était dans une maison humide ou y entrait, il en résultait normalement de la pluie. Cependant, une interaction significative de la Lune et de Saturne modifierait considérablement le résultat. De même, l'influence perturbatrice de Mars augmentait les risques de tempête, d'orage et de grêle. Ces facteurs

voyaient ensuite leur importance diminuer à mesure que la Lune parcourait son orbite, et étaient supplantés quand elle atteignait le point clé suivant.

### L'APPUI DES THÉOLOGIENS

L'intérêt pour les traités latins d'astrométéorologie a continué à croître après le XIII<sup>e</sup> siècle, sans préoccupations d'ordre religieux. Les théologiens voyaient d'un œil différent les prédictions météorologiques et les prédictions astrologiques destinées aux individus. Ces dernières étaient considérées au mieux comme frauduleuses, et au pire hérétiques et dangereuses parce qu'elles étaient en conflit avec le libre arbitre.

Les prédictions météorologiques, en revanche, avaient reçu l'appui d'une personnalité de poids : saint Thomas d'Aquin, grand théologien du XII<sup>e</sup> siècle. Dans sa *Somme théologique*, il traite du pouvoir des étoiles sur les entités terrestres et cite les propos de saint Augustin soutenant que les corps célestes pouvaient avoir des effets physiques sur Terre. Thomas d'Aquin voyait les prédictions météorologiques

de publier des almanachs annuels comprenant des prévisions météorologiques à long terme, des calendriers, des prédictions relatives aux tendances sanitaires et politiques.

Ces almanachs sont nés des prédictions et prévisions commanditées à titre privé à des savants renommés et à des détenteurs de chaires universitaires d'astronomie. La demande est apparue pratiquement dès que la nouvelle météorologie a atteint l'Europe latine. L'un des premiers exemples de savant ainsi sollicité est celui de l'astrologue Gui Bonatti, qui conseillait Guido da Montefeltro, seigneur d'Urbino, et d'autres dirigeants du XIII<sup>e</sup> siècle. Bonatti a consigné ses techniques de prévisions météorologiques dans une longue partie de son ouvrage, qui fut largement recopié les deux siècles suivants, et par la suite imprimé.

### DE PLUS EN PLUS D'ALMANACHS ET DE « PRONOSTICATIONS »

Si, aux XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles, les autorités en Europe ont fait d'importants investissements dans les universités, c'était pour une bonne part en lien avec l'astronomie, l'astrologie et la météorologie. La demande en spécialistes de l'astronomie et de l'astrologie est illustrée par la carrière de Georg von Peurbach, qui étudia en Italie, en France et en Allemagne avant de devenir professeur d'astronomie à l'université de Vienne. Il travailla pour Ladislas V de Hongrie et de Bohême, et pour l'empereur romain germanique Frédéric III.

Les prévisions et prédictions fournies aux puissants étaient privées, mais on demandait souvent aux titulaires des chaires universitaires d'émettre des recommandations publiques. Ces prédictions étaient données aux membres des universités et à leurs mécènes sous forme de pronostications annuelles, qui incluaient des prévisions météorologiques saisonnières. On dispose, de cette coutume qui s'est rapidement répandue, d'exemples remontant au début du XV<sup>e</sup> siècle.

Les pronostications de Pierre de Monte Alciano, qui vécut à Pavie, en Italie, semblent avoir été particulièrement sollicitées ; il nous en reste des exemples pour les années 1419, 1421, 1430 et 1448. Ses prévisions circulèrent non seulement dans le Saint Empire romain germanique, mais aussi en France et en Angleterre. Le prévisionniste le plus influent de tous fut sans doute Joannes Vesalius, arrière-grand-père de l'illustre médecin André Vésale. Vesalius obtint une chaire à l'université de Louvain en 1429 avant de devenir conseiller du duc de Bourgogne Philippe le Bon. Le conseil communal de Louvain lui commanda une pronostication pour 1431, que Vesalius lut fin 1430 devant une audience d'invités. Quand arriva à Louvain le premier imprimeur, Jan van Westfalen, celui-ci publia



# Les prédictions météorologiques n'étaient pas jugées divinatoires

comme une application de connaissances tirées de l'observation et de l'expérience ; de nombreux théologiens ne les considéraient donc pas comme démoniaques ou divinatoires.

Pour les étudiants du Moyen Âge, particulièrement à Paris, l'ouvrage contemporain de référence traitant de toutes les formes d'astrologie était le *Speculum astronomiae* (« Miroir de l'astronomie »). Cet ouvrage, attribué (peut-être à tort) au théologien du XIII<sup>e</sup> siècle Albert le Grand, accordait de la valeur au fait de savoir comment les variations des corps célestes peuvent entraîner des changements sur Terre, notamment sur le temps. Loin de rejeter comme étrangères et suspectes les prévisions météorologiques astronomiques, *Speculum astronomiae* en approuvait la pratique.

Des développements techniques ont aidé à diffuser cette nouvelle science. En particulier, avec l'avènement de l'imprimerie en Europe du Nord au XV<sup>e</sup> siècle, il était désormais possible

aussitôt des pronostications annuelles sur le modèle de celles de Vesalius.

Autre exemple: au xv<sup>e</sup> siècle, l'université de Bologne employait deux professeurs d'astronomie et d'astrologie. Le premier avait pour tâche de compiler un almanach annuel montrant jour par jour les positions des sept planètes pour l'année à venir, et de tabuler les angles des planètes par rapport à la Lune et entre elles. L'autre professeur était chargé d'utiliser ces données pour produire une pronostication. De nos jours encore, les almanachs imprimés préservent ce schéma.

Le long travail de calcul des positions planétaires fut allégé grâce à la contribution de l'astronome allemand Regiomontanus (voir la figure page 79), qui produisit un calendrier et des *Éphémérides*, ou livres de tables astronomiques, disponibles en version imprimée à partir de 1476. Ces gros volumes fournissaient non seulement des données planétaires complètes, mais également des indications

Dans cette page tirée de son almanach pour 1590, Thomas Buckminster (1531-1599) livre ses prédictions météorologiques pour le sud de l'Angleterre en juillet et août. Ce type de document, destiné au grand public, était écrit en langue vernaculaire et non en latin. Les termes employés – *fair* (« beau »), *fresh* (« frais », *raw* (« froid et humide »), *clear* (« dégagé »)... – sont encore en usage aujourd'hui.

pour les interpréter et une table de corrections à appliquer pour ajuster les coordonnées à une ville ou région particulière d'Europe. Les pouvoirs des planètes dans chaque signe et chaque aspect étaient tabulés sous forme numérique, et les maisons lunaires étaient incluses dans un tableau.

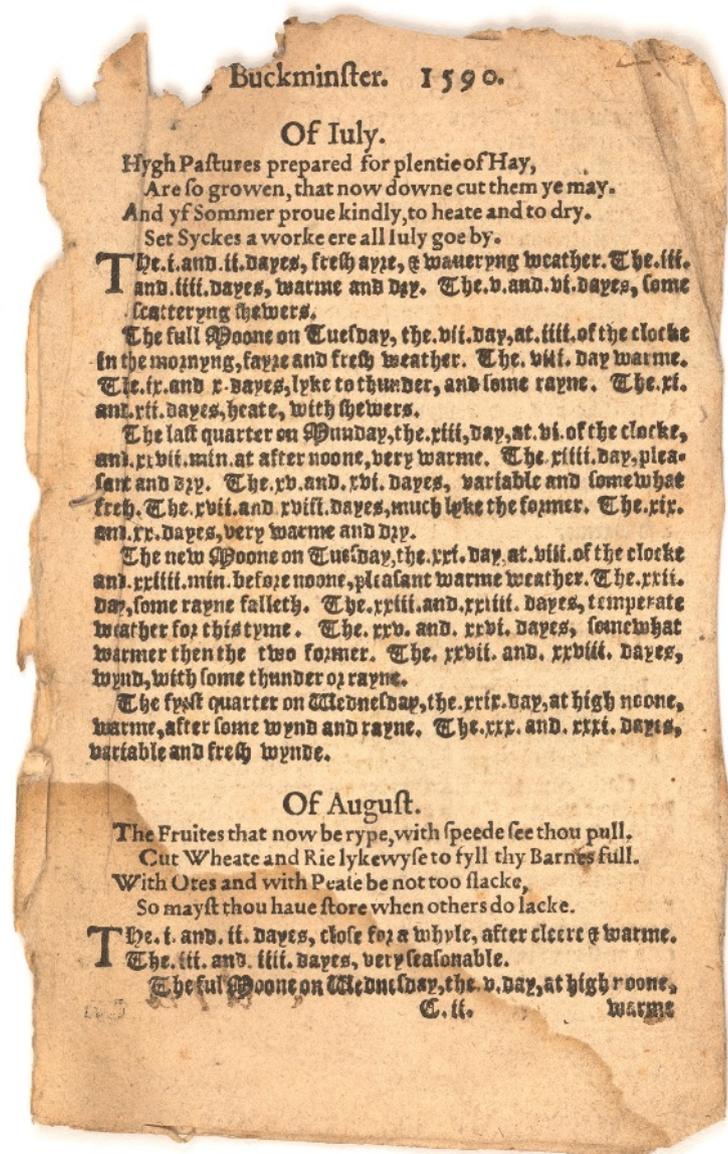
Regiomontanus a fourni des règles pour produire des pronostications, une première partie étant consacrée aux prévisions météorologiques. Les règles appliquaient les procédures standard de l'époque, et il semble que ce soit ainsi que Regiomontanus lui-même opérerait. Il identifiait certaines configurations planétaires comme étant particulièrement influentes. Par exemple, une opposition de la Lune et de Jupiter, quand elles occupaient le signe de feu du Bélier et le signe d'eau du Scorpion, devait produire des nuages.

La forte demande pour les travaux de Regiomontanus entraîna la production rapide de multiples versions imprimées, dont beaucoup piratées. On le considérait comme le plus grand astrologue de son temps: le cardinal Bessarion et le roi Matthias Corvin de Hongrie eurent recours à ses services, et Christophe Colomb utilisa ses travaux pour calculer les dates des tempêtes à venir.

## UN ENGOUEMENT JUSQU'AUX DÉBUTS DE L'ÉPOQUE MODERNE

Outre Regiomontanus, plusieurs scientifiques célèbres du début de l'époque moderne ont adopté l'astrométéorologie, dont Tycho Brahe et Johannes Kepler. L'idée de plus en plus acceptée d'un système planétaire héliocentrique n'avait pas ébranlé la croyance en l'influence des corps célestes sur l'atmosphère, la pluie et le beau temps, et la santé du corps humain. De fait, les ajustements continus des règles de formulation des prévisions météorologiques par leurs adeptes renforçaient la place de l'astrométéorologie dans la culture scientifique et populaire.

La tendance en faveur de l'astrométéorologie s'est manifestée en plusieurs lieux dès le milieu du xiv<sup>e</sup> siècle. À partir de 1340 environ, les astronomes et scientifiques travaillant à Merton College, à Oxford, en Angleterre, parmi lesquels l'éminent John Ashenden, ont fait preuve d'un intérêt particulier pour la discipline. Ashenden composa un imposant traité d'astrologie, où l'astrométéorologie avait une place importante. Il devint célèbre pour avoir prédit la Peste noire de 1348-1349, et ses prévisions météorologiques pour 1368-1374 mettaient l'accent sur les conjonctions planétaires majeures de 1365 et 1369, annonçant une période de fortes pluies et inondations suivie de trois années de sécheresse et, par conséquent, de mauvaises récoltes et de disette.





Regiomontanus, nom latinisé de l'astronome-astrologue allemand Johannes Müller (1436-1476), a créé des éphémérides pour documenter la trajectoire des corps célestes. Utilisés avec d'autres indications, ces travaux ont fait progresser l'astromééorologie et ont été précurseurs de la météorologie moderne.

Parallèlement aux travaux d'Ashenden, des prédictions et études plus locales du temps ont été consignées dans des traités présentés à Merton College par William Reed, évêque de Chichester et membre de Merton College. L'un de ces traités, *Rules for the Forecasting of Weather* (« Règles pour la prévision du temps ») de maître William Merle, adjoint à ses règles des observations météorologiques détaillées pour la période 1337-1344, effectuées dans le Lincolnshire mais également à Oxford. Le but principal semble avoir été de corrélér les facteurs astromééorologiques avec les notes sur le temps qu'il faisait réellement, afin d'établir quels étaient les facteurs les plus importants pour faire des prédictions. Cette démarche s'inspirait peut-être des travaux pionniers du frère franciscain Roger Bacon, qui fit ses études à Oxford à la fin du XIII<sup>e</sup> siècle. Une collection de ses traités scientifiques comporte un calendrier avec les positions planétaires journalières et des notes d'observations du temps.

Un projet distinct mais semblable à celui de Bacon a été mené par Eyno de Wurtzbourg, dont le traité d'astromééorologie était étayé par l'inclusion de notes météorologiques sur la période allant de 1331 à 1355. Comme le groupe d'Oxford, Eyno mettait l'accent sur la prédiction d'alertes météorologiques; il note avec fierté, par exemple, avoir prédit avec succès d'importantes chutes de neige en trois occasions.

Un volume à l'origine incertaine et appartenant aux Dominicains de Bâle témoigne de travaux comparables entre 1399 et 1406. Il inclut des règles de prédiction astromééorologique accompagnées d'ensembles de données et d'observations du temps. Les notes identifient quels facteurs astromééorologiques correspondraient au temps constaté. Par exemple, il est rapporté que le 7 avril 1400 était nuageux avec de brèves éclaircies et un fort vent d'ouest. Une note indique que la Lune s'éloignait de la bénéfique planète Jupiter, sortait d'un signe d'air, et se rapprochait de Mercure, planète dont on pensait qu'elle entraînait des perturbations atmosphériques.

La thèse selon laquelle la recherche météorologique avait pour but d'améliorer et d'affiner l'astromééorologie, plutôt que de la contester, est étayée par l'expansion de la science aux XV<sup>e</sup> et XVI<sup>e</sup> siècles. Le XVI<sup>e</sup> siècle, par exemple, a vu la production de traités que les scientifiques amateurs pouvaient utiliser pour faire leurs propres prévisions, et la publication d'un nombre toujours croissant de pronostications et d'almanachs annuels – des ouvrages en langue vernaculaire, plutôt qu'en latin, destinés aux non-spécialistes (voir la figure page 78).

Les travaux de Tycho Brahe apportent une preuve supplémentaire de la valeur que l'on continuait d'accorder à l'astromééorologie. L'astronome danois lui consacre une place étonnamment importante dans son ouvrage de 1573 sur une nouvelle étoile (en fait, une supernova) apparue dans la constellation de Cassiopée. Tycho Brahe y livre ses propres observations et calculs de météorologie et se montre en faveur de la publication de prévisions météorologiques journalières. Il reconnaissait l'inexactitude des prédictions, mais il soutenait qu'en tenant des registres du temps, la pratique de l'astromééorologie s'affinerait et se renforcerait.

Kepler, qui fut l'élève de Tycho Brahe, suivit ses conseils et consigna quotidiennement le temps constaté. Ses éphémérides et calendriers publiés incluaient ses observations et prédictions météorologiques. Comme les autres praticiens avant lui, Kepler identifiait ce qu'il pensait être les facteurs les plus importants: dans son cas, les aspects planétaires.

Le soutien à la météorologie médiévale de personnalités scientifiques aussi éminentes montre qu'il ne s'agissait pas vraiment de superstition et d'ignorance. Les observations mises à jour et corrigées des mouvements planétaires produites par des scientifiques tels que Tycho Brahe et Kepler permettaient d'améliorer les tables planétaires utilisées par les astromééorologues. L'enregistrement précis des conditions météorologiques et le renforcement des techniques de prévision sont sans doute la plus grande contribution de l'astromééorologie à la science météorologique qui lui a succédé. ■

## BIBLIOGRAPHIE

A. Lawrence-Mathers, **Medieval Meteorology**, Cambridge University Press, 2020.

J. al-Khalili, **The House of Wisdom : How Arabic Science Saved Ancient Knowledge and Gave Us the Renaissance**, Penguin Press, 2011.

G. Bos et C. Burnett, **Scientific Weather Forecasting in the Middle Ages : The Writings of al-Kindi**, Kegan Paul International, 2000.

E. Zinner, **Regiomontanus : His Life and Work**, North Holland, 1990.

# R

## ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul  
 P.86 Art & science  
 P.88 Idées de physique  
 P.92 Chroniques de l'évolution  
 P.96 Science & gastronomie  
 P.98 À picorer

# DES NOMBRES PREMIERS ROBUSTES OU DÉLICATS

Manipuler les chiffres des nombres premiers est un jeu stimulant... qui réserve de nombreuses surprises.

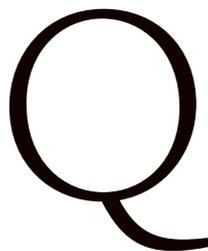
## L'AUTEUR



**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)



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



Que se passe-t-il quand on modifie les chiffres d'un nombre premier? Il peut rester premier ou devenir composé, mais ce que l'on découvre au cours de ces changements est parfois inattendu. Par exemple, changer l'ordre des chiffres du nombre premier 991 donne toujours un autre nombre premier, car 199 et 919 sont premiers. À l'opposé, d'autres opérations de changements ne donnent que des nombres composés. Ainsi, il y a 54 façons de changer un seul chiffre du nombre premier 294001, et tous ces changements donnent des nombres composés.

Ces questions sont parfois sans réponse définitive; et plusieurs découvertes conduisent à une situation étrange où l'on sait démontrer qu'une catégorie de nombres est infinie alors qu'on ne réussit pas à trouver un seul de ces nombres. Pour quiconque aime programmer, le sujet est une occasion rêvée de lancer sa machine à la poursuite de tels nombres singuliers, mais si certains apparaissent en quelques secondes, d'autres demandent plusieurs minutes de calcul, voire plusieurs heures.

## UN SAUT INATTENDU

Sur la liste de courriels *Math-Fun*, les mathématiciens aiment échanger des informations à propos de questions mathématiques

amusantes... quoique parfois très difficiles. Le 24 janvier 2003, Bill Gosper, l'inventeur du célèbre lance-glisser du *Jeu de la vie* de John Conway, fit part à la liste de son expérience suivante ayant consisté à lancer un programme de recherche des nombres premiers qui le restent toujours quand on permute leurs chiffres, nombres dénommés «nombres premiers permutable» ou «nombres premiers absolus». Il obtint rapidement une liste de 22 nombres sur l'écran de son ordinateur: 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 31, 37, 71, 73, 79, 97, 113, 131, 199, 311, 337, 373, 733, 919, 991.

Le programme sembla alors s'arrêter. Mais après une minute de calcul, apparut le nombre 1111111111111111111. Après un temps plus long encore, s'afficha le nombre 111111111111111111111. Le programme resta alors silencieux et fut interrompu sans qu'il ait affiché de nombres supplémentaires.

Il n'existe donc aucun nombre premier permutable entre 991 et 1111111111111111111. Peut-être que plus loin, les seuls nombres premiers permutables sont tous composés uniquement de chiffres 1. L'expérience, que vous pouvez reproduire, suggère d'étudier deux séries de questions:

*Série 1.* Existe-t-il d'autres nombres premiers permutables composés uniquement de 1 en

base 10? On les nomme «répunits» pour la base 10. Si oui, en existe-t-il une infinité?

Série 2. Existe-t-il des nombres premiers permutable supérieurs à 991 qui ne sont pas composés que de chiffres 1? Que peut-on en savoir?

Aucune des deux séries de questions n'est parfaitement traitée!

Pour les répunits premiers, on sait démontrer (essayez, ce n'est pas très difficile) que  $11\dots 1$  ( $n$  fois le 1) ne peut être un nombre premier que si  $n$  est premier, mais que ce n'est pas suffisant, comme le montre l'exemple  $111 = 3 \times 37$ .

Aujourd'hui, on ne connaît que les onze répunits premiers suivants: 2 fois le 1; 19 fois le 1; puis 23, 317, 1031, 49081, 86453, 109297, 270343, 5794777, 8177207 fois le 1. Le dernier a été découvert le 8 mai 2021. On comprend pourquoi, après le nombre qui s'écrit avec 23 fois le 1, le programme de Bill Gosper ne donna rien d'autre: il n'aurait trouvé un autre répunit premier qu'en atteignant le nombre composé de 317 fois le 1, ce qui vraisemblablement ne pouvait se faire avec son programme en un temps raisonnable.

En réalité, les six derniers répunits de la liste sont seulement des nombres premiers «probables», ce qui signifie qu'on a testé leur primalité en utilisant une méthode qui donne un résultat probablement vrai avec toutefois un risque infinitésimal d'erreur. On conjecturerait qu'il n'existe qu'un nombre fini de répunits premiers en base 10, mais les dernières découvertes affaiblissent la conjecture.

Concernant la question des nombres premiers permutable supérieurs à 991 et qui ne sont pas des répunits, on a avancé, sans toutefois arriver à une réponse définitive. Les travaux de divers mathématiciens, dont Arkadii Slinko, de l'université d'Auckland, en Nouvelle-Zélande (voir la bibliographie), ont montré que:

- Puisque tout nombre qui se termine par 0, 2, 4, 5, 6 ou 8 est composé, on en déduit immédiatement que tous les chiffres d'un nombre premier permutable sont pris parmi 1, 3, 7 et 9. Des raisonnements plus compliqués conduisent à d'autres précisions: tout nombre premier permutable qui n'est pas un répunit est obtenu en permutant les chiffres d'un entier de la forme  $aaa\dots aaab$ , composé de  $n-1$  chiffres  $a$  et d'un chiffre  $b$ , avec  $a$  et  $b$  différents et pris parmi 1, 3, 7 et 9.

- Pour que  $aaa\dots aaab$  soit un nombre premier permutable,  $(a, b)$  ne doit être aucun des couples suivants:  $(9, 7)$ ,  $(9, 1)$ ,  $(1, 7)$ ,  $(7, 1)$ ,  $(3, 9)$ ,  $(9, 3)$ .

- Les nombres premiers permutable qui ne sont pas des répunits et qui sont supérieurs à 991 comportent au moins  $6 \times 10^{175}$  chiffres.

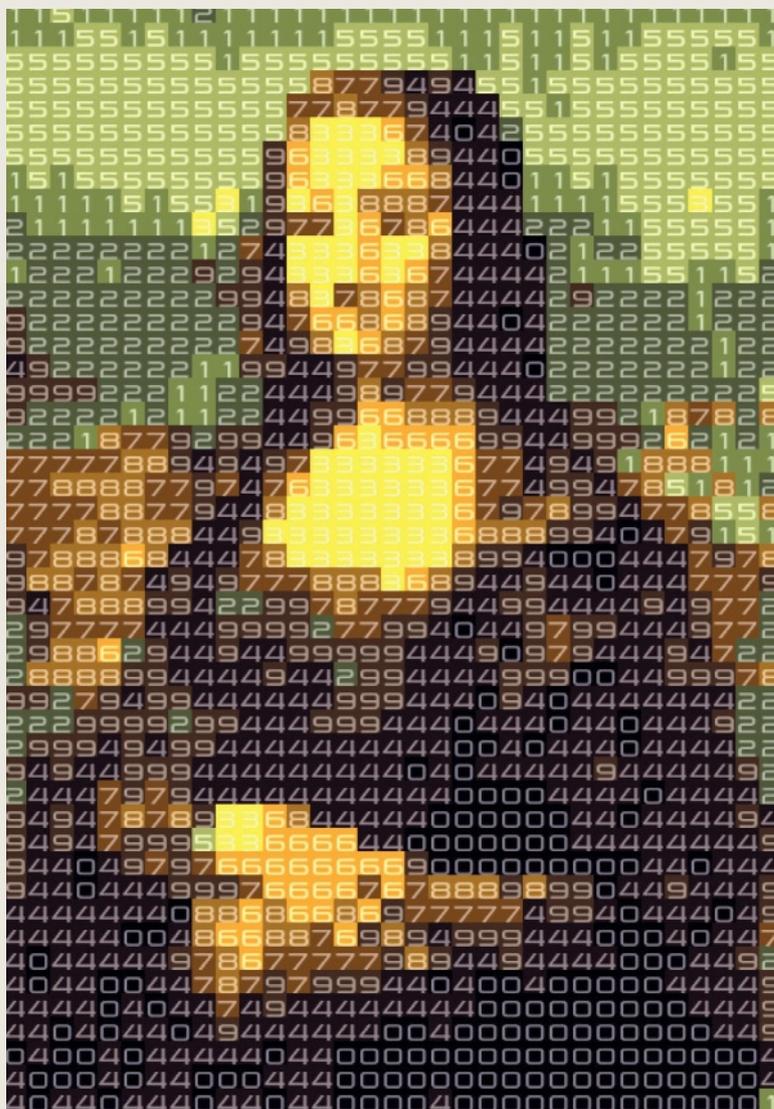
On conjecture donc que les nombres premiers permutable supérieurs à 991 sont tous

# 1

## PORTRAIT EN NOMBRES PREMIERS

Roland Meertens, un ingénieur qui travaille en Allemagne sur des projets de voitures autonomes, a obtenu un nombre premier qui représente la Joconde. Ce nombre comporte 1 617 chiffres décimaux qui se disposent en 49 lignes de 33 chiffres produisant le portrait. Roland Meertens construit d'abord une approximation en 10 couleurs de l'image. Il assigne un chiffre à chaque couleur, ce qui donne un nombre entier  $N$  produisant

le portrait. Il modifie ensuite le nombre  $N$  aléatoirement en quelques chiffres qui ne changent pas la perception que nous avons de l'image, et il recommence jusqu'à obtenir un nombre premier. Les tests probabilistes de primalité rendent cette recherche possible rapidement. Pour plus de détails, voir : <http://www.pinchofintelligence.com/painting-by-prime-number/> <http://archive.bridgesmathart.org/2016/bridges2016-359.pdf>



des répunits, mais, là encore, on attend une démonstration complète. En regroupant cette conjecture et celle sur les répunits en base 10, on conjecture donc tout simplement qu'il n'existe qu'un nombre fini de nombres premiers permutables et que ce sont les vingt-deux jusqu'à 991 et les dix répunits supérieurs à 991 connus.

### DANS LES AUTRES BASES

La notion de nombre premier permutable est liée à la base de numération décimale et peut donc être envisagée dans d'autres bases. Convenons de nommer «nombres premiers  $b$ -permutables» les nombres premiers qui, quand on permute les chiffres de leur écriture en base  $b$ , restent premiers.

Une petite exploration numérique avec un ordinateur nous donne des débuts de listes pour ces nombres  $b$ -permutables.

Pour la base 2, en calculant par exemple jusqu'à 10000, on trouve quatre nombres premiers 2-permutables :

- 3, dont l'écriture en base 2 est  $11_2$ , (l'indice derrière un nombre précise la base dans laquelle on l'écrit quand ce n'est pas la base 10)

- $7 = 111_2$
- $31 = 11111_2$
- $127 = 1111111_2$
- $8191 = 1111111111111_2$

La situation est plus simple que pour la base 10: en base 2, les nombres trouvés sont tous, sans exception, des répunits. On formule donc la conjecture que tous les nombres premiers 2-permutables sont des répunits pour la base 2. La conjecture se démontre facilement: s'il y a un chiffre autre que 1 dans un nombre écrit en base 2, c'est un 0, donc en permutant les chiffres de ce nombre, ce 0 peut être mis à la fin, ce qui donne un nombre pair... qui n'est pas premier.

Les nombres premiers 2-permutables sont donc des répunits en base 2. Un répunit en base 2 qui s'écrit avec  $n$  fois le 1 vaut  $2^n - 1$ . Les nombres premiers de cette forme sont très recherchés et portent le nom de «nombres premiers de Mersenne» en l'honneur de Marin Mersenne (1588-1648), un moine savant de l'ordre des Minimes qui aurait énoncé que si  $2^n - 1$  est premier, alors  $n$  est premier. Le plus grand nombre premier connu est un nombre premier de Mersenne; il s'écrit en base 2 avec 82589933 fois le 1 et, quand on l'écrit en base 10, il comporte 24862048 chiffres. Il a été découvert en décembre 2018 par Patrick Laroche en utilisant un programme du projet GIMPS (*Great Internet Mersenne Prime Search*, <https://www.mersenne.org>).

Au total, on connaît aujourd'hui 51 nombres premiers de Mersenne, qui sont donc aussi les

# 2

## LES NOMBRES PREMIERS ET LE CALCUL

Un nombre est premier s'il a exactement deux diviseurs, 1 et lui-même. Les plus petits nombres premiers sont 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, ...

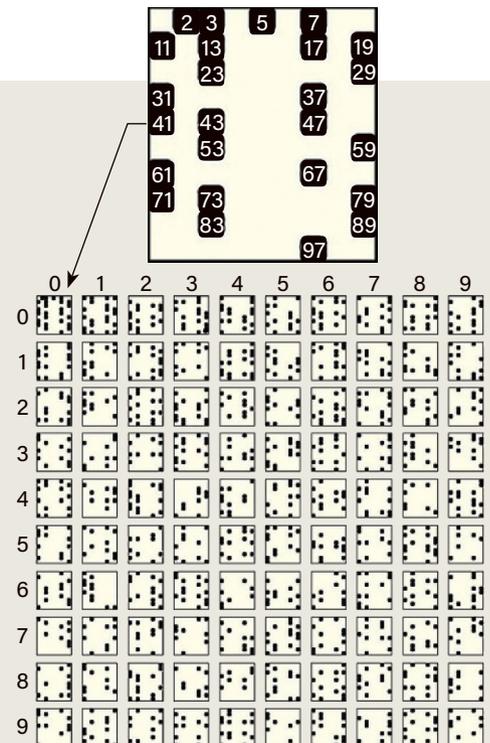
Le tableau à droite représente les nombres premiers jusqu'à 10 000. Chaque carré représente 100 entiers en 10 lignes de 9 petits carrés (les multiples de 10 ne sont pas représentés). Les nombres premiers sont dans une petite case noire. En examinant par exemple le carré de la ligne 9 et de la colonne 5, on voit qu'il y a sept nombres premiers entre 9 500 et 9 599, qui sont 9 511, 9 521, 9 533, 9 539, 9 547, 9 551 et 9 587.

On constate sur ce graphique que la densité des nombres premiers décroît lentement. Le théorème d'Hadarnard et de la Vallée Poussin de 1896 indique que la densité des nombres premiers autour de  $n$  est d'environ  $1/\log(n)$ .

Autour de 10 000, cette densité est donc  $1/\log(10\ 000) \approx 1/9,21$ , ce qui

est compatible avec le fait qu'on trouve 9 nombres premiers dans la dernière centaine avant 10 000 de notre tableau et un peu plus dans la centaine précédente.

Les nombres premiers sont étudiés depuis l'Antiquité. Euclide savait démontrer qu'il y en a une infinité. Parmi les mathématiciens qui s'y sont intéressés, citons Ératosthène, Marin Mersenne, Pierre de Fermat, Leonhard Euler, Carl Friedrich Gauss, etc. On connaît des algorithmes rapides pour tester la primalité d'un nombre, y compris quand il comporte plusieurs milliers de chiffres. En revanche, pour décomposer un entier en facteurs premiers, les seuls algorithmes rapides qu'on connaît sont quantiques et sont donc inutilisables aujourd'hui faute d'ordinateurs quantiques de puissance suffisante. Personne ne sait aujourd'hui factoriser n'importe quel nombre de 300 chiffres décimaux.



# 3

## RAISONNEMENTS HEURISTIQUES

Les raisonnements heuristiques utilisés en théorie des nombres déterminent des propriétés presque certaines concernant les entiers ou les familles d'entiers. La densité des nombres premiers étant  $1/\log(n)$  pour les nombres autour de  $n$ , on en déduit que la densité des nombres premiers jumeaux (nombres premiers séparés de deux unités, comme 11-13, 17-19, 821-823) autour de  $n$  est, en ordre de grandeur, probablement  $1/(\log(n))^2$ . L'argument heuristique est : « La probabilité que  $p$  et que  $p + 2$  soient simultanément premiers est le produit de la probabilité que  $p$  soit premier par celle que  $p + 2$  le soit, donc le  $1/\log(n)$  du théorème des nombres premiers fournit un  $1/(\log(n))^2$ . »

Bien sûr, l'argument n'est pas totalement satisfaisant, puisque même si la densité des nombres premiers est un résultat sûr, le fait pour un entier d'être premier ne résulte pas d'un tirage aléatoire : il est donc abusif de parler de probabilité. De plus, les événements concernant la primalité de  $p$  et de  $p + 2$  ne sont pas indépendants, ce qui serait nécessaire pour multiplier les probabilités.

Le raisonnement heuristique donne une affirmation probable, mais qui ne peut être considérée comme rigoureusement prouvée.

Pour les nombres premiers permutablement, on peut mener le raisonnement heuristique suivant. La « probabilité » pour qu'un entier  $p$  formé de  $n$  chiffres décimaux soit premier ainsi que les  $n!$  nombres qu'on obtient en permutant ses chiffres est, en ordre de grandeur,  $(1/\log(p))^{n!}$ . Puisqu'il y a environ  $10^n$  nombres de  $n$  chiffres et que leur taille est environ  $10^{n-1}$ , le nombre d'entiers premiers permutablement à  $n$  chiffres sera environ  $10^n / (\log(10^{n-1}))^{n!}$ .

Le calcul donne 18,9 pour  $n = 2$ ,  $1/10$  pour  $n = 3$ ,  $7 \times 10^{-17}$  pour  $n = 4$  et  $2 \times 10^{-111}$  pour  $n = 5$ . Ces évaluations sont grossièrement compatibles avec ce que l'on sait des nombres permutablement trouvés, mais surtout, la décroissance de l'évaluation heuristique est tellement rapide, quand  $n$  augmente, que le calcul appuie la conjecture qu'il n'y a qu'un nombre fini de nombres premiers permutablement. Pour les nombres premiers circulaires, un raisonnement du même type appuie aussi la conjecture qu'il n'y en a qu'un nombre fini.



51 nombres premiers 2-permutablement connus. On ignore s'il en existe une infinité, mais cette fois on conjecture plutôt que oui.

Pour la base 3, en calculant jusqu'à 50000, les nombres premiers 3-permutablement sont :  $2=2_3$ ,  $5=12_3$ ,  $7=21_3$ ,  $13=111_3$ ,  $1093=111111_3$ . Mis à part 2, 5 et 7, ce sont tous des répunits de la base 3. En base 4, les nombres premiers 4-permutablement sont, jusqu'à 50000 :  $2=2_4$ ,  $3=3_4$ ,  $5=11_4$ ,  $7=13_4$ ,  $13=31_4$ ,  $23=113_4$ ,  $29=131_4$ ,  $53=311_4$ .

Pour la base 5, en calculant jusqu'à 50000, on a :  $2=2_5$ ,  $3=3_5$ ,  $7=12_5$ ,  $11=21_5$ ,  $13=23_5$ ,

$17=32_5$ ,  $19=34_5$ ,  $23=43_5$ ,  $31=111_5$ ,  $1249=14444_5$ ,  $2749=41444_5$ ,  $3049=44144_5$ ,  $3109=44414_5$ ,  $3121=44441_5$ ,  $19531=111111_5$ .

D'autres listes de nombres premiers  $b$ -permutablement sont à la portée de votre ordinateur ou données sur Wikipédia, le tout conduisant à la conjecture générale : dans toute base  $b$  supérieure ou égale à 2, à l'exception du début de leur liste, les nombres premiers  $b$ -permutablement sont les répunits premiers de la base  $b$ .

Envisager toutes les permutations est très exigeant et cela a eu pour conséquence que nous

# 4

## LES NOMBRES PREMIERS DÉLICATS EN BASE B

Les nombres premiers délicats sont les nombres premiers qui ne restent jamais premiers quand on change l'un quelconque de leurs chiffres. Les dix premiers nombres premiers délicats pour les bases de 2 à 10 sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Il a été démontré que les nombres premiers délicats en base 10 ont une densité strictement positive parmi les nombres premiers. Cela signifie que pour un certain nombre réel  $D > 0$ , le rapport (nombre d'entiers premiers délicats jusqu'à  $N$ )/(nombre d'entiers premiers jusqu'à  $N$ )

s'approche de  $D$  ou le dépasse quand  $N$  tend vers l'infini.

Un raisonnement heuristique suggère une valeur pour  $D$ . Pour un nombre premier de  $k$  chiffres en base  $b$ , il y a  $(b - 1)k$  nombres modifiés. La « probabilité » pour qu'un de ces nombres modifiés soit composé est  $1 - 1/\log(b^k)$ . La probabilité que tous les nombres modifiés d'un nombre premier à  $k$  chiffres soient composés est donc :  $[1 - 1/\log(b^k)]^{(b-1)k}$ . C'est la probabilité qu'un nombre premier à  $k$  chiffres soit délicat. Le nombre attendu de nombres premiers à  $k$  chiffres est :

$b^k/\log(b^k)$ . Le nombre attendu de nombres premiers délicats à  $k$  chiffres est donc :  $[b^k/\log(b^k)][1 - 1/\log(b^k)]^{(b-1)k}$ .

La densité  $D$  attendue des nombres premiers délicats à  $k$  chiffres parmi les nombres premiers à  $k$  chiffres est donc :  $[1 - 1/\log(b^k)]^{(b-1)k}$ . Si l'on calcule les valeurs que prend cette expression pour  $b = 10$ , on trouve :  $k = 10, D = 0,018\ 38$  ;  $k = 100, D = 0,019\ 897$  ;  $k = 1\ 000, D = 0,020\ 050$ .

La densité  $D$  semble avoir une valeur proche de 2 %. Michael Filaseta m'a indiqué que la limite de cette expression était  $\exp(-9/\log(10))$ , qui vaut précisément 0,020 067 56... D'autres raisonnements heuristiques plus fins sont possibles et conduisent à des évaluations sensiblement plus petites pour  $D$ . Cette situation illustre le fait que les raisonnements heuristiques sont insuffisants pour obtenir des certitudes !

- Base 2 :** 127, 173, 191, 223, 233, 239, 251, 257, 277, 337.
- Base 3 :** 2, 7, 13, 19, 31, 41, 149, 239, 283, 293.
- Base 4 :** 373, 2 333, 2 917, 2 999, 3 779, 6 211, 6 323, 6 379, 7 043, 7 583.
- Base 5 :** 83, 233, 277, 397, 487, 509, 593, 647, 739, 907.
- Base 6 :** 28 151, 82 913, 153 887, 437 771, 632 987, 676 297, 685 169, 873 359, 903 781, 934 001.
- Base 7 :** 223, 409, 491, 587, 701, 1 051, 1 163, 1 237, 1 361, 1 637.
- Base 8 :** 6 211, 57 803, 62 213, 83 477, 130 769, 132 589, 145 289, 153 259, 161 869, 169 909.
- Base 9 :** 2 789, 4 027, 6 421, 8 963, 20 521, 20 719, 23 143, 23 473, 27 631, 28 579.
- Base 10 :** 294 001, 505 447, 584 141, 604 171, 971 767, 1 062 599, 1 282 529, 1 524 181, 2 017 963, 2 474 431.

ne savons pour aucune base  $b$  s'il existe une infinité de nombres premiers  $b$ -permutables.

### ROBUSTE AU SENS DES PERMUTATIONS CIRCULAIRES

Pour augmenter un peu les chances d'avoir des listes infinies de résultats, on considère les «nombres premiers circulaires» :  $n$  est un nombre premier  $b$ -circulaire s'il est premier et si, en opérant une permutation circulaire de ses chiffres quand il est écrit en base  $b$ , on obtient toujours un nombre premier. L'entier 37199 est un nombre premier 10-circulaire car les nombres 71993, 19937, 99371, 93719 sont premiers.

Voici la liste des nombres premiers 10-circulaires jusqu'à 1 000 000 : 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 31, 37, 71, 73, 79, 97, 113, 131, 197, 199, 311, 337, 373, 719, 733, 919, 971, 991, 1 193, 1 931, 3 119, 3 779, 7 793, 7 937, 9 311, 9 377, 11 939, 19 391, 19 937, 37 199, 39 119, 71 993, 91 193, 93 719, 93 911, 99 371, 193 939, 199 933, 319 993, 331 999, 391 939, 393 919, 919 393, 933 199, 939 193, 939 391, 993 319, 999 331.

On y retrouve tous les nombres premiers 10-permutables. Les répunits premiers de la base 10 sont bien sûr aussi dans la liste et donc, plus loin, on est certain de trouver 19 fois le 1 ; puis 23, 317, 1 031, 49 081, 86 453, 109 297, 270 343, 5 794 777, 8 177 207 fois le 1.

Si l'on ne s'intéresse qu'aux nombres premiers circulaires qui ne sont pas des répunits premiers de la base 10, vous n'en trouverez probablement que cinquante-quatre et aucun au-delà de 999 331. Ce nombre pourrait bien être le dernier nombre premier circulaire qui ne soit pas un répunit de la base 10. En effet, des calculs massifs menés en 2019 par Felix Fröhlich, un amateur de programmation amoureux des nombres premiers, montrent que s'il y en a, ils dépassent  $10^{23}$ . Il en résulte qu'une conjecture raisonnable concernant les nombres premiers 10-circulaires est à nouveau qu'il n'en existe qu'un nombre fini. Leur liste serait composée des onze répunits premiers connus de la base 10 et des cinquante-quatre autres trouvés et qui sont tous inférieurs à 1 000 000. Selon un raisonnement heuristique fondé sur des arguments probabilistes, il n'y aurait qu'un nombre fini de nombres premiers 10-circulaires qui ne sont pas des répunits (voir l'encadré 2).

La notion de nombre premier  $b$ -circulaire dépendant de la base  $b$ , l'étude doit être poursuivie. Nous vous laissons le plaisir d'explorer avec votre ordinateur ces familles de nombres premiers  $b$ -circulaires pour  $b$  autre que 10.

Certains nombres premiers ne supportent pas qu'on en modifie un seul chiffre, car à chaque essai cela leur fait perdre leur statut privilégié de

nombre premier. Un exemple est 294001: dès qu'on change un de ses chiffres par un autre, cet entier devient toujours un nombre composé. En modifiant le chiffre des unités, on obtient 294000, 294002, 294003, ..., 294009, qui sont tous composés. C'est aussi le cas si l'on modifie le chiffre des dizaines, ou le chiffre des centaines, etc.

## NOMBRES PREMIERS DÉLICATS

L'exigence semble forte et d'ailleurs votre machine calculera un moment avant de trouver un nombre premier de ce genre. On va voir que ces nombres, dénommés «nombres premiers délicats» ou «nombres faiblement premiers», sont, contrairement à une première intuition, bien moins rares que ceux que nous avons cherchés précédemment.

La première mention de ces nombres provient d'un problème posé en 1978 par Murray Klamkin dans *Mathematics Magazine*, une revue américaine destinée aux étudiants et enseignants. Parmi les réponses publiées par le journal l'année suivante, figurent des calculs et la démonstration qu'il existe une infinité de nombres premiers délicats; la démonstration était proposée par le célèbre et prolifique mathématicien hongrois Paul Erdős.

Le nombre premier délicat que nous avons donné en exemple est le plus petit pour la base 10; il est suivi de 505 447, 584 141, 604 171, 971 767, 1062 599, 1282 529, 1524 181, 2017 963, 2474 431, 2690 201, 3085 553, 3326 489, 4393 139, 5152 507, 5564 453, 5575 259, 6173 731, 6191 371, 6236 179, 6463 267, 6712 591, 7204 777, ... C'est la suite A050249 de l'encyclopédie de Neil Sloane (<https://oeis.org>).

Que la suite soit infinie est remarquable, mais il y a bien plus remarquable. En 2011, Terence Tao, professeur à l'université de Californie à Los Angeles et médaillé Fields en 2006, a en effet démontré que ces nombres constituent une proportion non nulle des nombres premiers. Ne retenir qu'un nombre premier sur deux donne un ensemble de densité  $1/2$  dans l'ensemble des nombres premiers. La densité des nombres premiers délicats semble plus faible que  $1/2$ , mais il est certain qu'elle est strictement positive, ce qui signifie qu'en parcourant la suite des nombres premiers, on tombera régulièrement sur des nombres premiers délicats. L'article de Terence Tao ne permet pas de connaître cette densité des nombres premiers délicats. Michael Filaseta, de l'université de Caroline du Sud et spécialiste de ces questions, que j'ai interrogé, m'a indiqué qu'il savait prouver que la densité est supérieure à  $1/(2 \times 10^{756575})$ . Cette valeur est extrêmement petite!

Des résultats encore plus récents renforcent l'étonnement face à ces nombres premiers délicats. On envisage maintenant non seulement de changer l'un des chiffres de l'écriture usuelle, mais aussi de changer l'un des 0 qu'on peut

placer devant le nombre sans que cela modifie sa valeur (par exemple,  $331 = 0331 = 00331$ ). On peut placer autant de 0 que l'on veut devant un nombre sans changer sa valeur; il y a donc une infinité de modifications possibles de ces 0, et on veut que toutes donnent des nombres composés. Lorsque c'est le cas pour un nombre premier  $N$ , on dit que  $N$  est un «nombre premier gravement délicat» (*widely digitally delicate prime*). Bien sûr, ces nombres sont beaucoup moins nombreux que les nombres premiers délicats.

En 2020, Michael Filaseta et son doctorant Jeremiah Southwick ont montré que les nombres premiers gravement délicats existent et qu'il y en a une infinité. Mieux encore: ils constituent aussi une proportion non nulle de l'ensemble des nombres premiers. La démonstration est particulière à la base 10; pour les autres bases, on ignore si le même résultat est correct. La même borne inférieure que précédemment est valable pour cette densité.

Le plus extraordinaire est cependant que même si ces nombres premiers gravement délicats représentent une proportion strictement positive des nombres premiers, on n'en connaît aucun aujourd'hui!

Un article récent de Michael Filaseta et Jacob Juillerat confirme que ces nombres ne sont pas très rares, car les chercheurs démontrent que quel que soit l'entier positif  $k$ , il existe des suites de  $k$  nombres premiers consécutifs qui sont tous gravement délicats. L'idée est que les nombres premiers se raréfient et qu'en conséquence plus on prend un grand nombre premier  $N$ , plus il devient facile que les nombres modifiés obtenus à partir de  $N$  soient composés. Bien sûr, pour tirer de cette idée une démonstration, un travail important est nécessaire (*voir la bibliographie*)!

Étrangement, ce que l'on sait n'interdit pas que les nombres premiers soient tous délicats à partir d'une certaine valeur ou même soient tous gravement délicats, autrement dit que leur densité soit 1. Cela serait un comble pour des nombres dont on ne réussit à proposer aucun exemple!

L'idée que le mathématicien a de la rareté n'est pas tout à fait la même que celle du sens commun: pour lui, les nombres premiers gravement délicats sont fréquents puisque leur densité est strictement positive, et pourtant, il ne peut nous en montrer aucun. ■

**Ajout de dernière heure.** Des calculs par sondage menés par Michael Filaseta semblent indiquer que la densité des nombres premiers délicats serait d'environ 0,00005. De plus, bien que cela soit non confirmé et non publié, Jon Grantham, de l'Institute for Defense Analyses, aux États-Unis, aurait trouvé un nombre premier gravement délicat. Il commence par 903663, finit par 399249 et comporte 4030 chiffres.

## BIBLIOGRAPHIE

M. Filaseta *et al.*, **Widely Digitally Stable Numbers, Combinatorial and Additive Number Theory IV**, Springer, 2021.

M. Filaseta et J. Southwick, **Primes that become composite after changing an arbitrary digit**, *Mathematics of Computation*, vol. 90, pp. 979-993, 2021.

M. Filaseta et J. Juillerat, **Consecutive primes which are widely digitally delicate**, prépublication arXiv:2101.08898, 2021.

J. Southwick, **Two inquiries related to the digits of prime numbers**, thèse de l'université de Caroline du Sud, 2020.

A. Stinko, **Absolute Primes**, prépublication arXiv:1811.08613, 2018.

J.-P. Delahaye, **Merveilleux Nombres premiers**, Belin/Pour la Science, 2013.

T. Tao, **A remark on primality testing and decimal expansions**, *Journal of the Australian Mathematical Society*, vol. 91(3), pp. 405-413, 2011.

C. K. Caldwell et G. L. Honaker, **Prime Curios I**, CreateSpace, 2009.

P. Erdős, **Solution to problem 1029 : Erdős and the computer**, *Mathematics Magazine*, vol. 52, pp. 180-181, 1979.

## L'AUTEUR



**LOÏC MANGIN**  
rédacteur en chef adjoint  
à Pour la Science

# UNE HARPE AUX MILLIERS DE CORDES

Une équipe réunissant des physiciens et un artiste a converti la structure d'une toile d'araignée en musique. L'objectif? Mieux comprendre la dynamique du tissage et, peut-être, communiquer avec l'animal.

# E

lle s'affaire activement, la petite épeire de l'Opuntia (*Cyrtophora citricola*). Peu à peu, l'industrielle araignée tisse sa toile, faisant apparaître une grande nappe maintenue par deux réseaux de fils, l'un au-dessus, l'autre au-dessous. Le nombre de mailles est impressionnant, et l'on croit voir une sorte de tissu serré, qui sous l'effet des tensions, adopte une forme de dôme ou d'entonnoir. C'est fini. Une proie heurtera bientôt les fils de soutènement et tombera sur la nappe sous laquelle se tient l'araignée, prêt à piquer de ses crochets (les chélicères) son futur dîner qu'il emmaillotera consciencieusement.

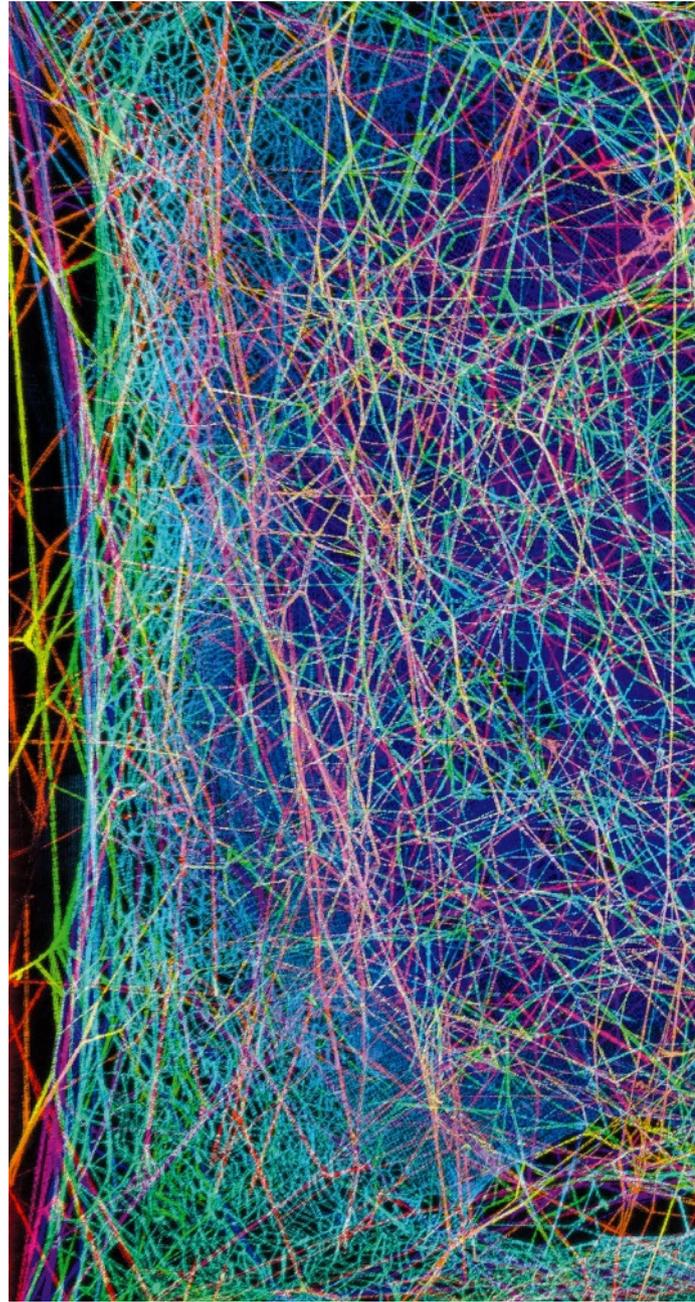
Le modèle tridimensionnel d'une toile d'araignée prêt à être converti en musique.

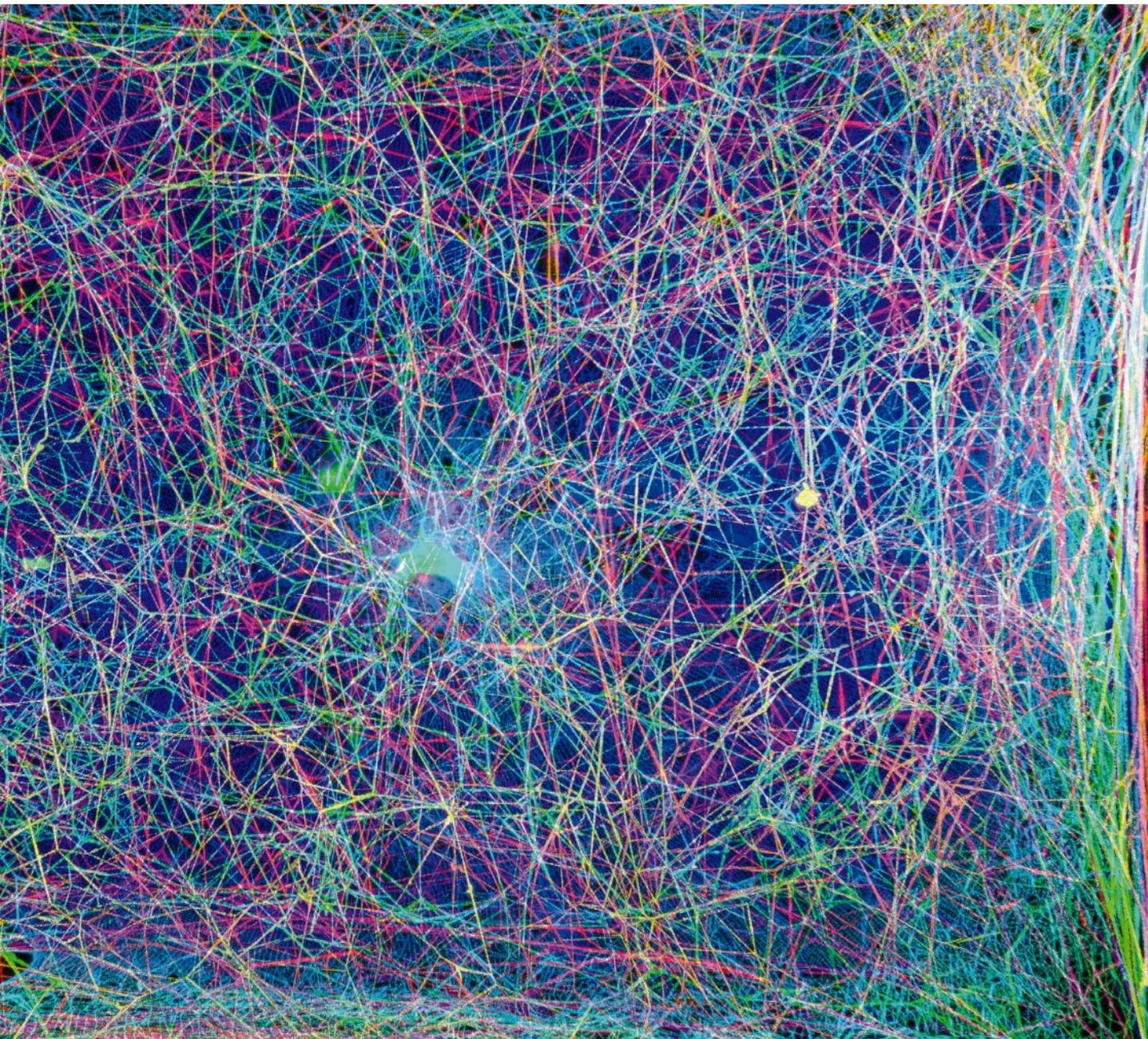
Il faut faire vite, car aucun fil n'est gluant et ne peut donc retenir longtemps la victime.

L'espèce, d'environ un centimètre, est fréquente en Afrique, en Asie, en Australie et s'observe depuis quelques années dans le Sud de la France, par exemple en Corse et sur la Côte d'Azur où elle a été introduite accidentellement. Mais celle qui nous préoccupe était dans un laboratoire, celui de Markus Buehler, professeur à l'institut de technologie du Massachusetts, et elle a tissé sa toile sous les feux d'un laser qui l'a scannée en deux dimensions, tout au long de son ouvrage! Un algorithme s'est ensuite chargé de

rassembler le tout dans un modèle tridimensionnel de la toile à mesure qu'elle était élaborée. Pour quelles raisons? Celles-ci ont été présentées le 12 avril lors d'une conférence organisée par la Société américaine de chimie (l'ACS).

Le projet, mené en collaboration avec l'artiste argentin Tomás Saraceno, dont beaucoup de travaux ont pour inspiration les araignées, et la doctorante Isabelle Su, a consisté à chaque étape à mettre en musique la toile de l'épeire de l'Opuntia afin de mieux comprendre le processus de sa construction. La reconstitution informatique permet d'attribuer des fréquences sonores aux fils en fonction de





leur tension, créant ainsi autant de notes que l'on peut combiner en des mélodies rendant compte de la structure de la toile. En d'autres termes, on fabrique une sorte de harpe arachnéenne! Au-delà de l'idée artistique, ce projet a d'autres finalités.

D'abord, il offre la possibilité d'explorer de façon sonore la dynamique du tissage de la toile. C'est une nouvelle approche dont peuvent s'emparer les éthologues. Pour mieux pénétrer l'univers de l'araignée, un environnement en réalité virtuelle a également été conçu où se mêlent informations visuelles et musicales qui, en se complétant, aident à mieux comprendre la structure de la toile.

Ensuite, selon Markus Buehler, l'édification de la toile, qui se fait sans support préalable, serait utile pour concevoir de nouvelles imprimantes 3D, qui fonctionneraient à la façon des araignées.

Enfin, le physicien imagine même pouvoir converser avec l'animal. De fait, celui-ci, dépourvu d'une bonne vue, vit dans un monde de vibrations. L'équipe du projet a ainsi enregistré celles produites lors de différentes activités, comme communiquer avec les congénères (l'espèce est effectivement semi-sociale, plusieurs araignées pouvant édifier des toiles connectées) ou attirer un partenaire sexuel. L'objectif serait d'émettre à travers

la toile des signaux, des rythmes, dans l'espoir d'obtenir une réponse, en un mot d'échanger avec l'épeire... Pratique lorsqu'il s'agira de dire à une araignée de ne pas nous mordre! ■

La vidéo de la conférence de l'ACS:  
<https://youtu.be/qBIHztbOAAc>

Les musiques tirées des toiles d'araignées :  
<https://soundcloud.com/user-275864738>



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

## LES AUTEURS



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

# MÉLANGER, UNE OPÉRATION PAS SI SIMPLE

Mélanger deux liquides, même miscibles comme l'eau et le sirop de grenadine, n'est pas de tout repos: il faut agir mécaniquement de façon appropriée et fournir une énergie considérable.



**I**l fait chaud et c'est l'heure de l'apéritif; pourquoi ne pas ajouter à notre verre d'eau fraîche un trait de pastis? Le résultat est décevant: une petite couche de pastis pur flotte au-dessus de l'eau, sans s'être mélangée. Nous aurions dû nous souvenir de l'adage: «Verser l'eau dans le pastis et non le pastis dans l'eau»! Est-ce un effet de densité? Pas vraiment, car un phénomène analogue se produit avec du sirop de grenadine. Plus dense que l'eau, celui-ci coule au fond du verre... sans se mélanger non plus (voir l'illustration ci-dessus).

## TROP LENTE DIFFUSION MOLÉCULAIRE

On comprend qu'il soit compliqué de mélanger deux fluides non miscibles tels que l'huile et l'eau. Ces molécules d'espèces différentes n'ont aucune affinité

(chimique) entre elles et tendent à rester séparées. Mais pourquoi est-il parfois si difficile de mélanger deux liquides bien miscibles, comme du sirop dans de l'eau ou du miel dans une tisane?

Un phénomène physique, la diffusion, assure pourtant, sans action extérieure, le mélange parfait de composés miscibles. Son origine est l'agitation thermique des molécules. À l'échelle microscopique, les molécules sont sans cesse en mouvement et se cognent les unes aux autres. De ce fait, la trajectoire d'une molécule est une marche aléatoire qui l'écarte progressivement de sa position initiale. Au bout d'un certain temps, la probabilité de trouver cette molécule à un endroit donné sera uniforme dans tout le volume du fluide.

Pourquoi alors ne pas laisser faire la nature? Parce que nous n'avons pas le

temps! En effet, l'une des propriétés de la marche aléatoire est qu'à cause des multiples changements de direction, la durée moyenne nécessaire pour que la molécule se trouve à une distance donnée du point de départ est proportionnelle au carré de cette distance. Un coefficient de diffusion typique dans l'eau est de l'ordre de  $10^{-9}$  mètre carré par seconde. Cela signifie qu'il faut une milliseconde pour diffuser sur une épaisseur de 1 micromètre... mais déjà 16 minutes pour une épaisseur de 1 millimètre!

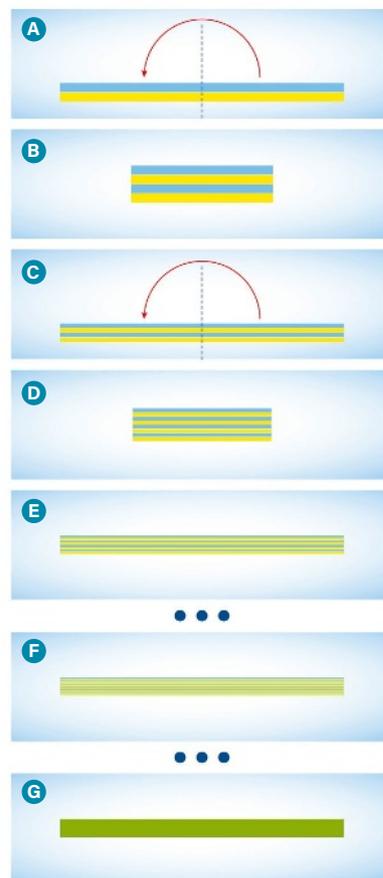
La diffusion n'étant efficace qu'aux petites échelles, une piste, pour mélanger deux fluides sur des dimensions macroscopiques, est de procéder en plusieurs étapes. Il faut tout d'abord faire interpénétrer les deux fluides pour homogénéiser la concentration moyenne uniquement à grande échelle. À une



Lorsqu'on verse de l'eau dans un verre contenant un fond de sirop, les deux liquides se mélangent très vite. Mais quand on verse le sirop dans un verre d'eau, le mélange ne se fait pas...

## UN CHAOS BOULANGER

La « transformation du boulanger », inspirée de la préparation d'une pâte feuilletée, est un exemple très simple de mélange dit « chaotique » (où deux points initialement voisins peuvent se retrouver lointains à la fin du processus). Une variante est illustrée ici. On part d'un bloc constitué de deux couches (en bleu et en jaune) des matières à mélanger **A** ; on le tranche au milieu et on superpose les deux moitiés **B**. Puis on étale le bloc obtenu de façon qu'il retrouve sa largeur et son épaisseur initiales **C**. On tranche de nouveau par le milieu et on superpose les deux moitiés **D**. On aplatit pour retrouver les dimensions initiales **E**. Et ainsi de suite. À la fin du processus (**F**, **G**), les couches alternées sont tellement minces que la diffusion moléculaire complète l'homogénéisation très rapidement.



échelle intermédiaire, disons le millimètre, cette étape ne modifie pas la concentration locale: on est en présence de l'un ou l'autre des deux fluides. Ensuite, on tente de réduire la taille de ces régions de composition uniforme, disons jusqu'à une fraction de millimètre, et d'augmenter la surface totale de la frontière qui sépare les deux fluides.

### MÉLANGER PAR LA TURBULENCE ET LE CHAOS

Ces deux étapes nécessitent des actions mécaniques appropriées. Pour déformer un fluide, il est en effet nécessaire de le cisailer, c'est-à-dire de faire glisser des couches de fluide les unes sur les autres. Il faut aussi que ces actions concernent bien l'ensemble du volume de fluide, sans volume mort. Cela conduira

à la dernière étape, durant laquelle la diffusion moléculaire effectuera un mélange intime à l'échelle microscopique.

Comment procéder? Selon les situations, on a le choix entre la turbulence et le chaos. Avec des fluides peu visqueux, les écoulements deviennent vite turbulents. C'est le cas lorsqu'on remue une boisson avec une petite cuillère. En régime turbulent, les tourbillons créés à grande échelle par les mouvements de la cuillère engendrent des tourbillons plus petits, qui font de même à leur tour, et ainsi de suite. On a ainsi du désordre en cascade à toutes les échelles, cascade qui permet d'atteindre d'une pierre deux coups: une homogénéité aux échelles macroscopiques et une très grande surface de contact entre les deux fluides.

Lorsque les fluides sont plus visqueux – par exemple de l'huile ou du miel liquide,

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



dix mille fois plus visqueux que l'eau -, il est difficile de créer de la turbulence. Qu'à cela ne tienne: on peut effectuer un «mélange chaotique», l'exemple le plus simple étant celui de la «transformation du boulanger» (voir l'encadré page 89). Le chaos est caractérisé par une évolution parfaitement déterministe, mais très sensible aux conditions initiales, de telle sorte que deux éléments de volume très proches peuvent se retrouver très distants à la fin de la transformation. Un mélange chaotique emplit ainsi de façon homogène tout le volume avec les deux fluides.

En pratique, on peut facilement réaliser ce type de transformation dans des tuyaux à l'aide de mélangeurs dépourvus de pièces mobiles. Les deux fluides sont injectés à l'entrée; puis des cloisons successives séparent, étirent et recombinaient les écoulements pour obtenir, à la sortie, un mélange bien homogène. Dans un récipient, vous pouvez obtenir un résultat analogue à celui de la transformation du boulanger en faisant des 8 avec votre cuillère, par exemple pour mélanger de la pâte fluide à du chocolat fondu.

## CISAILLER ÉNERGIQUEMENT

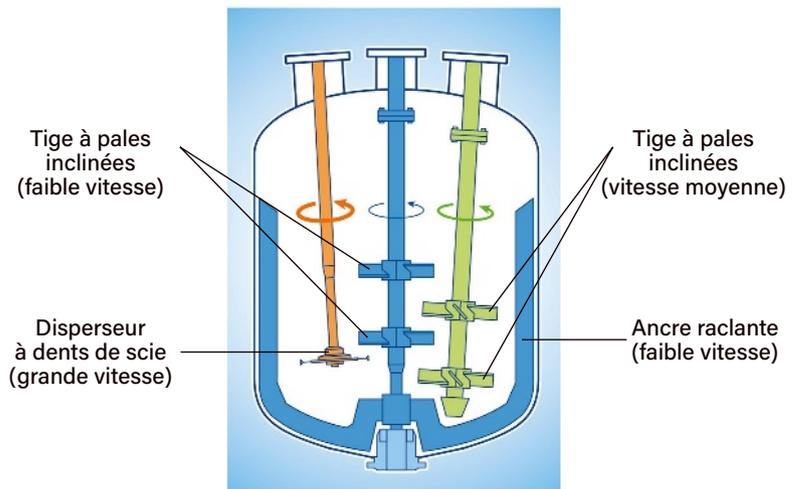
L'histoire est-elle finie? Hélas non. Lorsque les fluides à mélanger ont des viscosités très différentes, du miel dans du thé par exemple, la cuillère ne suffit pas. Son principal effet est de déplacer le miel en bloc dans de l'eau tourbillonnante. Pourquoi? Parce que pour une même contrainte, la vitesse de cisaillement est inversement proportionnelle à la viscosité. Par conséquent, si l'on veut déformer notablement le miel, il est nécessaire d'appliquer des forces très importantes ou, ce qui est équivalent, donner une très grande vitesse à l'eau.

L'agitation manuelle à la petite cuillère ne le permet pas et il faut recourir à un fouet mécanique ou à un blender. Quant aux mélangeurs industriels, ce sont souvent des dispositifs comportant plusieurs éléments mobiles qui agissent chacun à une échelle différente (voir l'encadré ci-dessus). Un premier dispositif opère à l'échelle du récipient entier, afin que les fluides ne restent pas immobiles à proximité des parois. Un deuxième porte sur l'homogénéisation moyenne à des échelles intermédiaires et, enfin, un troisième dispositif agit aux petites échelles pour briser les éventuels morceaux homogènes trop visqueux...

Dans tous les cas, il faut se résoudre à fournir de l'énergie, beaucoup d'énergie, car qui dit cisaillement dit dissipation

## HOMOGENÉISER AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES

Les mélangeurs industriels sont de conceptions très variées. Dans le type de mélangeur schématisé ici, un premier dispositif (en bleu) à rotation lente assure un mélange grossier, à grande échelle. Un deuxième (en vert), qui tourne à moyenne vitesse, permet de mélanger plus finement, à une échelle intermédiaire. Enfin, le troisième (en orange) tourne à grande vitesse et ses dents de scie effectuent un mélange à petite échelle. Et à l'échelle microscopique, c'est la diffusion moléculaire qui fait son œuvre.



d'énergie à cause de la viscosité. C'est d'ailleurs pourquoi il faut ajouter l'eau dans le sirop et non l'inverse. Détaillons cela.

Lorsqu'on verse un liquide dans un récipient qui en contient déjà un autre, l'énergie apportée est l'énergie cinétique du fluide versé lorsqu'il arrive au niveau de la surface du fluide déjà présent. Si l'on diminue au maximum la vitesse de versement, par exemple en opérant très près de la surface ou délicatement le long d'une paroi ou d'un objet qui ralentit la chute, on parvient à superposer deux fluides *a priori* miscibles sans qu'ils ne se mélangent, l'énergie apportée étant minime.

Maintenant, supposons que l'on veuille mélanger une mesure de sirop ou de pastis à neuf mesures d'eau, en versant les boissons d'une hauteur égale à la moitié de la hauteur du verre. L'énergie disponible pour le mélange est 15 fois supérieure si l'on verse l'eau en second que si on la verse en premier: les 9 volumes d'eau mettent facilement en mouvement turbulent le volume de sirop ou de pastis, alors que le contraire ne se produit pas. Et c'est sans tenir compte des différences de masse volumique et de viscosité, qui constituent elles aussi des freins au mélange par simple ajout. ■

## BIBLIOGRAPHIE

D. S. Dickey, **Tackling difficult mixing problems**, *Chemical Engineering Progress*, vol. 111(8), pp. 35-42, 2015.

A. L. Ventresca et al., **The influence of viscosity ratio on mixing effectiveness in a two-fluid laminar motionless mixer**, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 80(4), pp. 614-621, 2002.

J. Villermaux, **The role of energy dissipation in contacting and mixing devices**, *Chemical Engineering & Technology*, vol. 11(1), pp. 276-287, 1988.

**La grenadine parfaite**, vidéo de *Merci la Physique* : <https://www.youtube.com/watch?v=FZ62nDv19nc>

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

---

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

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

---

**CITEO**

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

## L'AUTEUR



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

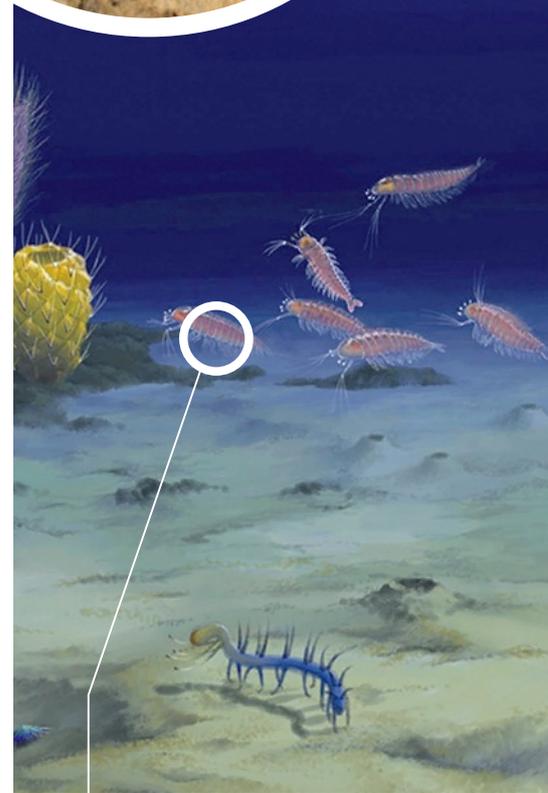
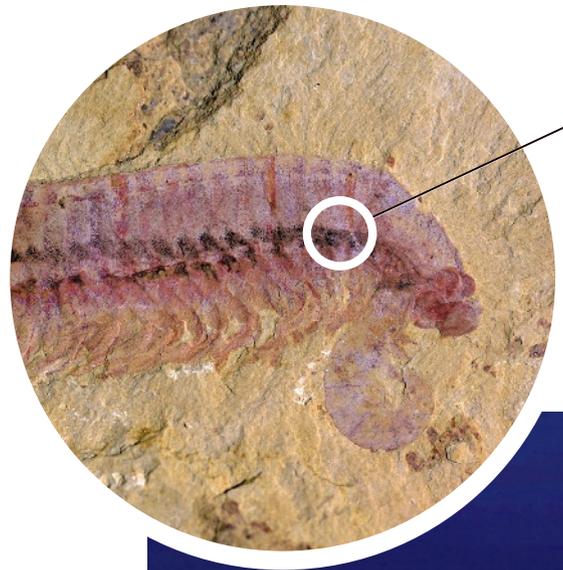
# LES CREVETTES À POIGNE DU CAMBRIEN

Mâchoires, antennes, crochets... : les arthropodes actuels présentent sur leur tête des appendices particuliers. Un nouveau fossile du Cambrien apporte des lumières sur leur origine.

**E**n 1886, mandaté par la commission géologique du Canada, le géologue Richard McConnell partit établir la carte géologique des abords du tout nouveau chemin de fer canadien du Pacifique. Près du village de Field, il apprit qu'un cheminot avait trouvé des «insectes de pierre» sur le mont Stephen, à 500 mètres de là. Il grimpa donc à son tour sur la montagne et en rapporta nombre de fossiles de trilobites, ainsi que deux fragments étranges ressemblant à des crevettes (ce gisement sera connu plus tard comme celui des «schistes de Burgess»). D'autres morceaux furent découverts ensuite et deux paléontologues, Joseph Whiteaves en 1892, puis Charles Walcott en 1911, se risquèrent à décrire l'animal, dénommé *Anomalocaris canadensis* (crevette anormale du

Canada). Mais celui-ci semblait insaisissable : selon les parties que l'on regardait, on y voyait une méduse, un concombre de mer, un ver polychète ou des appendices d'autres arthropodes !

Il a fallu attendre le paléontologue britannique Harry Whittington et son doctorant irlandais Derek Briggs pour avoir, en 1985, une description raisonnable de ce qui s'est révélé un imposant carnivore des mers du Cambrien, il y a entre 540 et 485 millions d'années. Le corps de l'animal, d'environ 1 mètre de long, est segmenté, comme celui d'une crevette ou d'un insecte. Les segments centraux portent de part et d'autre des palettes qui l'aidaient à nager par ondulation du corps. Deux appendices antérieurs segmentés devaient servir à saisir ses proies (des trilobites, par exemple).



Avec leur exosquelette souvent calcifié, les arthropodes se fossilisent facilement. Ainsi, de très nombreux taxons éteints ont été décrits, certains contemporains de *K. zhangii*, comme *Anomalocaris* (en haut à droite), des trilobites (à droite) et des limules (en bas à droite en vert).



Hervé Le Guyader a récemment publié : **Biodiversité, le pari de l'espoir**, (Le Pommier, 2020).

Sur ce fossile, on distingue deux filets de matière noire le long du corps, l'un central, l'autre ventral. Le premier est identifié comme le tube digestif, le deuxième comme le cordon nerveux.

Si *Kylinxia zhangii* avait cinq yeux, *Anomalocaris* n'en avait que deux. En revanche, chacun était composé de 16 000 ommatidies, les unités optiques élémentaires constituant l'œil des arthropodes. Par comparaison, les grandes libellules en ont 23 000.

## EN CHIFFRES

### 1 MÈTRE

*Anomalocaris canadensis* n'a de crevette que le nom: ce carnivore des mers cambriennes mesurait 1 mètre de long... Avec ses quelques centimètres, *Kylinxia zhangii* ne devait être pour lui qu'un amuse-gueule.

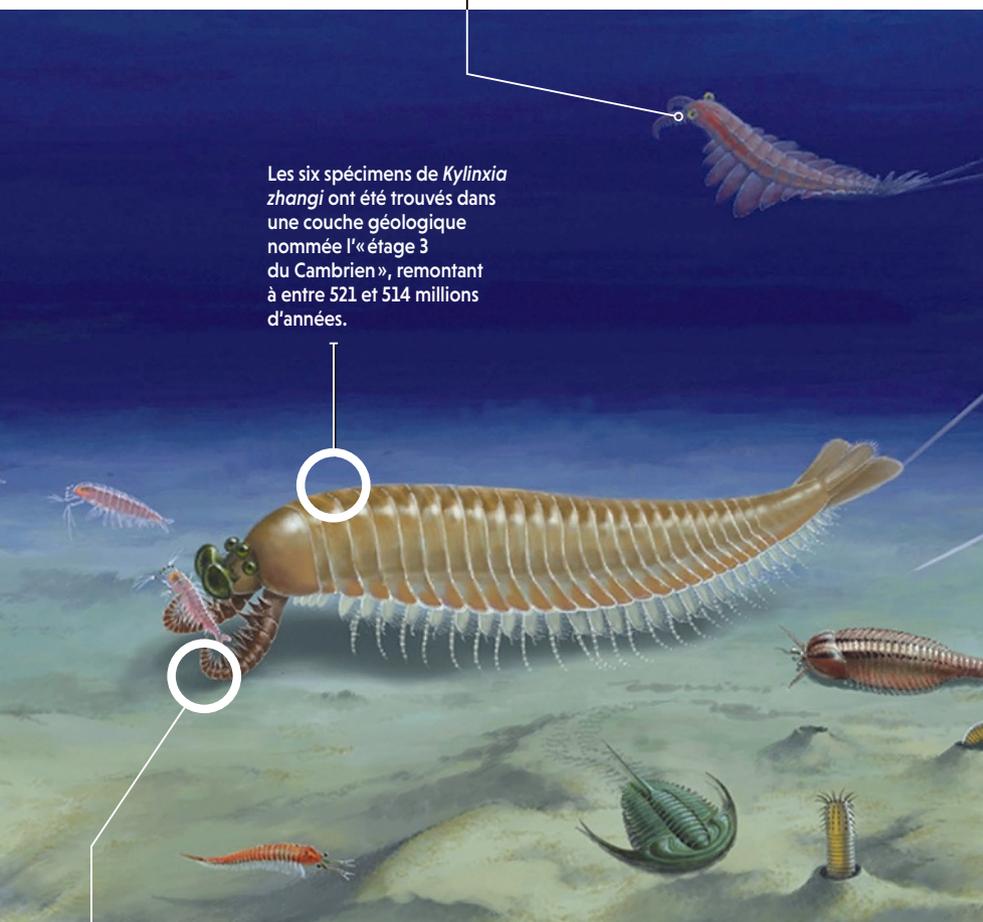
### 15

Chaque appendice frontal de *Kylinxia zhangii* compte 15 articles. Ceux d'*Anomalocaris canadensis* en ont à peu près autant. Les espèces plus tardives d'euarthropodes, en revanche, en ont moins.

### 1 MILLION

Caractérisés par un corps et des pattes segmentées, les arthropodes constituent le plus vaste embranchement connu, avec plus de 1 million d'espèces actuelles connues.

Les six spécimens de *Kylinxia zhangii* ont été trouvés dans une couche géologique nommée l'« étage 3 du Cambrien », remontant à entre 521 et 514 millions d'années.



Son appendice frontal lui servait à saisir ses proies, comme celui d'*Anomalocaris*.



*Kylinxia zhangii*

Taille: environ 6 cm

La tête est munie d'yeux à facettes d'une remarquable acuité. La bouche présente une curieuse structure: c'est un cône composé de différentes plaques disposées de manière radiale. D'abord confondue avec une méduse, elle a donné son nom au taxon – les radiodontes (ou bouche radiaire) – qui, depuis, rassemble aussi d'autres grands prédateurs fossiles.

Les phylogénies morphologiques placent les radiodontes comme le groupe le plus proche des deutéropodes, c'est-à-dire de tous les euarthropodes qui possèdent des appendices sur le second segment de leur tête (voir l'encadré page 94). Les euarthropodes, eux, rassemblent tous les animaux actuels et

fossiles caractérisés par un corps et des pattes segmentés (le terme « arthropodes » est le nom commun que l'on donne aux euarthropodes actuels). Ils sont subdivisés en mandibulés (crustacés, insectes, mille-pattes...) et chélicérates (araignées, scorpions, acariens...). Aujourd'hui, des phylogénies moléculaires récentes ont mis fin aux incessantes controverses sur la classification de ces différents groupes et des groupes voisins. En revanche, elles laissent sans réponse nombre de questions évolutives, comme l'origine des antennes des mandibulés ou celle des chélicères (des chélicérates, donc), ces redoutables crochets avec lesquels les araignées injectent leur venin.

## UN NOUVEL EUARTHROPODE

Aussi, naturellement, l'une des questions immédiates qui s'est posée quand on a compris le lien de parenté des radiodontes et des euarthropodes a concerné l'appendice préhensile des radiodontes: est-il homologue d'un des appendices des euarthropodes actuels, comme une mâchoire, une chélicère, une antenne? Son interprétation, cependant, restait délicate. Mais une réponse inattendue est venue d'un nouvel euarthropode fossile, *Kylinxia zhangii*, que l'équipe de Diying Huang, à l'institut de géologie et de paléontologie de Nankin, en Chine, vient de décrire

après avoir découvert, dans des schistes cambriens du Yunnan, plusieurs exemplaires remarquablement conservés.

Le hasard peut bien faire les choses. Cette crevette cambrienne de quelques centimètres apparaît avoir des caractères ancestraux partagés avec les radiodontes et des caractères nouveaux partagés avec les deutéropodes, ce qui la met en bonne position pour aider à proposer des scénarios évolutifs. Comme les radiodontes, *K. zhangii* a des appendices frontaux préhensiles. Mais, comme les deutéropodes, l'animal présente un bouclier céphalique fusionné, un tronc multiségmenté, un pygidium (l'extrémité postérieure du corps) individualisé et des appendices biramés à la cuticule parfaitement articulée: les plaques cuticulaires se rejoignent à des zones souples d'articulation.

Par ailleurs, il porte cinq yeux composés, comme *Opabinia regalis*, une autre espèce découverte par Walcott et qui se trouve être l'euarthropode qui émerge le plus précocement dans la phylogénie (non représenté). *K. zhangii* vient donc s'insérer dans la phylogénie entre les radiodontes et les autres deutéropodes.

L'intérêt de *K. zhangii* réside dans la remarquable préservation des tissus mous de l'animal. La fossilisation est telle que l'on décèle les nerfs qui innervent les appendices thoraciques, de façon comparable à ce qui a déjà été observé chez d'autres euarthropodes cambriens. On distingue aussi les nerfs des appendices préhensiles frontaux, des yeux et des appendices postoculaires, ce qui permet de situer un deutocérébron, la partie médiane du cerveau caractéristique des deutéropodes.

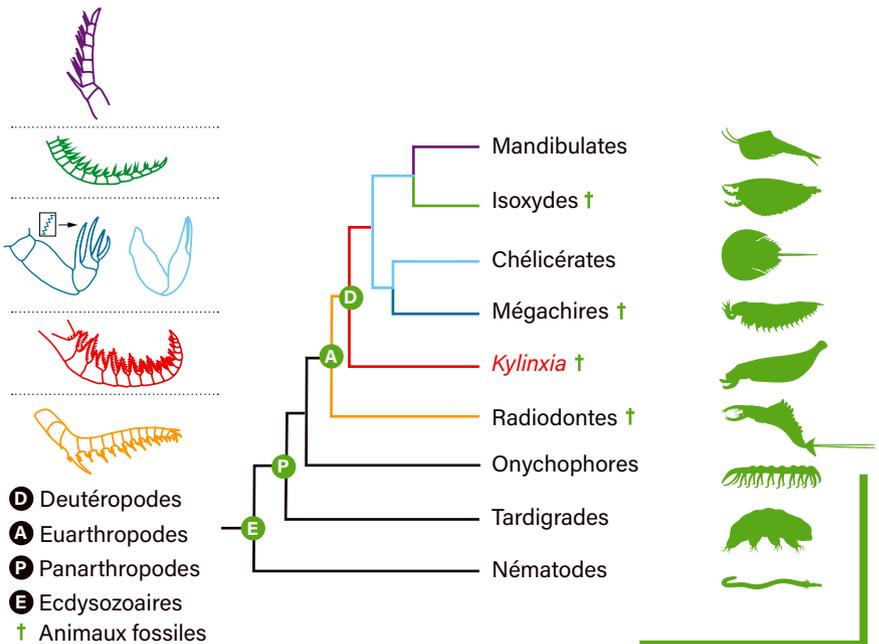
## DES APPENDICES TRÈS SIMILAIRES

La phylogénie obtenue par l'équipe de Dying Huang permet alors de proposer un scénario évolutif des appendices frontaux (voir l'encadré ci-dessus). De par leur structure et leur innervation, ceux de *K. zhangii* paraissent identiques à ceux des radiodontes, à la différence près que les lobes (les petites épines) sont dorsaux dans le premier cas (disposés sur la partie supérieure de l'appendice), ventraux dans le deuxième, ce qui est lié au sens de fermeture de l'appendice: celui de *K. zhangii* se referme vers le haut, celui des radiodontes, vers le bas.

Or les appendices de *K. zhangii* présentent aussi des similarités avec ceux des mégachires, des arthropodes fossiles situés en groupe frère des chélicérates.

## LA SITUATION PRIVILÉGIÉE DE KYLINXIA

Dans la phylogénie des ecdysozoaires (les animaux dont la croissance est assurée par des mues, rassemblés en deux grands taxons, les nématodes et les panarthropodes), le nouvel euarthropode fossile *Kylinxia* se positionne à un endroit clé, entre les radiodontes et les arthropodes actuels – mandibulates (dont les crustacés) et chélicérates (dont les limules et les arachnides). Plus exactement, les radiodontes forment le groupe le plus basal des euarthropodes, et *Kylinxia* apparaît de même pour les deutéropodes. L'étude des appendices frontaux montre que celui de *Kylinxia* présente la même structure que celui des radiodontes. Puis, dans les deutéropodes, on assiste à une transformation de cet appendice en chélicère chez les chélicérates et en antenne chez les mandibulates.



Dying Huang et ses collègues avancent alors l'hypothèse raisonnable que les appendices frontaux de *K. zhangii* sont homologues de ceux des mégachires, à leur tour homologues des chélicères des chélicérates. Par ailleurs, les isoxydes, arthropodes fossiles proches des mandibulates, présentent des «antennes préhensiles» qui ressemblent fortement aux appendices de *K. zhangii* et qui paraissent homologues de la première paire d'antennes des crustacés.

Par l'étude de ce fossile si bien conservé, Dying Huang et ses collègues arrivent donc à affirmer l'homologie des appendices frontaux des radiodontes avec les chélicères des chélicérates et la première paire d'antennes des mandibulates. Alors qu'au temps de Walcott, et même de Whittington, les arthropodes fossiles cambriens apparaissaient comme d'étranges créatures, la découverte de nouveaux fossiles diminue le fossé entre les animaux cambriens et actuels, permettant de faire surgir une unité structurale *a priori* cachée. *Anomalocaris canadensis* n'était donc pas si anormal qu'il y paraissait... ■

## BIBLIOGRAPHIE

H. Zeng et al., **An early Cambrian euarthropod with radiodont-like raptorial appendages**, *Nature*, vol. 588, pp. 101-105, 2020.

G. Giribet et G. Edgecombe, **The phylogeny and evolutionary history of arthropods**, *Curr. Biol.*, vol. 29, pp. R592-R602, 2019.

A. Daley et G. Edgecombe, **Morphology of *Anomalocaris canadensis* from the Burgess shale**, *J. Paleontol.*, vol. 88, pp. 68-91, 2014.



## L'AUTEUR



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

# DES SUSPENSIONS EN POUPÉES RUSSES

En réalisant des suspensions de suspensions colloïdales, on ouvre la voie à de nombreuses recettes innovantes.

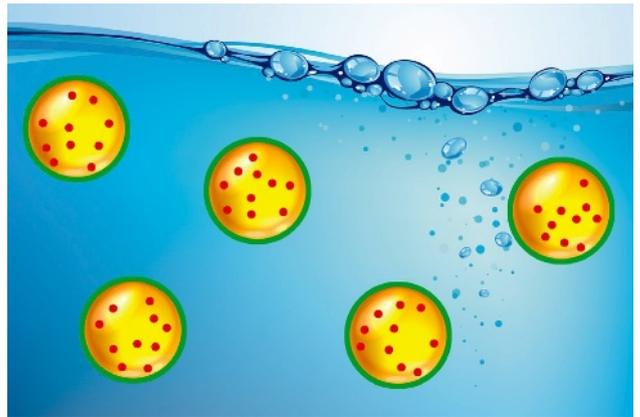
**L**es suspensions sont des dispersions de particules solides dans un liquide. Elles existent à toutes les échelles, du macroscopique au nanoscopique, en passant par les «suspensions colloïdales». Pour ces dernières, les objets suspendus ont une dimension comprise entre le nanomètre (milliardième de mètre) et le micromètre (millionième de mètre). Les suspensions sont parfois très stables, et l'un des exploits du grand physicien anglais Michael Faraday fut d'avoir compris en 1850 que la couleur rouge de l'«or colloïdal» résultait de la taille nanométrique des particules d'or suspendues dans l'eau.

Certaines suspensions sont comestibles, telles les gouttes d'huile que l'on fait léviter dans une solution hydroalcoolique, mais ce sont surtout les suspensions colloïdales qui ont été étudiées lors du neuvième concours international de cuisine note à note, démarche culinaire où les ingrédients ne sont plus des viandes, poissons, fruits ou légumes, mais des composés purs, avec lesquels on produit des mets sur mesure.

## PLUS D'UNE CENTAINE DE POSSIBILITÉS

Combien de différentes suspensions existe-t-il? On peut distinguer les suspensions dans l'huile de celles dans des solutions aqueuses, mais un langage nommé «formalisme des systèmes dispersés» permet d'être plus systématique et de voir rapidement que, avec la définition de l'IUPAC (l'Union internationale de chimie pure et appliquée), on obtient des suspensions différentes en dispersant des particules de «dimension 0» (quand les

Représentation schématique d'une suspension de suspension. Une première suspension, constituée de petites particules solides (en rouge) dispersées dans un liquide A (en jaune), remplit des sphères solides creuses (en vert). La seconde suspension est faite de ces sphères, dispersées dans un liquide B (en bleu).



tailles, dans les trois directions de l'espace, sont plus petites que la taille de référence de plus d'un ordre de grandeur), ou de dimension 1, ou de dimension 2: cela fait un total de six suspensions de «classe 1», c'est-à-dire avec une seule phase solide dispersée dans une phase liquide (solution aqueuse ou huile).

Pour autant, les amateurs d'innovations seront heureux d'explorer des systèmes à plus de deux phases. Là, l'énumération devient fastidieuse, mais un petit programme informatique utilisant le formalisme évoqué précédemment indique plus d'une centaine de possibilités. Par exemple, on découvre dans la liste de formules produite que l'on pourrait disperser non pas des solides simples, mais des solides creux dont le cœur serait liquide. Autre exemple: on pourrait simplement suspendre non pas un type de solide, mais deux, l'un étant de dimension 0 (petites particules sphériques) et l'autre de dimension 2 (minces feuilles, plaquettes, etc.).

De façon plus élaborée, on réaliserait des analogues d'œufs de saumon, à l'aide d'alginate de sodium et de sel de calcium, afin de provoquer la formation d'une peau gélifiée autour du liquide qui contiendrait l'alginate, et l'on disperserait ces perles à cœur liquide dans une huile. Ou encore, on pourrait commencer par faire une dispersion colloïdale d'un solide dans de l'huile, puis disperser cette suspension

dans un gel (considéré comme un solide par la physicochimie), avant de disperser ce gel dans une solution aqueuse.

Avec cette dernière proposition, on réalise un analogue des matriochkas, les poupées russes emboîtées, mais on n'oublie pas que c'est seulement l'une des multiples possibilités pointées récemment: partant de ce résultat, l'innovation devient toute simple. ■



## MATRIOCHKA VANILLÉE À LA POMME

- 1 Dans 200 g d'huile, faire macérer une gousse de vanille pendant une semaine.
- 2 Broyer au pilon 150 g de sucre glace jusqu'à obtenir une poudre impalpable.
- 3 Disperser ce sucre « ultraglace » dans l'huile vanillée (première suspension).
- 4 Dans 100 g de jus de pomme, ajouter 50 g de protéines de blanc d'œuf, puis l'huile vanillée en fouettant comme pour produire une mayonnaise (à défaut de protéines de blanc d'œuf, les remplacer par un simple blanc d'œuf).
- 5 Faire chauffer cette émulsion d'une suspension au four à microondes jusqu'à ce qu'elle double de volume : on obtient un système gélifié (que j'ai nommé un « gibbs »).
- 6 Ajouter ce système dans un caramel décuît (on chauffe du sucre jusqu'à la caramélisation, puis on ajoute de l'eau pour obtenir une solution au goût de caramel), et le diviser soit au fouet, soit à l'aide d'un mixeur plongeant.





Retrouvez tous nos articles sur [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## p.72 MAISONS DE LA LUNE

Au Moyen Âge, l'astrologie jouait un rôle de premier plan pour prédire le temps. Notamment, la sphère céleste était divisée en 28 «maisons». Selon la maison où se trouvait la Lune, on attribuait un degré d'humidité différent aux conditions sur Terre.

## p.58 4 300 MÈTRES

Selon le scénario le plus pessimiste du Giec, le pergélisol pourrait disparaître des faces sud des montagnes jusqu'à une altitude de 4 300 mètres. Or la glace que contient ce sous-sol gelé maintient la cohésion de la roche. Sa fonte correspond donc à une déstabilisation qui entraînera de nombreux effondrements.

p.20 Pour nourrir les 10 milliards d'individus prévus en 2050, la FAO estime qu'il faudrait augmenter la production alimentaire de 60%

CATHERINE AUBERTIN économiste de l'environnement à l'IRD

## p.50 1<sup>ER</sup> MAI

Les Celtes célébraient cette date à mi-chemin entre équinoxe de printemps et solstice d'été. Elle revêtait aussi une grande importance pour les bâtisseurs du sanctuaire néolithique de Pömmelte, en Allemagne, car ce jour-là, le soleil se lève dans l'axe d'une des entrées.

## p.92 CHÉLICÉRATES

**Cette branche des arthropodes comprend notamment araignées, scorpions, acariens et limules. Elle doit son nom aux chélicères, deux appendices en forme de crochet ou de pince situés près de la bouche. Chez les araignées, ce sont les redoutables crochets avec lesquels elles injectent leur venin.**

## p.22 SHANGHAI

Chaque année, le «classement de Shanghai», l'un des plus attendus, note les universités du monde entier. Bien que les experts de l'évaluation critiquent fortement cette approche, de nombreux gestionnaires d'établissements d'enseignement supérieur conçoivent leur politique afin d'optimiser leur position dans de tels classements.

## p.80 991

Ce nombre premier est dit «robuste» car toutes ses permutations de chiffres (199 et 919) sont aussi des nombres premiers. Au-delà de 991, les seuls nombres premiers robustes connus sont des répunits, c'est-à-dire des entiers uniquement composés du chiffre 1. Personne ne sait s'il existe des nombres premiers robustes plus grands que 991 et qui ne sont pas des répunits.

# Diplômes d'Université de l'Observatoire de Paris

## EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS

## LUMIERES SUR L'UNIVERS

Licence 1

Licence 1 à Master 1

### Niveau

### Suivi

Formation en présentiel ou à distance  
Cours magistraux filmés et retransmis  
en direct ou en différé

Formation en ligne  
Tutorat personnel et individualisé  
Cours thématiques avec de  
nombreux exercices

### Objectifs

Acquérir un panorama des connais-  
sances actuelles en astronomie et  
astrophysique auprès d'astronomes  
professionnel·le·s

Acquérir des bases solides en astrophysique  
à travers les parcours thématiques proposés

Se spécialiser grâce aux exercices suivis  
et corrigés à distance par un·e astronome  
professionnel·le

### Contenu

Cours et TD (Mécanique Céleste,  
Ondes et Instruments, Soleil, Cosmologie,  
Galaxies etc.)

Des parcours thématiques adaptés à tous :

Stage pratique d'une semaine à  
l'Observatoire de Meudon (optionnel et  
sous conditions)

- Des étoiles aux planètes (L1-L2)
- Cosmologie et Galaxies (L2)
  - Mécanique céleste (L3)
  - Sciences planétaires (L3)
- Fondamentaux pour l'astrophysique (L3)
  - Fenêtres sur L'Univers (M1)
  - Instrumentation (M1)

Stage d'observation à l'Observatoire de  
Haute Provence  
(optionnel et sous conditions)

Plusieurs centaines d'exercices  
corrigés individuellement

### Pages Web

[http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/  
DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/](http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/)

[http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/  
LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/](http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/)

### Contact

[contact.duecu@obspm.fr](mailto:contact.duecu@obspm.fr)

[contact.dulu@obspm.fr](mailto:contact.dulu@obspm.fr)

### Dates limites d'inscription

5 septembre 2021

[https://ufe.obspm.fr/candidatures\\_ufe](https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe)

ÉTUDE DE CAS

# Accélérez et améliorez le développement de vos produits.

Les ingénieurs et les chercheurs de l'industrie accélèrent le développement de produits en créant des applications de simulation numérique et en les déployant au sein de leurs organisations. COMSOL Multiphysics® vous permet de créer des applications spécialisées et COMSOL Server™ et COMSOL Compiler™ vous aident à les distribuer aux bons collaborateurs et au bon moment dans votre cycle de développement de produits.

EN SAVOIR PLUS [comsol.blog/product-development](https://comsol.blog/product-development)

The screenshot displays the COMSOL Server Application Library interface. The top navigation bar includes the COMSOL logo, user information (comsol175599 power user), and a Log Out button. The main area is titled 'Running Applications' and lists four active applications: 0001 Absorptive Muffler Designer, 0002, 0003, and 0004. The 'Absorptive Muffler Designer' application is selected, showing its session details (3min 16s) and a 'Reconnect in Browser' button. Below this is a 'Library' section with a search bar and the application name. The central part of the interface is a simulation window titled 'Forced Air Cooling with Heat Sink'. It features a toolbar with options like 'Reset to Default', 'Update Geometry', 'Mesh', 'Compute', 'Report', and 'Open PDF Documentation'. The 'Input and Results' panel on the left shows parameters for a 'Heat sink' geometry, including dimensions (Depth: 2.5 cm, Length: 2.5 cm, Thickness: 2.5 mm, etc.) and operating conditions (Inlet velocity: 1.0 m/s, Inlet temperature: 22 °C, Heat source temperature: 100 °C). The 'Results' panel shows 'Dissipated power: 4.074 W' and 'Pressure loss: 0.9036 Pa'. The 'Graphics' panel on the right displays a 3D visualization of the heat sink with streamlines and a temperature field, with a color scale ranging from 20 to 70 °C.

 COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.