



Entretien avec Anne-Marie Moulin

POUR LA SCIENCE

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COSMOLOGIE
**BIG BANG :
TESTER LES BASES
DU MODÈLE ?**

ZOOLOGIE
**LA GUÊPE
ÉMERAUDE,
PIRE QU'ALIEN !**

ARCHÉOLOGIE
**IL Y A 6 000 ANS,
L'EUROPE AVAIT
DES MÉTROPOLIS**

LES CHÂTEAUX D'EAU DE LA PLANÈTE

Un risque de pénurie pour 2 milliards d'habitants ?



PORTFOLIO
**LES PAYSAGES
CHANGEANTS
DE MARS**

MARS 2021
N° 521

L 13256 - 521 - F: 6,90 € - RD



DOM: 79 € - BEL/LUX: 79 € - CH: 12,70 CHF - CAN: 12,50 \$CA - TOM: 10,40 XPF

BRAINCAST

La voix des neurones

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

Disponible sur www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/
ainsi que sur toutes les plateformes de podcast

Braincast est le rendez-vous des amateurs des sciences du cerveau et de leurs derniers développements, qui transforment notre société et expliquent d'une façon nouvelle nos comportements, nos pensées, nos émotions, nos désirs...

Ce podcast emmènera l'auditeur dans une conversation avec un chercheur qui a marqué sa discipline, pour revenir sur sa vie, son parcours, ce qui l'a passionné dans le monde des neurosciences.

Ce moment privilégié, axé sur l'homme ou sur la femme dans leur dimension humaine et sur les fondements de la recherche en neurosciences, va ouvrir pour l'auditeur des fenêtres sur le fonctionnement de son propre cerveau.





MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

CE QUE DEVIENT L'EAU DE LÀ-HAUT

L'eau est indispensable à la vie sur Terre. Elle recouvre, avec les océans, presque les trois quarts de la surface du globe, mais elle ne représente qu'un peu plus du millième de son volume. Et seuls 2,5% de cette eau est douce. Qui plus est, près de 70% de l'eau douce n'est pas utilisable parce qu'elle se trouve en permanence sous forme de glace ou de neige. Ne restent qu'une dizaine de millions de kilomètres cubes d'eau douce liquide (en surface ou souterraine) susceptibles d'abreuver les écosystèmes terrestres et les populations humaines.

Ce chiffre peut paraître élevé, sachant que l'humanité consomme aujourd'hui de l'ordre de 4000 kilomètres cubes d'eau par an. Mais il cache le fait que l'eau douce est très inégalement répartie dans le monde et que les ressources du précieux liquide sont déjà soumises à rude épreuve dans de nombreuses régions, comme d'ailleurs leurs populations. Une situation qu'aggraveront la croissance démographique, le développement économique, l'urbanisation et... le réchauffement climatique, qui commence à rebattre les cartes du cycle de l'eau et à modifier, dans l'espace et le temps, les régimes de précipitations.

Dans ce contexte, une connaissance détaillée du cycle de l'eau, des ressources et des besoins des populations, ainsi que de leurs évolutions, s'impose. En particulier, les efforts des scientifiques se sont portés récemment sur les châteaux d'eau naturels de la planète: des régions d'altitude riches en glaciers et en neige, qui participent au cycle de l'eau et approvisionnent en eau liquide 1,9 milliard d'habitants - soit un quart de la population mondiale!

Pour mieux cerner l'hydrologie des montagnes de haute altitude et son évolution, plusieurs équipes dans le monde effectuent des (difficiles) mesures sur le terrain et des modélisations. Celle du Néerlandais Walter Immerzeel en fait partie; elle étudie certaines régions de l'Himalaya et vient de classer, en caractérisant leur importance et leur vulnérabilité, les 78 principaux châteaux d'eau naturels du globe (voir pages 24 à 33). Une tâche titanesque, mais un jalon essentiel pour anticiper les menaces de pénurie qui pèseront sur les populations au cours des prochaines décennies. ■

S OMMAIRE

N° 521 /
Mars 2021

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- L'énigme des températures de l'Holocène résolue?
- Pollution sonore des océans: il est temps d'agir
- Quand le Covid-19 ne sera plus qu'un rhume
- Le son du pétilllement
- Chaos magnétique dans la galaxie du tourbillon
- Un pas vers la résolution du problème de Navier-Stokes
- Un air de ptérosaure
- La nage des spermatozoïdes
- Une avalanche d'un type rare
- Au diapason d'Éole
- Une dent de lait pour l'au-delà

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

HOMO SAPIENS INFORMATIUS

Mon alter ego sur le web
Gilles Dowek

P. 22

QUESTIONS DE CONFIANCE

Quand le politique doit simplifier
Virginie Tournay



En couverture:
© Shutterstock.com/Rasto SK

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, jeté 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. 34

COSMOLOGIE

TESTER LES FONDEMENTS DU MODÈLE DU BIG BANG

Jean-Philippe Uzan

Certains résultats d'observations astrophysiques semblent inconciliables. C'est peut-être le signe que les hypothèses de base du modèle du Big Bang sont à revoir. Il faut donc tester ces prémisses, mais comment?



P. 44

BIOLOGIE ANIMALE

LA STUPÉFIANTE ATTAQUE DE LA GUÊPE ÉMERAUDE

Kenneth Catania

Comment la guêpe émeraude transforme-t-elle une blatte en garde-manger vivant pour sa progéniture? Bien que déjà beaucoup étudié, le mode opératoire de cet insecte réservait encore des surprises.



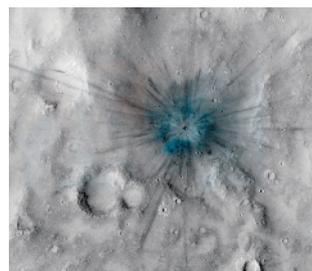
P. 52

ARCHÉOLOGIE

DES MÉTROPOLIS EN EUROPE ILY A 6 000 ANS

Johannes Müller,
Wiebke Kirleis
et Robert Hofmann

Vers 4100 avant notre ère, des milliers de paysans ont fondé des cités bien structurées sur les sols fertiles d'Ukraine. Une civilisation qui a disparu aussi vite qu'elle est apparue.



P. 60

PORTFOLIO

MARS, UNE PLANÈTE DYNAMIQUE

Clara Moskowitz

La sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* fête ses quinze ans de mission en orbite autour de la Planète rouge. Ses nombreuses et spectaculaires photographies ont révélé une surface en perpétuel changement.



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



P. 68

HISTOIRE DES SCIENCES

**DU CHOLÉRA
AU CORONA**

*Heiner Fangerau
et Alfons Labisch*

Choléra, peste, grippe espagnole... les pandémies ont toujours contribué au développement de la santé publique. Aujourd'hui encore, pour lutter contre le Covid-19, nous recourons aux institutions qui en ont résulté.



P. 76

SANTÉ PUBLIQUE

**« LA DÉMOCRATIE
SANITAIRE
RESTE UN DÉFI »**

*Entretien avec
Anne-Marie Moulin*

Dans la gestion des épidémies, quelles leçons tirer du passé, qu'il soit lointain ou remonte à la première année de la pandémie actuelle?



P. 24

GÉOSCIENCES

**LES CHÂTEAUX D'EAU
DE LA PLANÈTE
SOUS PRESSION**

Walter Immerzeel

Les réserves naturelles d'eau situées à haute altitude alimentent près de deux milliards d'humains. Comment évolueront-elles avec le réchauffement climatique et le développement des populations? Une pénurie d'eau menace-t-elle? Pour le savoir, les scientifiques multiplient les observations et affinent leurs modélisations.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

**ADDITION
ET MULTIPLICATION,
DES TABLES
QUI INTRIGUENT**

Jean-Paul Delahaye

Combien de nombres différents y a-t-il dans une table d'addition ou de multiplication? Cette question est à l'origine d'une famille de passionnants problèmes arithmétiques.

P. 86

ART & SCIENCE

Giotto l'artiste géologue

Loïc Mangin

P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

**Quand le courant
passe, le cœur bat**

*Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik*



P. 92

**CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION**

Notre cousin Trichoplax

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

**Le flambage
réduit-il l'acidité?**

Hervé This

P. 98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

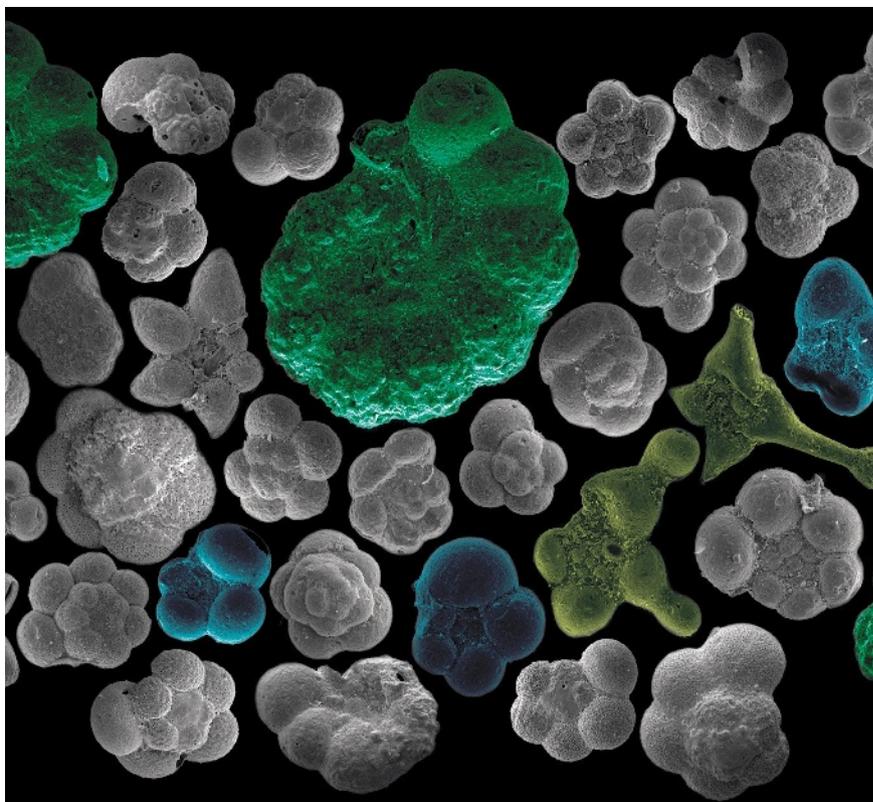
P.18 Livres du mois

P.20 *Homo sapiens informaticus*

P.22 Questions de confiance

CLIMATOLOGIE

L'ÉNIGME DES TEMPÉRATURES DE L'HOLOCÈNE RÉSOLUE?



Les foraminifères du plancton fossilisé servent de paléothermomètre: la composition chimique de leur coquille est sensible à la température marine.

L'histoire des températures au cours des 12 000 dernières années souffrait d'une incohérence entre modélisations numériques et mesures géochimiques. Un biais lié aux saisons en serait la cause.

La dernière période glaciaire s'est terminée il y a 11 700 ans. Elle a été suivie par l'Holocène, la période interglaciaire actuelle, où la reconstruction de l'évolution des températures est essentielle pour établir un contexte rigoureux au réchauffement climatique en cours. Cependant, les climatologues étaient jusqu'à présent confrontés à une incohérence. L'histoire des températures obtenues à partir de l'analyse de différentes archives géologiques était marquée par un maximum il

ya entre 8000 et 6000 ans, l'«optimum climatique de l'Holocène». Or ce dernier est absent des modélisations numériques. Samantha Bova, de l'université d'État du New Jersey, et ses collègues ont identifié un biais saisonnier dans les reconstitutions des températures issues de l'analyse géochimique des sédiments marins: il conduirait à une mauvaise évaluation des températures moyennes annuelles.

Les climatologues s'appuient sur différentes méthodes pour déterminer l'évolution des températures du passé. Pour suivre notamment la température de

surface des océans, ils analysent différents indicateurs, ou paléothermomètres. Par exemple, ils étudient les coquilles fossilisées d'organismes unicellulaires, les foraminifères, dont la composition chimique varie sensiblement avec la température des mers. Les coquilles se déposent régulièrement dans les sédiments et il est alors possible de retracer l'évolution des températures au cours du temps. C'est avec ce genre de paléothermomètres que les climatologues ont mis en évidence l'optimum climatique de l'Holocène. Cependant, les simulations numériques décrivent une hausse monotone de la température jusqu'à la période industrielle (où l'on constate une accélération de cette tendance).

En 2010, Guillaume Leduc, maintenant au Cerege (Centre européen de

recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement), à Aix-en-Provence, et ses collègues avaient constaté que, selon les paléothermomètres utilisés en un même endroit, ils obtenaient des résultats contradictoires. « Nous avons alors proposé que les divers paléothermomètres restituent des tendances saisonnières et non annuelles, et que chaque thermomètre retracerait une saison différente », souligne Guillaume Leduc. Ces biais saisonniers pourraient donc induire une erreur dans le calcul de la température moyenne annuelle. Mais les chercheurs ne savaient pas comment quantifier et corriger ce biais.

Pour y parvenir, Samantha Bova et ses collègues se sont d'abord intéressés à la période interglaciaire précédente (il y a entre 128 000 et 115 000 ans). Durant cette dernière, l'ensoleillement était plus fortement contrasté en fonction des saisons, à cause notamment d'une inclinaison plus importante de l'axe de rotation de la Terre. Il était donc plus facile pour les chercheurs d'y isoler les biais saisonniers et développer une méthode pour estimer des températures moyennes annuelles.

L'équipe a ensuite appliqué cette méthode à plusieurs enregistrements paléoclimatiques issus de sédiments marins collectés dans des régions différentes. Résultat : l'évolution des températures durant l'Holocène augmente de façon monotone comme dans les simulations numériques, au moins dans la région de latitude nord ou sud inférieure à 40° correspondant aux données étudiées (aux latitudes supérieures, la dynamique pourrait être différente). Pour confirmer ce résultat, il sera crucial d'appliquer la méthode de correction des biais saisonniers à d'autres types d'archives paléoclimatiques.

« Grâce à cette étude, Samantha Bova et ses collègues apportent une élégante argumentation indiquant que l'optimum climatique de l'Holocène n'a jamais existé et qu'il n'est qu'un artefact des paléothermomètres », résume Guillaume Leduc. « L'optimum faisait partie intégrante de la description de l'Holocène malgré les contradictions avec les simulations. Cette étude sera scrutée avec beaucoup d'attention par les spécialistes, qui vont en analyser les hypothèses dans les moindres détails. » ■

SEAN BAILLY

S. Bova et al., *Nature*, vol. 589, pp. 548-553, 2021

Pollution sonore des océans : il est temps d'agir

Depuis les années 1950, les chercheurs étudient la pollution sonore des océans et ses conséquences sur la faune. La bioacousticienne Lucille Chapuis et ses collègues viennent de réaliser une synthèse des connaissances dans ce domaine et soulignent l'urgence d'agir. Elle répond à nos questions.



Propos recueillis par SEAN BAILLY

LUCILLE CHAPUIS
bioacousticienne
à l'université d'Exeter,
en Grande-Bretagne

On parle de paysage sonore des océans ; de quoi s'agit-il ?

On distingue trois types de sources de sons dans les océans. D'abord, la biophonie regroupe tous les sons produits par les animaux. Parce que le son se propage très vite et très loin dans l'eau, les animaux marins ont une ouïe très développée. Le son sert à communiquer, trouver un partenaire, marquer son territoire, etc. La géophonie correspond à tous les sons liés au vent, aux vagues, aux banquises, aux volcans. Depuis la révolution industrielle, les bruits de l'activité humaine, l'anthropophonie, se sont multipliés. Ils sont dus au transport maritime, à l'industrie pétrolière, aux opérations militaires, à la construction des champs d'éoliennes, etc.

Comment ce paysage a-t-il évolué ?

La biophonie a considérablement baissé. Avec la surpêche, les populations de poissons ont drastiquement diminué. Les récifs coralliens sont normalement des zones très bruyantes, car elles hébergent une faune riche. On se sert d'ailleurs de ce bruit pour estimer la santé de ces milieux. Et quand un récif blanchit, il devient quasiment silencieux. Ce phénomène est lié au réchauffement climatique, qui touche aussi la géophonie : la fréquence des orages change, l'abondance de la glace de mer est modifiée. Mais c'est surtout l'activité humaine qui s'est développée ces dernières décennies. Le bruit du trafic maritime a ainsi été multiplié par trente !

Quel est l'impact sur les animaux ?

On constate des changements de comportements. Certains cétacés se déplacent vers des eaux plus silencieuses, ou chantent la nuit quand le bruit anthropique est moindre. On observe aussi des séquelles physiologiques, comme des pertes d'audition. Certaines détonations, notamment pour sonder

le sous-sol à la recherche de gaz ou de pétrole, provoquent des ondes de choc très puissantes. Autre problème : à leur naissance, les larves des poissons coralliens doivent retrouver par elles-mêmes les récifs. Elles utilisent notamment le bruit qui en émane pour se diriger. Mais avec le bruit ambiant, les larves risquent de se perdre.

Notre travail de synthèse, qui se fonde sur cinq cents articles – c'est peu par rapport à la richesse du sujet –, a mis en évidence qu'il reste encore beaucoup de choses à étudier et à comprendre alors que la situation n'attend pas. La situation des cétacés est la plus documentée. Pourtant, quand on regarde les fameux échouages, nous n'avons pas assez de données pour affirmer avec certitude qu'ils sont causalement liés à la pollution sonore, même si les indices sont assez convaincants.

Est-il possible d'agir contre cette pollution sonore ?

La situation que nous décrivons est inquiétante, mais nous avons voulu terminer notre travail de synthèse sur une note positive. Contrairement à la lutte contre le réchauffement climatique, celle contre la pollution sonore pourrait être plus simple : les sources sont ponctuelles et quand on les supprime, l'impact négatif disparaît quasi immédiatement. Il existe déjà des solutions. Par exemple, de nouvelles coques de bateaux nécessitent une puissance de moteur moindre et font donc moins de bruit. Il faut aussi encourager l'utilisation de navires électriques. En mer du Nord, pour les forages ou les installations d'éoliennes, les sites sont entourés de rideaux de bulles d'air, qui amortissent les ondes acoustiques. En réalisant cette synthèse, nous espérons fournir des outils pour que les gouvernements s'emparent de cet enjeu et mettent en place des programmes internationaux pour restaurer la qualité sonore des océans. ■

C. M. Duarte et al., *Science*, vol. 371, article eaba4658, 2021

MÉDECINE

QUAND LE COVID-19 NE SERA PLUS QU'UN RHUME

L'analyse des divers coronavirus humains connus suggère que le SARS-CoV-2 pourrait à terme devenir endémique et n'occasionner alors que de simples rhumes bénins.

Comment l'épidémie de Covid-19 évoluera-t-elle à long terme? Sera-t-on un jour débarrassé du virus SARS-CoV-2 ou devra-t-on vivre avec? Et dans ce dernier cas, avec quel type de risque pour la population? Rustom Antia, de l'université Emory, à Atlanta, et deux collègues ont tenté de répondre. Selon leurs modélisations, il est probable que l'infection au nouveau coronavirus s'apparente un jour à un simple rhume.

Pour parvenir à ce scénario, l'équipe s'est penchée sur les paramètres épidémiologiques du SARS-CoV-2 et, notamment, de quatre autres coronavirus (229E, NL63, OC43 et HKU1) bénins chez les humains car ils n'entraînent que des rhumes. Une hypothèse centrale de l'étude est que ces coronavirus déclenchent des réactions immunitaires similaires. Difficile à croire au vu du bilan du Covid-19 actuel, mais celui-ci s'explique par le fait que le nouveau coronavirus touche une population « naïve », c'est-à-dire des individus dont le système immunitaire n'a jamais été confronté à l'agent infectieux, et donc vulnérables.

Les chercheurs ont utilisé trois paramètres pour caractériser l'immunité contre un coronavirus. En effet, l'immunité peut empêcher l'agent pathogène de se répliquer et interdire donc toute réinfection, ou seulement atténuer la maladie en cas de réinfection, ou encore réduire la transmissibilité. Chez un même individu, ces trois paramètres, qui dépendent d'acteurs différents du système immunitaire, diminuent avec le temps mais avec des rythmes qui leur sont propres, par exemple en fonction de la fréquence des réinfections.

Une analyse des données disponibles concernant les anticorps contre les coronavirus bénins chez des enfants et des adultes révèle notamment que l'immunité bloquant l'infection diminue rapidement, tandis que les deux autres sont de longue durée. Autre résultat, la primo-infection par un des quatre coronavirus bénins intervient entre 3,4 et 5,1 ans.

Grâce à ces informations, les auteurs montrent que la dangerosité du virus ira en s'amenuisant sans toutefois disparaître, suivant en cela l'évolution des quatre coronavirus bénins. Pour rappel, on suspecte le OC43



Selon une récente modélisation, les réactions immunitaires contre le SARS-CoV-2 finiront par atténuer la dangerosité du virus, au point de transformer le Covid-19 en un rhume banal.

d'avoir fait un million de morts lors d'une pandémie en 1890. L'élément clé de ce scénario est le fait que l'infection est sans gravité chez les enfants: à l'avenir, en conditions d'endémie, seuls les enfants, qui ne développent en très grande majorité que des formes légères, seraient alors concernés par le SARS-CoV-2; plus âgés, ils resteraient protégés et le seraient toujours plus à chaque réinfection.

Sans vaccin, cette situation adviendrait – au prix de nombreux morts et formes sévères de la maladie –, d'ici quelques années à quelques décennies, en fonction de la vitesse de propagation du coronavirus (et d'éventuels nouveaux variants) et de la durée de la réponse immunitaire développée contre lui – cette dernière donnée étant encore mal connue compte tenu de la récente apparition du virus. Les vaccins (seulement pour les adultes) réduiraient ce délai à un an, voire six mois. Les auteurs de l'étude préviennent: leurs conclusions seraient toutes différentes avec un agent pathogène qui provoquerait une maladie grave chez les jeunes. ■

LOÏC MANGIN

J. S. Lavine *et al.*, *Science*, en ligne le 12 janvier 2021

EN BREF

LES RIVIÈRES FRAGMENTÉES D'EUROPE

Aujourd'hui, le concept de continuité des rivières est inscrit dans la directive-cadre sur l'eau (DCE) européenne : son plan de gestion des bassins des cours d'eau requiert de dresser l'inventaire des obstacles physiques à cette continuité. Cependant, il n'existe toujours pas de base de données harmonisée à l'échelle du continent. Au sein d'un consortium européen, Barbara Belletti, aujourd'hui à l'École normale supérieure de Lyon, et ses collègues ont montré qu'au moins 1,2 million d'obstacles sont présents dans les rivières d'Europe ; parmi eux, beaucoup sont de petite taille et perturbent le transport de sédiments et les communautés d'espèces fluviales.

Nature, 16 décembre 2020

PHYSIQUE

LE SON DU PÉTILLEMENT

Approchez l'oreille d'une flûte de champagne et vous entendrez son subtil pétilllement. Lorsque chaque bulle arrive à la surface du liquide, elle se retrouve prise entre deux forces antagonistes, la poussée d'Archimède et la tension de surface. À cause de la courbure de son interface, la bulle est sous pression jusqu'à la rupture du film de fluide au-dessus. Ce dernier se rétracte en quelques microsecondes. Alors que le gaz s'échappe violemment, la cavité s'effondre en quelques millisecondes. Chaque étape de ce processus contribue à l'émission du son caractéristique d'une bulle qui éclate en surface.

En 1992, le physicien américain Donald Spiel a remarqué que la fréquence sonore évoluait au cours du processus d'éclatement. Il a suggéré que cette variation était liée à la réduction du volume de la cavité. Plus tard, d'autres chercheurs ont plutôt mis cela sur le compte de la taille de l'ouverture lors de la rétraction du film. Pour y voir plus clair, Juliette Pierre et ses collègues, de Sorbonne Université, à Paris,



Les bulles qui éclatent à la surface d'un verre de champagne ou d'une autre boisson effervescente produisent un son caractéristique.

ont examiné le mécanisme exact en synchronisant une caméra ultrarapide filmant l'évolution de la bulle et un microphone enregistrant le son. L'équipe a ainsi montré que l'évolution de la fréquence sonore vers les aigus est bien corrélée à la rétraction du film. ■

S. B.

M. Poujol et al., *Physical Review Fluids*, vol. 6, article 013604, 2021



PORTONS
LA VOIX
DE LA
NATURE

mnhn.fr

POUR LA
SCIENCE

Découvrez les
**Manifestes
du Muséum**,
une collection
de **4 ouvrages** qui
offrent un éclairage
scientifique sur des
sujets **d'actualité**.

Écoutez
**Pour que nature
vive**, 12 podcasts
pour **comprendre
le vivant**.

POUR LE FUTUR
DE NOTRE PLANÈTE,
**PARTAGEZ NOTRE
ENGAGEMENT !**



ASTROPHYSIQUE

CHAOS MAGNÉTIQUE DANS LA GALAXIE DU TOURBILLON

Située à près de 31 millions d'années-lumière, la galaxie du Tourbillon, ou Messier 51, déploie de magnifiques bras dans lesquels on distingue des pouponnières d'étoiles, des nuages de gaz où naissent ces astres (*en rouge*). Elle fait partie des galaxies spirales les plus observées et étudiées; pourtant, elle continue de surprendre les astrophysiciens.

Le champ magnétique de Messier 51 avait fait l'objet d'analyses menées à partir de radiotélescopes. Les lignes de champ semblaient calquer la structure des bras. Mais les récentes mesures de *Sofia* (l'Observatoire stratosphérique pour l'astronomie infrarouge), un télescope installé à bord d'un Boeing 747, révèlent un paysage plus chaotique. Grâce à l'instrument HAWC+ de l'observatoire aéroporté et opérant dans l'infrarouge lointain, les chercheurs ont constaté que le champ magnétique (*lignes claires*) de la galaxie est déformé dans la partie extérieure des bras et présente une structure plus complexe. Causes probables: la forte activité de formation des étoiles dans les pouponnières et la présence de la galaxie voisine NGC 5195 (*en jaune*).

La caméra HAWC+ est sensible à la lumière diffusée par les particules de poussière présentes dans les galaxies. Ces particules s'alignent perpendiculairement au champ magnétique et polarisent la lumière, de sorte qu'il est possible, en étudiant la polarisation de celle-ci, de reconstruire la forme du champ magnétique. En 2019, grâce à cet instrument, Enrique Lopez-Rodriguez, du centre Ames de la Nasa, et ses collègues avaient montré que le champ magnétique d'une galaxie spirale jouait un rôle crucial dans le modelage de sa forme si spectaculaire. ■

S. B.

Collaboration Sofia, 237^e rencontre de la Société américaine d'astronomie, 14 janvier 2021





© Nasa, the Sofia science team, A. Borlaff; Nasa, ESA, S. Beckwith (STScI) and the Hubble Heritage Team (STScI/Aura)

MATHÉMATIQUES

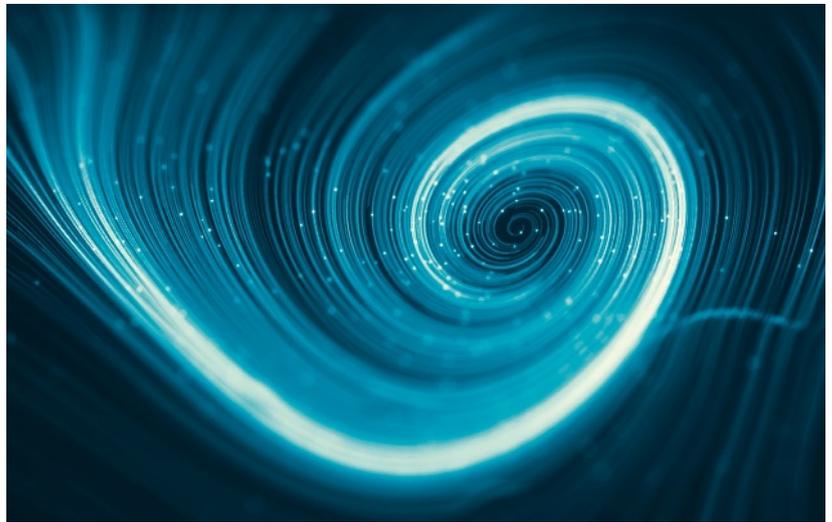
UN PAS VERS LA RÉOLUTION DU PROBLÈME DE NAVIER-STOKES

L'équation fondamentale de la mécanique des fluides peut-elle décrire des comportements turbulents avec des grandeurs tendant vers l'infini ? Un nouvel indice tend à montrer que non.

L'institut de mathématiques Clay est surtout célèbre pour ses sept « problèmes du millénaire ». L'un d'eux est une question que les hydrodynamiciens se posent depuis des décennies : l'équation de Navier-Stokes, qui décrit le mouvement général d'un fluide – liquide ou gaz –, est-elle bien posée mathématiquement ? En d'autres termes, une fois fixées des conditions initiales sur le mouvement d'un fluide, peut-on garantir que son évolution, si elle était exactement régie par cette équation, ne s'emballerait jamais au point de donner des valeurs infinies ? Dhawal Buaria, de l'institut Max-Planck à Göttingen, en Allemagne, et deux collègues ont, grâce à des simulations, découvert un nouveau mécanisme d'atténuation intrinsèque des comportements extrêmes du fluide : un indice qui tendrait à montrer que l'équation de Navier-Stokes est en effet bien posée.

L'équation de Navier-Stokes s'applique dans de nombreux domaines : les prévisions météorologiques, l'étude des courants marins, l'optimisation des fuselages d'avions, etc. Elle traite notamment les phénomènes turbulents comme les tourbillons, qui intéressent beaucoup les hydrodynamiciens. Pour rendre compte du « tourbillonnement » d'un fluide, ces derniers utilisent une grandeur physique appropriée : la vorticité. Cette grandeur est définie en chaque point, et mesure le degré de rotation du fluide à cet endroit.

La difficulté de l'équation de Navier-Stokes est qu'elle comporte des termes dits « non linéaires ». Ils font potentiellement apparaître des comportements « explosifs » ou « divergents », où certaines quantités tendent vers l'infini. En l'occurrence, la forme de l'équation de Navier-Stokes laisse craindre que des tourbillons puissent apparaître, s'auto-entretenir en raison de la non-linéarité de l'équation, et éventuellement s'amplifier sans limite. Cela signifierait que certaines solutions à l'équation développeraient des comportements pathologiques, qui ne décrivent plus correctement l'évolution du fluide. Existe-t-il de telles solutions qui dégénèrent ? C'est l'objet du problème du millénaire lié à l'équation de Navier-Stokes.



L'équation de Navier-Stokes décrit l'évolution d'un fluide. Dans le cas de turbulences, cette équation reste-t-elle bien définie ou les variables qu'elle contient acquièrent-elles des valeurs infinies ?

Grâce à des simulations numériques, Dhawal Buaria et ses collègues ont montré que la non-linéarité de l'équation modère elle-même cet effet potentiellement « explosif ». Ils ont analysé la vorticité en chaque point d'un fluide. Pour ce faire, ils ont procédé à une décomposition de l'espace avec une boule de rayon R autour de chaque point. Quitte à supposer que le reste du fluide ne comporte pas d'autre tourbillon, on sait que la partie extérieure à la boule a une influence positive sur la vorticité sans pour autant provoquer une divergence. Reste alors à étudier le terme « local ». Les chercheurs ont montré, dans ce cas, que si le rayon R était choisi assez petit, la réaction due à cette portion de fluide sur la vorticité était négative. Autrement dit, on obtient en fin de compte un terme modérateur et un terme incapable de déclencher une explosion : la vorticité ne s'emballera jamais. C'est un indice fort pour ce problème du millénaire, mais sa résolution exacte n'est sans doute pas encore à portée de main ! ■

LUCAS GIERCZAK

D. Buaria et al., *Nature Communications*, vol. 11, article 5852, 2020

EN BREF

LE MAGNÉTISME D'UNE EXOPLANÈTE

Grâce à *Lofar*, un réseau d'antennes européen, Philippe Zarka, du Lesia, à Paris, et ses collègues ont détecté des bouffées d'ondes radio en provenance du système Tau Boûtes, qui contient un couple d'étoiles et une exoplanète. Le champ magnétique de cette dernière, une géante gazeuse comme Jupiter mais très chaude, serait la source de ce signal. Son analyse ouvre des perspectives intéressantes pour en savoir plus sur la structure interne de la planète et sur son atmosphère.

Astron. Astrophys., 14 janv. 2021

INSULINE À TEMPÉRATURE AMBIANTE

Jusqu'à présent, le protocole pharmaceutique recommandait de conserver l'insuline au réfrigérateur. Une contrainte difficile à respecter, notamment en Afrique subsaharienne, où chaque foyer n'est pas toujours équipé. Or l'équipe de Leonardo Scapozza, de l'université de Genève, et l'association Médecins du Monde viennent de montrer que l'insuline gardée entre 25 °C et 37 °C pendant quatre semaines (durée d'utilisation d'un flacon) ne perd pas son efficacité.

Plos One, 3 février 2021

LE MAGNÉTISME DE LA DIONÉE

Le piège de la dionée attrape-mouche, une plante carnivore, se déclenche grâce à un signal électrique. Ce dernier crée un champ magnétique très faible. Anne Fabricant, de l'université Johannes-Gutenberg, à Mayence, en Allemagne, et ses collègues l'ont mesuré avec un magnétomètre composé d'une enceinte remplie d'un gaz d'atomes sensible aux variations du champ magnétique. Résultat : 0,5 picotesla, des millions de fois moins que celui de la Terre.

Scientific Reports, 14 janv. 2021

PALÉONTOLOGIE

UN AIR DE PTÉROSAURE

L'origine des ptérosaures est toujours un mystère: leurs fortes différences anatomiques avec les groupes de reptiles les plus proches laissent penser que leur évolution a été très rapide. Toutefois, Martín Ezcurra, du musée argentin des Sciences naturelles, et ses collègues viennent de montrer que les lagerpétidés, un petit groupe de reptiles du Trias, sont plus proches des ptérosaures qu'on ne le pensait, ce qui comblerait le fossé évolutif. En effet, les fossiles de ces deux groupes présentent des similarités que l'on retrouve presque exclusivement chez eux. En particulier, ils partagent une anatomie unique de l'oreille interne et de ses canaux semi-circulaires. Ce sont les seuls chez qui cette région est aussi développée: elle représente 40% de la hauteur de leur cavité endocrânienne.

Les canaux semi-circulaires détectent les mouvements de la tête. On sait qu'un rayon plus grand implique un meilleur sens de l'équilibre chez les primates et les oiseaux; il est aujourd'hui associé aux espèces qui volent, ou aux espèces terrestres les plus agiles. Les chercheurs ont conclu qu'en considérant le groupe des lagerpétidés comme davantage apparenté aux ptérosaures, et non aux dinosaures comme on le pensait généralement, la



Vue d'artiste d'un dimorphodon, un ptérosaure du Jurassique inférieur.

vitesse d'évolution requise pour que les ptérosaures acquièrent les traits anatomiques nécessaires au vol n'est pas aussi extrême. L'anatomie des lagerpétidés, adaptée à la course et aux déplacements exigeant un bon équilibre et une bonne agilité, aurait ainsi pavé la voie vers l'apparition de caractères à l'origine du vol chez les ptérosaures. ■

THÉO TORCQ

M. D. Ezcurra et al., *Nature*, vol. 588, pp. 445-449, 2020

MÉDECINE

UNE THÉRAPIE GÉNÉRIQUE POUR LA NOHL

La neuropathie optique héréditaire de Leber (Nohl) est une maladie rare qui touche des cellules ganglionnaires de la rétine, dont les axones forment le nerf optique. Chaque année en Europe et aux États-Unis, cette maladie atteint 1500 nouveaux patients, adolescents et jeunes adultes qui souffrent de cécité en moins d'un an. Autour de Jos-É Alain Sahel, de l'Institut de la vision à Paris, une équipe vient d'obtenir des résultats très encourageants avec une amélioration significative de la vision et de la qualité de vie chez 37 patients.

Les chercheurs ont utilisé une thérapie génique (qui consiste, de façon générale, à intégrer dans l'ADN du noyau cellulaire une séquence normale du gène défectueux) particulière, car la Nohl est liée à des mutations de l'ADN présent dans les mitochondries, des



Chez une personne souffrant de neuropathie optique héréditaire de Leber, les cellules ganglionnaires de la rétine sont touchées.

organites qui fournissent aux cellules leur énergie. La stratégie a consisté à insérer dans le noyau un gène tel que la protéine qu'il code se concentre dans les mitochondries, où son action a rétabli leur bon fonctionnement. ■

NOËLLE GUILLOIN

P. Yu-Wai-Man et al., *Science Translational Medicine*, vol. 12, article eaaz7423, 2020

BIOLOGIE CELLULAIRE

LA NAGE DES SPERMATOZOÏDES

Comme un véritable réseau de routes intracellulaires, les microtubules sont des éléments constitutifs très importants du squelette de nos cellules. Composés de protéines – les tubulines – qui s’assemblent en filaments, ils parcourent le milieu interne de la cellule et permettent le transport de divers composants moléculaires. Ils sont en outre impliqués dans la division cellulaire et dans la motilité des cellules dotées de cils et de flagelles, par exemple les spermatozoïdes. Pourtant, tous les microtubules sont structurellement très similaires. Les biologistes estiment que leur polyvalence fonctionnelle est attribuable à des combinaisons précises de modifications post-traductionnelles, c’est-à-dire des modifications qui surviennent après leur synthèse dans la cellule, généralement par l’action de certaines enzymes. Carsten Janke, de l’institut Curie et du CNRS, et ses collègues se sont intéressés à l’une de ces modifications: la glycylation, exclusive aux microtubules qui se trouvent dans les cils et les flagelles.

Chez les mammifères, la glycylation peut être induite par deux enzymes particulières, notées TLL3 et TLL8. Les biologistes ont travaillé avec des souris mâles privées de ces



Déplacement normal et linéaire d’un spermatozoïde (à gauche), comparé à un mouvement anormal circulaire (au centre) ou diagonal (à droite).

enzymes. Leur fertilité est réduite d’environ 66%, car leurs spermatozoïdes nagent pour la plupart en rond, et ne parviennent plus à rejoindre l’ovocyte et à le féconder. Les chercheurs ont noté que sans glycylation, les moteurs moléculaires des microtubules qui composent les flagelles ne sont plus agencés correctement. Le battement du flagelle est alors désynchronisé et rend impossible la natation en ligne droite des spermatozoïdes. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

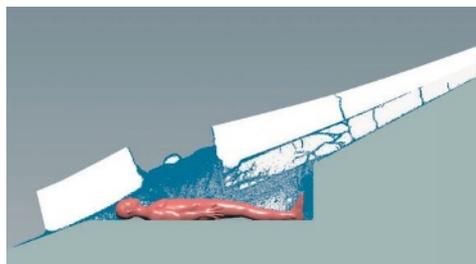
S. Gadadhar *et al.*, *Science*, vol. 371, article eabd4914, 2021

PHYSIQUE

UNE AVALANCHE D’UN TYPE RARE

En février 1959, dans le nord de l’Oural, neuf alpinistes expérimentés ont péri lors d’une expédition à travers le col de Dyatlov. Deux enquêtes menées en 2015 et 2019 ont conclu qu’une avalanche avait causé le drame. Mais cette explication n’a pas convaincu tout le monde: la pente semblait trop faible, les blessures des victimes n’étaient pas classiques d’une avalanche, etc. Johan Gaume, de l’École polytechnique fédérale de Lausanne, et Alexander Puzrin, de l’École polytechnique fédérale de Zurich, ont analysé ces objections et confortent aujourd’hui la piste d’une avalanche.

Les deux spécialistes ont montré que la couche de neige à l’aplomb du camp installé dans une tranchée était peu stable. Le vent a accumulé de la neige sur cette couche jusqu’à ce que l’apport de masse provoque le glissement



Simulation de l’avalanche mettant en évidence le choc au thorax et à la tête des alpinistes infligé par des blocs de neige compacte.

d’une plaque. Des blocs de neige dense sont ainsi tombés sur le torse et la tête des alpinistes allongés dans leur tente. Les simulations numériques sont compatibles avec les blessures constatées, et ce mystère vieux de soixante-deux ans semble ainsi résolu. ■

S. B.

J. Gaume et A. M. Puzrin, *Communications Earth & Environment*, vol. 2, article 10, 2021

EN BREF

BÉBÉS MÉGALODONS CANNIBALES

Espèce de requins disparue il y a environ 3,6 millions d’années, le mégalodon adulte mesurait une quinzaine de mètres de longueur. Kenshu Shimada, de l’université DePaul à Chicago, et ses collègues ont montré sur un individu de 9,2 mètres qu’il avait atteint 2 mètres à la naissance ! Ils suggèrent que les premiers à éclore dans le ventre de leur mère mangeaient les autres œufs... Cela représentait un coût énergétique pour la mère, mais un avantage pour le jeune requin, dont l’imposante taille devait dissuader les prédateurs.

Historical Biology, 11 janvier 2021

PIMENTER LES PANNEAUX SOLAIRES

La capsaïcine est le composé qui confère au piment son piquant. Shaobing Xiong et ses collègues, de l’université normale de la Chine de l’Est, ont découvert qu’elle augmenterait l’efficacité énergétique et la stabilité des cellules solaires à pérovskite. Elle permettrait un meilleur transport des charges à la surface du semi-conducteur en augmentant le nombre d’électrons disponibles, atteignant une efficacité de 21,9 %, sans recourir à des composés toxiques comme le plomb.

Joule, 13 janvier 2021

LES PEINTURES RUPESTRES DE SULAWESI

L’île de Sulawesi, en Indonésie, abrite les plus anciennes peintures rupestres. En 2019, Maxime Aubert, de l’université Griffith, en Australie, et ses collègues avaient trouvé une scène de chasse de 43 900 ans. Ils viennent d’établir un nouveau record avec des peintures de cochons datant d’au moins 45 500 ans. Il est en général difficile de dater de telles œuvres, mais le calcaire poreux des grottes de Sulawesi permet une datation fondée sur le rapport uranium-thorium.

Science Advances, 13 janvier 2021

L'ORDINATEUR QUANTIQUE

Promesses et réalité

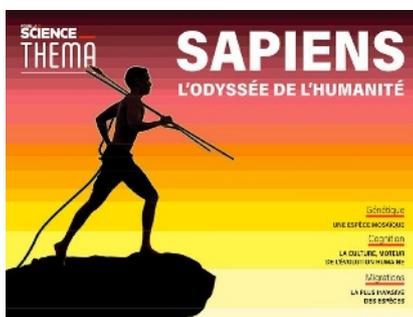
- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

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



BIOLOGIE VÉGÉTALE

AU DIAPASON
D'ÉOLE

Dans les zones venteuses, on constate que les plantes poussent moins haut et ont un diamètre plus important. Cependant, les mécanismes cellulaires impliqués dans la perception du vent sont mal connus. Daniel Tran, de l'université Paris-Saclay, et ses collègues ont étudié, chez l'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*), un canal transmembranaire mécanosensible nommé MSL10. Celui-ci réagit à un signal mécanique (en l'occurrence, la déformation des cellules engendrée par le souffle du vent) et le convertit en signal électrique (en libérant un flux d'ions à travers la membrane). Cette activité déclenche la synthèse de protéines qui contribuent à la réponse complexe de la croissance de la plante.

L'équipe a montré que le canal répondait surtout à un mouvement oscillant à des fréquences comprises entre 0,3 et 3 hertz... qui correspondent à celles du balancement de l'arabette lorsque le vent souffle. « C'est un peu comme si ce canal était accordé à cette oscillation ou comme si, au contraire, la plante au cours de sa croissance s'était mise au diapason de la fréquence perçue par son canal mécanorécepteur », explique Bruno Mouliat, du centre Clermont-Auvergne Rhône-Alpes de l'Inrae, qui a participé à l'étude. En effet, la fréquence



Chez l'arabette des dames, des mécanismes cellulaires mécanosensibles réagissent aux oscillations due au vent.

typique d'oscillation d'une tige dépend de ses caractéristiques (longueur, diamètre). Si la plante pousse d'une certaine façon, elle risque de changer sa fréquence typique d'oscillation. Celle-ci ne serait alors plus compatible avec la gamme de fonctionnement optimal du canal MSL10. On aurait donc une rétroaction contrôlant la croissance de la plante (on parle de thigmomorphogenèse). Mais cela reste encore à démontrer. ■

ALINE GERSTNER

D. Tran *et al.*, *PNAS*, vol. 118(1), article e1919402118, 2021

ÉTHOLOGIE

UNE MEUTE
ÉLECTRIQUE

Chasser en groupe est une stratégie commune chez de nombreux mammifères et oiseaux, mais c'est un comportement rarement observé chez les poissons. Douglas Bastos et ses collègues, de l'Institut national de recherches amazoniennes, à Manaus, au Brésil, ont montré que les anguilles électriques *Electrophorus voltai*, que l'on considérait uniquement comme des chasseuses solitaires, font aussi équipe, en utilisant une stratégie qui leur est propre et qui repose sur leur capacité à produire de puissantes décharges électriques.

Lors de la chasse, des groupes d'une centaine d'individus ou plus nagent en cercles autour de bancs de petits poissons afin de les rassembler en une sorte de « boule de proies », qui est poussée vers les eaux les moins



Les anguilles électriques sont capables de produire des décharges de 860 volts, les plus puissantes du monde animal.

profondes. Puis un petit groupe de moins d'une dizaine d'anguilles attaque les poissons à coups de décharges électriques. Les proies sautent alors hors de l'eau et retombent assommées, prêtes à être avalées. ■

T. T.

D.A. Bastos *et al.*, *Ecology and Evolution*, en ligne le 14 janvier 2021

EN BREF

LE DÉCLIN DES
REQUINS ET DES RAIES

Depuis les années 1970, les populations de requins et de raies ont diminué de 70 %, d'après Nathan Pacoureau, de l'université Simon-Fraser, au Canada, et ses collègues. Trois quarts de ces espèces, qui jouent un rôle indispensable dans les écosystèmes marins, sont aujourd'hui menacées d'extinction. De strictes réglementations de la pêche sont aujourd'hui nécessaires pour éviter l'effondrement de ces populations, qui menace la durabilité des ressources alimentaires marines.

Nature, 27 janvier 2021

LES DRÔLES DE CROTTES
DES WOMBATS

Étonnamment, les wombats font des crottes... cubiques ! Comment ? Patricia Yang et ses collègues de l'Institut de technologie de Géorgie, aux États-Unis, se sont intéressés aux intestins de ces marsupiaux et aux muscles qui les entourent : ceux-ci forment un circuit avec des zones d'épaisseurs et de rigidités variées. Grâce aux contractions dues à la digestion, cet agencement permettrait à un anus rond et un colon cylindrique de produire des crottes présentant des faces plates et des arêtes.

Soft Matter, 8 décembre 2020

ENCORE UN VECTEUR
DU PALUDISME

Anopheles stephensi est une espèce de moustique originaire d'Inde qui est arrivée dans les pays de la Corne de l'Afrique il y a quelques années. Elle y est maintenant très présente en milieu urbain, d'après Fitsum Tadesse, de l'Institut de recherche Armauer-Hansen, en Éthiopie, et ses collègues. Vecteur du paludisme, ce moustique le propage plus rapidement que les espèces endémiques. Les efforts contre la transmission de cette maladie ne devront donc plus se concentrer uniquement sur les milieux ruraux.

Emerg. Infect. Dis., 12 janvier 2021

UNE DÉFENSE TOXIQUE

De nombreuses plantes produisent des molécules « de défense » qui les protègent contre les prédateurs. Ces molécules s'attaquent souvent à des tissus particuliers des herbivores, comme ceux du système nerveux. Toutefois, certaines de ces toxines végétales perturbent des fonctions cellulaires fondamentales et seraient *a priori* aussi néfastes pour la plante. Jiancai Li, de l'institut Max-Planck à Iéna, en Allemagne, et ses collègues ont précisé le mode d'action de ces molécules chez le tabac sauvage *Nicotiana attenuata*. Ils ont montré que les feuilles stockent les molécules sous une forme inactive, et que quand elles sont ingérées par la chenille du sphinx du tabac, ces molécules subissent des réactions chimiques qui les rendent toxiques. ■

NICOLAS BUTOR

J. Li et al., *Science*, vol. 371, pp. 255-260, 2021

UNE DENT DE LAIT POUR L'AU-DELÀ



La sépulture du jeune enfant gallo-romain, dans laquelle on distingue nombre de vases et de restes de squelettes.

KOMBUCHA PROGRAMMABLE

Le kombucha est une boisson fermentée à base de thé, obtenue grâce à l'activité symbiotique d'une communauté microbienne. Charlie Gilbert et ses collègues, de l'Imperial College, à Londres, se sont inspirés des interactions des bactéries et des levures pour concevoir des biomatériaux innovants. En combinant des bactéries *Komagataeibacter rhaeticus* et des levures *Saccharomyces cerevisiae* (génétiquement modifiées), ils ont fabriqué de la cellulose programmée pour réagir à différents stimuli. Ils ont ainsi obtenu un matériau qui réagissait à la présence de β -œstradiol (un perturbateur endocrinien) dans son environnement en produisant une enzyme laccase; celle-ci dégrade le β -œstradiol par oxydation. Les résultats de l'équipe permettraient ainsi de produire facilement des matériaux dépolluants, programmés pour éliminer certains déchets toxiques. ■

T. T.

C. Gilbert et al., *Nature Materials*, en ligne le 11 janvier 2021

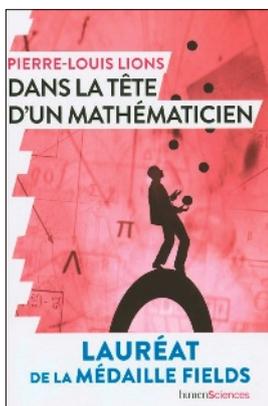
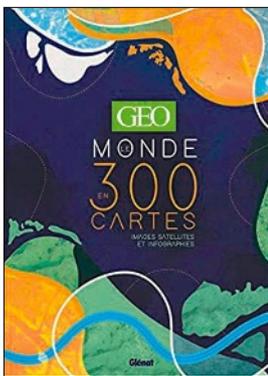
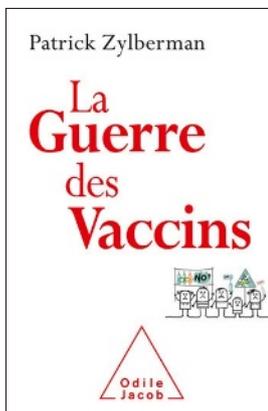
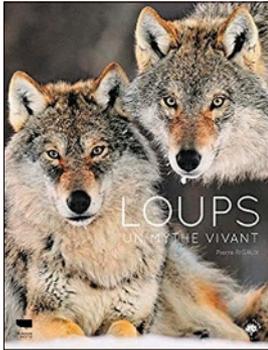
Parfois, dans la boue, les archéologues découvrent de la délicatesse. C'est le cas avec la très riche tombe gallo-romaine mise au jour à l'aéroport de Clermont-Ferrand, à Aulnat, par Laurence Lautier et Ivy Thomson, de l'Inrap. Il y a deux mille ans, un enfant n'a pas voulu laisser partir dans l'au-delà son petit frère ou sa petite sœur, âgée d'environ un an, sans lui offrir quelque chose de personnel: il a déposé dans la tombe, sur un coquillage, sa dent de lait.

La sépulture du très jeune enfant est exceptionnelle tant par la quantité que par la qualité de son mobilier funéraire. Long de 80 centimètres, son cercueil en bois n'est plus notable que par les clous qui l'assemblaient. Il fut déposé dans une large fosse de 2 mètres de long et entouré de nombreuses offrandes. Parmi elles, de la viande en quantité: un demi-cochon, divers autres morceaux de porc, trois jambons et deux poules sans tête. La vingtaine de vases retrouvés comprend notamment des vases miniatures et des balsamiques en verre, contenant sans doute des substances cosmétiques ou médicinales. Il y avait aussi une fibule en bronze, un cerceau et la baguette qui permettait de le faire rouler. Et la famille du petit défunt lui a donné un compagnon dans l'au-delà en sacrifiant un chien, déposé dans la tombe avec son collier cerclé d'appliques en bronze et muni d'une clochette.

La grande peine de la famille de l'enfant se mesure ainsi non seulement à l'offre émouvante d'une dent par un frère ou une sœur, mais aussi à la richesse, inédite dans la région, des offrandes de cette tombe gallo-romaine d'enfant. Avec sa moitié de porc, celle du petit défunt d'Aulnat évoque presque une tombe gauloise. Peut-être pas si étonnant en contexte gallo-romain, la peine poussant à revenir aux racines... ■

FRANÇOIS SAVATIER

Communiqué de l'Inrap du 14 janvier 2021 (<https://bit.ly/39G8TKe>)



ÉCOLOGIE

LOUPS. UN MYTHE VIVANT

Pierre Rigaux
Delachaux & Niestlé, 2020
240 pages, 32 euros

Naturaliste de terrain qui a travaillé onze ans dans plusieurs associations de protection de la nature, l'auteur vient de créer son bureau d'études. Il a déjà publié *Pas de fusils dans la nature* (Humensciences, 2019) et adopte ici le même ton militant pour défendre le loup. Cette monographie, illustrée de grandes et belles photographies, est moins détaillée que les deux parues sur cette espèce en 2017, mais elle est émouvante et facile à lire. Au-delà des connaissances scientifiques générales et des anecdotes, cet ouvrage suscite aussi la réflexion sur notre rapport à cet animal.

Revenu en France en 1992, le loup cohabite avec nous, situation que 80% des Français plébiscitent. Mais c'est aussi une espèce haïe dont, chaque année, un cinquième de la population est abattu légalement. Depuis les débuts de l'élevage, l'homme livre une guerre sans merci à ce prédateur si adaptable. L'auteur comprend le désarroi de l'éleveur français qui, alors qu'il pouvait surveiller facilement de grands troupeaux, voit revenir un animal que l'on avait éradiqué grâce à des primes d'État. Il s'étonne que, chez nous, la cohabitation paraisse impossible alors qu'elle n'a jamais posé de grands problèmes dans les pays voisins à forte tradition pastorale tels que l'Espagne ou l'Italie, où les loups sont quatre fois plus nombreux. La concentration des indemnisations sur une minorité de troupeaux témoigne-t-elle d'un effort inégal de gardiennage contre ce prédateur qui coûte cher aux contribuables français? En tout cas, les abattages croissants n'ont pas empêché l'augmentation des attaques, d'où la réforme du « Plan loup » qui sera menée en 2021.

PIERRE JOUVENTIN
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS

SANTÉ PUBLIQUE

LA GUERRE DES VACCINS

Patrick Zylberman
Odile Jacob, 2020
352 pages, 23,90 euros

Non, la guerre des vaccins n'est pas celle que mènent les trusts pharmaceutiques pour décrocher la timbale du Covid-19, mais la querelle entre partisans et adversaires des vaccins. Auteur de *L'Hygiène dans la République* (1986) et de *Tempêtes microbiennes* (2013), l'auteur remonte l'histoire pour décrire les débats entourant les vaccins depuis la découverte de la vaccine par Edward Jenner en 1798.

Il s'attarde sur la pandémie manquée H5N1 de 2009 et la désaffection actuelle à l'égard des vaccins. Selon lui, le noyau dur de réfractaires ne représente pas plus de 2% de la population, mais les vaccins sont contestés par un grand nombre de nos concitoyens. Cela témoigne d'un malaise vis-à-vis de la science et de l'État, dont la portée dépasse les seuls problèmes médicaux. Si les opposants aux vaccins s'inspirent généralement d'une philosophie individualiste et attachée aux thérapies naturelles, l'auteur y voit surtout une idéologie incohérente et dévoyée, proche du complotisme. Ses tenants refusent en fait le débat scientifique auquel ils prétendent contribuer.

Brillant, regorgeant d'informations et de citations provocantes, l'ouvrage rappelle que des révolutionnaires comme Marat et Robespierre, obsédés de la conspiration, encourageaient le peuple à jouer les délateurs. Le complotisme qui entache aujourd'hui le vaccinoscepticisme révélerait une difficulté récurrente en démocratie: il est difficile d'y organiser de vrais débats scientifiques, alors que le pouvoir politique garde le droit de trancher pour protéger les citoyens, malgré eux s'il le faut. Une histoire démocratique des vaccins est-elle possible? La campagne vaccinale qui débute sera à coup sûr un test du lien entre le fonctionnement de notre démocratie et le choix des meilleures stratégies de santé publique.

ANNE-MARIE MOULIN
CNRS, LABORATOIRE SPHERE, PARIS

GÉOGRAPHIE

LE MONDE EN 300 CARTES

Collectif

Glénat-Géo, 2020
352 pages, 39,95 euros

Voici le monde bien montré en cartes et en images satellites. Il ne s'agit pas d'un énième atlas – un type d'ouvrage qui se périmé très vite –, mais d'une étude variée de nombreux aspects de la surface de notre planète, très bien illustrée. À la partie atlas classique (cartes physiques et politiques des différentes parties du monde), s'ajoute en effet une deuxième partie présentant des images prises par satellite et une troisième contenant des infographies thématiques soigneusement sélectionnées.

Dans la partie atlas, les cartes sur la France sont claires et soignées, bien que souvent petites. Toutes les cartes sont très précises. La section du livre la plus attrayante visuellement est celle présentant des images satellitaires plutôt bien choisies dans les différentes parties du monde. Des commentaires brefs et efficaces mettent en perspective des territoires que l'on n'a pas l'habitude de voir ainsi, comme Lisbonne avec ses maisons rouges et ses ponts visibles de l'espace, les zones mises en culture irriguée circulaire dans le désert le long de la vallée du Nil ou encore la Grande Barrière de corail au large de l'Australie, encore éclatante bien que menacée.

Dans la dernière section, les nombreuses infographies sur les climats, les ressources ou les enjeux environnementaux sont très intéressantes. On aurait aimé que les données soient plus récentes encore, mais il semble que cela n'ait pas été possible. Dans un contexte où les atlas français actualisés de catégorie similaire manquent, cet ouvrage conviendra particulièrement au public universitaire, sans manquer d'intérêt pour le grand public.

FARID BENHAMMOU
CHERCHEUR ASSOCIÉ AU LABORATOIRE RURALITÉS,
UNIVERSITÉ DE POITIERS

MATHÉMATIQUES

DANS LA TÊTE D'UN MATHÉMATICIEN

Pierre-Louis Lions

Humensciences, 2020
252 pages, 22 euros

Spécialiste réputé de mathématiques appliquées, Pierre-Louis Lions, tantôt souriant voire farceur, tantôt sérieux voire grave, décrit ici son itinéraire. Il sourit de sa première rencontre avec un «escogriffe improbable tout droit sorti d'un roman fantastique du XIX^e siècle»: son futur étudiant de thèse Cédric Villani. Farceur, il intitule «Racines carrées» le chapitre évoquant les principes éducatifs carrés que ses parents lui ont inculqués.

Sérieux, il synthétise, sans entrer dans la technique, l'esprit des sujets sur lesquels il travaille (équations aux dérivées partielles non linéaires, contrôle optimal) en décrivant les problèmes abordés: l'écoulement des fluides, l'urbanisme, l'exploration spatiale... La gestion de portefeuilles boursiers, aussi, pour le seul intérêt du problème, car Pierre-Louis Lions n'a pas de goût pour l'argent. Grave, il déplore qu'ayant été, pendant quarante ans, sollicité pour proposer des améliorations à l'enseignement supérieur, ses suggestions soient invariablement tombées dans des oreilles de sourds. Le chapitre relatant les prestations des responsables politiques a pour titre «Zéro pointé»...

Ce livre est aussi un autoportrait. Curiosité inlassable, excellente mémoire, intuition fulgurante, grande concentration. Humour et franc-parler. Sans complaisance, l'auteur s'avoue autoritaire, voire pénible, n'en faisant qu'à sa tête. Pudique, il est aussi agacé quand on le célèbre que quand on dit du mal de lui! Timide et sujet au trac: attendant son tour pour recevoir sa médaille Fields en 1994, il appréhende comme un Everest les marches qu'il va devoir gravir pour atteindre l'estrade. Passionné de rugby. La musique et la littérature l'émeuvent plus que les mathématiques. Une personnalité riche, volontiers ironique à son propre égard, à laquelle le lecteur s'attache.

DIDIER NORDON
ESSAYISTE ET MATHÉMATICIEN ÉMÉRITE

ET AUSSI



50 IDÉES FAUSSES SUR LES ARAIGNÉES

Christine Rollard

Quae, 2020
152 pages, 23 euros

Les araignées n'ont rien de nocif, mais sont si détestées que beaucoup de gens les détruisent dès qu'ils les voient. Dans ce recueil d'idées bienfaitrices sur la réalité de ces arthropodes, on apprend par exemple que les veuves noires ne sont pas mortelles, que nous ne mangeons pas d'araignées en dormant, qu'il ne sort pas d'araignées mortelles des régimes de bananes, que les araignées ne sont pas sales, qu'il y a des araignées aquatiques, mais surtout qu'elles jouent le rôle important d'insecticide naturel et sans danger, dans la nature comme dans nos maisons.

GRAINES

Serge Schall

Plume de Carotte, 2020
288 pages, 35 euros

Tous les savoirs, toutes les histoires, tous les pouvoirs, tous les espoirs... des graines: voilà ce que contient ce livre écrit par un passionné du sujet. Cet ouvrage foisonnant comme un jardin passe en revue les aspects biologiques, économiques et culturels des semences végétales. Cette somme passionnante et magnifique nous fait aussi rencontrer de multiples acteurs de ce monde – qu'ils soient de distingués botanistes du passé, des «créatrices de variétés bio», des chefs cuisiniers, des «vendeurs de graines de rêves»...

LA VIE QUOTIDIENNE DES SOLDATS ROMAINS

Yann Le Bohec

Tallandier, 2020
336 pages, 20,90 euros

L'auteur est un insigne spécialiste de l'armée romaine, cette étonnante institution qui, avec 350 000 hommes seulement, parvint à l'apogée de l'Empire à contrôler 5 millions de kilomètres carrés. De son style élégant et précis, il explore un thème encore peu travaillé par les historiens: la vie quotidienne du soldat. Il montre notamment à quel point le recrutement était soigné, l'entraînement permanent, l'armement performant, l'encadrement compétent, la discipline stricte et les techniques les plus avancées pour l'époque. Ce livre démythifie l'armée romaine en révélant ses rouages de base.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

MON ALTER EGO SUR LE WEB

On trouve souvent en ligne la réponse à une question que l'on se pose, car généralement quelqu'un d'autre a déjà rencontré le même problème.



Les moteurs de recherche et le web ont beaucoup facilité l'accès à la connaissance. Encore faut-il se méfier des erreurs et fausses informations qui prolifèrent en ligne...

Les sciences utilisent principalement deux modes d'accès à la connaissance: le raisonnement et l'observation. Par exemple, nous savons que les médianes d'un triangle concourent en un point, parce que nous l'avons démontré, et que la glace se transforme en eau, parce que nous l'avons observé. Mais il existe d'autres façons d'accéder à la connaissance. Pour connaître la douleur d'une personne qui, par maladresse, s'est tapé sur les doigts avec un marteau, le raisonnement et l'observation nous sont de peu d'utilité. Nous pouvons cependant avoir une certaine idée de cette douleur, parce qu'il est vraisemblable que nous ayons nous-mêmes déjà vécu une telle expérience. Ce mode d'accès à la connaissance repose donc sur le postulat que l'autre est un autre moi: un *alter ego*. Ainsi, il s'applique forcément davantage en psychologie qu'en astrophysique.

Ce postulat a une autre conséquence: quand nous nous posons une question, il est vraisemblable qu'un *alter ego* se la soit déjà posée et qu'il y ait apporté une

réponse. Tant que notre accès à l'information était difficile, ce postulat ne nous était pas d'une grande utilité: qui s'était déjà posé cette question? Où? Comment accéder à la réponse? Mais le web et les moteurs de recherche ont changé la situation.

Interroger le web est une façon efficace d'obtenir la réponse

Par exemple, un exercice classique de programmation consiste à donner aux étudiants une addition où chaque chiffre a été remplacé par une lettre et à leur demander d'écrire un programme pour retrouver quel chiffre a été remplacé par quelle lettre. La version la plus célèbre de cet exercice est l'addition SEND + MORE = MONEY. Une première façon de répondre à la question est d'énumérer les 1814400 fonctions qui associent un

chiffre à chacune des huit lettres qui apparaissent dans l'opération et de les tester l'une après l'autre. Une autre est d'ajouter quatre variables w, x, y et z pour les retenues de cette addition et de résoudre le système d'équations:

$$\begin{aligned} D+E &= 10w+Y, & w+N+R &= 10x+E, \\ x+E+O &= 10y+N, & y+S+M &= 10z+O, & z &= M, \end{aligned}$$

auquel nous devons ajouter 31 équations pour exprimer que les huit lettres représentent des chiffres distincts et que les chiffres les plus à gauche ne sont pas des 0.

Mais une troisième est de postuler qu'un *alter ego* a déjà fait cet exercice et publié sa solution sur le web. Une simple requête «send more money» dans un moteur de recherche nous mènera alors à la solution.

Cette troisième façon d'obtenir la réponse est sans doute la meilleure, car nous sommes plus intelligents et plus savants à sept milliards que si l'on est seul. Ainsi, quelqu'un m'a un jour demandé – croyant sans doute que je connaîtrais la réponse – comment faire une table des matières avec le logiciel de traitement de texte LibreOffice. J'ai lancé une requête dans un moteur de recherche et je suis vite tombé sur une page web qui expliquait comment faire.

Nous enseignons naguère aux doctorants qu'avant de suer sang et eau pour résoudre un problème, il faut faire une recherche bibliographique, c'est-à-dire se demander si un *alter ego* ne l'a pas déjà résolu. Cela devient désormais quelque chose qu'il faut enseigner dès le début du collège, car c'est l'une des clés qui ouvrent les portes de la connaissance.

Cependant, comme il y a beaucoup d'infos sur le web, il faut aussi enseigner à vérifier les réponses que nous y trouvons. Par exemple, tant que nous n'avons pas fait l'addition SEND + MORE = MONEY par nous-mêmes, et tant que nous n'avons pas nous-mêmes créé une table des matières en LibreOffice, nous ne savons pas si les réponses que nous avons trouvées sont correctes ou non. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria, enseignant à l'École normale supérieure de Paris-Saclay et membre du Comité national pilote d'éthique du numérique.

3 mars à 19h

La mesure de toute chose

Marc Himbert, physicien

10 mars à 19h

**Tous cousins : mesurer la parenté
entre les espèces**

Guillaume Lecointre, biologiste de l'évolution

11 mars à 11h

Capteurs : du macro au nano!

Laurence Bodelot, physicienne

Bérengère Lebental, physicienne

17 mars à 19h

L'infiniment petit est-il mesurable?

Nathalie Besson, physicienne des particules

24 mars à 19h

Société : sous la toise du big data

Pauline Givord, économiste

Accès gratuit sur place (réservation obligatoire) ou en ligne
Informations et réservation : cite-sciences.fr

AVEC LE SOUTIEN DE **POPULA SCIENCE**

**le monde sous
toutes ses mesures**
cycle de conférences

— mars

cité

sciences
et industrie

© Gettyimages

cité

sciences
et industrie

**la 5G : que savoir
pour décider?**

cycle de conférences

mars - avril

— 19h

La 5G promet beaucoup (objets connectés, voitures autonomes, chirurgie à distance...), mais soulève des controverses concernant son utilité, ses impacts sur le climat et sur la santé. Qui décide et comment réguler son déploiement?

23 mars

2G, 3G... 5G, comment ça marche?

30 mars

Quel impact environnemental du numérique?

6 avril

La 5G : quels effets sur la santé?

13 avril

Déploiement de la 5G : qui décide?

Accès gratuit sur place (réservation obligatoire) ou en ligne
Informations et réservation : cite-sciences.fr

AVEC LE SOUTIEN DE **POPULA SCIENCE**

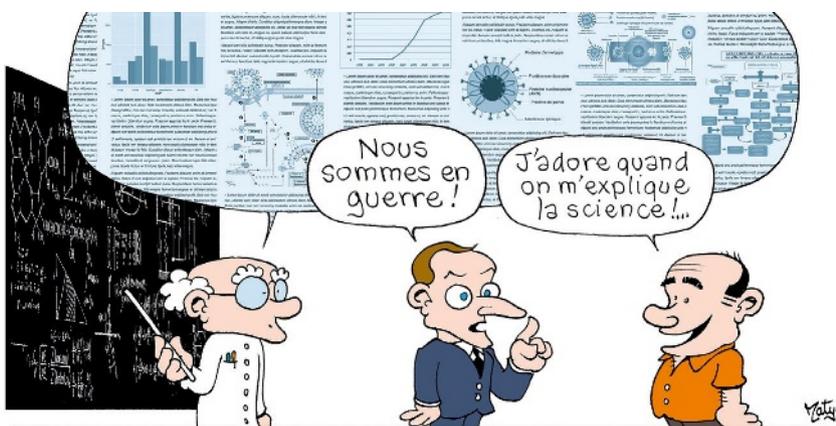
© Gettyimages



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

QUAND LE POLITIQUE DOIT SIMPLIFIER

La science vise à comprendre dans toute sa complexité un problème tel que la pandémie de Covid-19. L'action politique, elle, demande de la simplification.



Le début de ce xxi^e siècle a vu l'essor de la biologie des systèmes, qui vise à articuler différentes échelles d'observation pour modéliser plus finement les processus biologiques. Il s'agit par exemple d'appréhender dans leur globalité des pathologies comme le diabète, l'obésité ou le cancer en croisant les données génétiques et cellulaires à celles de la clinique, voire des écosystèmes – un ambitieux pari... Une telle approche dynamique globale permet de mieux cerner la complexité des menaces sanitaires, mais peut-elle conforter les actions des autorités politiques?

La question semble naïve tant il apparaît évident que la connaissance détaillée d'un problème est la condition *sine qua non* de sa résolution. C'est toutefois oublier que la fonction du politique repose sur un arbitrage entre des valeurs contradictoires. Pour être prescriptive, l'action politique passe obligatoirement par une réduction de la complexité du problème initialement posé. Tel est le cas de la stratégie française de vaccination,

où le critère de priorité adopté est, pour l'essentiel, l'âge. Est-il possible d'éviter les controverses sur l'ordre des populations à vacciner en adoptant un regard plus interactif et globalisé du vivant? Plus de science, plus de confiance?

Le concept de «syndémie» intègre les aspects sociaux liés à une pandémie

L'éditorial de Richard Horton dans le *Lancet* du 26 septembre dernier en constitue un plaidoyer. Le rédacteur en chef de cette éminente revue médicale propose, pour décrire l'épidémie de Covid-19, d'abandonner le terme de pandémie au profit de «syndémie». Cette approche culturelle de la santé publique a été développée dans les années 1990 par l'anthropologue américain Merrill Singer suite à

l'observation des disparités sociales dans les populations américaines exposées au virus du sida. Plutôt que de partir d'un problème de santé spécifique tel qu'une maladie virale, l'approche syndémique intègre les menaces sanitaires liées aux conditions sociales des populations: pauvreté, consommation de drogues, malnutrition, violences urbaines...

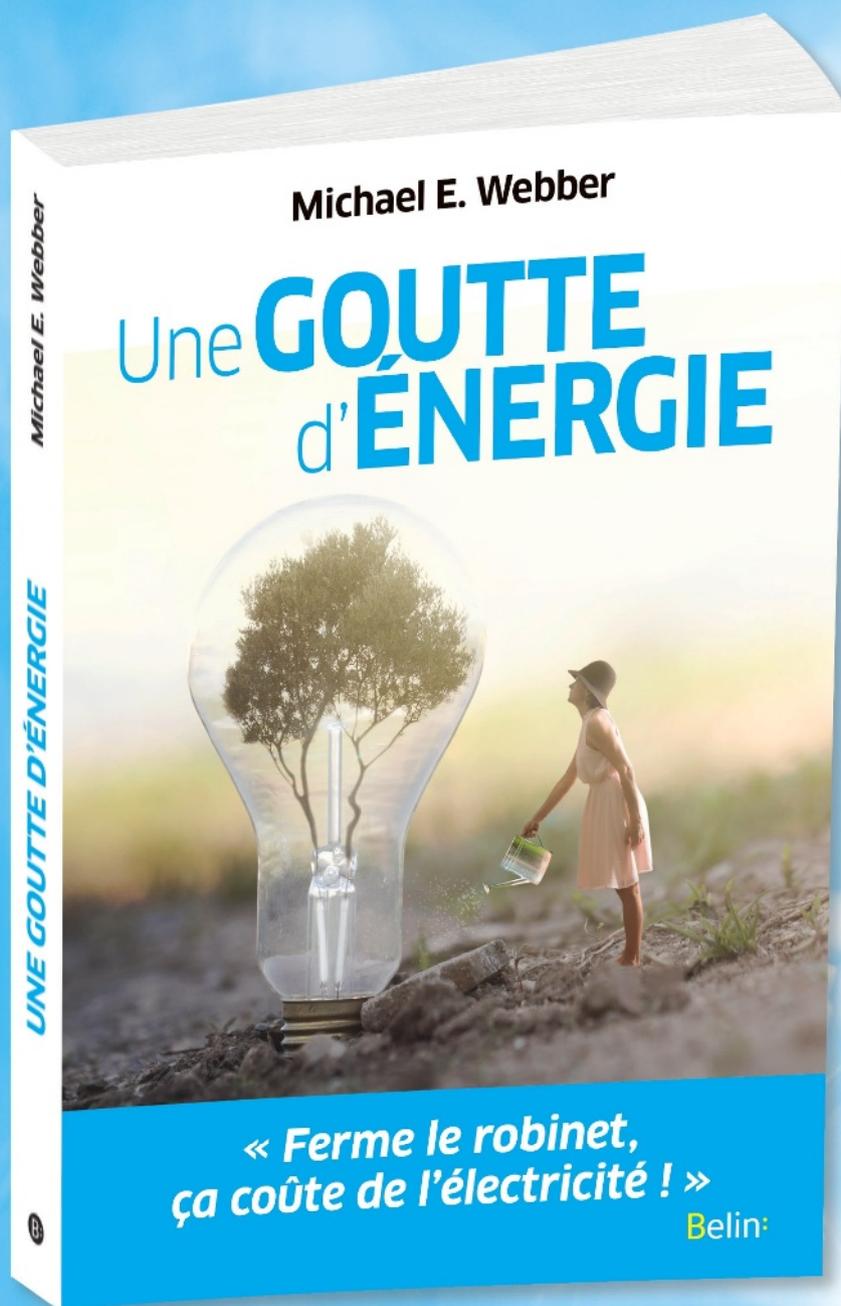
Ainsi, le récit scientifique du Covid-19 serait le produit de deux catégories de pathologies: l'infection respiratoire aiguë due au coronavirus et un éventail de maladies non transmissibles (obésité, diabète, etc.) facilitées par des facteurs socioéconomiques et politiques. La parenté avec le principe directeur de «santé globale» désormais au cœur des grands programmes internationaux de recherche est claire. Il donne une importance accrue aux disparités existantes à l'échelle de la planète pour produire des réponses articulées à la gouvernance spécifique des territoires.

Sur un plan institutionnel, l'initiative est heureuse, car cet ancrage théorique se substitue à une recherche scientifique fragmentée par ses cloisonnements disciplinaires. En revanche, les nuances qu'apportent les facteurs sociaux de comorbidités au coronavirus en font une science difficilement exportable, en l'état, dans l'action publique. En effet, elle réactive des enjeux de justice sociale autour des communautés vulnérables. La vaccination doit-elle s'adresser en priorité aux personnes actives ayant des antécédents cardiovasculaires, à celles atteintes de maladies chroniques ou luttant contre un cancer?

Une compréhension scientifique fine complexifie l'arbitrage du politique, lequel ne peut pourtant se résoudre éthiquement à renoncer à cette compréhension. Si toute culture scientifique doit transmettre l'exquise complexité du monde vivant, le politique œuvre pour sa simplification à l'usage de la société. Les deux sont un art indispensable à toute démocratie. ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

Le nouveau **DÉFI** de notre **ESPÈCE**







Une vue des montagnes
de l'Himalaya, au Népal.

Les châteaux d'eau de la planète sous pression

Walter Immerzeel

Les réserves naturelles d'eau situées à haute altitude alimentent près de deux milliards d'humains. Comment évolueront-elles avec le réchauffement climatique et le développement des populations ? Une pénurie d'eau menace-t-elle ? Pour le savoir, les scientifiques multiplient les observations et affinent leurs modélisations.

L'ESSENTIEL

- > Les glaciers et les manteaux neigeux des hautes montagnes stockent des quantités d'eau considérables.
- > Libérée en été par la fonte, cette eau alimente les populations, leur fournit de l'électricité et joue un rôle essentiel dans les activités agricoles.
- > En modifiant le cycle de l'eau en montagne, le changement climatique menace les ressources en eau de deux milliards de personnes.
- > Afin de préciser ces modifications et les menaces qu'elles représentent, les chercheurs recueillent des données par satellite et sur le terrain, et effectuent des modélisations.

L'AUTEUR



WALTER IMMERZEEL
professeur de géographie physique à l'université d'Utrecht, aux Pays-Bas

A 5 300 mètres d'altitude, à l'intérieur d'une tente, les nuits sont longues. Vers 20 heures, après un *dal bhat*, plat traditionnel de riz et de lentilles au Népal, les dix membres de notre expédition sur le glacier Yala se réfugient dans leurs sacs de couchage à l'intérieur des petites tentes de notre camp temporaire. S'y endormir est difficile, car le cœur réagit souvent au manque d'oxygène dû à l'altitude en battant la chamade. C'est pourquoi je passe souvent de nombreuses heures la nuit à écouter le grondement des avalanches ou les craquements de la glace, tout en me demandant si je dois sortir de mon sac de couchage pour aller me soulager dehors et en passant en revue ce qu'il ne faut pas oublier le lendemain. Dès le lever du soleil, le camp s'anime et nous voilà en route sur la pente escarpée du glacier afin d'aller installer à 5 600 mètres d'altitude des appareils de mesure.

Mon équipe, qui comprend des collègues du Centre international pour le développement intégré des montagnes au Népal, mène deux fois par an des expéditions dans ces lieux, le bassin versant de la vallée du Langtang. Les stations météorologiques automatiques que nous avons installées au camp de base et en altitude mesurent les précipitations, l'épaisseur de la neige, le rayonnement, la température, l'humidité relative et le vent. Elles font de la vallée du Langtang l'un des bassins versants de haute altitude les mieux surveillés d'Asie.

Tous les six mois, nous nous rendons sur les stations météorologiques afin d'assurer la maintenance des instruments de mesure et de récupérer leurs données: l'absence de réseau cellulaire et la mauvaise réception des signaux satellitaires due au relief empêchent leur télétransmission. Lors de la présente mission, nous allons ancrer dans la glace un cadre métallique de trois mètres de haut, puis y fixer des capteurs

qui mesureront en continu la sublimation de la glace ou la neige (la transformation directe de glace en vapeur d'eau) en enregistrant dix fois par seconde la température de l'air et la quantité de vapeur d'eau qu'il contient.

Ces expéditions nous aident à recueillir les informations nécessaires pour mieux comprendre le cycle de l'eau en haute altitude: la neige tombe sur le sommet des montagnes, y forme petit à petit des glaciers, dont la glace s'écoule lentement vers l'aval jusqu'à une altitude assez faible pour fondre; libérée, l'eau ruisselle ensuite jusqu'aux rivières qui alimentent les populations d'altitude, les forêts, les cultures sur terrasses, les champs agricoles en fond de



Ces expéditions aident à mieux comprendre le cycle de l'eau en haute altitude



vallée, etc., avant de parvenir aux grandes villes et aux sites industriels de la plaine.

Lorsque nous avons entamé nos recherches, le cycle de l'eau en haute altitude était très peu connu. Nous ignorions la quantité d'eau apportée par la pluie ou la neige, combien les glaciers accumulent de neige ou libèrent de l'eau par fonte; de plus, nous ne comprenions pas pourquoi les glaciers noirs, couverts de débris rocheux dus à l'érosion, semblent fondre aussi vite que les glaciers blancs. Il nous fallait préciser tous ces aspects du cycle de l'eau en



Les chercheurs installent une station météorologique à 5 600 mètres d'altitude sur le glacier Yala, dans l'Himalaya népalais, afin de mesurer l'accumulation de la neige et sa fonte (*ci-dessus*). L'eau de fonte ruisselle et nourrit des cours d'eau de plus en plus importants qui, sur leur chemin vers le delta du Gange et la baie du Bengale (*carte ci-contre*), alimentent des barrages hydroélectriques, irriguent les cultures et approvisionnent en eau des millions de personnes.

Bengale, à l'est de l'Inde. L'Himalaya héberge des centaines de bassins versants comparables à celui du Langtang.

Les mêmes dynamiques de stockage et de ruissellement de l'eau sont à l'œuvre dans les autres chaînes de montagnes telles que les Alpes, les Andes ou les Rocheuses. Notre étude, publiée en 2020 dans la revue *Nature*, a révélé que 78 de ces «châteaux d'eau naturels», du bassin du Tarim en Chine à la vaste région montagneuse de La Puna au Pérou, fournissent l'essentiel de l'eau douce utilisée par près de deux milliards de personnes dans le monde.

Les modélisations numériques suggèrent que le changement climatique pourrait menacer ces sources vitales. La quantité d'eau qui ruisselle dépend de la distribution des particules dans l'air, qui induisent la formation de nuages, du régime des précipitations, de l'accumulation de neige sur le sol et les glaciers, de la fonte de la neige et des glaciers, laquelle dépend largement de la température de l'air. Pourtant, la plupart des actions politiques liées au changement climatique et au développement durable négligent le rôle de l'eau en montagne. Mais maintenant que nous avons systématiquement >

montagne afin d'estimer, en fonction de la période de l'année, le volume d'eau qui s'échappe du manteau neigeux et des glaciers, et de déterminer comment ces flux pourraient se modifier dans le futur.

La vallée du Langtang forme un petit bassin versant qui draine plusieurs sommets et glaciers. De ce bassin versant naît la rivière Trishuli, qui alimente plusieurs barrages hydroélectriques construits récemment à mi-pente et des terres irriguées plus loin en aval. Ses eaux s'écoulent sur des centaines de kilomètres jusqu'au delta du Gange, qui approvisionne en eau quelque 400 millions de personnes avant de déboucher dans le golfe du

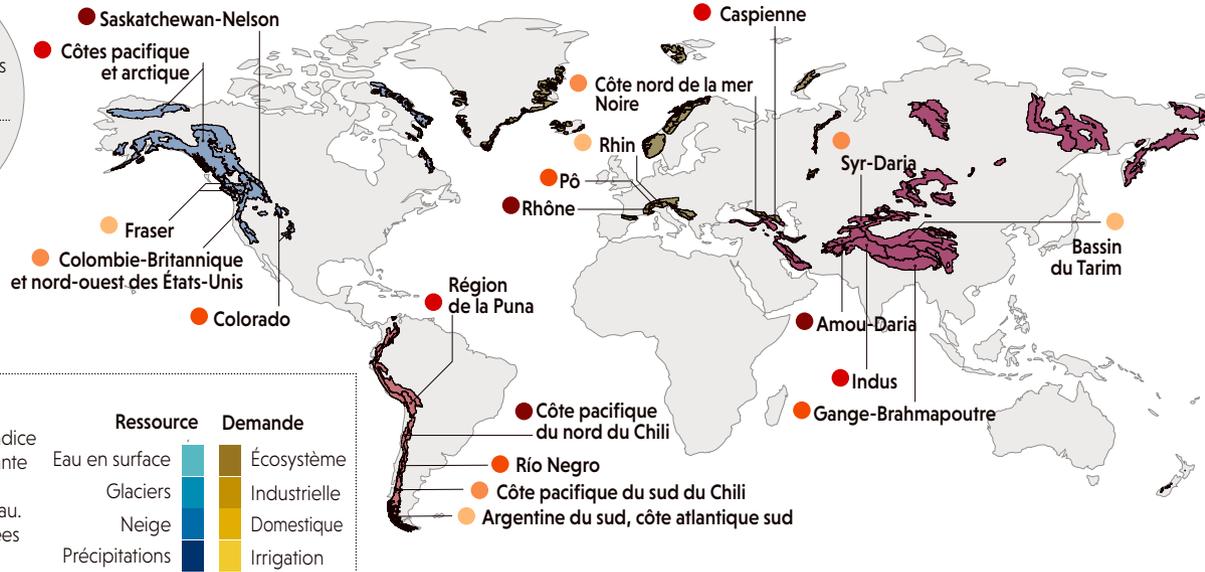
LES MONTAGNES QUI ABREUVENT LE MONDE

Dans 78 régions montagneuses du monde, la pluie, la neige et la glace constituent des « châteaux d'eau » dont dépendent près de deux milliards de personnes et les écosystèmes où elles vivent. Sur chaque continent, ces réservoirs naturels d'eau ont été classés par ordre d'importance.

Les réservoirs naturels d'eau les plus vitaux sont aussi les plus vulnérables au stress induit par le changement climatique, l'augmentation de la population et la croissance économique. Des actions sont donc nécessaires pour protéger la ressource d'eau et réduire la demande.

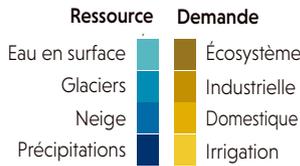
La planète compte 78 systèmes hydriques englacés. Cinq importants systèmes de chaque région sont ici classés

Importance
Élevée → Maximale

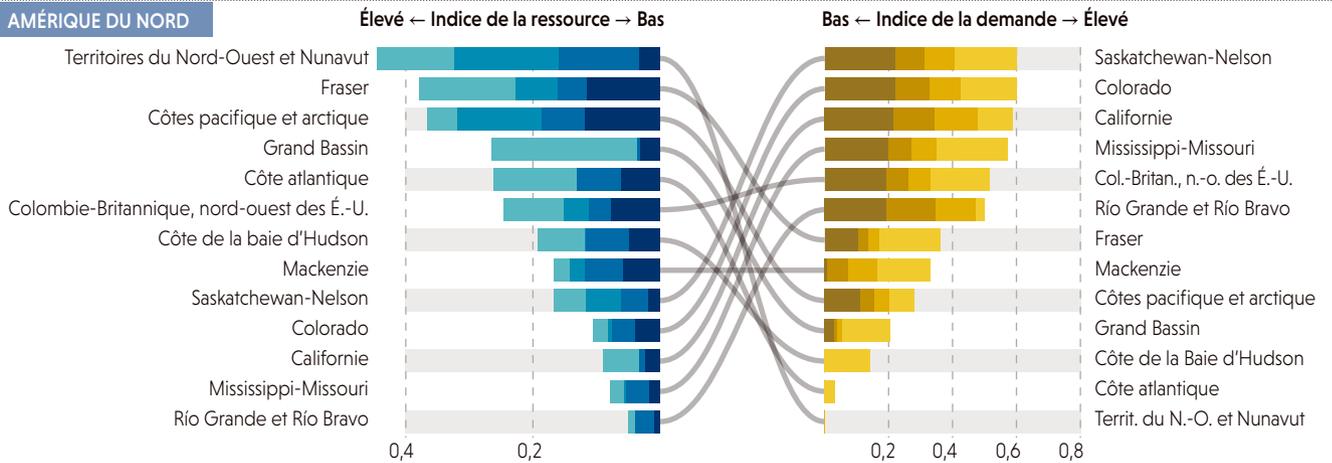


CLÉ DE LECTURE

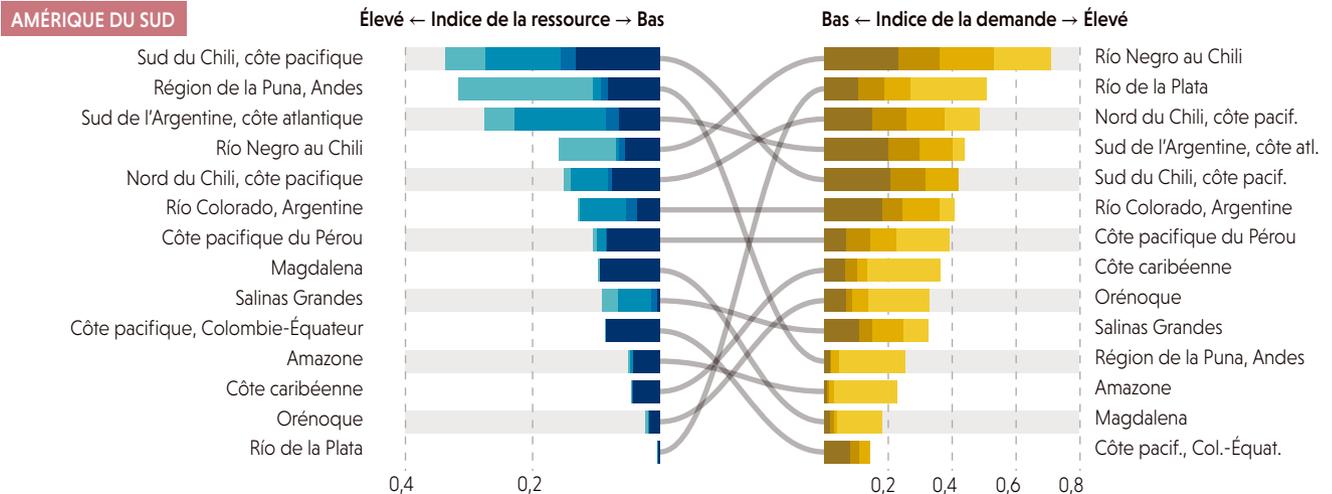
Les valeurs élevées de l'indice représentent une importante ressource en eau ou une importante demande d'eau. Les valeurs sont normalisées de 0 (faible) à 1 (élevée).



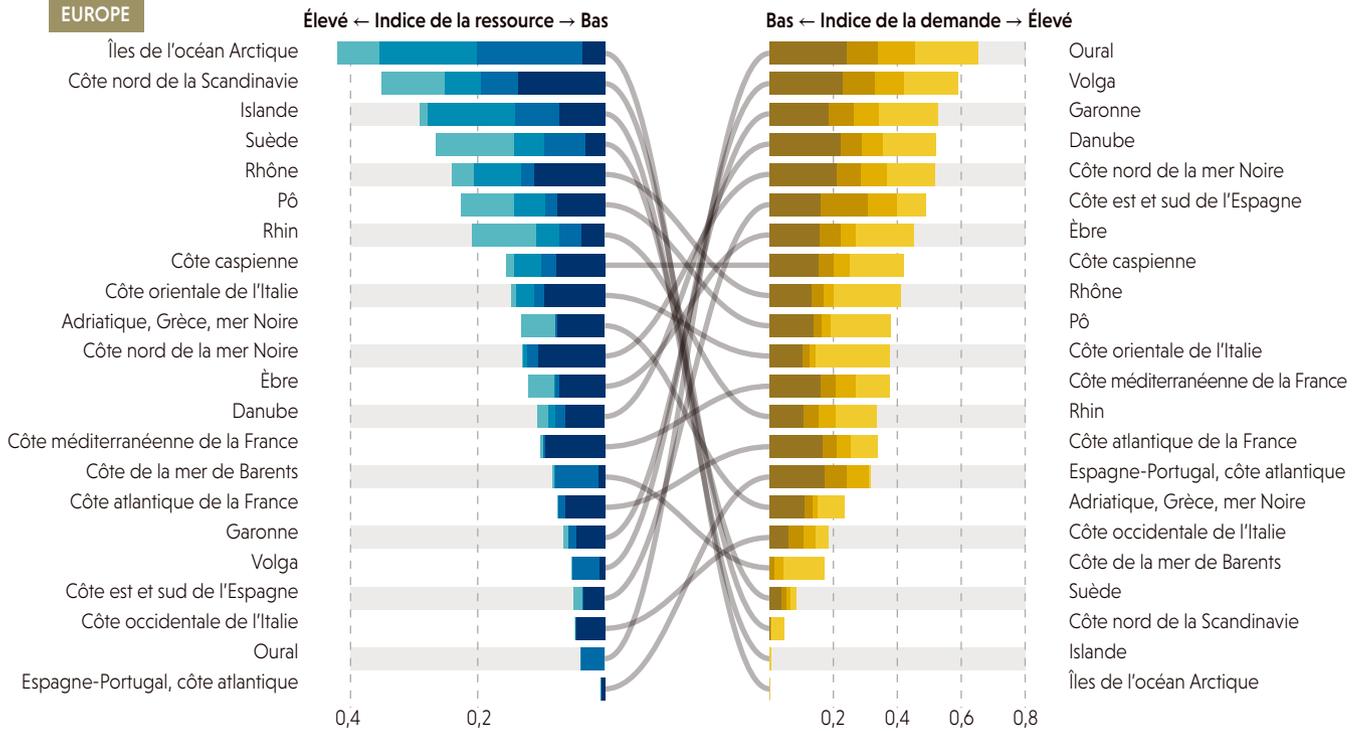
AMÉRIQUE DU NORD



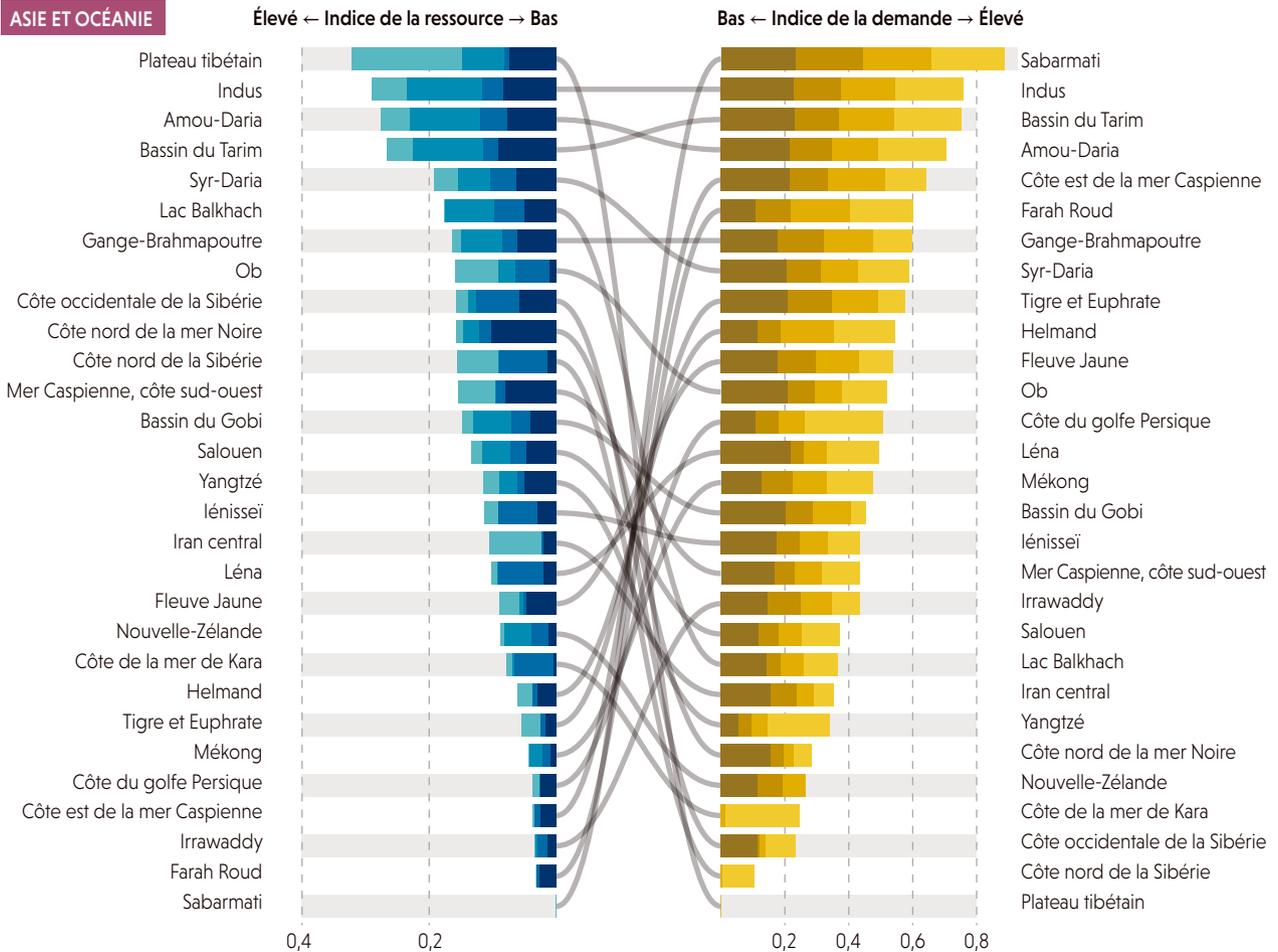
AMÉRIQUE DU SUD



EUROPE



ASIE ET OCÉANIE





> étudié les principaux châteaux d'eau naturels de la planète, la situation pourrait changer.

Les montagnes fonctionnent comme des châteaux d'eau parce qu'il pleut et neige davantage en altitude que dans les plaines et parce qu'une grande partie de l'eau y est stockée temporairement sous forme solide. Puisque la neige et la glace fondent lentement et de façon régulière, ces dernières constituent une source fiable et prévisible, et amortissent les effets des sécheresses.

LE RÔLE DOMINANT DE LA MOUSSON

L'eau emmagasinée dans les montagnes du Népal est ainsi cruciale pour les populations vivant en contrebas. Elle provient pour l'essentiel de la mousson, qui, entre juin et septembre, fournit 70 à 80% des précipitations annuelles sur l'Himalaya. Combinées avec les modèles météorologiques, les données de nos stations révèlent les interactions de la mousson avec le relief. Même dans un petit bassin versant comme celui du Langtang, une vallée orientée est-ouest, les pluies varient beaucoup d'un endroit à l'autre. Une grande partie de l'air chaud et humide qui entre dans la vallée donne des pluies entre le début de la vallée, à environ 1350 mètres d'altitude, et le village de Lama Hotel, à 2480 mètres. Nous avons mesuré à cet

endroit de l'ordre de 2500 millimètres de précipitations annuelles, ce qui fait de Lama Hotel le lieu le plus humide de la vallée. Kyanjin, à 3900 mètres d'altitude et seulement 15 kilomètres plus à l'est, ne reçoit que 800 millimètres d'eau chaque année: bien que tout proche, il est trois fois moins arrosé.

La position et la forme des montagnes créent d'autres effets locaux. Si l'on monte de Kyanjin au glacier Yala situé à 5300 mètres, les précipitations augmentent de nouveau, de 40% en moyenne. L'ensemble des divers processus locaux ou à l'échelle de la vallée façonnent la répartition des pluies et de la neige dans la région. Ainsi, le débit de la rivière observé au cours du temps en aval de la vallée est par exemple très différent s'il pleut surtout à basse altitude ou s'il neige surtout en hauteur.

Pour comprendre la dynamique des châteaux d'eau naturels, nous avons particulièrement étudié la dynamique du manteau neigeux proche du glacier Yala. La quantité d'eau présente dans ce manteau – ce que l'on nomme l'«équivalent en eau de la neige» – dépend des chutes de neige, puis de comment cette neige se répartit sous l'effet du vent, fond, regèle et se sublime. Les instruments de mesure installés dans notre camp de base à 5300 mètres d'altitude permettent d'estimer et quantifier la plupart de ces processus. Les conditions peuvent y être très rudes: le



Le camp de base sur le glacier Yala, à 5 300 mètres d'altitude (ci-dessus), est le point de départ d'expéditions bisannuelles destinées à installer des équipements et à collecter les données des instruments de mesure disséminés dans les montagnes (ci-contre). Les chercheurs (dont l'auteur, en veste bleue sur la structure métallique), doivent aussi assurer l'entretien des capteurs, qui sont soumis à des conditions extrêmes.

froid extrême a déjà fait exploser des batteries, des vents violents ont abîmé des capteurs et des avalanches ont parfois fait tomber la structure sur laquelle ils sont installés.

MESURER LA SUBLIMATION

La mesure de la sublimation, processus turbulent qui se produit dans des conditions froides, ensoleillées, venteuses et sèches, courantes durant l'hiver himalayen, est particulièrement délicate. Des instruments, tels ceux que nous avons installés à 5 600 mètres d'altitude, nous ont permis de la quantifier à partir des variations de l'humidité et de la température de l'air. Nous avons constaté que dans les endroits exposés au vent, environ 21% de la neige tombée ne finit jamais dans les rivières, mais se sublime dans l'atmosphère. Cela suggère que même à des températures très inférieures à 0 °C, le manteau neigeux peut se réduire.

Nous avons aussi mis en évidence que lorsque la température de l'air est inférieure à 0 °C à deux mètres au-dessus de la neige, il y a assez d'énergie à sa surface pour la faire fondre. Cette énergie est apportée par le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde, par le rayonnement de grandes longueurs d'onde (infrarouges) émis par la surface et l'atmosphère, et par des flux de chaleur turbulents. D'intéressants phénomènes se produisent aussi à l'intérieur du manteau neigeux : au moins 30% de la neige qui s'y transforme en eau liquide pendant la journée regèle au cours de la nuit. La fonte du manteau neigeux nécessite beaucoup plus d'énergie que celle que l'on calculerait en ne considérant que sa masse.

Nous avons aussi installé au-dessus de la neige un instrument qui mesure le rayonnement gamma émis naturellement par les roches sous-jacentes. L'atténuation de ce rayonnement par la neige permet en effet d'estimer approximativement la quantité d'eau stockée dans le manteau neigeux.

Parfois, nous recueillons des données par des voies inattendues. Il y a environ huit ans, un collègue travaillant en Tasmanie a fait voler des drones au-dessus d'un glissement de terrain et a

ainsi collecté des informations intéressantes sur le volume de roches concerné et sur la vitesse de leur mouvement. Nous nous sommes rendu compte que la même méthode était susceptible de nous fournir des données sur les glaciers couverts de débris rocheux, particulièrement difficiles d'accès. Nous avons ainsi fait voler en 2013 notre premier drone, au-dessus d'une langue glaciaire située juste au-dessus de Kyanjin.

Le drone a pris sous divers angles des centaines de photos de ce glacier. Un logiciel les a ensuite exploitées pour déterminer le relief de la surface de glace avec la remarquable résolution d'une dizaine de centimètres. En répétant ces relevés tous les six mois environ jusqu'en 2019, nous avons découvert que, chaque année, le glacier s'amincit d'environ 80 centimètres, tandis que son front recule de quelque 40 mètres ; de plus, il ne s'écoule presque plus de glace. Bientôt, cette masse froide ne pourra plus être considérée comme un glacier, mais plutôt comme une langue de glace en voie de dépérissement, à l'image d'un tas de neige sale au bout d'un parking.

En théorie, un glacier couvert de débris, qui font l'effet d'isolants thermiques, devrait, à la même altitude, fondre beaucoup plus lentement qu'un glacier blanc. Nous avons toutefois identifié à la surface de tels glaciers noirs des zones singulières où la fonte est accrue et qui amplifient donc la perte de masse du glacier. Nous ne les aurions jamais identifiées sur des images satellitaires, de résolution trop faible.

Nous rassemblons toutes ces pièces du puzzle dans nos modèles afin d'estimer les quantités d'eau qui couleront dans les rivières. Toutefois, avant de prédire l'évolution des débits, il nous faut savoir combien d'eau les rivières transportent aujourd'hui.

MESURER LES DÉBITS DES RIVIÈRES

Le niveau d'un cours d'eau ne suffit pas pour déterminer son débit. Pour ce faire, on a besoin de la « courbe de tarage », qui donne la relation entre le niveau d'eau et le débit du cours d'eau considéré. Cette courbe doit être assez complète pour indiquer tant les débits élevés pendant la mousson que les débits faibles l'hiver.

Obtenir des données fiables à cet égard n'est pas une mince affaire. Nous pouvons utiliser soit des capteurs de pression placés au fond des rivières dans un tube d'acier, soit des capteurs radar de niveau installés quelques mètres au-dessus de la surface de l'eau. Nous pouvons aussi mesurer le débit en jetant une quantité connue de sel en un point de la rivière, puis en mesurant l'augmentation de la conductivité de l'eau quelques dizaines de mètres en aval. Même si les conditions sont moins difficiles que celles régnant sur le glacier Yala, il arrive pendant la mousson que des inondations emportent nos

ÉTABLIR LE BILAN DE MASSE DES GLACIERS

Depuis 2002, des équipes françaises sont actives dans l'Himalaya. Avec leurs partenaires locaux, elles se concentrent sur un glacier situé au nord de l'Inde et, depuis 2007, sur trois glaciers de la région népalaise de l'Everest. L'objectif est de déterminer le bilan de masse, variable qui reflète le mieux l'état des glaciers année après année, car elle permet de quantifier leur apport d'eau aux rivières et à l'océan. En Himalaya ou ailleurs, deux grandes techniques sont déployées à cette fin.

La première, dite « glaciologique », repose sur des mesures de terrain effectuées en général une fois par an. Elle concerne d'une part la zone d'accumulation,

là où le glacier gagne plus de neige qu'il n'en fond. Des sondages accompagnés de mesures de densité permettent d'y déterminer l'épaisseur de neige déposée en une année. Elle est appliquée d'autre part plus bas en altitude, où des jalons en bois implantés dans la zone d'ablation de la glace nous informent sur la quantité de glace disparue. En extrapolant ces relevés ponctuels, on obtient le bilan de masse, exprimé par l'épaisseur d'une lame d'eau uniforme étendue à la surface du glacier.

Depuis le début des mesures, les glaciers suivis en moyenne perdu l'équivalent de 0,5 à 1,5 mètre d'eau par an. Ceux situés le plus bas en altitude, dont la zone d'accumulation est souvent réduite à néant, affichent des pertes record. Le bilan de masse de chaque glacier suivi varie cependant beaucoup d'une année à l'autre. Positif les années où des typhons entraînent de grosses chutes de neige, il est le plus souvent négatif, comme cela l'a été au cours des six dernières années, caractérisées par une très forte fonte.



Un glaciologue examine un jalon en bois servant à mesurer l'évolution de la surface d'un glacier d'une année sur l'autre. On distingue au fond l'Everest (à droite sous un panache) et plusieurs grands glaciers.

La seconde technique, dite « géodésique », repose sur les données satellitaires. La comparaison de cartes topographiques réalisées à quelques années d'intervalle permet de mesurer les variations d'altitude de la surface du glacier, dont on déduit la variation de volume. En faisant une hypothèse raisonnable sur la densité de la neige ou de la glace, on détermine alors la variation de masse glaciaire. Appliquée aux images de très haute résolution comme celles du couple de satellites *Pléiades* du Cnes, cette technique aide à vérifier les bilans mesurés sur le terrain. Mais la méthode géodésique démontre surtout son potentiel quand on l'applique à l'ensemble des

glaciers des hautes montagnes d'Asie. Elle nous a permis de caractériser leur évolution depuis 2000, de mettre en évidence de fortes pertes en Himalaya, notamment au sud-est du plateau tibétain où les glaciers perdent plus de 0,6 mètre d'eau par an. Plus à l'ouest, les glaciers du Karakoram, de l'est du Pamir et du massif du Kun Lun sont presque à l'équilibre. Une exception dont les travaux de l'équipe de Walter Immerzeel aident à élucider l'origine.

ÉTIENNE BERTHIER ⁽¹⁾
et PATRICK WAGNON ⁽²⁾

⁽¹⁾CNRS-Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (Legos), Toulouse

⁽²⁾IRD-Institut des géosciences de l'environnement, Grenoble

> appareils de mesure. Malgré ces difficultés, après des années d'effort, nous avons aujourd'hui une assez bonne idée des quantités d'eau qui s'écoulent dans les rivières.

Ainsi, depuis plusieurs années, nous intégrons les résultats obtenus sur divers bassins versants himalayens dans un modèle qui décrit tous les processus dont dépend le débit des rivières de l'Himalaya; d'autres chercheurs font de même pour d'autres régions montagneuses du monde. D'abondants ensembles de données sont par exemple disponibles pour les Alpes et les Andes; et la connaissance de ce qui se passe en Himalaya s'améliore, depuis que des chercheurs des universités de Katmandou et de Tribhuvan amassent des données dans des bassins versants situés à plus haute altitude encore, dans les massifs de l'Annapurna et de l'Everest.

Par ailleurs, il faut, pour les prévisions, prendre en compte les effets du changement climatique, par exemple le fait que les montagnes se réchauffent plus vite que les plaines en raison de rétroactions atmosphériques liées à la formation de nuages, à l'humidité et à la diminution de l'albédo (le pouvoir réfléchissant de la surface) due à la réduction du manteau neigeux. Un réchauffement global de la planète de 1,5 °C signifiera ainsi un réchauffement de 2,1 °C dans l'Himalaya.

Au-delà de l'étude du bassin versant du Langtang, mon équipe a aussi réalisé des simulations hydrologiques à l'échelle de la planète pour quantifier l'approvisionnement en eau des rivières. Dans ces travaux, publiés en 2020, nous proposons une classification des réservoirs d'eau naturels de montagne du monde entier (voir l'encadré pages 28 et 29).

LES GRANDS CHÂTEAUX D'EAU DE LA PLANÈTE RECENSÉS ET CLASSÉS

Nous considérons comme « important » un réservoir s'il est riche en glaciers, en neige ou en lacs et s'il alimente une forte population en aval. Parmi les plus importants châteaux d'eau naturels, citons ceux du Colorado, du Fraser dans l'ouest du Canada, du Río Negro en Argentine, des Alpes dont dépendent le Rhin et le Pô.

Cette vaste modélisation montre que les bassins versants asiatiques, qui alimentent de grands fleuves tels que l'Amou-Daria et l'Indus, sont les plus importants de la planète. Ils sont aussi parmi les plus vulnérables: les modèles prévoient de forts taux de réchauffement dans ces régions ainsi qu'une croissance rapide de leurs populations et de leurs économies, ce qui augmentera énormément les besoins en eau. La disponibilité moyenne en

eau ne devrait pas diminuer avant le milieu du siècle, en partie grâce à l'augmentation des pluies de mousson, mais les prévisions à plus long terme sont sombres. Nous prévoyons ainsi que 50 à 60% du volume de glace seront perdus d'ici à la fin du siècle, à moins que l'humanité ne réduise radicalement ses émissions de gaz à effet de serre.

À court terme, le grand défi pour les populations de ces régions d'Asie sera de faire face aux changements du régime des rivières et aux risques naturels. Dans certains bassins, la fonte des neiges débutera peut-être plusieurs semaines plus tôt qu'auparavant, ce qui obligera les agriculteurs à modifier leurs cultures ou à décaler les semailles. Les accumulations de neige, moins intenses, auront un rôle tampon plus limité. On peut donc s'attendre à une augmentation des niveaux d'eau dans les rivières dans une région du monde déjà confrontée à de fortes inondations chaque année.

Les pluies extrêmes dans les montagnes provoquent aussi davantage de glissements de terrain, notamment lors de la mousson. Une fonte accrue remplit les lacs glaciaires à ras bord, provoquant des inondations désastreuses lorsque les barrages morainiques qui les endiguent cèdent sous la pression de l'eau. Au cours des deux dernières décennies, les catastrophes naturelles telles que les avalanches, les glissements de terrain et les inondations soudaines ont fait des milliers de victimes et causé des milliards d'euros de dommages matériels. L'augmentation future des précipitations extrêmes et le réchauffement vont exacerber ces risques. Les dégâts se multiplieront aussi, car les populations en croissance construisent des villes et des barrages hydroélectriques à des altitudes croissantes.

Bien que ces tendances générales soient claires, chaque région doit être étudiée en détail afin que l'on puisse fournir à ses habitants des informations pertinentes.

Ainsi, la partie de l'Asie centrale reliant les chaînes orientales du Pamir et du Karakoram à la partie occidentale de la cordillère de Kunlun constitue une anomalie. Les glaciers y sont stables, voire grandissent, ce que l'on ne voit presque nulle part ailleurs sur la planète. Les données recueillies l'année dernière suggèrent que le développement des activités agricoles et de l'irrigation dans le bassin du Tarim tout proche pourrait jouer un rôle. L'eau prélevée dans les nappes phréatiques et les sources pour irriguer les champs s'évapore dans l'atmosphère. L'évapotranspiration des cultures contribue encore à augmenter l'humidité de l'atmosphère. Et cette vapeur d'eau vient se condenser au-dessus des montagnes pour former de la neige. Cela illustre une fois de plus à quel point les activités humaines modifient les écosystèmes.

Les recherches sur le cycle de l'eau à haute altitude font déjà prendre conscience de l'importance de l'eau en montagne pour des milliards de personnes dans le monde. Les autorités devraient commencer à agir dès maintenant pour la sauvegarder.

QUELLES POLITIQUES POUR LES MONTAGNES ?

La première étape consiste à inclure les montagnes dans les discussions plus larges sur la préservation des ressources naturelles de la Terre. Au niveau local, les autorités peuvent créer des parcs nationaux afin de protéger les hautes montagnes du développement. Elles peuvent mettre en place des politiques visant à réduire la pollution et les émissions de suie, afin de diminuer le nombre de particules en suspension dans l'air. Elles peuvent aussi faire construire des réservoirs pour stocker l'eau provenant de la pluie ou de la fonte du manteau neigeux au printemps – à condition d'analyser les effets de telles structures sur l'hydrologie et les écosystèmes.

Un bon exemple nous vient de la vallée du Langtang. Il y a encore deux ans, le village le plus haut de la vallée n'avait pas d'électricité; puis, avec l'aide d'une organisation non gouvernementale, les villageois ont construit une centrale hydroélectrique qui leur fournit aujourd'hui de l'électricité et un accès à internet.

Des pays voisins auraient intérêt à collaborer afin de réduire la demande d'eau et de réguler les prélèvements sur les cours d'eau qui traversent des frontières nationales. Des ministres de huit pays allant de l'Hindou Kouch à l'Himalaya ont montré l'exemple en octobre 2020: réunis lors d'un sommet consacré à la montagne, ils se sont engagés par écrit à s'appuyer sur la science pour améliorer les politiques relatives à la montagne, à écouter les populations très diverses de la région et à parler d'une seule voix dans les négociations internationales. L'approvisionnement en eau de millions de personnes en Afghanistan, au Bangladesh, au Bhoutan, en Chine, en Inde, au Myanmar, au Népal et au Pakistan dépend en effet de l'immense massif montagneux qui s'étend de l'Hindou Kouch à l'Himalaya. Or le régime des précipitations et les rendements agricoles sont déjà en train de se modifier dans ces régions.

Les hauts sommets de la planète se transforment rapidement. Au cours des prochaines décennies, de nombreux habitants des plaines vont devoir s'adapter à des conditions météorologiques plus extrêmes, à des risques naturels plus importants et à des modifications des ressources en eau. Les chercheurs, les ingénieurs et les autorités politiques doivent unir leurs forces et agir dès maintenant pour garantir que les ressources en eau des montagnes soient durables et que les générations futures continuent d'en bénéficier. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Wagnon et al., **Reanalysing the 2007-19 glaciological mass-balance series of Mera Glacier, Nepal, Central Himalaya, using geodetic mass balance**, *Journal of Glaciology*, vol. 67, pp. 117-125, 2021.

W. W. Immerzeel et al., **Importance and vulnerability of the world's water towers**, *Nature*, vol. 577, pp. 364-369, 2020.

R. Alley, **Le géant Thwaites va-t-il fondre ?**, *Pour la Science*, n° 502, pp. 54-61, juillet 2019.

F. Brun et al., **A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016**, *Nature Geoscience*, vol. 10, pp. 668-673, 2017.

P. Crouzet, **L'eau comptabilisée à l'échelle européenne**, *Pour la Science*, n° 420, pp. 17-18, septembre 2012.

Tester les fondements du modèle du Big Bang

Certains résultats d'observations astrophysiques semblent inconciliables. C'est peut-être le signe que les hypothèses de base du modèle du Big Bang sont à revoir. Il faut donc tester ces prémisses, mais comment ?

En tout juste un siècle, les astrophysiciens ont bâti un modèle mathématique et physique de notre Univers. Ce modèle du Big Bang s'est progressivement imposé, parce qu'il parvient à interpréter et concilier un vaste ensemble d'observations et parce qu'il offre une vision cohérente de l'histoire cosmique. Cependant, des questions sur les premiers instants de l'Univers et sur la nature de son contenu matériel restent encore ouvertes.

Au-delà de ces énigmes, des observations récentes ont fait apparaître des tensions au sein du modèle. Cette situation concerne par exemple la mesure de la constante de Hubble, qui caractérise le taux d'expansion actuel de l'Univers, ou, depuis quelques mois, la densité moyenne de matière baryonique (la matière ordinaire). Diverses méthodes pour en déterminer la valeur, reposant sur des observables très différentes, conduisent actuellement à des résultats incompatibles entre eux. Les astrophysiciens s'efforcent de comprendre l'origine de ces désaccords. Les observations ou une mauvaise interprétation des données sont-elles en cause ?

Ces tensions émergent dans un cadre particulier, le modèle du Big Bang. Celui-ci s'est construit progressivement. Initialement

très qualitatif et peu contraint par les observations, il a évolué grâce aux avancées théoriques et techniques. Les chercheurs ont affiné leur description de l'Univers et le modèle est devenu plus quantitatif. Les paramètres du modèle sont aujourd'hui mesurés avec une précision de l'ordre de quelques pourcents. On parle de « cosmologie de précision » ou de « cosmologie au pourcent ».

Une autre façon d'aborder le problème de ces tensions consiste à se rappeler que tout modèle, comme celui du Big Bang, repose sur un ensemble d'hypothèses qu'il est nécessaire de questionner de façon constante. Alors que la précision des mesures augmente, ces hypothèses, et donc le modèle lui-même, sont-elles toujours adaptées pour interpréter les observations ? Faut-il en abandonner certaines, les modifier ? Avec de nombreux collègues, nous avons exploré cette voie de réflexion. En testant les hypothèses du modèle du Big Bang, notre objectif est de consolider et d'améliorer les fondements du modèle cosmologique, et éventuellement d'identifier des pistes pour résoudre les questions ouvertes et les tensions qui y persistent.

Un modèle, en cosmologie, mais de façon générale en science, est un cadre théorique qui donne une description simplifiée d'un phénomène. Il est voué à

L'AUTEUR



JEAN-PHILIPPE UZAN
cosmologiste du CNRS
à l'institut d'astrophysique
de Paris

© Nasa, ESA, et l'équipe Hubble Heritage (STScI/AURA)

À l'image des « Piliers de la Création », un nuage de gaz photographié par le télescope spatial *Hubble*, quelques hypothèses constituent le socle du modèle du Big Bang. Les progrès observationnels peuvent les remettre en cause, d'où l'importance de tester leur robustesse.



L'ESSENTIEL

> Le modèle du Big Bang décrit l'Univers et son évolution. De nombreuses observations le confirment.

> Il repose sur quelques grandes hypothèses : la nature est décrite par la relativité générale et la physique quantique, l'Univers est homogène et isotrope.

> Ces dernières années, différentes mesures de certaines grandeurs comme la constante de Hubble et la densité de matière baryonique ont abouti à des valeurs incompatibles.

> Les hypothèses du modèle sont peut-être devenues insuffisantes au regard de la précision des observations. Les chercheurs imaginent des façons de les tester.

> évoluer. Par exemple, il faut accepter que certaines questions restent en dehors de son champ explicatif à un moment donné. Les premiers modèles cosmologiques des années 1920, fondés sur la relativité générale d'Albert Einstein, décrivaient la matière comme un «gaz» d'étoiles ou de galaxies dont il suffisait de connaître la densité moyenne. Par construction, ils étaient inadaptés à l'étude de la formation des galaxies et de leur évolution. Ils ont néanmoins permis d'établir un résultat majeur: loin d'être statique, l'Univers est en expansion. Le Russe Alexander Friedmann et le Belge Georges Lemaitre avaient prédit cette dynamique, qui a ensuite été confirmée dès 1929 par l'astronome américain Edwin Hubble en mesurant la vitesse d'éloignement des galaxies en fonction de leur distance. Bien que très limité initialement, ce modèle a fourni le cadre dans lequel allait se construire notre vision actuelle de l'Univers.

UNE CONSTRUCTION PAR ÉTAPES

Le modèle a connu une évolution importante à partir de la fin des années 1930. Des physiciens tels que Robert Herman, Ralph Alpher et George Gamow ont mis en évidence les implications du fait que, dans un espace en expansion, la matière se dilue et se refroidit inévitablement. Ainsi, en remontant le temps, l'Univers devait être dans un état très dense et chaud. Ces chercheurs en ont déduit que les éléments atomiques légers (hydrogène, deutérium, hélium et des traces de lithium) ne pouvaient pas exister dans l'Univers primordial et ont été synthétisés dans les premières minutes de l'histoire cosmique (les autres éléments ne se sont formés que plus tard, dans les étoiles notamment).

On a ensuite compris qu'environ 380 000 ans après le Big Bang, la matière jusqu'alors ionisée est devenue neutre: les noyaux atomiques se sont combinés avec les électrons du milieu. L'Univers est ainsi devenu transparent et le rayonnement électromagnétique (les photons) s'est alors propagé librement. On l'observe aujourd'hui sous la forme du «fond diffus cosmologique». Ces prédictions (l'abondance des éléments légers et le fond diffus cosmologique), confirmées par les observations, représentent deux arguments forts en faveur du modèle du Big Bang.

À partir des années 1960, le modèle a évolué pour inclure la question de l'origine et de l'évolution des grandes structures de l'Univers. Grâce au développement des simulations numériques et des grands relevés observationnels, les astrophysiciens ont commencé à étudier comment les galaxies et les amas de galaxies se forment. Puis, dès les années 1980, les théoriciens se sont penchés sur la

dynamique de l'Univers primordial et ont formulé les théories d'inflation, qui rendent compte des «germes» initiaux nécessaires à la formation de ces grandes structures.

Ces quatre grandes étapes de la construction du modèle du Big Bang se reflètent dans son aspect modulaire. Chaque pan de la théorie complète le précédent en abordant des questions qui étaient en dehors de son champ explicatif et en considérant de nouvelles observations. Certains éléments sont plus solides que d'autres: la physique du fond diffus cosmologique ou de la formation des noyaux légers repose sur l'électromagnétisme et la physique nucléaire, théories bien testées en laboratoire, alors que les théories d'inflation sont plus spéculatives et, bien qu'en accord avec les données actuelles, attendent d'être consolidées aussi bien d'un point de vue théorique qu'observationnel.

Le modèle du Big Bang définit le cadre théorique pour prédire et interpréter les observations. Pour le tester, il faut prédire ce qu'un observateur mesurerait, ce qui nécessite de décrire finement la propagation de la lumière et les biais associés à la position de l'observateur, car ce sont ces prédictions qui sont confrontées aux mesures. Le cadre théorique dicte mais restreint aussi les questions et affirmations que nous pouvons poser sur l'Univers, si bien qu'elles ne peuvent être détachées des hypothèses du modèle. Par exemple, l'affirmation que l'Univers est âgé de 13,8 milliards d'années n'est pas le résultat d'une mesure directe, mais une conclusion reposant sur un ensemble d'observations et d'hypothèses (voir l'encadré page 38).

En pratique, on détermine les valeurs des paramètres cosmologiques (dont la définition et le nombre dépendent du modèle; celui du Big Bang en comprend six principaux) qui donnent le meilleur accord entre les prédictions et un jeu d'observations. Quand la qualité des observations augmente, l'estimation des paramètres cosmologiques s'affine. Ainsi, deux observables dont les mesures sont de plus en plus précises peuvent conduire à un désaccord ou une tension qui n'existait pas à un niveau de précision moindre, comme dans le cas de la mesure de la constante de Hubble (voir l'encadré page 40). Il faut alors démontrer que la précision des prédictions théoriques est au moins aussi bonne que celle des observations.

On doit ainsi se demander si ce désaccord remet en question les observables et leur interprétation ou l'une des hypothèses du modèle, s'il s'agit d'un biais que l'on pouvait jusqu'alors négliger ou si le désaccord est annonciateur d'une «nouvelle physique» à découvrir. Si une observation unique peut mettre en défaut la construction théorique, faire évoluer le modèle est plus compliqué. Il >

LE MODÈLE STATIONNAIRE

Dans les années 1940, le Britannique Fred Hoyle et ses collègues ont proposé un modèle cosmologique dit «stationnaire» où une création continue de matière compense la dilution due à l'expansion de l'Univers. Dans ce cas, il n'y a pas de phase primordiale dense et chaude. Ce cadre théorique a longtemps été un concurrent sérieux au modèle du Big Bang. Mais il est tombé en désuétude, principalement à la suite de la découverte du fond diffus cosmologique.

L'UNIVERS, DU BIG BANG À AUJOURD'HUI

À partir de la théorie de la relativité générale et de la physique des particules, les cosmologistes ont développé un cadre théorique censé décrire l'histoire de l'Univers : le modèle du Big Bang. Notre Univers, vieux de 13,8 milliards d'années, aurait émergé d'une phase très

dense et très chaude. En expansion, il se refroidit et a une histoire thermique riche. Le modèle décrit de façon satisfaisante un grand nombre d'observations : le fond diffus cosmologique, l'abondance des éléments légers, la formation des grandes structures, etc.

1 INFLATION

Date et température inconnues
Phase la plus primordiale du modèle cosmologique et encore spéculative, elle rend compte de l'homogénéité de l'Univers à grande échelle et de l'origine de ses grandes structures.

2 BARYOGENÈSE

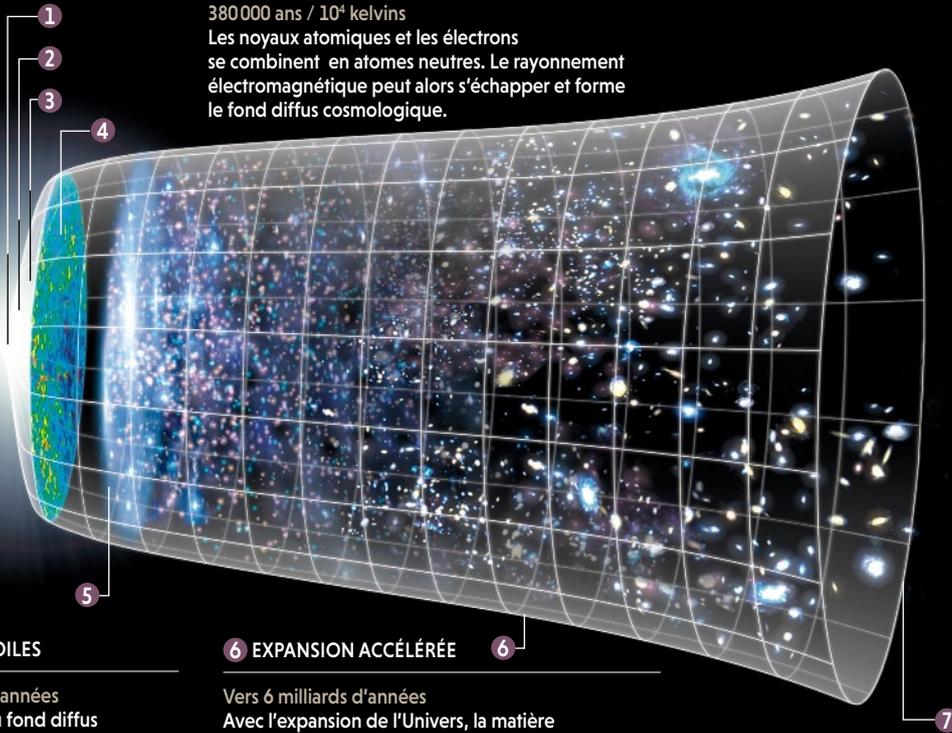
Environ 10^{-32} à 10^{-12} seconde
Période encore mal comprise décrivant la formation des baryons et l'asymétrie entre matière et antimatière.

3 NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE

10^{-3} à 300 secondes / 10^{11} à 10^9 kelvins
Les noyaux atomiques légers (hydrogène, deutérium, hélium et lithium) se forment.

4 FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

380 000 ans / 10^4 kelvins
Les noyaux atomiques et les électrons se combinent en atomes neutres. Le rayonnement électromagnétique peut alors s'échapper et forme le fond diffus cosmologique.



5 PREMIÈRES ÉTOILES

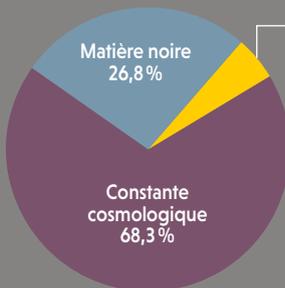
Vers 400 millions d'années
Après l'émission du fond diffus cosmologique, l'Univers est sans étoiles et galaxies. Cette période, les « âges sombres », s'achève avec la formation des premières étoiles.

6 EXPANSION ACCÉLÉRÉE

Vers 6 milliards d'années
Avec l'expansion de l'Univers, la matière et le rayonnement se diluent. L'« énergie sombre » (ou « noire ») devient alors une composante dominante et impose sa dynamique : l'expansion cosmique accélère.

7 L'UNIVERS ACTUEL

13,8 milliards d'années / 2,73 kelvins



Matière ordinaire 4,9 %

LA COMPOSITION ACTUELLE DE L'UNIVERS

Différentes observations ont permis d'estimer le contenu actuel en énergie de l'Univers. La « constante cosmologique » est la composante dominante (68,3 %) ; viennent ensuite la « matière noire » (26,8 %) et la matière ordinaire (4,9 %). Les photons et les neutrinos ne représentent qu'une petite fraction de ce bilan total.

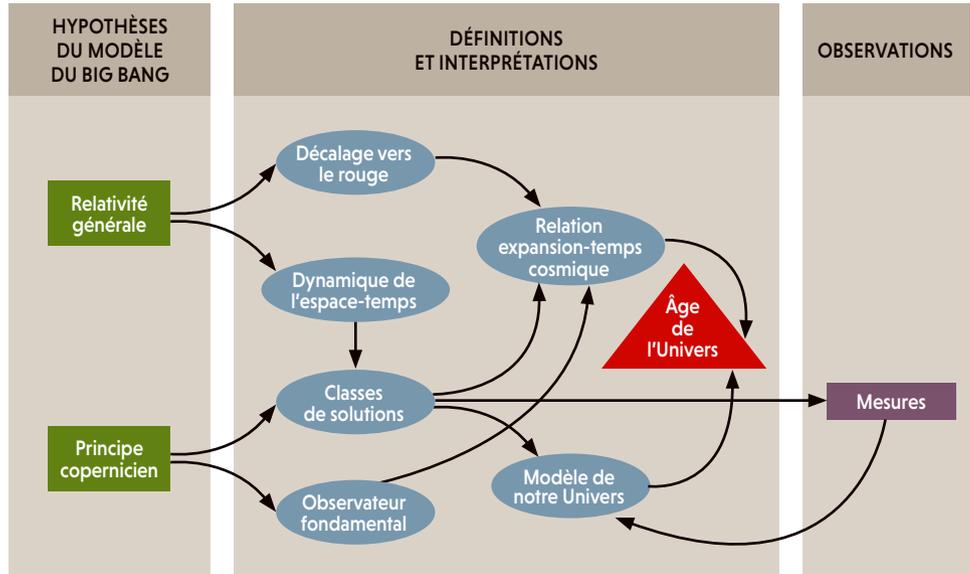
DES QUESTIONS ENCORE OUVERTES

Certains aspects du modèle restent à élucider, comme la nature de la matière noire et de l'énergie sombre. La physique sous-jacente à l'inflation et à la baryogenèse, dans l'Univers primordial, reste très spéculative. Et une théorie quantique de la gravitation sera nécessaire pour décrire les phases antérieures à l'inflation.

QUEL EST L'ÂGE DE L'UNIVERS ?

On affirme que l'Univers a 13,8 milliards d'années. Il ne s'agit bien sûr pas d'une observation directe. Nous pouvons mesurer l'âge de certains objets astrophysiques, ce qui fournit une limite inférieure sur l'âge de l'Univers, mais ce dernier est déduit du modèle cosmologique dans son ensemble. Cette affirmation repose ainsi sur un tissu d'hypothèses et d'observations.

Il faut tout d'abord définir ce qu'est cet âge, à savoir « la durée écoulée entre la singularité initiale et aujourd'hui, mesurée par un observateur fondamental » (il s'agit d'une classe théorique d'observateurs de référence définie par le principe copernicien et dont le temps propre est le temps cosmique, auquel tout observateur réel peut comparer ses mesures).



En effet, rappelons que, en relativité, la durée écoulée entre deux événements dépend de l'état de mouvement des observateurs. Il s'agit donc d'un âge théorique calculé à partir du modèle, que l'on extrapole jusqu'au Big Bang.

Dans le cadre du modèle du Big Bang, l'affirmation repose donc sur la validité de la relativité générale pour décrire la dynamique de l'expansion, pour définir le décalage spectral (le *redshift*) et le relier au temps. Elle repose aussi sur le principe

copernicien, qui opère un choix de solutions cosmologiques, conduit à la définition des observateurs fondamentaux et permet l'interprétation de toutes les observations qui confortent le modèle. Dans un modèle inhomogène, par exemple, le taux d'expansion serait différent en chaque point de l'Univers et la durée entre la singularité initiale et l'observateur dépendrait de la position de ce dernier dans le cosmos. Il n'y aurait donc pas de notion « universelle »

d'âge de l'Univers et il faudrait préciser quel est l'observateur.

Pour finir, les modèles sont ajustés à partir d'un ensemble de données observationnelles, que l'on utilise pour déterminer la meilleure valeur des paramètres cosmologiques. Avec tous ces éléments, il est alors possible de calculer l'âge de l'Univers. Il en va de même pour presque toutes les affirmations sur la chronologie cosmique, par exemple quand on dit que le fond diffus cosmologique a été émis 380 000 ans après le Big Bang.

> faut en effet formuler un nouveau cadre et s'assurer que l'ensemble des observations, qui étaient expliquées dans l'ancien cadre, restent compatibles avec le nouveau modèle.

Deux modèles différents peuvent d'ailleurs être en accord avec le même jeu d'observations. Si l'on peut toujours jauger leur crédibilité respective en se fondant sur des arguments théoriques, il faut surtout identifier une situation pour laquelle les deux modèles font des prédictions assez distinctes pour être discriminées (voir l'encadré page 36), ce qui stimule la réflexion prospective sur les observations ou expériences futures.

Trancher entre deux modèles peut être très difficile. Prenons un exemple. En 1998, en étudiant les supernovæ de type Ia, deux équipes d'astrophysiciens ont montré que l'expansion cosmique est en accélération, un résultat récompensé par le prix Nobel en 2011. L'explication théorique la plus simple et la plus économique était alors d'accepter que la « constante cosmologique » (une constante que les équations de la relativité générale peuvent contenir) n'est pas nulle.

Cette option était déjà incluse dans l'ensemble des possibilités du modèle; il n'était donc pas nécessaire d'en révolutionner la construction, et encore moins de postuler de nouvelles lois physiques. Cependant, l'interprétation physique de la constante cosmologique en tant qu'énergie du vide pose un problème théorique de compatibilité entre cosmologie et physique quantique. Ainsi, d'autres voies sont explorées pour rendre compte de l'accélération de l'expansion: nous pourrions vivre dans une région où la densité moyenne est plus basse qu'elle ne l'est à très grande échelle (voir l'encadré page ci-contre); il pourrait exister un nouveau type de matière (une « énergie sombre » de nature encore inconnue); ou la théorie de la relativité générale aurait une faille.

Actuellement, aucune déviation aux prédictions du modèle standard avec la constante cosmologique n'est observée. Toutes ces explications alternatives doivent donc être indiscernables de celui-ci à la précision actuelle des mesures et sont donc fortement contraintes. Seules de futures observations démontreront

peut-être que l'hypothèse d'une simple constante cosmologique est à écarter.

Cette discussion illustre que l'interprétation des observations n'est pas indépendante du modèle. C'est l'ensemble modèle-observations dont on juge la crédibilité. Un modèle est un outil de travail, un consensus temporaire, nécessairement limité et ouvert à l'évolution. Il permet de formuler des questions et des modèles concurrents. Cette exploration stimule la réflexion sur la façon de les contraindre ou de mettre en évidence leurs signatures propres. Cela conduit à améliorer la précision de la description théorique du modèle, qui doit être au moins aussi bonne que celle des observations. L'apparition de tensions est signe que le modèle lui-même n'a pas la justesse requise pour les interpréter.

Depuis une vingtaine d'années, certains cosmologistes se proposent d'utiliser des observations non pas pour simplement mesurer les paramètres du modèle du Big Bang (la constante de Hubble par exemple), mais pour éprouver la robustesse de ses hypothèses. Ces dernières étaient suffisamment bonnes par le passé, mais ne le sont peut-être plus pour rendre compte d'effets fins que les astrophysiciens sont aujourd'hui capables de mesurer. On passerait ainsi d'une cosmologie de précision à une cosmologie de justesse. Mais, bien sûr, précision des mesures et justesse du modèle vont de pair.

QUATRE HYPOTHÈSES PRINCIPALES

Quelles sont les hypothèses utilisées par les cosmologistes pour bâtir le modèle du Big Bang? Avec du recul, on en distingue quatre majeures, que l'on notera H1, H2, H3 et H4. Les deux premières concernent les lois fondamentales de la nature. Tout d'abord, on suppose que la gravitation est bien décrite par la théorie de la relativité générale (H1). Cela implique que l'Univers est représenté mathématiquement par un espace-temps dont la géométrie est déterminée à partir des équations d'Einstein. Quant à la matière et ses interactions non gravitationnelles (électromagnétique, nucléaires forte et faible), on suppose qu'elles sont décrites par le modèle standard de la physique des particules (H2). Ces deux hypothèses fixent le cadre théorique du modèle.

Mais il faut également inclure la constante cosmologique et supposer l'existence d'un autre type de matière, la matière noire, dont la nature n'est pas encore déterminée. Il s'agit d'ingrédients qui sortent du cadre théorique de référence mais qui offrent une explication phénoménologique cohérente à de nombreuses observations actuelles (du fond diffus cosmologique à la dynamique des galaxies en passant par celles des amas et les effets de lentilles gravitationnelles).

BULLE DE HUBBLE

Dans le scénario dit « bulle de Hubble », la Voie lactée se trouverait dans une région de densité plus faible que la moyenne, dont le rayon serait d'environ 130 millions d'années-lumière. Cela pourrait induire des biais dans les mesures de distances et, par exemple, fausser l'estimation de la constante de Hubble ou même donner l'illusion d'une expansion cosmique qui accélère.

Ce cadre théorique ne constitue pas directement un modèle cosmologique. Prises dans leur pleine généralité, les équations de la relativité générale sont trop complexes à résoudre. Pour obtenir des solutions, les chercheurs sont contraints d'ajouter une ou plusieurs hypothèses simplificatrices. Ils ne cherchent donc pas « la » géométrie de l'Univers, mais une solution approchée qui en donne une bonne description.

D'après les observations, l'Univers paraît sensiblement identique dans toutes les directions. En première approximation, on suppose donc qu'il est isotrope autour de nous. Cette hypothèse d'isotropie s'accompagne du principe copernicien, qui stipule que nous n'occupons pas une position particulière dans l'Univers (H3). Mathématiquement, cela implique que la distribution spatiale de la matière est homogène, que l'expansion de l'espace est la même dans toutes les directions et en tout point, mais qu'elle peut changer dans le temps.

L'hypothèse H3 définit la géométrie locale de l'Univers. Mais différentes topologies, c'est-à-dire différentes structures globales, sont compatibles avec une géométrie donnée. L'espace pourrait être infini ou éventuellement



Un modèle est un consensus temporaire, nécessairement limité et ouvert à l'évolution

se replier sur lui-même et avoir un volume fini. Par exemple, en deux dimensions, un plan infini, un cylindre ou un tore sont des espaces euclidiens dont les structures globales sont clairement différentes. Cette propriété n'est pas déterminée par les équations de la relativité générale. Dans le modèle du Big Bang, on suppose que l'espace n'a pas de structure topologique complexe (H4).

Ces hypothèses sous-tendent l'interprétation de toute observation puisqu'elles interviennent dans les notions de distances et la modélisation de la propagation de la lumière. Ainsi, dans l'idée d'aller au-delà d'une cosmologie de précision vers une cosmologie de justesse, les chercheurs ont proposé un ensemble de tests de ses hypothèses. Évoquons ici le principe de quelques-uns d'entre eux. >

► Pour commencer, la relativité générale est testée avec une extrême précision dans le Système solaire. Cette théorie a par ailleurs conduit à des prédictions conceptuelles majeures qui ont toutes été vérifiées: l'expansion de l'Univers, l'existence des trous noirs et celle des ondes gravitationnelles. Cependant, elle est moins bien testée aux échelles astrophysiques et dans des régimes de très faibles accélérations, qui correspondent à ceux associés à la matière noire et à l'accélération de l'Univers.

Une première façon de mettre à l'épreuve la relativité générale consiste à en tester un élément clé: le principe d'équivalence, qui stipule que tout corps, quelles que soient sa

masse et sa composition chimique, tombe de la même façon dans un champ de gravité extérieur. Depuis 2017, le satellite *Microscope*, du Cnes (Centre national d'études spatiales) et de l'Onera (Office national d'études et de recherches aérospatiales), a testé ce principe avec une précision de l'ordre de 10^{-14} . L'équipe responsable espère améliorer encore la sensibilité de un ordre de grandeur.

UN PRINCIPE AU MICROSCOPE

On peut aussi montrer que le principe d'équivalence est intimement lié au fait que les constantes de la nature ne varient pas dans le temps et l'espace, ce qui est testable en dehors du Système solaire. Depuis des décennies, différentes équipes se sont attachées à mesurer, dans différents systèmes astrophysiques, la valeur de la « constante de structure fine », une constante caractérisant l'interaction électromagnétique. La nucléosynthèse primordiale ou les analyses du satellite *Planck* démontrent que cette constante n'a pas varié de plus de un millième pendant l'histoire de l'Univers; elle n'a pas varié de plus de 10^{-5} (en valeur relative) au cours des dix derniers milliards d'années, d'après l'étude des spectres d'absorption de quasars; les analyses géophysiques amènent la contrainte à moins de 10^{-7} lors des deux derniers milliards d'années, et les comparaisons d'horloges atomiques en laboratoire montrent que la variation est inférieure à 10^{-17} par an.

L'essence de la relativité générale repose sur le fait que la matière courbe l'espace-temps et que cette courbure modifie la trajectoire de tout corps matériel et de la lumière. On doit donc observer une déflexion de la lumière passant près d'un astre massif. Les Britanniques Arthur Eddington et Andrew Crommelin, en 1919, ont été les premiers à réaliser une telle mesure lors d'une éclipse solaire: ils ont vérifié que la déflexion de la lumière émise par une étoile lointaine et frôlant le Soleil est compatible avec le champ gravitationnel créé par notre étoile, dont on connaît la masse par ailleurs grâce à la dynamique des orbites planétaires. La mesure de la déflexion de la lumière est un test de cohérence entre diverses observables (ici, deux mesures de la masse du Soleil) dont la violation indiquerait la défaillance d'une des hypothèses (ici, de la relativité générale). Tant que le test est passé avec succès, cela améliore le domaine de validité des hypothèses et des théories utilisées pour interpréter les données et contraint tout scénario qui reposerait sur une hypothèse différente.

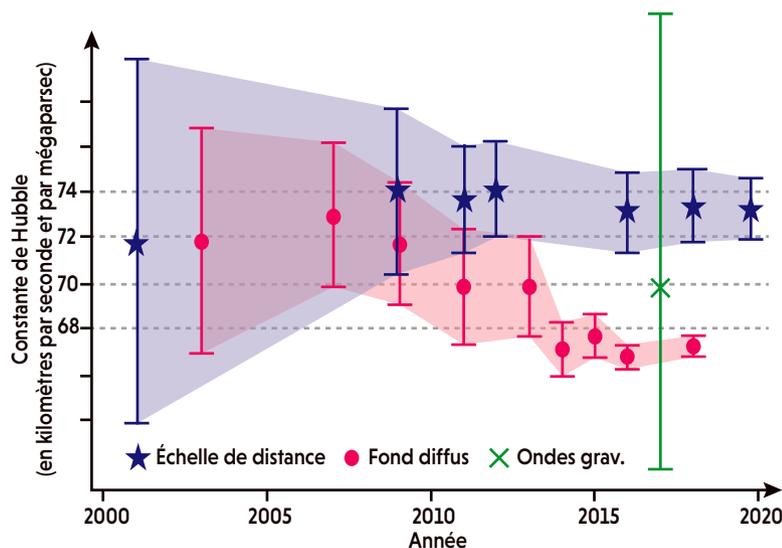
En 2001, Francis Bernardeau, du CEA, et moi avons proposé de généraliser ce test classique de la relativité générale aux échelles astrophysiques. En effet, en 2000, Yannick Mellier, de l'institut d'astrophysique de Paris, et son équipe ont détecté pour la première fois des distorsions

LA TENSION ÉMERGENTE SUR LA CONSTANTE DE HUBBLE

Plusieurs approches principales ont été utilisées pour mesurer la constante de Hubble. L'une d'elles consiste à construire une échelle de distance en utilisant en particulier les supernovæ de type Ia et les céphéides (en bleu); une autre utilise les décalages temporels des effets de lentilles gravitationnelles; une troisième méthode se fonde sur l'analyse du fond diffus cosmologique (en rouge). Au cours du temps, les mesures ont gagné en précision et sont aujourd'hui incompatibles, avec des barres d'erreur qui ne se recouvrent plus. Une nouvelle méthode utilise les ondes gravitationnelles (en vert).

La tension entre les différentes déterminations peut avoir différentes origines possibles. On ne peut exclure un biais mal compris dans au moins l'une des méthodes. Il faut aussi noter le fait que le fond diffus cosmologique sonde l'Univers plus primordial, tandis que les échelles de distances et les lentilles gravitationnelles concernent l'Univers plus récent. L'Univers local pourrait ainsi ne pas être représentatif de l'Univers à grande échelle.

Autre possibilité: contrairement au fond diffus cosmologique, l'observation des supernovæ repose sur des faisceaux lumineux fins sensibles à la structure de l'espace à des échelles plus petites que celle du lissage imposé par l'hypothèse d'homogénéité du modèle du Big Bang. Dans ce cas, on ne pourrait pas interpréter les deux observables avec la même géométrie, ce qui nécessiterait de réanalyser la façon de comparer ces observations. Cette tension pourrait aussi, en dernier recours, être le signe d'une nouvelle physique: les cosmologistes évoquent déjà, par exemple, l'effet de l'énergie sombre dans l'Univers primordial, une interaction avec la matière noire, une modification de la relativité, etc. Toutes ces pistes, et d'autres, sont en cours d'exploration.

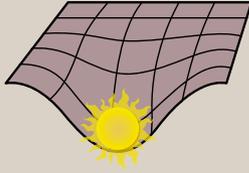


LES HYPOTHÈSES DU BIG BANG

On distingue quatre hypothèses principales sur lesquelles repose le modèle cosmologique du Big Bang. Elles ne sont pas de même nature. Les deux premières, H1 et H2, concernent les lois fondamentales de la nature ; la troisième, H3, est une classe de solutions de ces théories, tandis que la quatrième, H4, est une propriété de ces solutions. On ajoute à ces hypothèses la constante cosmologique et la matière noire, dont la nature est encore inconnue.

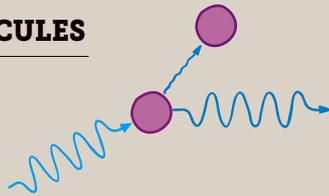
H1 : RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Le modèle suppose que la théorie de la relativité générale d'Einstein décrit la gravitation. Cette force est alors la conséquence des déformations de l'espace-temps, qui sont déterminées par la matière et l'énergie présentes.



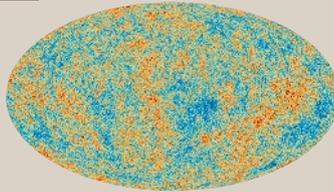
H2 : MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Les interactions non gravitationnelles (électromagnétique, nucléaires forte et faible) de la matière sont décrites par le modèle standard de la physique des particules, qui repose sur la physique quantique.



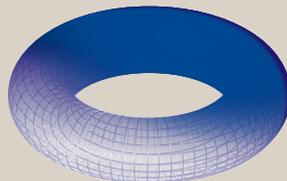
H3 : PRINCIPE COPERNICIEN

Les cosmologistes font l'hypothèse que l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle. Ces hypothèses imposent des symétries dans les solutions qui décrivent l'Univers. Selon ce principe, nous n'occupons pas une place particulière dans le cosmos, et l'Univers que nous observons est alors représentatif de l'Univers dans sa globalité.



H4 : TOPOLOGIE TRIVIALE

La géométrie globale de l'Univers n'est pas contrainte par les hypothèses précédentes. Les observations suggèrent que l'espace est localement euclidien (c'est-à-dire de courbure nulle). Or différentes géométries globales satisfont cette contrainte, par exemple un univers infini ou un univers fini « replié » à la façon d'un tore. Dans le modèle du Big Bang, on suppose que l'Univers n'a pas de structure topologique complexe.



faibles de la forme des galaxies. Ces effets, dits « de lentilles gravitationnelles faibles », sont induits par l'effet gravitationnel de toute la matière présente sur la ligne de visée de l'objet observé sur la lumière qui nous en parvient. Il est alors possible de déterminer la distribution de matière grâce à ces observations, mais aussi, indépendamment, à partir de la distribution des galaxies et de leurs vitesses. En comparant les résultats obtenus par les deux méthodes, on peut tester la relativité. Le satellite *Euclid*, de l'ESA (l'Agence spatiale européenne), qui sera lancé en 2022 devrait mettre en œuvre cette approche.

Les cosmologistes concluent aujourd'hui que près d'un quart du contenu matériel de l'Univers était sous la forme de matière noire. Ce constat indique déjà que l'hypothèse H2 est trop restrictive, puisque le modèle standard de la physique des particules n'inclut pas la matière noire. La cosmologie donne donc des arguments forts pour une physique dépassant le cadre standard, ce qui est stimulant. Les théoriciens ont imaginé de nombreux candidats susceptibles de constituer la matière noire, par exemple les wimps dans les théories supersymétriques, les axions, etc. La non-détection de la matière noire encourage certains chercheurs à explorer l'idée que cette matière ne serait en fait que la manifestation d'une faille dans la théorie de la relativité générale. Ils étudient ainsi des solutions de « gravitation modifiée ». Celles-ci doivent, comme nous l'avons vu, satisfaire toutes les contraintes existantes. Certaines pistes réussissent d'ailleurs à reproduire la dynamique des galaxies, mais aucune ne rend compte de toutes les observations cosmologiques.

Cette situation souligne le caractère inclusif de la cosmologie: toute avancée dans la compréhension des interactions et des constituants fondamentaux doit s'intégrer dans le modèle. Ainsi, quand les physiciens ont découvert que les neutrinos (particules qui interagissent très peu avec la matière ordinaire) ont une masse très faible (et pas nulle comme on le pensait), les cosmologistes ont dû ajuster leur description de la formation des grandes structures de l'Univers.

Quand on étudie l'Univers, il faut garder à l'esprit certaines spécificités. En effet, nous n'avons accès qu'à un seul univers, le nôtre, observé depuis un point unique, ici et maintenant. Nous sommes plongés dans l'expérience que nous tentons de comprendre et nous ne pouvons pas en effectuer d'autres et les comparer. Ce n'est pas tout. Nous n'observons qu'une petite partie de l'Univers, « l'univers observable », qui contient tous les objets dont la lumière a pu nous parvenir. Son existence résulte de la finitude de la vitesse de la lumière et de l'âge de l'Univers.

Dès lors, comment tester la pertinence du principe copernicien alors que nous ne pouvons pas changer de point d'observation? Ce principe était considéré comme invérifiable, ce qui était assez gênant. En 2008, avec mes collègues George Ellis et Chris Clarkson, de l'université du Cap, en Afrique du Sud, nous avons considéré de plus près ce qui semble être une évidence: nous observons bien l'Univers depuis « ici et maintenant », mais « maintenant » change à chaque instant. Cela implique que le décalage spectral de chaque galaxie doit changer de façon imperceptible au cours du temps (voir l'encadré page 42).

TESTER LE PRINCIPE COPERNICIEN

Pour construire le modèle du Big Bang, les cosmologistes ont adopté le principe copernicien qui suppose que nous ne vivons pas dans un lieu cosmique privilégié. Quelle que soit sa position dans l'Univers, l'observateur mesurera, en moyenne, les mêmes propriétés. Comment vérifier ce principe alors que nous ne pouvons pas installer un observatoire dans une autre galaxie ?

Il existe plusieurs possibilités. Il faut d'abord comprendre que, dans le vide, la

lumière se propage toujours à la même vitesse. Un observateur situé en O (figure 1) ne peut donc voir que des objets situés sur son cône de lumière (grisé sur le schéma). Plus un astre est distant, plus sa lumière met du temps à nous parvenir. Ainsi, seule une partie finie de l'Univers est observable, si bien que se pose la question de savoir si notre Univers observable est représentatif de l'Univers dans son ensemble. Par ailleurs, il est impossible d'avoir accès aux propriétés de l'Univers en dehors du cône de lumière.

En raison de l'expansion de l'Univers, le spectre de la lumière émise par une galaxie est décalé vers les grandes longueurs d'onde, le décalage étant d'autant plus important que la galaxie est distante. Ce décalage spectral vers le rouge (nommé *redshift* en anglais et noté z) est mesurable, ce qui n'est en général pas le cas de la distance galactique. On peut déduire celle-ci à partir du *redshift* et de la loi d'expansion cosmique, qui dépend du modèle dans son ensemble.

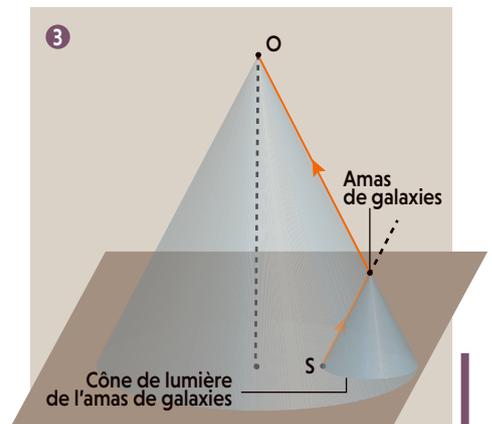
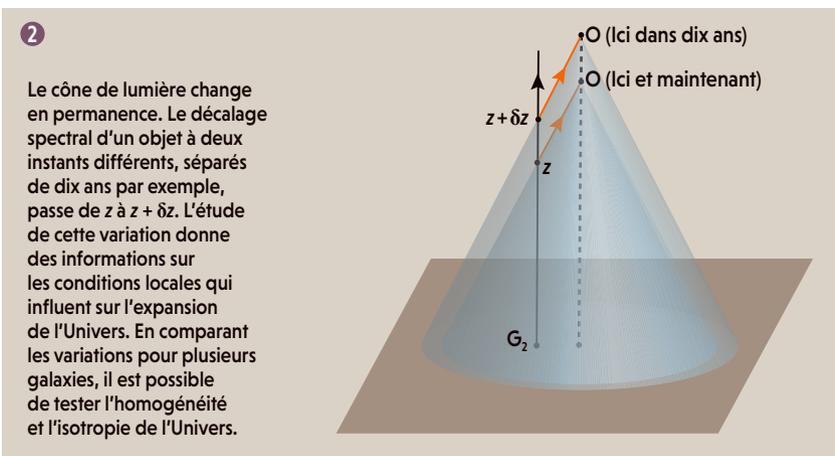
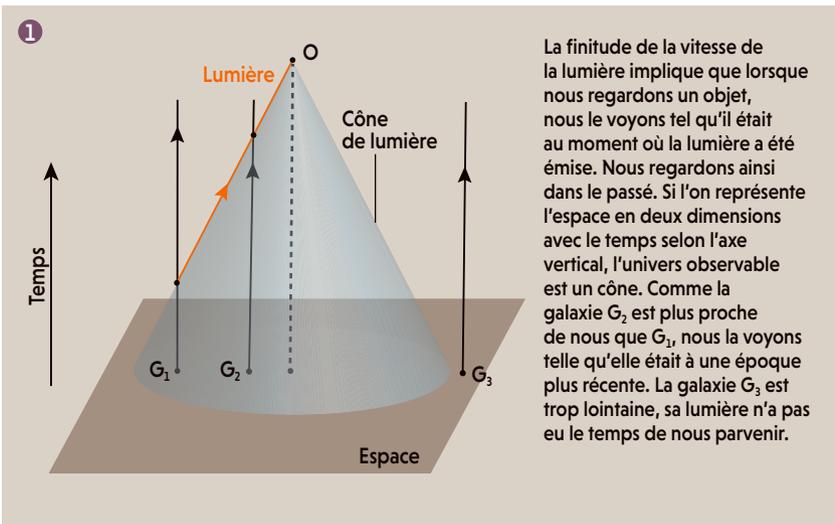
Dès lors, en observant l'Univers à dix ans d'intervalle, on a accès à deux cônes de lumière (figure 2). Durant cet intervalle, le décalage spectral de chaque galaxie change légèrement. Cette variation (δz) donne des informations sur la structure de l'espace en dehors du cône de lumière. En comparant

différents astres le long du cône de lumière, on peut tester le principe copernicien, en tant à profit le fait que l'Univers n'est pas vu depuis le même point d'observation.

Un autre test du principe copernicien repose sur le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement se propage principalement de façon libre depuis son émission 380 000 ans après le Big Bang. Nous l'observons dans

Nous ne pouvons pas installer un observatoire dans une autre galaxie

toutes les directions, telle une sphère qui nous entoure. Son analyse permet de tester l'isotropie de sa température, mais, *a priori*, elle ne fournit aucune information sur l'intérieur de l'Univers observable. Il existe cependant une façon d'accéder à cette information. Une infime partie des photons du fond diffus cosmologique interagissent sur leur trajet avec le gaz chaud des amas de galaxies qu'ils traversent (figure 3). Grâce à cette diffusion, l'« effet Sunyaev-Zeldovich » (du nom des deux physiciens russes qui l'ont proposé, Rashid Sunyaev et Yakov Zeldovich), il est possible de reconstruire certaines propriétés du fond diffus cosmologique tel qu'il serait vu depuis cet amas de galaxies, et donc d'avoir des informations à l'intérieur de notre cône de lumière.



Le fond diffus cosmologique a été émis quand l'Univers avait 380 000 ans. Nous en voyons aujourd'hui la partie qui se trouve sur le cône de lumière, et pas celle à l'extérieur ou celle à l'intérieur. Pour cette dernière cependant, la diffusion par le gaz d'amas de galaxies sur son parcours peut la mettre sur notre cône de lumière. On a alors accès à des informations sur l'aspect du fond diffus cosmologique vu depuis l'amas.

> Nous avons montré qu'il est possible de construire un test du principe copernicien en combinant cette dérive des décalages spectraux à d'autres mesures de distance. Dans les années 1960, les Américains Alan Sandage et George McVittie avaient calculé que cette dérive était très faible, de l'ordre de 10^{-10} en valeur relative en 10 ans pour un objet distant de 5 milliards d'années-lumière. Un tel effet était au-delà de toute mesure possible, ce qui était rassurant, car cela assurait la stabilité des mesures de spectres astrophysiques sur des échelles de temps de plusieurs siècles. Mais avec les développements de la spectrographie à haute résolution, une telle dérive semble aujourd'hui accessible au futur *E-ELT* (*European Extremely Large Telescope*) et son miroir de 39 mètres en construction sur le Cerro Armazones, dans le désert d'Atacama, au Chili.

Presque simultanément, une autre méthode reposant sur l'observation d'amas de galaxies a été proposée (*voir l'encadré page ci-contre*). Ainsi, le progrès des techniques observationnelles a permis de tirer des informations sur l'Univers «vu d'ailleurs», ce qui est la clé des tests du principe copernicien. Actuellement, nous n'avons que des confirmations indirectes de la validité de l'homogénéité spatiale et il faudra attendre pour la mise en œuvre de ces tests.

L'ISOTROPIE MISE EN DOUTE

Se pose aussi la question de l'isotropie de l'expansion cosmique. L'analyse de la carte des températures du fond diffus cosmologique semble conforter cette hypothèse. Mais jusqu'à quelle précision est-elle valide? Au printemps 2020, en analysant un catalogue de 313 amas de galaxies, et en utilisant une relation phénoménologique entre leur température et leur luminosité, Konstantinos Migkas, de l'université de Bonn, et ses collègues ont annoncé que le taux d'expansion, et donc la constante de Hubble, varierait de plus de 15% selon différentes directions dans l'Univers récent. Ce résultat demande à être confirmé et il faut aussi comprendre pourquoi cette anisotropie n'a pas eu d'impact sur d'autres observables, comme le fond diffus cosmologique.

Le satellite *Euclid* sera encore une fois un outil efficace pour évaluer les écarts à l'isotropie. En effet, comme nous l'avons montré en 2015 avec Cyril Pitrou, de l'institut d'astrophysique de Paris, et Thiago Pereira, de l'université d'État de Londrina, au Brésil, il devrait être possible de mettre en évidence une anisotropie de l'ordre de 1% à partir de l'analyse des distorsions gravitationnelles. D'un point de vue théorique, cette anisotropie, si elle est confirmée, pourrait être apparue tardivement. Elle pourrait être liée à l'accélération de l'expansion et éventuellement à une propriété de l'énergie sombre, ce

qui serait une avancée inestimable dans la compréhension de cette dernière.

Soulignons que dans leur boîte à outils, les cosmologistes ont de nombreux modèles cosmologiques qui ne reposent pas sur l'hypothèse H3: des univers homogènes mais anisotropes (l'expansion n'est pas la même dans toutes les directions) ou hétérogènes (qui peuvent alors avoir un centre). Ces derniers permettent de quantifier les effets d'un écart à l'homogénéité et à l'isotropie et ainsi d'évaluer la pertinence de ce choix.

Soulignons que l'Univers n'est ni homogène ni isotrope de façon évidente. La matière se regroupe dans des galaxies qui s'alignent en amas le long de filaments et qui délimitent de grands espaces vides. Le modèle cosmologique considère ainsi la géométrie de l'Univers moyenné à une certaine échelle, qui n'est pas spécifiée explicitement, et qui est bien plus grande que la distance moyenne entre deux galaxies.

En 2017, avec Pierre Fleury, de l'université autonome de Madrid, et Julien Larena, de l'université du Cap, nous avons soulevé la question difficile de savoir si la géométrie moyenne de l'Univers permet d'interpréter toutes les observations avec la précision requise. En effet, comme la géométrie détermine la propagation de la lumière, il faut démontrer que les déviations à petite échelle entre la géométrie «réelle» et la géométrie moyenne ne sont pas à l'origine de biais dans l'analyse des observations reposant sur des faisceaux lumineux fins (comme c'est le cas pour des objets ponctuels comme des supernovæ, mais pas pour le fond diffus cosmologique).

Enfin, la structure topologique (l'hypothèse H4) a été abondamment discutée depuis plus de trente ans. L'analyse des données du satellite *Planck* montre que l'Univers ne peut pas être plus petit que 96% de la taille de l'univers observable. Mieux, on peut montrer que si sa taille dépasse celle de l'univers observable de 15%, alors on ne peut pas distinguer un Univers très grand, mais fini, d'un Univers infini. Il est d'ailleurs impossible de prouver par l'observation que l'Univers est infini. Seuls des arguments théoriques peuvent éventuellement être utilisés.

La plupart de ces tests seront mis en œuvre dans les années à venir et il sera intéressant d'évaluer la justesse des hypothèses actuelles. Avec les tensions naissantes, ces tests fourniront peut-être des indices, qui serviront de fil d'Ariane providentiel pour mener à une meilleure compréhension de l'origine de l'accélération cosmique et de la nature de la matière noire. Ce fil servira aussi à faire évoluer le modèle du Big Bang ou à le modifier, ou il améliorera son domaine de validité, confortant ainsi certaines de ses conclusions. Cela aussi fait partie d'un modèle vivant. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Pitrou et al., **A new tension in the cosmological model from primordial deuterium ?**, *MNRAS*, stab135, 20 janvier 2021.

K. Migkas et al., **Probing cosmic isotropy with a new X-ray galaxy cluster sample through the L_x - T scaling relation**, *Astron. Astrophys.*, vol. 636, A15, 2020.

A. G. Riess et al., **The accuracy of the Hubble constant measurement verified through cepheid amplitudes**, *Astrophys. J. Lett.*, vol. 896(2), L43, 2020.

F. Combes, **Le Big Bang**, Que Sais-je ?, 2019.

J.-P. Uzan, **Big Bang. Comprendre l'univers depuis ici et maintenant**, Flammarion, 2018.

SUR LE WEB

Conférence de J.-P. Uzan (TimeWorld 2019), **Peut-on affirmer que l'Univers a 13,8 milliards d'années ?**, http://bit.ly/PLS521_Uzan1

Conférence de J.-P. Uzan (SFP, janvier 2020), **Le statut du modèle cosmologique**, http://bit.ly/PLS521_Uzan2

La stupéfiante attaque de la guêpe émeraude

Kenneth Catania





Comment la guêpe émeraude transforme-t-elle une blatte en garde-manger vivant pour sa progéniture ? Bien que déjà beaucoup étudié, le mode opératoire de cet insecte réservait encore des surprises.

La guêpe émeraude utilise une blatte américaine qu'elle réduit à l'état de zombie afin d'y déposer son œuf, la future larve ayant alors de quoi se nourrir et se développer.

L'ESSENTIEL

> Grâce à deux piqûres bien précises dans le système nerveux, la guêpe émeraude paralyse une blatte américaine et la transforme en zombie, avant de pondre sur elle un œuf.

> De cet œuf éclosa une larve qui dévorera la blatte de l'intérieur.

> L'auteur a récemment découvert qu'afin de bien placer son œuf, la guêpe inflige à la blatte des piqûres supplémentaires.

> Il a aussi mis en évidence le comportement de défense de la blatte.

L'AUTEUR



KENNETH CATANIA
professeur de sciences
biologiques à l'université
Vanderbilt, à Nashville,
aux États-Unis

« **V**ous n'avez pas encore compris à qui vous avez affaire? À un parfait organisme! Et sa perfection structurale n'a d'égal que son hostilité [...]. J'admire sa pureté. Un survivant qui n'est pas souillé par la conscience, le remords ou les illusions de moralité. » Ainsi l'androïde Ash décrit-il le monstre extraterrestre dans le film *Alien* (1979) du réalisateur Ridley Scott. Cette superproduction a fourni matière à cauchemars à toute une génération de passionnés de science-fiction: une créature extraterrestre s'accroche au visage d'un membre de l'équipage du vaisseau spatial *Nostramo* et implante un embryon qui, plus tard, sortira de la poitrine de la victime en la faisant éclater. Techniquement parlant, l'extraterrestre est un parasitoïde, un organisme qui, contrairement à la plupart des parasites, finit par tuer son hôte. Ceux qui ont vu le film n'oublieront jamais comment il se reproduit...

Récemment, j'en suis arrivé à partager certains des sentiments d'Ash vis-à-vis des parasitoïdes éclateurs de poitrine. Mais je ne parle pas des monstres extraterrestres. Je fais allusion à ce qui semble ici, sur Terre, s'en rapprocher le plus: la guêpe émeraude (*Ampulex compressa*), qui transforme la blatte américaine (*Periplaneta americana*) en zombie, voire pire.

Étant neurobiologiste, je donne chaque automne un cours sur les cerveaux et le comportement des animaux à l'université Vanderbilt. À Halloween, j'aime bien présenter de la biologie un peu terrifiante, ce qui permet aux étudiants de mémoriser facilement quelques éléments de neurosciences. Quand j'ai pris comme sujet de cours la guêpe émeraude, cette espèce m'a tellement intrigué que j'ai fait venir quelques guêpes dans mon laboratoire pour observer leur comportement par moi-même. J'ai commencé par prendre des photos et faire quelques vidéos pour mes étudiants, mais je me suis vite retrouvé à effectuer des recherches sur cet étonnant insecte.

Cette jolie guêpe était déjà bien connue pour être un parasitoïde. Mais mes expériences, publiées en 2018 et 2020, m'ont appris qu'elle est encore plus remarquable qu'on ne l'avait pensé; et que le cafard déploie lui-même des astuces pour se défendre.

UN CONTRÔLE D'UNE PRÉCISION... NEUROCHIRURGICALE!

Avant de vous dire ce que j'ai découvert et qui m'a rempli d'admiration pour cet insecte, je dois vous expliquer comment celui-ci est devenu célèbre. Pour se reproduire, la guêpe femelle a besoin de trouver un hôte qui nourrira sa progéniture. Comme de nombreuses espèces de parasitoïdes, la guêpe émeraude est une spécialiste qui n'a qu'un seul hôte, en l'occurrence la blatte américaine. Cette cible est l'une des raisons pour lesquelles la guêpe émeraude est si populaire, même parmi ceux qui ont la phobie des insectes: comme on dit, « l'ennemi de mon ennemi est mon ami ».

Mais chez les biologistes, la guêpe émeraude suscite le respect pour sa remarquable stratégie d'attaque. Dans les années 2000, Frédéric Libersat, de l'université Ben-Gourion, en Israël, et ses collègues – dont le spécialiste des venins Michael Adams, de l'université de Californie à Riverside – ont mené une série d'élégantes études qui racontent une histoire digne de la science-fiction.

Ici, sur Terre, la guêpe émeraude est ce qui se rapproche le plus du monstre d'Alien

Tout commence lorsqu'une guêpe émeraude femelle repère un malheureux cafard. Elle déploie alors une attaque incroyablement précise et élaborée. Elle réalise une véritable neurochirurgie pour paralyser son hôte, en piquant d'abord le cafard directement dans un composant du système nerveux central, le «premier ganglion thoracique». Cette structure abrite les neurones moteurs qui contrôlent les pattes antérieures du cafard. Le venin de la guêpe contient de l'acide gamma-aminobutyrique (Gaba), un neurotransmetteur inhibiteur qui éteint les neurones moteurs et paralyse temporairement les pattes. Cette première frappe chirurgicale laisse le cafard incapable de protéger sa tête contre la piqûre suivante, que la guêpe administre, à travers les membranes souples de son cou, directement dans son cerveau. Cette deuxième dose de venin a pour effet de transformer le cafard, d'adversaire dangereux et se débattant violemment, en un hôte docile et calme, c'est-à-dire un zombie.

À partir de là, le cafard se retrouve dans une situation fort délicate. Le venin injecté par la piqûre au cerveau contient de la dopamine, un neurotransmetteur qui fait que le cafard se toilette sans cesse les pattes et les antennes alors qu'il devrait plutôt tenter de s'échapper. Pendant ce temps, la guêpe part à la recherche d'une cavité cachée où elle pourra enfouir le cafard avec un œuf collé sur lui.

Une fois l'endroit approprié trouvé, la guêpe revient auprès de la blatte et fait quelque chose qui pourrait sembler gratuit dans un film d'horreur. Elle saisit l'une des antennes du cafard et la sectionne avec ses mâchoires, ne laissant qu'un moignon. Elle fait ensuite de même avec l'autre antenne et utilise les moignons comme des pailles pour boire le sang (plus précisément l'hémolymphe) du cafard. On peut considérer ce liquide comme un complément alimentaire de choix pour la guêpe, qui lui apporte énergie et nutriments après la lutte intense.

Ensuite, la guêpe saisit l'un des moignons d'antenne et, en marchant à reculons, tire le cafard, lequel suit comme un chien en laisse. Arrivée dans la cavité qu'elle avait choisie, la guêpe colle un petit œuf sur la base de l'une des deux pattes médianes de sa victime. Elle sort ensuite de ce terrier et se sert des débris qui se trouvent à proximité pour bloquer l'entrée, puis s'en va.

Réfléchissons un instant à cet étonnant produit de l'évolution. Pour tout prédateur, il est très difficile de traquer, d'attraper et de tuer des proies insaisissables. La guêpe émeraude relève un défi encore plus grand : elle fait prisonnière sa proie afin qu'elle serve de garde-manger à la larve qui éclore de l'œuf. Pour ce faire, la guêpe doit inoculer son venin dans deux petites cibles neurales à l'intérieur du corps blindé d'un insecte dont la spécialité est de fuir rapidement



La larve de la guêpe émeraude se nourrit en dévorant de l'intérieur la blatte encore vivante (en haut). Puis elle se tisse un cocon et, à la fin de sa métamorphose, émerge du cocon sous sa forme adulte et sort du corps de la blatte (en bas).

lorsqu'il est confronté à une menace. La guêpe émeraude est le seul animal connu qui dispose de moyens aussi perfectionnés pour manipuler le système nerveux d'un autre animal. Cependant, l'histoire ne s'arrête pas là !

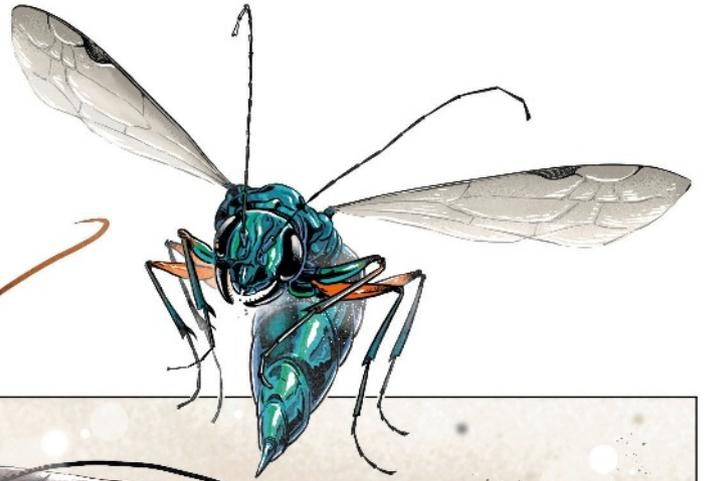
UN POSITIONNEMENT TRÈS PRÉCIS DE L'ŒUF

La larve va éclore du minuscule œuf, trouver un point faible dans la cuticule du cafard pour la percer et dévorer de l'intérieur l'insecte vivant, et ensuite émerger du cafard à la manière du parasitoïde d'*Alien*. Mais cela n'est pas si facile, comme j'ai eu l'occasion de l'apprendre lorsque j'ai été distrait par d'autres projets et que ma colonie de guêpes a failli s'éteindre. C'est seulement à ce moment-là que j'ai fait le suivi de chaque larve, en espérant que je finirais par avoir assez de guêpes pour ressusciter la colonie.

La colonie a survécu, mais cette expérience m'a fait constater que la petite larve de guêpe au corps mou n'est pas très adroite. Contrairement à l'effrayant et habile monstre d'*Alien*, cette larve se déplace lentement, voire pas du tout, et, au début, elle ne peut se nourrir avec succès qu'au niveau d'une seule membrane molle sur le cafard. Si la guêpe pond avec un décalage d'une

GUÊPE CONTRE BLATTE

La guêpe émeraude est bien connue des biologistes pour son extraordinaire manipulation du système nerveux de la blatte américaine, manipulation qui fait du cafard une source vivante de nourriture pour la progéniture de la guêpe. Les recherches récentes ont montré que les tactiques de la guêpe sont même encore plus ingénieuses qu'on ne le pensait.



Pour se reproduire, la guêpe émeraude femelle a besoin d'un hôte spécifique, une blatte américaine.

On pensait que l'interaction guêpe-blatte, remarquée il y a plusieurs décennies, était bien comprise.

La guêpe inocule au cafard un venin paralysant.

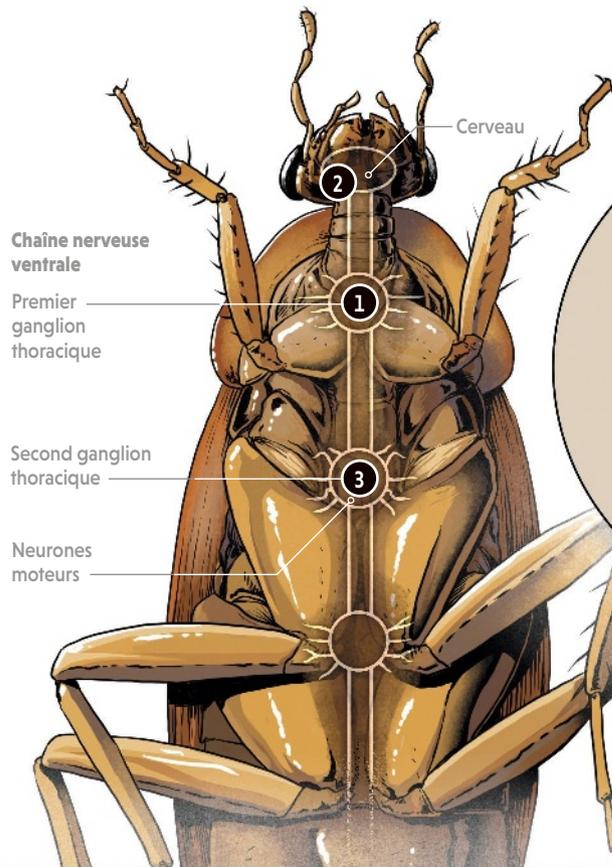
Elle traîne le cafard zombifié pour l'emmener au fond d'une cavité.

Elle dépose un œuf sur l'hôte devenu docile puis sort et ferme la cavité.

À l'éclosion, la larve s'enfouit à l'intérieur de la blatte vivante.

La larve se nourrit de son corps puis tisse son cocon.

Quelque 40 à 60 jours plus tard, une guêpe adulte émerge de la blatte.



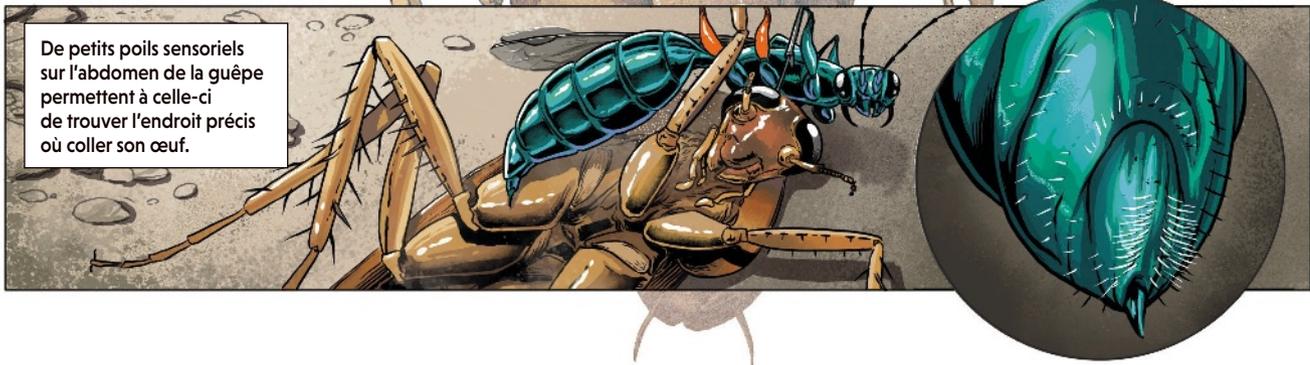
D'après les études précédentes, la guêpe piquait deux fois la blatte lors de son attaque.

Elle pique d'abord la blatte dans une partie du système nerveux central nommée « premier ganglion thoracique » ①, ce qui a pour effet d'immobiliser les pattes antérieures, puis elle inflige une seconde piqûre directement dans le cerveau ②, ce qui « zombifie » sa victime.

De nouvelles recherches ont révélé des piqûres supplémentaires.

Juste avant de déposer un œuf sur la blatte, la guêpe pique le second ganglion thoracique ③. Cela active des neurones moteurs qui étendent les pattes médianes, exposant ainsi l'endroit où l'œuf doit être collé.

Le bon placement de l'œuf est crucial pour la survie de la larve. À l'éclosion, la très vulnérable larve doit trouver un point faible dans la carapace du cafard : une membrane souple à l'articulation de la patte médiane ④, qu'elle peut mâcher puis traverser pour pénétrer à l'intérieur de l'hôte.



De petits poils sensoriels sur l'abdomen de la guêpe permettent à celle-ci de trouver l'endroit précis où coller son œuf.

La contre-stratégie de la blatte est simple : ne pas laisser la guêpe s'approcher.

Elle suit attentivement la guêpe à l'aide de ses antennes.

Et tire parti de sa taille et de sa force pour se défendre.



La blatte pivote pour rester hors d'atteinte des mâchoires.



À l'aide de ses pattes munies d'épines, elle écarte la guêpe.



Se dresser sur ses longues pattes pour garder la distance. Juste au bon moment, diriger un puissant coup de patte vers la tête de la guêpe.

Insecte très adaptable, la blatte peut, à l'aide de quelques manœuvres simples, repousser l'un des prédateurs les plus sophistiqués de la nature.



> fraction de millimètre, la larve mourra (et la chanceuse blatte se remettra alors de la piqûre à son cerveau au bout d'une semaine environ).

La fragilité de la larve constitue un défi pour la mère guêpe, qui doit coller son œuf au bon endroit pour que la future larve survive. Comment la guêpe y parvient-elle? Pour répondre à cette question, j'ai réalisé, à l'aide d'un dispositif approprié (avec un terrier artificiel transparent) placé sur la platine d'un microscope inversé, un enregistrement en gros plan de l'ensemble du processus de ponte.

La vidéo montrait que la guêpe explore de façon très approfondie la patte du cafard avec l'extrémité de son abdomen, avant de pondre l'œuf juste à côté d'un point faible de la carapace de la victime (étant des insectes, les cafards ont un exosquelette solide, mais, tout comme les armures du Moyen Âge, cet exosquelette présente des points faibles au niveau des articulations). En examinant l'extrémité de l'abdomen de la guêpe au moyen d'un microscope électronique à balayage, j'ai remarqué une rangée de minuscules poils. Ceux-ci constituaient-ils les capteurs permettant à la guêpe de trouver le bon endroit où déposer l'œuf?

Pour le savoir, j'ai anesthésié des guêpes et coupé ces poils. Il s'agit là d'une opération comiquement délicate que je n'ai pu réaliser qu'en maintenant la guêpe engourdie (qui sera bientôt très énervée) entre deux doigts nus, tout en rasant doucement l'équivalent de ses parties intimes avec un scalpel très tranchant, en obsidienne. Risqué... mais cela a fonctionné, et les résultats ont confirmé mes soupçons: les guêpes glabres avaient du mal à trouver le bon endroit où placer l'œuf. Ces observations ont non seulement révélé le rôle des poils sensoriels de l'extrémité de l'abdomen, elles ont aussi confirmé l'importance cruciale d'un bon placement de l'œuf – une larve qui a éclos au mauvais endroit ne trouve généralement pas le point faible du cafard et meurt.

DES PIQÛRES SUPPLÉMENTAIRES

En étudiant les poils sensoriels de la guêpe et la survie de sa larve, j'ai découvert un autre élément tout à fait inattendu. Avant de trouver l'endroit idéal pour son œuf, la guêpe étendait l'extrémité de son abdomen et sondait à plusieurs reprises le centre de la blatte, près de la base des pattes médianes. En réaction, la blatte étendait souvent sa patte médiane du côté où se trouvait la guêpe.

Au début, je ne savais pas quoi penser de ce comportement. J'ai finalement décidé d'examiner cela de plus près en augmentant le grossissement de mon microscope. J'ai été stupéfait de voir que la guêpe ne se contentait pas de tâter le dessous de la blatte. Je voyais en effet son dard se déployer sous la cuticule partiellement transparente de la victime. Comment était-ce

Parfois, les blattes se préparent à affronter la guêpe et à parer son attaque en se dressant sur leurs pattes.



Avant de pondre son œuf, la guêpe pique trois fois le deuxième ganglion thoracique

possible? Tous ceux qui étudient la guêpe émeraude savent qu'elle pique le cafard deux fois, une fois dans le premier ganglion thoracique, ce qui paralyse les pattes antérieures, et une fois dans le cerveau, ce qui fait de la victime un zombie. Peut-être observais-je une guêpe confuse, qui se comportait anormalement?

En approfondissant cette observation, j'ai appris bientôt qu'avant de pondre son œuf, la guêpe femelle administre trois piqûres dans la région centrale du corps du cafard, sous une zone bien précise de sa carapace, le «basisternum». Sous cette structure se trouve le deuxième ganglion thoracique, un autre élément du système nerveux central de la blatte. Ce ganglion abrite les neurones moteurs qui contrôlent la paire de pattes médianes, dont l'une sera choisie par la guêpe comme site de ponte.

Je me suis rendu compte que l'étrange extension de la patte du cafard se produisait quelques secondes après les trois piqûres nouvellement remarquées. Apparemment, ces piqûres forçaient d'une manière ou d'une autre le cafard à bouger sa patte. Serait-ce une étape de plus dans le processus par lequel la guêpe contrôle sa victime?

Cela semblait possible, mais comment savoir si les piqûres visaient réellement le deuxième ganglion thoracique, qui se trouve à l'intérieur du corps du cafard? La même question s'était

posée à propos de la première piqûre de la guêpe dans le premier ganglion thoracique; elle est restée longtemps débattue, jusqu'à ce que Frédéric Libersat résolve finalement l'énigme grâce à une ingénieuse approche. Il a rendu la guêpe, et donc son venin, radioactifs; et il a pu montrer que le premier ganglion thoracique de la blatte présentait de la radioactivité après la piqûre.

J'avoue ne pas être aussi courageux que Frédéric Libersat lorsqu'il s'agit de rendre les guêpes radioactives – ou d'entreprendre toutes les démarches administratives nécessaires pour obtenir l'autorisation de faire une telle chose. Heureusement, pour savoir où la guêpe piquait, il y avait un moyen plus direct. J'ai anesthésié un cafard et découpé une petite fenêtre dans sa cuticule pour que le ganglion soit visible. Puis j'ai augmenté le grossissement de mon microscope et observé la guêpe piquer. Effectivement, son dard visait le ganglion (cette approche ne fonctionnerait pas pour déterminer la cible de la première piqûre, qui survient lors d'une lutte agitée entre la guêpe et la blatte). Qui plus est, le dard ciblait le côté du ganglion contrôlant la patte du même côté que la guêpe – le côté où elle allait plus tard coller son œuf. Il est donc assez clair que le venin de la guêpe, lors de ces piqûres ultérieures, contient un composant qui active les neurones moteurs du second ganglion thoracique et provoque ainsi l'extension de la patte.

Mais en quoi l'extension de la patte du cafard est-elle utile à la guêpe? La réponse est en fait évidente. Lorsque la blatte replie sa patte médiane, la guêpe ne peut pas explorer, avec ses poils sensoriels, la base de la patte et trouver l'endroit idéal pour son œuf, où la larve pourra plus tard se nourrir et se frayer un chemin jusqu'à l'intérieur de la victime. En activant le circuit neuronal qui provoque l'extension de la patte, la guêpe supprime la dernière barrière que le cafard pourrait utiliser pour se défendre.

On ignore comment le venin provoque cette réaction, mais on sait quel neurotransmetteur active probablement les neurones cibles: l'acétylcholine. De nombreuses guêpes ont de l'acétylcholine dans leur venin, et cela suffirait probablement pour activer les neurones moteurs et provoquer l'extension de la patte. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour déterminer si cette explication est correcte ou si un autre composant du venin est impliqué.

Peut-être comprenez-vous maintenant pourquoi je suis si impressionné par la guêpe émeraude. Elle a acquis le comportement et le venin nécessaires pour cibler successivement trois petits composants du système nerveux du cafard. Chaque piqûre a un effet différent, et chacune permet à la guêpe de soumettre sa victime à sa volonté, laissant finalement le cafard,

habituellement insaisissable et dangereux, en vie et à la merci d'une petite larve fragile.

Tout cela semble désespérant pour la blatte, comme cela a été le cas pour l'équipage du *Nostromo* dans le film *Alien*. Mais le monstre d'*Alien* a rencontré son adversaire dans Ellen Ripley, jouée par Sigourney Weaver. Que se passe-t-il lorsqu'une guêpe rencontre la Ellen Ripley du monde des cafards?

QUAND LA BLATTE SE DÉFEND

Jusqu'à présent, je vous ai raconté comment une guêpe met une blatte à son service grâce à plusieurs piqûres dans son système nerveux central. Le résultat semble inévitable si le cafard est surpris par la guêpe ou s'il s'enfuit: la guêpe prend facilement le dessus, soit en saisissant immédiatement le cafard, soit en le poursuivant, cet insecte rampant ne pouvant pas échapper à une guêpe volante. Une fois que la guêpe a saisi sa victime avec ses mâchoires, elle administre généralement sa première piqûre en une seconde environ – et vous connaissez la suite.

Mais parfois, les blattes parviennent à se défendre. Vigilantes, elles surveillent et perçoivent avec leurs longues antennes l'approche d'une menace. Lorsqu'elles remarquent une guêpe s'approcher, ces blattes ne courent pas. Elles se préparent au contraire au combat, en se dressant sur leurs longues pattes épineuses. Avec cette posture haute «sur échasses», le cafard soulève son corps, ce qui fait de lui une proie plus difficile et peut-être plus impressionnante. En même temps, ses pattes présentent vers la guêpe des rangées d'épines pointues. Or la prédatrice ne peut pas infliger sa première piqûre tant qu'elle n'a pas saisi le cafard avec ses mâchoires. Les deux ennemis tournent en rond, avançant et reculant à tour de rôle. Souvent, la guêpe s'élance vers le cafard, qui saute et tourne afin d'esquiver les mâchoires de l'attaquante, puis se remet en position défensive.

Mais la véritable surprise pour moi (et probablement pour la guêpe aussi) lors de mes observations, c'étaient les puissants coups de patte donnés par le cafard avec ses épineuses pattes postérieures. Ces coups de patte atteignaient souvent la tête de la guêpe, qui était projetée en l'air et allait heurter l'objet le plus proche. L'attaquante se dépoüssierait invariablement en effectuant un toilettage rapide et reprenait l'attaque, au moins après le premier coup de patte. Mais si la blatte parvenait à lui en infliger plusieurs, la guêpe abandonnait généralement la partie.

Apparemment, pour éviter d'être transformée en zombie et d'être dévorée de l'intérieur par un organisme étranger qui éclatera son corps, la blatte doit adopter la même stratégie que beaucoup de personnages de science-fiction: rester vigilante, ne pas fuir en courant et viser la tête de l'ennemi! ■

BIBLIOGRAPHIE

K. C. Catania, *Getting the most out of your zombie: Abdominal sensors and neural manipulations help jewel wasps find the roach's weak spot*, *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 95, pp. 181-202, 2020.

H. Le Guyader, *Comment une blatte devient zombie*, *Pour la Science*, n° 499, pp. 92-94, mai 2019.

K. C. Catania, *How not to be turned into a zombie*, *Brain, Behavior and Evolution*, vol. 92, pp. 32-46, 2018.

C. Wilcox, *La guêpe émeraude et sa blatte-zombie*, *Pour la Science*, n° 471, pp. 48-53, janvier 2017.

F. Thomas et F. Libersat, *Les parasites manipulateurs*, *Pour la Science*, n° 391, pp. 36-42, mai 2010.

SUR LE WEB

Vidéos de K. C. Catania, 2018 et 2020 :
<https://bit.ly/3bFjS8b>,
<https://bit.ly/3nSgk52>

Vidéo de R. Arvidson et al., 2018 :
<https://bit.ly/39zVaTV>

Des métropoles en Europe il y a 6000 ans

Vers 4100 avant notre ère, des milliers de paysans ont fondé des cités bien structurées sur les sols fertiles d'Ukraine. Une civilisation qui a disparu aussi vite qu'elle est apparue.



Les archéologues ont découvert 15 protovilles en Ukraine centrale, dont, à proximité les unes des autres, Maydanets (ci-dessus une restitution), Talianki et Dobrovody. Ces anciennes agglomérations se trouvent aujourd'hui dans une zone agricole à quelque 45 kilomètres de la ville moderne d'Ouman, mais au IV^e millénaire avant notre ère, elles étaient au milieu d'une steppe parsemée d'îlots forestiers.

L'ESSENTIEL

> Vers - 4100, de grandes agglomérations paysannes se constituent en peu de temps dans les steppes de ce qui allait devenir le bassin de la Sinyukha, en Ukraine.

> Elles profitent d'un environnement très favorable à l'agriculture et atteignent

des densités de population comparables à celles des métropoles modernes.

> Vers - 3650, elles disparaissent soudainement qu'elles sont apparues, et leurs occupants retournent à la vie villageoise de leurs ancêtres.

LES AUTEURS



JOHANNES MÜLLER
professeur
d'archéologie
préhistorique
à l'université
Christian-Albrecht,
à Kiel, en Allemagne



WIEBKE KIRLEIS
professeuse
d'archéologie
environnementale
à l'université
Christian-Albrecht



ROBERT HOFMANN
archéologue
à l'université
Christian-Albrecht



L'Ukraine recèle un trésor incomparable: sa terre noire. Ce sol spectaculairement fertile s'est formé sur des surfaces de loess, sans doute parce que des humains ont défriché les forêts pour rendre la terre cultivable. Cette transformation des paysages anciens a commencé lorsque, vers -4800, des paysans se sont installés entre le Prout et le Dniepr. Le sol de cette région interfluviale est si fertile que de grandes agglomérations paysannes sont apparues. Ces protovilles contenaient jusqu'à environ deux mille habitations en même temps et plusieurs existaient simultanément sur le même territoire. Autrement dit, il y a quelque six mille ans, soit bien avant l'apparition des premières villes en Mésopotamie, l'Europe a vu se constituer des sortes de métropoles.

Les vestiges de ces grandes colonies se trouvent dans les anciennes steppes forestières de l'Ukraine, de la Moldavie et la Roumanie. Ils datent du Chalcolithique, c'est-à-dire l'âge du Cuivre (-4800 à -3200). Il y a environ cent trente ans, des chercheurs de Kiev furent les premiers à repérer ces grands sites, mais leur première étude systématique – par la photographie aérienne et la géophysique – a été l'un des hauts faits de l'archéologie soviétique. Les dimensions extraordinaires de ces agglomérations soulèvent bien des questions quant au nombre de leurs habitants, à leur urbanisme, à leur gestion politique et à la capacité de leur population à subvenir à ses besoins. Qu'en sait-on aujourd'hui, notamment dans le cas particulier, que nous avons étudié, de la grande colonie paysanne de Maydanets?

LES DÉBUTS DE L'AGRICULTURE SUR LA STEPPE FORESTIÈRE

Le Néolithique a commencé en Europe vers -6400, quand de premières populations paysannes en provenance d'Anatolie se sont établies par-delà le Bosphore dans de petites fermes isolées, qu'elles déplaçaient souvent. Ces populations ont créé en Europe centrale tout un foisonnement de cultures. Un millénaire après leur arrivée, la plus ancienne culture paysanne comportant des villages permanents – le Rubané (-5500 à -4900 ans en Europe centrale), ainsi nommé en raison de ses poteries ornées de rubans – s'est étendue à travers l'Europe centrale jusqu'en Ukraine.

Dans ce dernier pays, l'archéologie aérienne et les prospections géophysiques soviétiques des années 1960 ont cependant révélé un phénomène différent et inattendu: l'apparition d'immenses colonies paysannes. Les datations par le carbone 14 de ces grands sites ont conduit à les attribuer à la phase moyenne de la culture dite de Cucuteni-Trypillia (-4100 à -3600). Entre autres caractéristiques, cette culture se



reconnaît à des céramiques peintes et décorées de lignes, d'une qualité étonnante.

Ces découvertes, notamment les vestiges glaiseux de maisons (incendiées) qui occupaient le milieu d'une cour rectangulaire – ce que les archéologues soviétiques ont nommé des *ploshchadki* («domaines») –, ont électrisé la communauté des archéologues. Les chercheurs occidentaux ont d'abord douté de la

Au moyen de techniques archéogéophysiques, les chercheurs ont restitué les implantations des maisons réparties sur les 200 hectares de la grande agglomération de Maydanets, vieille de quelque 6000 ans.

Ces grandes colonies paysannes se sont établies sur des terres très fertiles

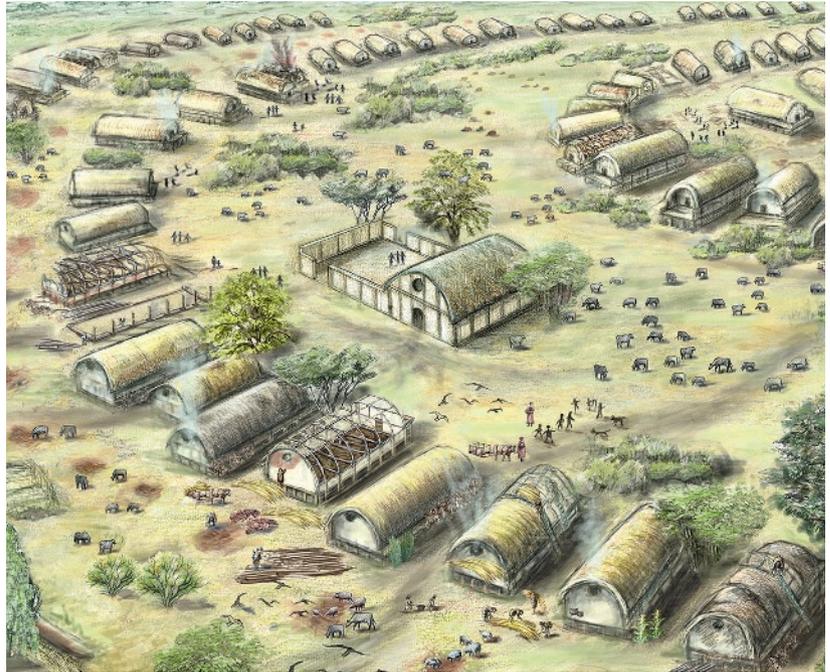
possibilité de colonies aussi vastes, puisque cela contredisait ce que l'on connaissait du Néolithique et de l'âge du Cuivre; puis, dans les années 1980, ils ont fini par admettre qu'il y a plus de six mille ans, de grandes protovilles sont apparues dans la steppe ukrainienne.

UNE STEPPE CULTIVÉE REMPLACE LA FORÊT

Ces dernières années, des équipes interdisciplinaires ont renouvelé nos connaissances sur ces sites. Avec l'aide de la Fondation allemande pour la recherche et de l'Institut archéologique allemand, et avec nos collègues de Kiev, en Ukraine, et de Chisinau, en Moldavie, nous avons mené pendant plusieurs années des campagnes de mesures géophysiques. Nous avons ainsi pu préciser comment de grandes agglomérations se sont développées à la frontière entre prairie et steppe forestière dans le bassin ukrainien de la Sinyukha. Aujourd'hui, cette région est une plaine couverte par d'immenses champs de blé dur, de soja, de tournesols et autres cultures, bordés de routes le long desquelles on rencontre d'étroits bosquets.

D'après nos diagrammes polliniques (qui relie la stratigraphie et les végétaux révélés par les pollens), il y a environ six mille ans, une steppe forestière s'étendait jusqu'au plateau central russe au nord-est et une steppe herbeuse occupait le sud de l'Ukraine. Au sein de l'ancienne steppe forestière, trois grands sites – Dobrovody, Talianki et Maydanets – sont regroupés au sein d'une région très irriguée, située aujourd'hui à environ 45 kilomètres à l'est de la ville actuelle d'Ouman.

Nous en avons dressé des cartes magnétiques, notamment afin de choisir les structures à fouiller en priorité. Étant donné que les agglomérations ont pu compter quelques milliers de maisons simultanément, nous avons choisi de reconstituer les étapes du



Un bâtiment collectif se trouvait au centre de chaque quartier (au centre de l'image), où les habitants se réunissaient.

Comme les autres maisons de la grande agglomération, ce bâtiment collectif a brûlé. On distingue les restes du bâtiment (à gauche) et la cour vide (à droite).



développement urbain en fouillant certains secteurs, avant de généraliser au site entier.

Nous avons ainsi constaté avec surprise que l'organisation de Maydanets résulte d'une planification urbaine. D'après les datations, les colons sont arrivés vers -3990. L'emprise de la zone à bâtir a d'abord été défrichée, puis bordée d'un fossé, défensif sans doute. Les pionniers espéraient manifestement un soutien divin, car ils ont sacrifié et enterré diverses denrées à l'intérieur de l'enceinte. Aux abords de la place ovale centrale de la colonie, ils ont installé des fours à poterie d'une conception très technique pour l'époque: trois entrées d'air y assuraient le tirage d'un foyer surmonté par une chambre de cuisson.

Dès les débuts de leur installation, les colons ont créé plusieurs quartiers, ce qui suggère qu'ils voulaient occuper tout l'espace enclos. Ils ont disposé des habitations standardisées de 5 × 10 mètres en neuf anneaux ovales. Des fosses d'extraction d'argile ont été creusées à côté de chaque bâtiment, qui sont devenues des poubelles. La plupart des maisons comportaient deux étages, ce qu'atteste la découverte du type de vestiges incendiés que laissent les bâtiments de plus de 4 mètres de haut (soit un étage); le rez-de-chaussée servait généralement d'entrepôt.

DES QUARTIERS À ADMINISTRATION AUTONOME

En vue aérienne, l'agglomération ressemble à l'un de ces forts de chariots qu'établissaient les pionniers dans la Prairie en Amérique du Nord, mais qui serait surdimensionné. Les anneaux y étaient reliés à la place >

> centrale par des chemins radiaux. Un boulevard large de 100 mètres, probablement à usage public, s'intercalait entre le quatrième et le cinquième anneau.

Selon nous, chaque quartier regroupait 150 maisons environ et s'administrait lui-même. C'est du moins ce que suggèrent les grandes halles érigées à intervalles réguliers sur le boulevard. D'après le mobilier archéologique qui y a été retrouvé – très différent de celui des habitations –, ces bâtiments auraient servi aux habitants du quartier à se réunir pour échanger et prendre des décisions. Nous avons identifié de grandes halles dans toute la surface habitée. Située à l'entrée principale nord-est, l'une d'elles est le plus grand bâtiment du site.

DES BÂTIMENTS COLLECTIFS DISPOSÉS À INTERVALLES RÉGULIERS

En 2016, nous avons fouillé sur le boulevard les vestiges de l'une des halles, un bâtiment d'une soixantaine de mètres carrés comportant un foyer et une cour murée de quelque 70 mètres carrés. La découverte de pesons, c'est-à-dire de poids de métiers à tisser, de fusaïoles (poids de fuseau de filage) et de meules suggère que l'on y tissait et moulait des céréales. Sans doute y rôtiissait-on aussi des viandes. Les recherches ethnographiques nous ont donné des exemples de bâtiments aux fonctions sociales comparables, comme les *morungs*, cases que construisent les Nagas, une ethnie tibéto-birmane du nord-est de l'Inde, pour y tenir des palabres et mener des activités communautaires.

L'ethnographie nous apprend aussi que les grandes sociétés préindustrielles géraient les tensions sociales en canalisant les conflits et le stress afférent par des rituels. À Maydanets, nous avons mis en évidence nombre de ces pratiques, attestées notamment par des autels où l'on déposait des figurines humaines ou animales modelées en glaise, ou des fosses rituelles dans lesquelles on plaçait une partie des bœufs sacrifiés lors des fêtes.

Entre -3935 et -3700, Maydanets a été l'agglomération la plus peuplée : à raison de cinq habitants par foyer, on peut estimer que ses 1 700 maisons abritaient quelque 8 500 habitants. Les fouilles des *ploshchadki* ont mis en évidence leur mode de vie.

Chaque maison était divisée en zones d'activités différentes. Les meules servant à moudre le grain étaient stockées au rez-de-chaussée, où l'on abritait aussi le bétail. Au premier étage, on transformait le grain dans une antichambre commandant une pièce principale où il y avait un four à coupole, un espace à manger comportant un foyer en forme de table et un lieu de couchage. Un long banc longeait un mur, sur lequel – peut-être à des fins

de représentation – des récipients peints et des réserves étaient conservés à la vue de tous.

Dans les fosses-poubelles, nous avons mis au jour des os de bovins, de moutons et de porcs. Grâce à leur analyse isotopique, nous avons établi que ces animaux n'étaient pas seulement gardés à l'étable, mais aussi autour de la maison et sur des pâtures communales proches. Les rapports entre certains isotopes stables traduisent en effet si un animal a été nourri au grain ou gardé sur des champs tout juste moissonnés, s'il a mangé des déchets ou s'il a pâturé dans un bois.

À quelle distance de la protoville se trouvaient les cultures qui la faisaient vivre ? Pour l'estimer, il faut mettre en rapport la taille de la population et ses besoins caloriques avec les rendements plausibles des champs et partir du principe qu'il fallait économiser l'énergie. Nous sommes ainsi parvenus à la conclusion que les champs pouvaient se trouver jusqu'à 5 kilomètres de la colonie. Comme nous avons retrouvé une trentaine de figurines représentant des traîneaux à bœufs, nous pensons que les colons réalisaient le transport lourd nécessaire par ce moyen.

Que cultivait-on ? Même si les cultures de céréales et de légumineuses ne laissent pratiquement aucun indice, nous avons montré la présence de deux types de blé épeautre (à grains vêtus) – l'amidonnier et l'engrain –, celle de l'orge et celle de pois. Les murs des maisons de Maydanets étaient en effet en torchis, c'est-à-dire en un mélange d'argile et de résidus de battage (paille, etc.). Dans leurs vestiges, nous y avons isolé des phytolithes, c'est-à-dire des dépôts siliceux intracellulaires caractéristiques de l'espèce végétale. Mêlés à ceux de céréales, ceux des « mauvaises herbes », comme la renouée des oiseaux



**Dans chaque quartier,
une grande halle
permettait à ses
habitants de se réunir
et de prendre
des décisions**





Les grandes agglomérations ont livré un grand nombre de ces figurines d'argile qui représentent un traîneau tiré par des bœufs.

(*Polygonum aviculare*), la morelle noire (*Solanum nigrum*) et le chénopode blanc (*Chenopodium album*), prouvent la richesse des sols arables en nutriments et en azote.

GRENIER À BLÉ CHALCOLITHIQUE

La grande qualité agronomique de la terre noire favorisait (et favorise toujours) la culture de céréales. Grâce aux sédiments, phytolithes et pollens étudiés, nous avons retracé la formation de ce sol si particulier. Manifestement, il s'est formé en même temps que la grande colonie de Maydanets parce que l'élevage et la culture intensive pratiqués accumulaient de l'humus sur du loess. Les sols boisés sont faciles à distinguer de la terre noire car ils sont bruns.

Nous savons, d'après les charbons de bois découverts, que poussaient dans les environs des frênes (*Fraxinus*), des chênes (*Quercus*), des ormes (*Ulmus*). Et, d'après nos calculs, les îlots forestiers entourant Maydanets fournissaient assez de bois.

Par ses abattages d'arbres, la population étendait la steppe herbeuse. Nous avons mis au jour des restes de barbes végétales – ces

fibres torsadées qui s'accrochent facilement aux toisons des animaux, forment des boules emportées par le vent et diffusent des graines au loin; elles indiquent la présence de graminées typiques de la steppe (*Stipa*), ce qui suggère que le pâturage erratique des moutons et autres animaux d'élevage a diffusé ces graminées de la steppe au sein de la grande clairière d'origine de Maydanets.

Sans des conditions extrêmement favorables à l'agriculture, jamais les grandes agglomérations de la culture de Cucuteni-Trypillia n'auraient pu subsister. Pratiquant une culture intensive, leurs habitants passaient beaucoup de temps à désherber: nos études archéobotaniques révèlent en effet de nombreuses mauvaises herbes proliférant en été, mais aucune persistant toute l'année.

Les habitants de Maydanets transformaient le grain et le stockaient dans leurs maisons et sans doute en partie dans les halles. Après le battage, ils stockaient l'orge sous forme d'épis complets, et l'amidonner ainsi que l'engrain sous forme d'épillets (leur efflorescence complète), car les grains enveloppés moisissent moins. Il semble que les céréales n'étaient décortiquées qu'au moment de les >

> consommer. Nous avons pu restituer la composition principale des repas: après le décorticage de la céréale, on la cuisait avec des légumineuses, pois ou lentilles...

Nous n'avons, pour le moment, aucun indice de stratification sociale. Certes, les maisons ne sont pas toutes de même taille et il semble que les familles étaient spécialisées, par exemple dans le tissage, la mouture de céréales, etc., mais très peu les distinguent. Cela ne suffit pas pour conclure. Habituellement, les strates sociales se révèlent quand on étudie les nécropoles; or nous n'en avons pas découvert, peut-être parce que, dans la culture de Cucuteni-Trypillia, on incinérât les morts. Ainsi, la principale source d'information sur la stratification sociale nous manque.

Sans squelettes, l'étude du patrimoine génétique de ses porteurs n'est pas non plus possible. Tout juste disposons-nous des vestiges osseux de quatre femmes du territoire de la Moldavie ayant vécu entre -3500 et -3100, c'est-à-dire après l'apogée de la culture de Cucuteni-Trypillia.

Leur ADN suggère une très grande mobilité: il les relie en effet d'une part au Rubané, d'autre part aux chasseurs-cueilleurs locaux ainsi qu'aux éleveurs de la steppe eurasiennne. Or en Europe centrale, des flux de gènes provenant de ces populations steppiques ne sont



Il semble qu'il n'y avait pas de stratification sociale, même si les maisons n'étaient pas toutes de la même taille



attestés que beaucoup plus tard, après -2800 environ, au Néolithique final, au sein de la culture de la céramique cordée qui s'est terminée vers -2300. Cette dernière culture serait issue notamment de la culture des tombes en fosse des éleveurs de la steppe: les Yamnas.

Dans l'aire de la culture de Cucuteni-Trypillia, il semble que des événements

Les fouilles ont mis au jour de nombreux fragments de récipients en argile. Les gobelets et pots en forme de cône et peints en noir sont typiques de la culture de Cucuteni-Trypillia.



démographiques différents se soient produits : des groupes venus de l'ouest ou de la steppe y sont arrivés au IV^e millénaire avant notre ère. Sa population serait donc le produit du mélange dans le bassin de la Sinyukha de groupes différents, qui, ensemble, ont développé un mode de vie et une vision du monde nouveaux, à l'origine des toutes premières métropoles européennes.

UNE CONURBATION S'EFFONDRE

Mais pourquoi cette civilisation fut-elle si fugace ? L'énigme reste entière. Vers -3650, après 10 générations seulement, les habitants de Maydanets ont abandonné leur colonie, dont les 1700 maisons ont été incendiées en une fois. Arrivés 350 ans plus tard, les éleveurs Yamnas ne peuvent être considérés comme de possibles conquérants de ces grandes colonies. Ce qui s'est produit à Maydanets a aussi été le lot des 14 autres grandes agglomérations connues des environs.

Certaines de ces protovilles, elles aussi créées vers -4100, ont été abandonnées plus tôt que Maydanets. Nombre d'entre elles ont prospéré à la même période. Ainsi, outre Maydanets, Talianki (320 hectares, 2200 maisons) et Dobrovody (210 hectares, 1380 maisons) se trouvaient dans un rayon de 15 kilomètres. Il en ressort qu'une densité de population d'environ 500 habitants par kilomètre carré s'est constituée à l'intérieur d'une zone de 60 kilomètres carrés. Cela s'approche des densités de population des conurbations modernes : dans la grande couronne de Paris par exemple, la densité de population atteint 477 habitants par kilomètre carré.

Pourquoi, à partir de -4100, des populations ont-elles formé de grandes colonies dans le bassin de la Sinyukha ? Il est difficile de répondre. La capacité à gérer ces colonies est entre autres due à des innovations techniques, comme le traîneau tiré par animaux. Il semble que ce n'est que grâce à ce moyen de transport lourd, efficace en hiver comme en été, que les habitants ont pu se concentrer aussi nombreux et exploiter des champs éloignés.

Nous avons été surpris par le fait que, malgré la densité très élevée de cette population préhistorique, elle n'a jamais épuisé son environnement. Il semble que ni la qualité du sol ni le couvert forestier n'aient été dégradés jusqu'à un degré critique. Les habitants de Maydanets semblent avoir été toujours bien nourris et ne jamais avoir manqué de bois pour leurs constructions, leurs feux, leurs fours à poterie et, sans doute, leurs bûchers funéraires.

Selon nous, ce n'est donc pas par manque de ressources que la grande conurbation de l'âge du Cuivre du bassin de la Sinyukha a



Ces figurines d'argile fragmentées, qui mesurent un peu plus de 3 centimètres, représentent un bélier et le torse d'une sorte de poupée. Mobiles, les jambes et les bras de cette dernière étaient attachés au moyen des trous.

BIBLIOGRAPHIE

A. Immel et al., **Gene-flow from steppe individuals into Cucuteni-Trypillia associated populations indicates longstanding contacts and gradual admixture**, *Scientific Reports*, vol. 10, article 4253, 2020.

R. Ohlrau, **Maidantes'ke. Development and Decline of a Trypillian Mega-site in Central Ukraine**, Sidestone Press, 2020.

M. Dal Corso et al., **Modelling landscape transformation at the Chalcolithic Tripolye mega-site of Maidanetske (Ukraine) : Wood demand and availability**, *The Holocene*, vol. 29, pp. 1622-1636, 2019.

R. Hofmann et al., **Governing Tripolye : Integrative architecture in Tripolye settlements**, *Plos One*, vol. 14(9), article e0222243, 2019.

J. Müller et al., **Maidanetske 2013. New excavations at a Trypillia megasite**, *Studien zur Archäologie in Ostmitteleuropa*, vol. 16, Habelt, 2017.

J. Müller et al. (dir.), **Trypillia Mega-sites and European Prehistory : 4100-3400 BCE**, Routledge, 2016.

disparu. Il n'existe aucun indice de sécheresse prolongée, ni de traces du passage de la peste (ou d'autres fléaux) comme on l'a parfois suggéré. On n'a en effet pas détecté la bactérie de la peste dans les quelques restes osseux connus dans la région pour cette période.

La fin de la culture de Cucuteni-Trypillia doit donc s'expliquer autrement. Pour la première période, nous avons documenté plusieurs bâtiments collectifs de différentes tailles à Maydanets, mais seul le plus grand semble être resté en service ensuite. À un moment donné, les niveaux intermédiaires de prise de décision au sein de ces sociétés auraient donc disparu. Cela aurait privé les habitants de la possibilité d'échanger. Dès lors, l'impossibilité de régler les problèmes importants a peut-être conduit à un effondrement social.

L'ethnographie montre que les processus de décisions dans les salles de palabre des sociétés égalitaires, quoique pas toujours intentionnels, n'en sont pas moins très efficaces. En tout cas, il convient de noter que la culture de Cucuteni-Trypillia s'est effondrée au moment où ces institutions décisionnelles décentralisées semblent avoir été abandonnées au profit d'un centre de décision unique.

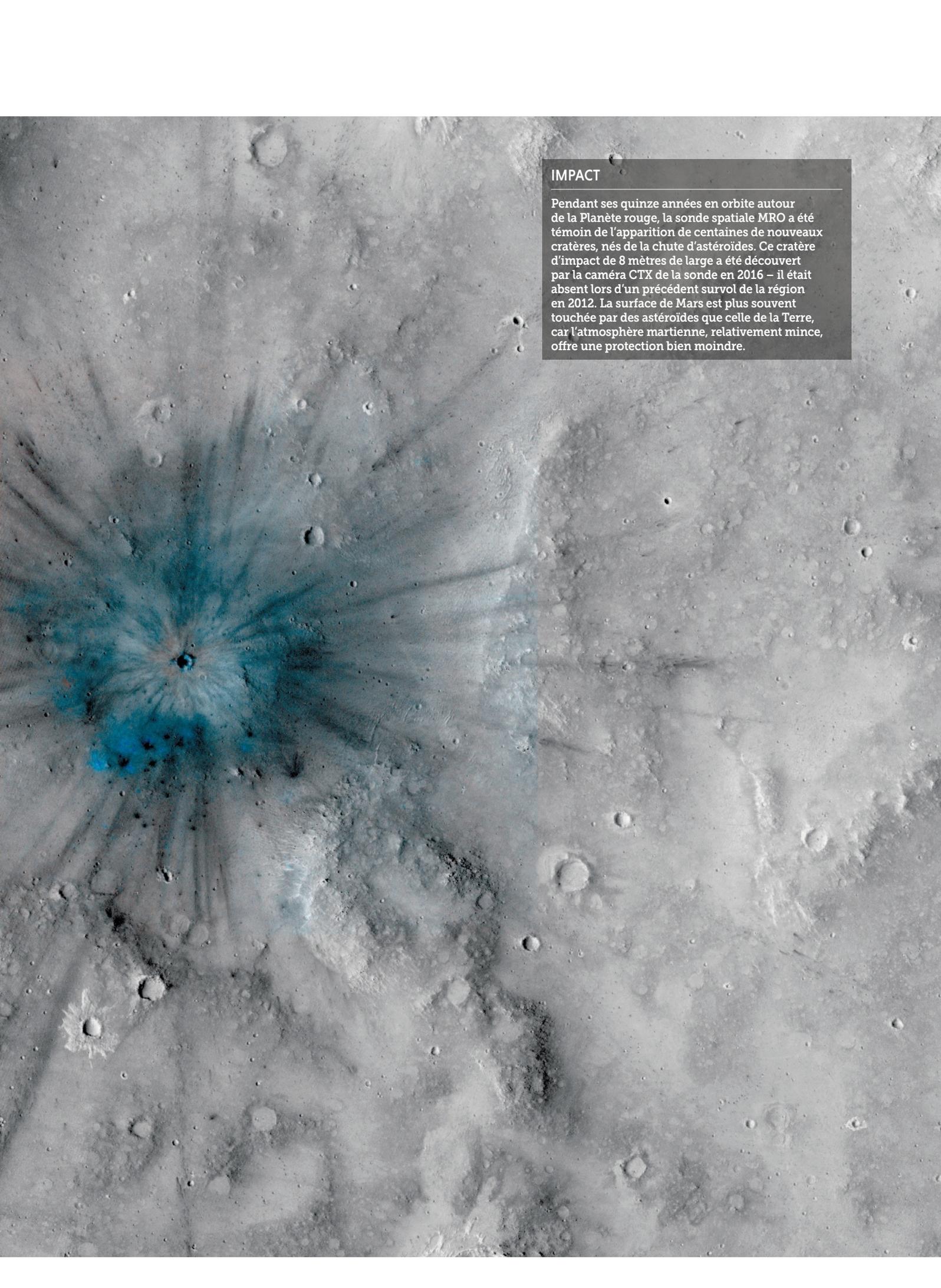
Les habitants de ces colonies sont ensuite partis s'installer dans de plus petits villages, puis dans des hameaux. Cette évolution se retrouve, entre autres, dans la culture matérielle : les objets de la vie quotidienne qui, avant -3700, étaient fabriqués de manière uniforme dans toute l'aire culturelle de Cucuteni-Trypillia ont cessé de l'être après -3500. De nombreux types de céramique sont alors apparus, ce qui traduit vraisemblablement la diminution des échanges. Plus tard, vers -3200, avec l'arrivée des éleveurs yamnas, une nouvelle ère s'est mise en place. ■

Mars

Une planète dynamique

Clara Moskowitz

La sonde Mars Reconnaissance Orbiter fête ses quinze ans de mission en orbite autour de la Planète rouge. Ses nombreuses et spectaculaires photographies ont révélé une surface en perpétuel changement. En voici un échantillon.



IMPACT

Pendant ses quinze années en orbite autour de la Planète rouge, la sonde spatiale MRO a été témoin de l'apparition de centaines de nouveaux cratères, nés de la chute d'astéroïdes. Ce cratère d'impact de 8 mètres de large a été découvert par la caméra CTX de la sonde en 2016 – il était absent lors d'un précédent survol de la région en 2012. La surface de Mars est plus souvent touchée par des astéroïdes que celle de la Terre, car l'atmosphère martienne, relativement mince, offre une protection bien moindre.

L'AUTRICE

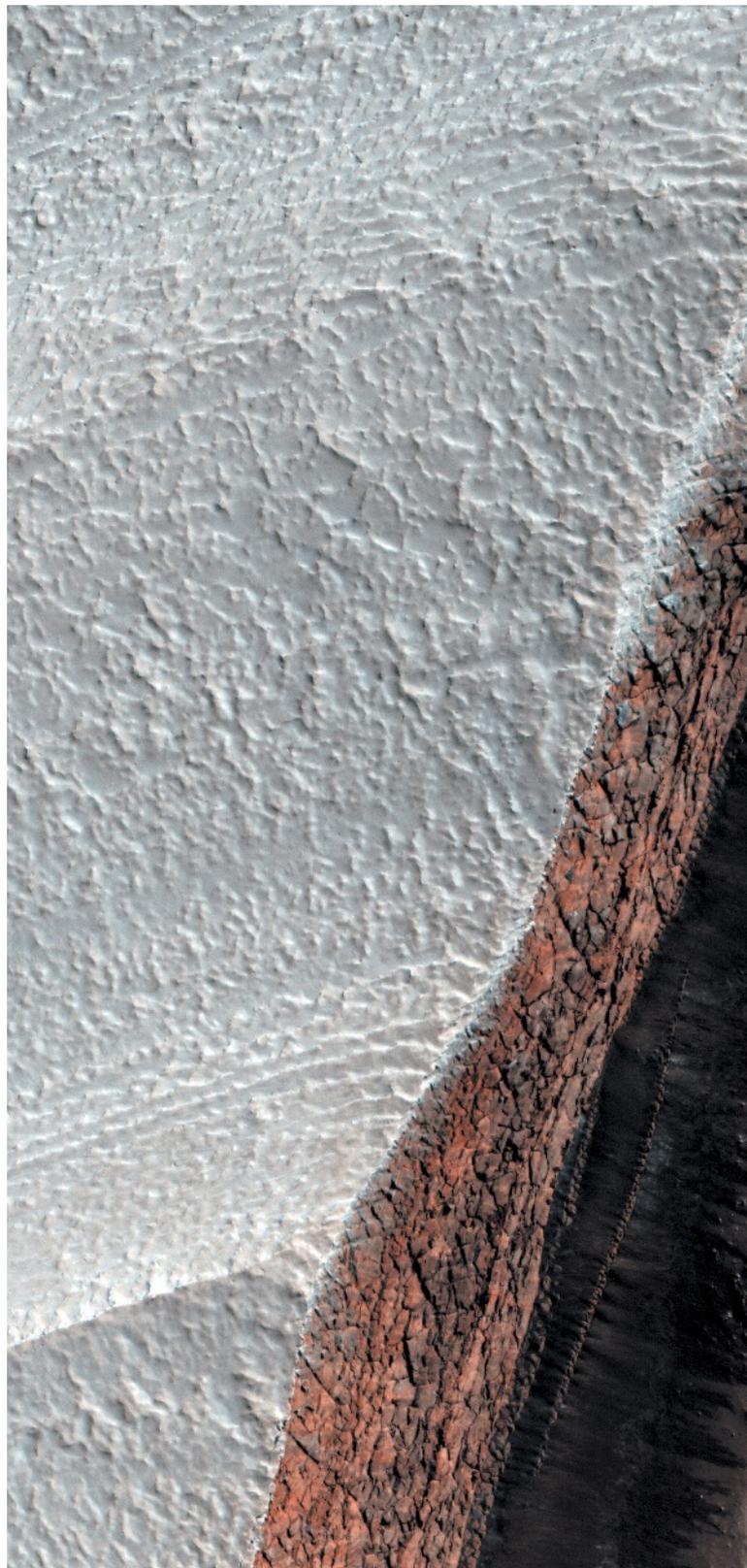


CLARA MOSKOWITZ
journaliste et responsable
des rubriques espace et physique
à *Scientific American*

On a longtemps pensé que Mars n'avait à offrir que des paysages figés et poussiéreux. Il n'en est rien. La sonde américaine *Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) a bouleversé notre vision de cette planète en constante évolution. Nous avons alors découvert des dunes changeantes, des saisons qui se succèdent et des tourbillons de poussière qui marquent la surface de la planète. La sonde a récemment célébré son 15^e anniversaire en orbite autour de ce monde voisin. Elle est équipée d'une série de quatre instruments scientifiques et trois caméras pour cataloguer un large éventail de caractéristiques géologiques. «Avant, nous n'avions pas d'équipement offrant une résolution suffisante et opérant sur une période assez longue pour voir évoluer la surface», explique Richard Zurek, le responsable scientifique du projet MRO au Jet Propulsion Laboratory (JPL) de Pasadena, en Californie. «Aujourd'hui, nous constatons à quel point Mars est dynamique.»

L'orbiteur, lancé en 2005, a conduit à de nombreuses découvertes sur l'atmosphère et la surface de Mars, et, grâce à son radar, même sur ce qui est enfoui dans le sol. Il a renvoyé vers la Terre près de 400 téraoctets de données au fil des ans. Il a également servi de satellite de communication en relayant les messages des différents atterrisseurs et rovers qui ont visité le sol martien durant son séjour. Après quinze ans de service, la sonde est toujours en bon état et dispose d'assez de carburant pour continuer à fonctionner pendant au moins quinze années supplémentaires, tant que ses instruments seront opérationnels. «Bien sûr, un élément peut tomber en panne de façon imprévue, comme une vieille voiture», explique Leslie Tamppari, responsable scientifique adjointe du projet MRO au JPL. «Mais atteindre une telle longévité serait vraiment un atout pour approfondir notre compréhension de Mars. Il y a des choses que nous ne pouvons apprendre qu'à partir d'un long historique d'observations.»

Les instruments de la sonde ont également mis en évidence la beauté de Mars, révélant un monde qui présente des similitudes surprenantes avec le nôtre. Comme nombre des photographies du télescope spatial *Hubble* et d'autres observatoires, les images de MRO ne sont pas seulement scientifiques, elles ont aussi une dimension artistique. Richard Zurek se rappelle quand Alfred McEwen, responsable de l'instrument HiRISE (pour *High resolution imaging science experiment*) de MRO, était venu un jour au JPL: «La secrétaire lui a dit: "Suivez le couloir, et quand vous arrivez au tableau impressionniste, tournez à gauche." Il a pris le couloir et a vu que le-dit tableau impressionniste était en fait une photo de Mars, prise par la caméra dont il était responsable.» ■

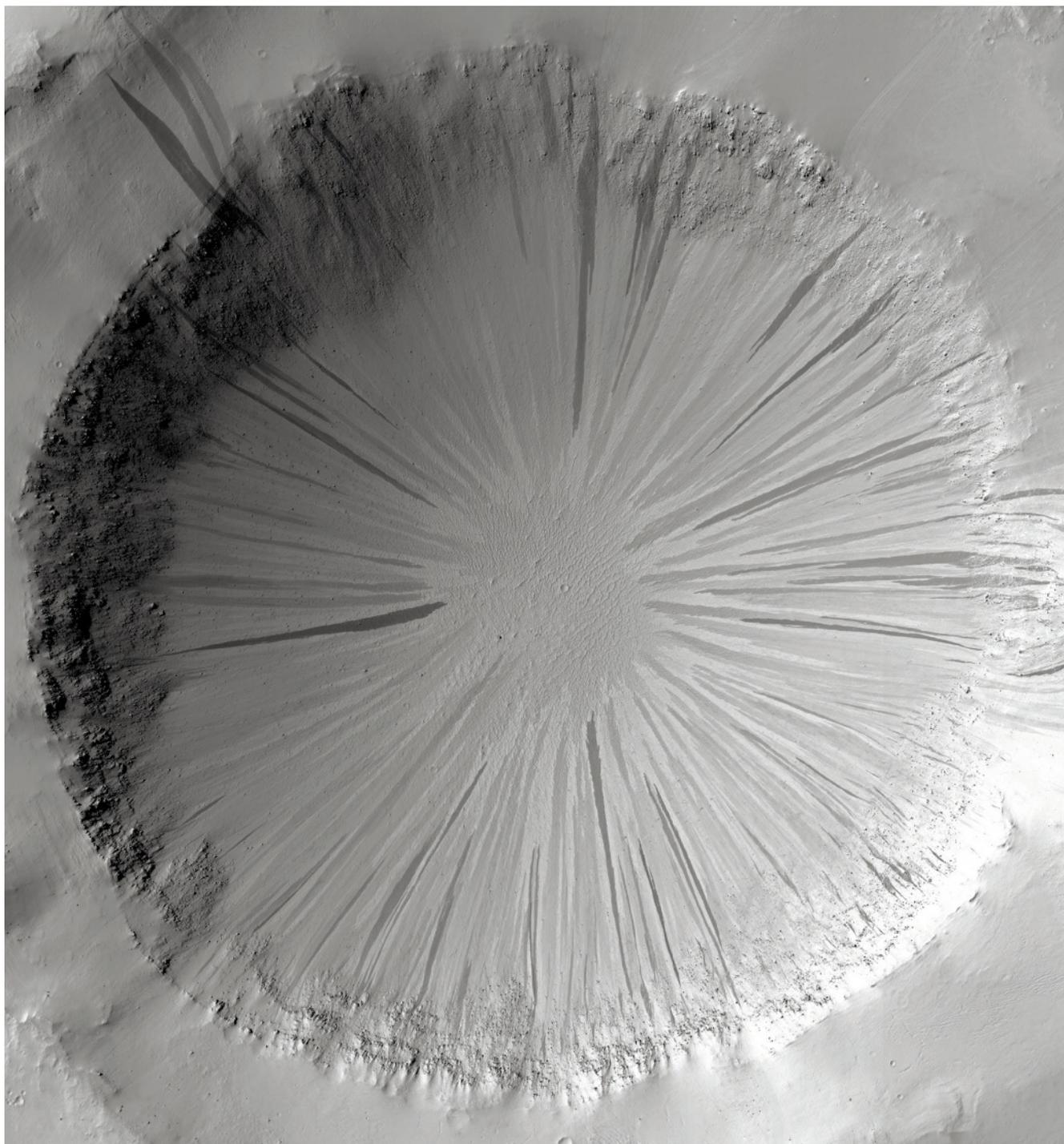




AVALANCHE

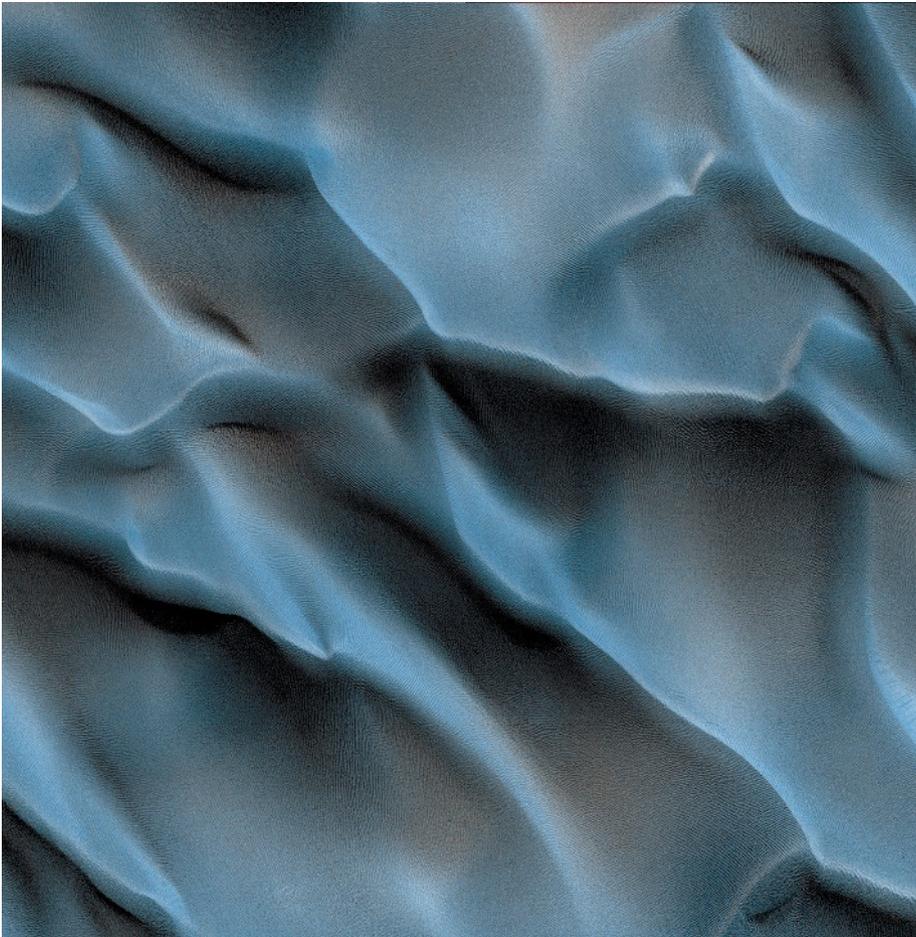
En 2010, la caméra HiRISE de la sonde a saisi la formation d'un nuage de débris s'élevant au-dessus d'une région proche du pôle Nord de Mars. Cette scène est probablement le résultat d'une avalanche. On distingue une falaise abrupte faite de couches de glace d'eau surmontées d'un givre blanc brillant constitué de dioxyde de carbone. De tels phénomènes sont fréquents dans cette région lors du printemps martien. Le pôle Nord connaîtrait une saison récurrente d'avalanches lorsque la lumière du soleil et la chaleur provoquent la fonte du gel hivernal.





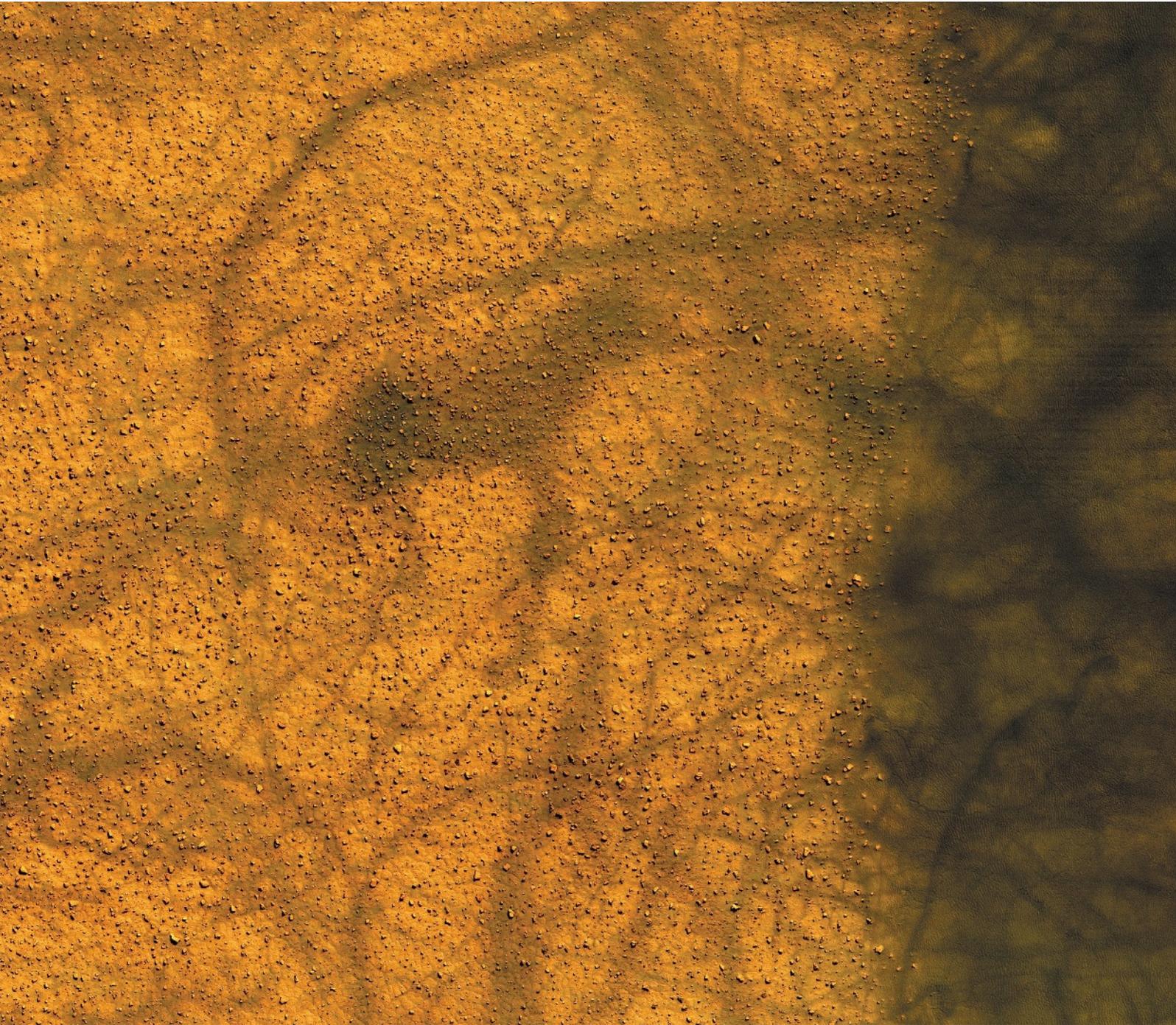
STRIES ET ONDULATIONS

La surface poussiéreuse de Mars présente des textures variées et magnifiques. De grandes dunes (*en haut, à gauche*) ondulent sur les pentes du massif Nectaris Montes dans le canyon de Coprates Chasma. Des stries étroites le long des dunes dans le cratère Russell (*en bas, à gauche*) se forment lorsque des morceaux de glace de dioxyde de carbone glissent sur les faces abruptes du cratère. Les canaux sombres semblent apparaître et se réarranger au fil des saisons, créant des motifs différents chaque année où l'orbiteur les a photographiés. Des lignes d'un autre type descendent les pentes d'un cratère dans la région d'Arabia Terra (*ci-dessus*). Ces stries sont le résultat de cascades de poussière le long des parois du cratère circulaire.



DUNES

Certains champs de dunes martiennes font penser à du satin froissé (*ci-contre*). Les scientifiques étudient la forme de ces dunes pour comprendre la géologie de la Planète rouge. Certaines crêtes incurvées ressemblent par exemple à des barkhanes, dunes en forme de croissant qui se forment lorsque le vent souffle régulièrement dans une seule direction – une caractéristique fréquente dans les déserts terrestres et martiens.



TOURBILLONS DE POUSSIÈRE

La Terre et Mars ont en commun ces phénomènes (nommés en anglais *dust devils*, « démons de poussière »), constitués d'une colonne verticale de poussière qui s'élève en spirale autour d'une poche d'air de faible pression. En 2019, la caméra HiRISE en a observé un culminant à quelque 650 mètres dans le ciel, comme l'indique la longueur de son ombre qui s'étend vers la droite (*en haut, à gauche*). Lors de leur passage, ces tourbillons dessinent des traces sombres et irrégulières (*ci-dessus*) sur le sol martien en soulevant la poussière brillante qui recouvre celui-ci.

BIBLIOGRAPHIE

F. Westall, **Mars, un autre laboratoire pour explorer les origines de la vie**, *Pour la Science*, n° 482, pp. 36-38, décembre 2017.

A. McEwen, **Mars, un remodelage permanent**, *Pour la Science*, n° 430, pp. 34-41, août 2013.

L'ESSENTIEL

> Avec l'amplification des flux de personnes et de marchandises à l'échelle mondiale, les pandémies comme le Covid-19 sont devenues plus probables.

> Le choléra et la grippe espagnole font ainsi partie des épidémies mondiales de notre passé récent.

> De telles épidémies ont largement contribué à l'émergence de la santé publique en tant que valeur et à la promouvoir sur le plan institutionnel. L'Organisation mondiale de la santé en est l'un des résultats.

LES AUTEURS



HEINER FANGERAU
professeur d'histoire,
de théorie et d'éthique
de la médecine à
l'université Heinrich
Heine de Düsseldorf,
en Allemagne



ALFONS LABISCH
professeur émérite
d'histoire des sciences
et de la médecine
à l'université
des langues étrangères
de Pékin

Du choléra au corona

Choléra, peste, grippe espagnole... les pandémies ont toujours contribué au développement de la santé publique. Aujourd'hui encore, pour lutter contre le Covid-19, nous recourons aux institutions qui en ont résulté.

La pandémie actuelle de Covid-19 a un impact majeur sur la vie sociale et sociétale dans le monde entier. La vaccination contre le SARS-CoV-2, le virus responsable de la maladie, n'étant qu'à ses débuts et les mécanismes à l'origine de l'infection n'étant que partiellement compris, les médecins et les responsables politiques en charge de la santé misent avant tout sur des mesures indirectes pour l'endiguer, telles que la limitation des contacts, l'interdiction de se réunir ou l'obligation de porter un masque. Très tôt, on s'est accordé à reconnaître que la restriction des contacts sociaux était le bon moyen de ralentir la propagation du virus et de permettre aux infrastructures médicales de prendre en charge toutes les personnes sérieusement atteintes. Assez vite, cependant, l'état d'esprit d'une partie de la population a commencé à basculer. Les critiques à l'encontre des mesures sanitaires et des restrictions de liberté associées s'expriment encore et ne peuvent être écartées comme le simple fait de quelques complotistes. Dans ce contexte, il est utile d'examiner

comment, par le passé, les gens ont agi face aux épidémies et quelles leçons en tirer aujourd'hui.

Certes, le Covid-19 est un phénomène nouveau et notre société l'affronte avec des techniques dont on ne disposait pas auparavant: il suffit de penser au télétravail, à l'école à distance et aux applications anticovid installées sur les téléphones portables. Cependant, les débats eux-mêmes, les désaccords sur la manière appropriée d'agir eu égard aux connaissances restreintes ainsi que les querelles concernant les choix politiques et médicaux ont existé sous une forme analogue lors des épidémies précédentes.

LES PRÉMICES D'UNE SANTÉ PUBLIQUE

L'une des pandémies les mieux documentées est le choléra qui s'est propagé au XIX^e siècle à la suite de l'industrialisation et, surtout, de la diffusion des modes de vie urbains dans les pays industrialisés. La maladie infectieuse (bactérienne, nous le savons aujourd'hui), qui a atteint l'Europe pour la première fois en 1824, a provoqué plusieurs pandémies durant le siècle. Elle a accéléré un processus déjà entamé qui a conduit >

Durant l'épidémie de grippe espagnole, entre 1918 et 1920, le port du masque s'est généralisé dans plusieurs pays comme la France, la Grande-Bretagne et les États-Unis.



> l'État à attribuer à la santé une «valeur publique», selon le terme utilisé alors par l'économiste et sociologue allemand Lorenz von Stein. Les institutions étatiques ont tenté de mettre en place une politique de santé globale. Dans ce contexte, les scientifiques ont formulé le concept d'une hygiène «fermée», c'est-à-dire fondée principalement sur la prise en compte du milieu de vie de la population.

Max von Pettenkofer, premier professeur allemand d'hygiène, a été le principal représentant de cette hygiène du milieu ou des conditions de vie en Allemagne. Les épidémies de choléra des années 1850 ont considérablement stimulé ses travaux, tant sur le plan thématique que méthodologique. À l'aide d'un arsenal de méthodes s'appuyant sur la chimie et la physiologie, et de divers outils techniques et statistiques, Pettenkofer a mis en lumière l'ensemble des éléments susceptibles d'influer sur la santé et la vie des gens: l'alimentation, l'habillement, le mode de chauffage, l'aération, la luminosité, le terrain, l'hygiène dans les écoles, les hôpitaux et les hébergements collectifs, l'eau et son approvisionnement, les égouts ainsi que les conditions de vie particulières dans les villes.

Les analyses de Pettenkofer et ses recherches expérimentales visant à améliorer l'hygiène, combinées à la prévention des maladies, de plus en plus urgente dans les grandes villes et dans les nouvelles régions industrielles, ont conduit à une politique de santé que l'on peut qualifier de moderne. La santé publique est devenue un domaine politique, économique et administratif à part entière. D'importants investissements, jusqu'alors inimaginables, ont été réalisés dans les infrastructures urbaines. Ils concernaient les logements, l'approvisionnement alimentaire, la construction des routes, les égouts, l'hygiène au travail, les abattoirs, les marchés, la collecte des déchets et bien d'autres choses encore.

Pour Pettenkofer, la cause du choléra était à rechercher dans la circulation des eaux souterraines et le sol. D'autres scientifiques, comme l'anatomiste italien Filippo Pacini, pensaient que la maladie était d'origine bactérienne. Mais aucun ne parvenait à s'imposer jusqu'à ce que, en 1884, le médecin allemand Robert Koch identifie le «vibron» cholérique et réussisse à le cultiver. Koch comprit en outre que la bactérie se transmettait par l'eau.

L'approche consistant à identifier des germes bactériens comme la cause d'une maladie commençait à s'imposer. Koch l'avait développée dans les années 1870 en s'intéressant à la maladie du charbon et aux surinfections des plaies, puis l'avait appliquée à la tuberculose. Il avait ainsi ouvert la voie à la bactériologie et de nombreux chercheurs à sa suite avaient peu à peu découvert divers agents infectieux. Cela signifiait, pour le système de santé, un changement de stratégie important:

il était désormais possible de lutter spécifiquement contre les agents pathogènes, par exemple en isolant les porteurs de germes ou en prenant en compte des hôtes intermédiaires ainsi que les voies de transmission. Des traitements visant à obtenir l'immunité des patients laissaient entrevoir un meilleur avenir.

APPROCHE VERTICALE OU HORIZONTALE ?

Très tôt, ces deux visions de l'origine de la maladie, l'une centrée sur le milieu de vie, l'autre sur un agent pathogène spécifique,



Koch intervenait verticalement et se souciait peu des conditions de vie



entrèrent en conflit. Pettenkofer tentait d'appréhender la maladie dans sa globalité et d'en déduire des actions à mener dans la sphère publique. Si l'on reformule ses idées en termes modernes, il considérait l'épidémie comme un processus global et complexe et visait une intervention «horizontale» en s'efforçant d'assainir tout l'environnement des personnes concernées. Selon lui, le bacille du choléra était une cause nécessaire, mais insuffisante pour expliquer l'apparition de la maladie.

Koch, en revanche, s'appuyait sur l'efficacité spécifique du germe, telle qu'elle avait été prouvée en laboratoire. Son seul objectif était d'isoler la bactérie et de la détruire afin d'interrompre la chaîne de contamination – tant comme clinicien que, plus tard, comme responsable de la lutte contre les maladies en santé publique. En d'autres termes, Koch intervenait «verticalement» et se souciait peu, voire pas du tout, des conditions de vie des personnes touchées.

Ce conflit s'est manifesté entre autres lors d'un célèbre événement de l'histoire de la médecine. Durant l'épidémie de choléra à Hambourg en 1892, Koch déclara que le bacille et sa propagation *via* l'eau potable en étaient les seules causes. Pettenkofer et son étudiant Rudolph Emmerich défièrent Koch en expérimentant cette hypothèse sur eux-mêmes. En octobre 1892, tous deux ingurgitèrent une solution contenant la bactérie du choléra (*Vibrio cholerae*) qu'ils avaient reçue du laboratoire de

Koch. Ils raisonnaient ainsi: si une infection par le microbe était suffisante pour provoquer le choléra, alors ils tomberaient malades – sinon, ils resteraient indemnes.

Pettenkofer ne manifesta que de légers symptômes; Emmerich, en revanche, faillit en mourir. Pettenkofer publia une analyse minutieuse de l'expérience, qu'il résuma ainsi: l'ingestion de bactéries du choléra ne rend pas malade à elle seule, tout dépend des conditions environnementales. Pour lui, une alimentation en eau exempte de germes ne suffisait donc pas à protéger de l'épidémie. Il fallait par ailleurs garantir des conditions locales telles que l'épidémie ne puisse se déclarer. Il concluait d'un ton acerbe: «J'aimerais bien devenir contagionniste, cette vision des choses est très pratique et évite d'avoir à réfléchir.»

Un autre bras de fer entre les écoles de Koch et de Pettenkofer eut lieu en 1901 à la suite de l'épidémie de fièvre typhoïde de Gelsenkirchen. Quelque 3300 personnes tombèrent malades, environ 500 moururent. L'été avait été sec et la consommation d'eau très importante, si bien que la compagnie locale des eaux avait raccordé le réseau de canalisations d'eau potable à la Ruhr, qui avait donc alimenté la ville en eau non traitée. Sollicité en tant qu'expert, Koch le constata rapidement et considéra avoir identifié la cause du problème: le branchement fut condamné.

En 1904, Koch et Emmerich intervinrent comme experts dans un procès sur cette

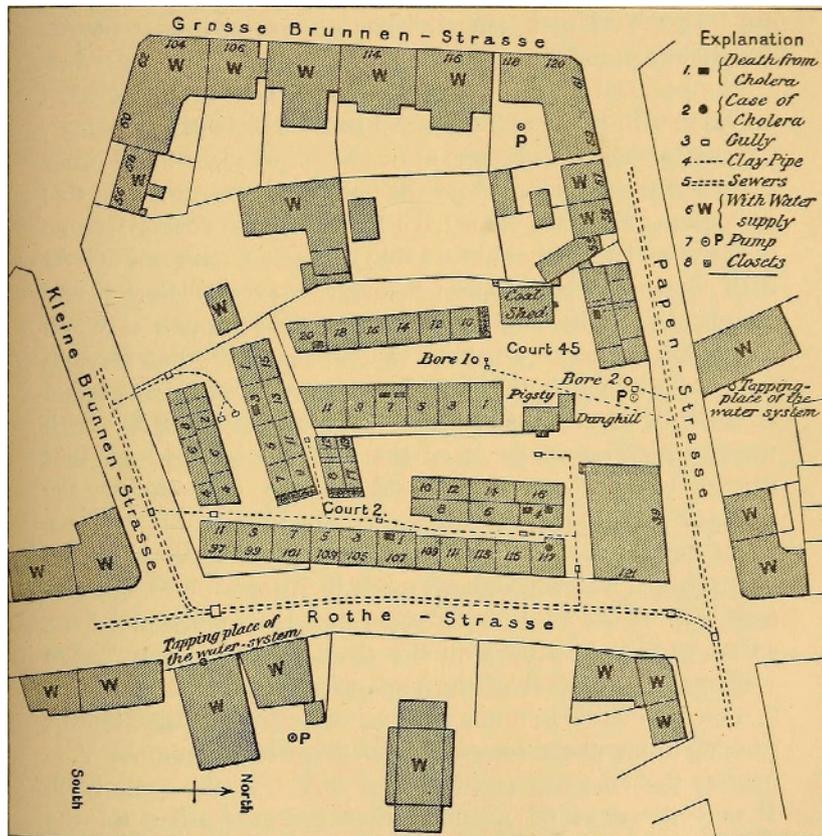
question. Le premier était persuadé que la bactérie de la fièvre typhoïde présente dans l'eau potable (après de nombreuses recherches, elle avait été détectée en laboratoire) était responsable de l'épidémie. Le second soutenait que le manque d'hygiène dans une région fortement polluée et négligée en était la cause. Les débats s'échauffaient lorsque l'on apprit que la compagnie des eaux prélevait de l'eau dans la Ruhr de manière permanente depuis plus d'un an déjà. Ainsi, pendant longtemps, plus d'un tiers de l'eau potable mise à disposition n'avait pas été traitée, et n'avait pas provoqué d'épidémie. Les juges se trouvèrent dans l'incapacité de prononcer un jugement. Cette querelle permit cependant de conférer à l'eau consommée le statut de denrée alimentaire. Encore aujourd'hui, elle est considérée comme telle en Allemagne et donc soumise à des contrôles stricts.

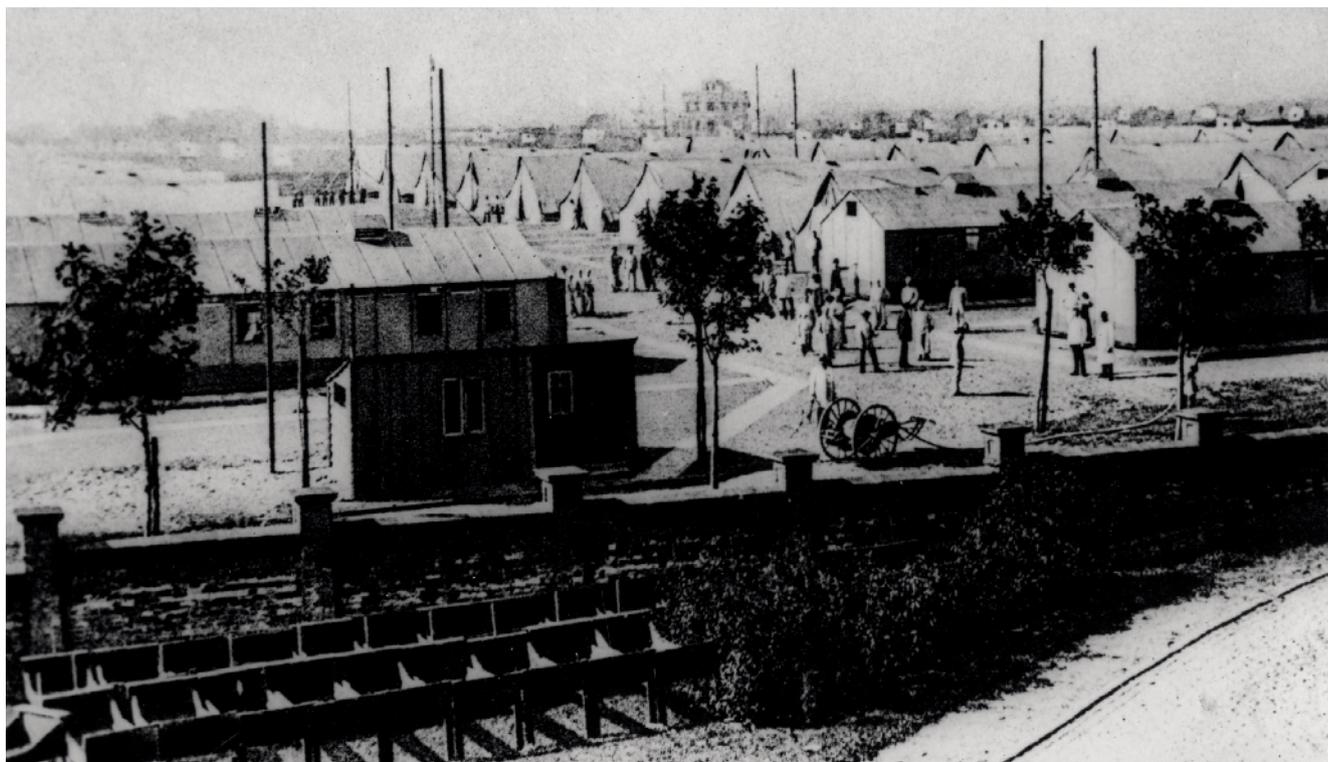
L'épidémie de choléra n'a pas seulement imposé une nouvelle vision des maladies et des épidémies. Elle a aussi montré à quel point des actions concertées sur le plan international étaient devenues nécessaires pour protéger la santé publique. En effet, favorisée par le transport maritime international qui s'était considérablement intensifié avec l'impérialisme et l'industrialisation, la maladie s'est propagée partout dans le monde en plusieurs vagues pandémiques. De 1817 à 1824, elle a atteint l'Europe, certainement en provenance de l'Inde. De 1826 à 1841, elle est parvenue jusqu'en Amérique du Nord. Entre 1852 et 1876, en partie à cause de la guerre de Crimée, des vagues successives se sont abattues en Europe, d'où l'épidémie est repartie en Amérique. Puis une autre vague, de 1882 à 1896, a provoqué en 1892, à Hambourg, une épidémie qui a coûté la vie à 8600 personnes et qui reste encore dans les mémoires. Des immigrants infectés ont alors embarqué sur des navires qui reliaient Hambourg à New York, où la maladie a continué de se propager.

MARQUÉ À LA CRAIE EN CAS DE SUSPICION

Pour éviter que cela ne se reproduise, le gouvernement fédéral américain fit construire des îles artificielles dans le port de New York, où les immigrants arrivant avec des maladies contagieuses pourraient être mis en quarantaine. En 1892, une telle station de transit (aujourd'hui devenue un musée) fut créée sur Ellis Island. L'accueil y était particulièrement violent: les malades n'étaient pas autorisés à débarquer et devaient repartir aussitôt; des enfants furent séparés de leurs parents. Quand les arrivants quittaient le bateau, ils devaient emprunter un escalier pour se faire enregistrer. Dès cet escalier, des employés de la station inspectaient leur démarche et examinaient ensuite leur état de santé général. Les suspects étaient marqués à la craie d'une

En 1892, le médecin allemand Robert Koch a analysé comment le choléra a envahi Hambourg en examinant un plan de la ville où étaient répertoriés canalisations, rues, bâtiments, cours et pompes à eau (ici un détail de ce plan reproduit dans un livre paru aux États-Unis en 1895).





> croix blanche sur le dos et placés en quarantaine. C'est pourquoi l'île reçut très tôt le surnom d'«île des larmes».

Si le trafic maritime a permis au choléra de traverser les océans, la propagation de l'épidémie sur le continent a souvent été liée aux mouvements de troupes. De manière générale, la mobilité grandissante, au cours du XIX^e siècle, des personnes et des biens sur les routes, les chemins de fer et les voies maritimes rendaient de plus en plus nécessaire une politique de santé publique supranationale. Dès le milieu du siècle, en raison de la récurrence des épidémies, une dizaine de conférences sanitaires tant régionales qu'internationales eurent lieu : elles aboutirent en 1903, dans le cadre de la onzième conférence sanitaire internationale, à la signature d'une convention internationale de l'hygiène. La Société des Nations créa en 1920 des commissions temporaires consacrées aux épidémies, puis, en 1923, l'Organisation d'hygiène de la Société des Nations, de rôle consultatif. L'Organisation mondiale de la santé naquit en 1948.

Une conséquence concrète de ces initiatives fut l'ouverture de bureaux à des endroits stratégiques du commerce maritime international, chargés de surveiller les épidémies, d'assurer la communication adéquate et de prendre les mesures nécessaires de quarantaine. Au début, seul le choléra se trouvait au centre de l'attention. À la suite d'une vague de peste à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e, cette maladie fut également prise en compte, de même que le paludisme, qui interrompit à

plusieurs reprises la construction du canal de Panama à la fin du XIX^e siècle.

PEUR ET COLÈRE

Les méthodes pour combattre le choléra n'intéressaient pas seulement les politiciens et les médecins. La maladie et sa gestion ont aussi joué un rôle majeur dans les débats publics du XIX^e siècle. Certaines descriptions contemporaines donnent parfois l'impression que les villes du monde civilisé avaient sombré dans le chaos sous la pression de l'épidémie. C'est ce qui ressort, par exemple, des articles que le poète Heinrich Heine publia en 1832 sur Paris dans le quotidien allemand *Augsburger Allgemeine Zeitung* sous le titre «Französische Zustände» («La situation française»). L'épidémie avait atteint la capitale française le 29 mars : les gens s'effondraient en pleine rue, l'horreur et l'impuissance grandissaient. On évitait les personnes infectées, on abandonnait les malades et les mourants – une situation qui n'est pas sans évoquer certains aspects de la gestion du Covid-19. Tout comme aujourd'hui, d'obscurs mythes conspirationnistes fleurirent. Un empoisonnement fut incriminé, des passants en colère tuèrent des «suspects», le temps des Lumières appartenait au passé, la peur régnait.

La suspicion, la dénonciation, l'exclusion, la stigmatisation ont toujours accompagné les épidémies de choléra. Là encore, certains parallèles existent avec la situation actuelle. Si, à l'époque, les auteurs allemands parlaient de «situation française», on se réfère aujourd'hui continuellement aux fêtards, skieurs et

Lors de l'épidémie du choléra en 1892 à Hambourg, on installa un hôpital de campagne pour isoler et soigner les malades. L'épidémie fit environ 8 600 morts dans la ville.

Suspicion, exclusion, dénonciation ont toujours accompagné les épidémies de choléra

adolescents qui se rencontrent malgré les interdits; et dans certains médias, des reportages sensationnels excitent les esprits en livrant au public des récits fleurant le scandale et des histoires suscitant l'horreur.

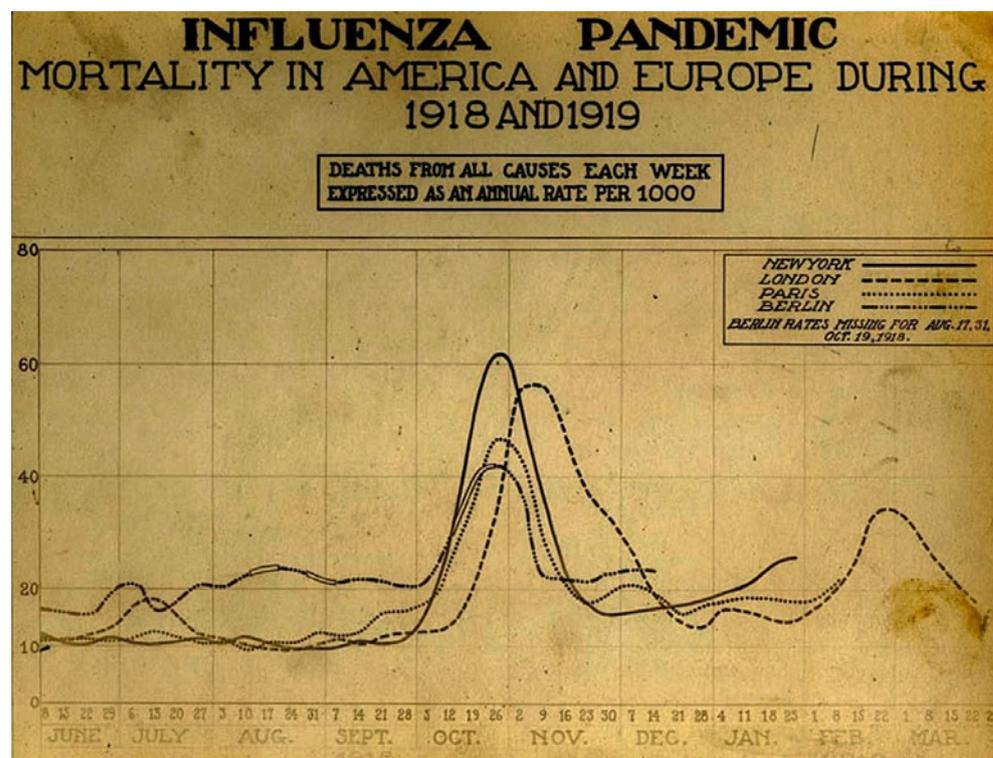
DANGER RÉEL, DANGER RESENTI

En lisant les rapports du XIX^e siècle, on peut avoir l'impression que le choléra était au zénith des maladies mortelles. Mais un bref examen des statistiques de l'époque sur le nombre de malades et de décès suffit à prouver qu'il n'en était rien. Selon les calculs du médecin allemand Friedrich Oesterlen sur la mortalité en Angleterre entre 1850 et 1859, par exemple, le choléra

n'apparaît qu'en huitième position parmi les «maladies zymotiques» (terme donné autrefois aux maladies infectieuses en raison de leur similitude avec le processus chimique de la fermentation: «zymotique» renvoie aux enzymes impliquées dans une réaction chimique). Il n'occupe la première place que lors de l'épidémie de 1854. Parmi ces maladies, la scarlatine, le typhus et la diarrhée ont de loin été les plus meurtriers, suivis à bonne distance par la coqueluche, la rougeole, le «faux croup» (laryngite striduleuse), la variole, et enfin le choléra.

Cela montre que notre perception des dangers sanitaires publics ne dépend pas seulement des risques réels. Avec le recul, nous avons souvent plutôt affaire à des «maladies scandalisées». Nous entendons par là – d'un point de vue purement descriptif et sans aucun jugement de valeur – des maladies dont l'importance épidémiologique réelle est en décalage par rapport à leur perception par l'opinion publique et aux réactions qui s'ensuivent. Les maladies scandalisées ont eu un impact durable sur les mesures de santé publique, sans que cela soit toujours rationnel. Les épidémies aiguës, souvent ressenties comme menaçantes, étaient plutôt (et le sont encore) des arguments déterminants pour discuter et imposer des politiques de santé publique.

Les maladies scandalisées ne constituent pas toujours des priorités pour la santé publique, mais elles suscitent la peur car elles sont peu, voire pas connues, semblent exotiques ou attirent l'attention du public sur des processus sociétaux en cours depuis longtemps >



La propagation de la grippe espagnole a entraîné une forte hausse de la mortalité dans les villes européennes et américaines, comme l'illustre ce graphique d'époque.

► – comme aujourd’hui la mondialisation croissante ou la destruction des habitats naturels. Le conflit entre enquêtes statistiques, évaluations des risques et perception individuelle est souvent difficile à résoudre. Les gens prennent certes en compte les statistiques concernant la maladie, mais de manière abstraite, ils ne se sentent pas concernés : ils ne s’intéressent pas au nombre de cas relevés, seulement au fait qu’ils puissent eux-mêmes tomber malades.

UN NOUVEAU MAL INCONNU : LA « GRIPPE ESPAGNOLE »

Les pandémies de choléra étaient à peine passées qu’une nouvelle épidémie aux répercussions mondiales apparut. En 1918 et 1919, la grippe dite « espagnole » se propagea à travers le monde et fit des millions de morts. Politiciens et médecins furent confrontés à une énigme : on ne connaissait pas exactement la cause de la maladie ni ne savait comment stopper la pandémie. Les médecins allemands ont alors émis l’hypothèse que les troupes de la Triple Entente (la Première Guerre mondiale touchait à sa fin) auraient rapporté la maladie d’Extrême-Orient. Des camps militaires américains ont aussi été suspectés. De leur côté, les Alliés ont aussi répandu la rumeur selon laquelle les Allemands auraient mis en circulation une arme biologique.

Aujourd’hui encore, cette pandémie est appelée « grippe espagnole », car la presse espagnole fut la première à diffuser des informations sur la maladie : l’Espagne ne participant pas activement à la guerre, la censure à l’égard de la presse y était moins marquée que dans les pays en guerre. Les médecins espagnols ont par ailleurs été les premiers en Europe à prendre des mesures plus drastiques pour se protéger de la maladie. Dans le Reich allemand, au contraire, on hésitait.

La pandémie avait atteint l’Allemagne fin mai 1918. En juillet et en octobre, le Conseil de santé du Reich s’était réuni pour débattre sur le nombre croissant de malades et de décès. Bien que la situation se fût nettement dégradée durant cette période, le Conseil n’avait imposé ni l’obligation de se déclarer en cas de maladie ni l’interdiction de se rassembler. De nombreux médecins réclamaient la fermeture des théâtres et l’annulation des manifestations afin d’endiguer l’épidémie. Les municipalités, cependant, s’y opposaient autant que possible. Les responsables politiques craignaient que de telles interventions n’affaiblissent encore l’arrière du pays, déjà fragilisé par le blocus allié. La décision de fermer les écoles fut laissée à leurs directeurs. On conseilla à la population de se laver fréquemment les mains, de se gargariser avec de l’eau salée et de rester au lit en cas d’infection.

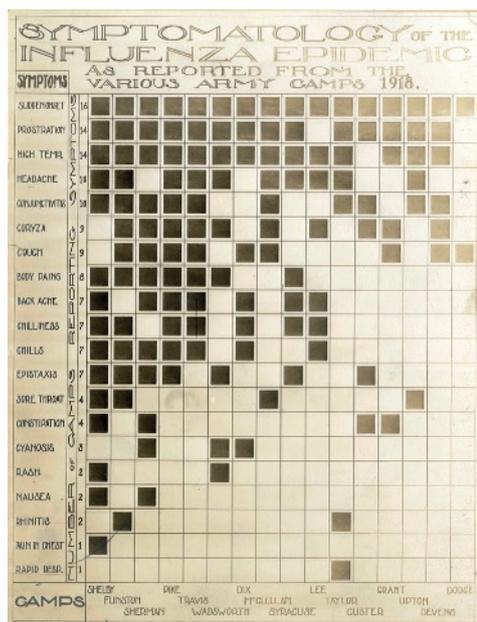
Pendant ce temps, les scientifiques se querrelaient sur la cause de la grippe espagnole.



Aux États-Unis, pendant la pandémie de grippe espagnole, en 1918, les personnes sans masque n’avaient pas le droit de monter dans les transports en commun (ici un tramway à Seattle).

Comme aucune bactérie n’avait été détectée, certains chercheurs se référèrent à des représentations historiques et géographiques dépassées pour expliquer l’apparition de la maladie. Finalement, la théorie émergea qu’un virus (non pas au sens moderne du terme, mais en tant que « poison ») en était responsable.

Loin de ces discours théoriques, les praticiens, quant à eux, étaient aux prises avec la maladie dans les hôpitaux. La plupart du temps, leurs efforts étaient vains. Des remèdes maison tels que l’alcool, le café, le bouillon de poule ou le thé (comme pour le choléra) avaient la cote. Les taux élevés de mortalité documentent à quel point ces mesures étaient inefficaces. Pourtant, alors même que le pire était passé, des médecins continuaient de débattre sur l’efficacité des diverses stratégies thérapeutiques publiques mises en œuvre.



L'apparition subite de la maladie, l'épuisement et la fièvre figuraient parmi les symptômes les plus fréquents de la grippe espagnole dans les camps militaires américains.

Durant l'année qui a suivi la pandémie, le discours sur la santé publique a pris de l'ampleur dans les pays industrialisés occidentaux et a dominé la sphère médicale. La politique sanitaire et la propagande associée se consacraient à divers aspects, du rôle de la forme physique à celui de l'environnement social en passant par les conditions environnementales, la nutrition ou l'hérédité. Les soins de santé couvraient presque tous les domaines de la vie humaine. La prévention des maladies était l'impératif du moment.

L'écrivain américain Sinclair Lewis a habilement caricaturé ce phénomène dans son roman *Arrowsmith*, paru en 1925: il y décrit comment les responsables de la politique de santé organisaient des semaines à thèmes – «semaines des meilleurs bébés», «semaines pour davantage de bébés», «semaines contre la tuberculose»... – et s'engageaient pour davantage d'air frais, moins de consommation d'alcool et de nicotine, des dents plus saines, alors même qu'ils s'interrogeaient quant au bénéfice du port du masque lors d'une pandémie de grippe.

DES SIMILITUDES AVEC LE PASSÉ

Que signifie tout cela concernant le SARS-CoV-2? De nombreux aspects de la pandémie actuelle nous rappellent les épidémies précédentes, même si nous devons nous garder de n'utiliser l'histoire que pour la comparer au présent. Les sociétés, le niveau des connaissances, les possibilités médicales d'alors et d'aujourd'hui sont bien trop différents. On peut cependant retenir de l'histoire de la médecine que chaque époque s'inspire des modèles

antérieurs de protection de la santé, tout en continuant de les penser et de les développer. Dans les années 1920, peu après la grippe espagnole, la prévention des maladies à tous les niveaux a inspiré des débats de société. Comme l'agent pathogène était inconnu et sans traitement spécifique, les gens se sont tournés vers des mesures anciennes de contrôle des maladies: se laver les mains, aérer, porter un masque, fermer les écoles, etc. Par la suite, l'extension des mesures de prévention s'est concentrée sur des interventions horizontales, c'est-à-dire sur une amélioration globale du cadre de vie, à la manière de Max von Pettenkofer des décennies auparavant.

Les mesures de lutte contre la pandémie actuelle vont aussi dans ce sens. Si les médecins et les responsables de santé publique espèrent que, au bout du compte, la vaccination sera l'intervention verticale la plus efficace possible, ils tentent d'ici là d'imposer des approches horizontales telles que des règles de distanciation sociale, d'hygiène générale, l'obligation du port du masque et les interdictions de se rassembler. Ils débattent des conditions de vie des ouvriers, de la cohabitation des humains et des animaux, des conditions climatiques et du comportement humain, des facteurs de risque tels que l'âge ou le sexe et de la manière dont on peut y remédier horizontalement, par exemple en interdisant les visites dans les maisons de retraite et les maisons de soins. Ce faisant, ils s'appuient sur des institutions internationales qui se sont développées depuis le XIX^e siècle et ont fait leurs preuves.

De même, la population réagit d'une façon qui n'est pas sans rappeler le passé: elle pratique l'exclusion (par exemple en exigeant la fermeture d'une frontière), la stigmatisation (de ceux qui, par exemple, nient l'existence du SARS-CoV-2), la suspicion (à l'égard, par exemple, d'une «transformation» prétendument planifiée par l'État), ou encore la dénonciation, aujourd'hui souvent *via* les réseaux sociaux. Et elle va même jusqu'à répandre des mythes complotistes. Certains médias tentent également, comme par le passé, d'exploiter la situation à leur profit en diffusant des histoires scandaleuses propres à éveiller la peur et l'indignation.

Une question importante, dont la réponse définitive n'apparaîtra probablement qu'après la pandémie, est de savoir dans quelle mesure le Covid-19 représente une maladie scandalisée. Mais la question la plus importante sera certainement de savoir quels enseignements les sociétés actuelles tireront de leur expérience du SARS-CoV-2 pour leur future cohabitation culturelle. Outre une meilleure prévention et une réaction plus rapide aux épidémies, ils devraient certainement inclure la limitation et la compensation des difficultés et injustices issues des mesures de protection. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Fangerau et A. Labisch, **Pest und Corona – Pandemien in Geschichte, Gegenwart und Zukunft**, Herder, 2020.

W. Witte, **The plague that was not allowed to happen. German medicine and the influenza epidemic of 1918-19 in Baden**, dans H. Phillips et D. Killingray (éd.), *The Spanish Influenza Pandemic 1918-19, New Perspectives*, Routledge, 2003, pp. 49-57.

S. M. Tomkins, **The failure of expertise: Public health policy in Britain during the 1918-19 Influenza epidemic**, *Social History of Medicine*, vol. 5(3), pp. 435-454, 1992.

A. M. Lilienfeld et D. E. Lilienfeld, **Foundations of Epidemiology**, Oxford University Press, 1980.

A. M. Lilienfeld (éd.), **Times, Places, and Persons. Aspects of the History of Epidemiology**, Johns Hopkins University Press, 1980.

A. L. Cochrane, **Effectiveness and Efficiency. Random Reflections on Health Services**, Nuffield Provincial Hospital Trust, 1972.

ANNE-MARIE MOULIN

est directrice de recherche émérite du CNRS au sein du laboratoire Sphere (CNRS, universités de Paris et Paris 1 Panthéon-Sorbonne), médecin et agrégée de philosophie, et membre de la mission chargée par le gouvernement français d'évaluer la gestion de la crise du Covid-19.



La démocratie sanitaire reste un défi

Dans la gestion des épidémies, quelles leçons tirer du passé, qu'il soit lointain ou remonte à la première année de la pandémie actuelle? Le point avec Anne-Marie Moulin, historienne de la médecine.

Tout au long du XIX^e siècle, plusieurs vagues d'épidémie de choléra avaient sévi partout dans le monde. Pourtant, en 1892, alors même que le médecin allemand Robert Koch avait décrit en 1884 le «vibrion» du choléra, un nouvel épisode a ravagé Hambourg, en Allemagne, causant plus de 8 600 morts. Comment expliquer la gravité de cette épidémie ?

Les historiens se sont beaucoup penchés sur cet épisode, notamment en comparant Hambourg à Brême, voisine et pourtant très peu touchée: 6 morts seulement, alors que Hambourg a perdu 12,5% de sa population. Au début de l'épidémie, les deux villes ont eu des comportements très différents pour des raisons multiples.

Hambourg était un grand port marchand très actif. Or prendre des mesures d'isolement et de quarantaine, comme cela se faisait depuis le Moyen Âge en Europe en cas d'épidémie, signifiait une catastrophe: le coup d'arrêt pour le commerce et la ruine pour la ville. De plus, jusqu'à la guerre de 1870, Hambourg, fière de son passé, avait résisté à l'influence prussienne et gardé jalousement son indépendance. Puis, devant la victoire de la Prusse sur la France et le nouveau prestige de Guillaume II, la ville s'était résignée à s'intégrer à l'Allemagne nouvelle, mais son Sénat avait conservé son autonomie de décision et les recommandations de Berlin avaient peu d'impact.

Aussi, quand en août 1892, Berlin, alertée de la progression du choléra en Russie, a pris certaines mesures dictées par Koch pour éviter la propagation de l'épidémie, les sénateurs de Hambourg ont nié la présence du choléra sur leur territoire, en accord avec des médecins. D'ailleurs, la plupart de ces derniers ne savaient ni utiliser un microscope ni cultiver la bactérie du choléra, à peine croyaient-ils en son existence.

Hambourg était alors le port principal où s'embarquaient les immigrants de l'Est, en particulier les juifs, pour les États-Unis. Et la préoccupation constante du Sénat était de se débarrasser de ces migrants pauvres et en mauvais état. La suite est abominable: le Sénat, pressé de les expédier, a délivré des certificats de santé aux capitaines pour que les immigrants puissent sans retard prendre la mer. Nombre d'entre eux sont morts sur le bateau qui les emmenait aux États-Unis, ou sur celui sur lequel les Américains, qui avaient compris le danger, les ont refoulés.

Brême est aussi une ville portuaire...

Oui, mais plus petite. Surtout, elle avait mieux saisi l'importance de la découverte du microbe. De plus, à la différence de Hambourg, elle avait pris des mesures d'hygiène dès le lendemain de la guerre en installant sur le

réseau de distribution d'eau un système de filtration à sable qui s'est révélé suffisant pour arrêter les bactéries.

Fin août 1892, alors que les cas de diarrhée se multipliaient, le Sénat de Hambourg a considéré qu'il s'agissait de banales diarrhées saisonnières, choléra nostras, «notre» banal choléra local. Il n'a rien fait et perdu un temps précieux, alors que Brême prenait déjà des mesures d'isolement des premiers malades. En une semaine, la maladie a flambé partout dans Hambourg. Le basculement s'est produit en quelques jours, comme avec le Covid-19.

Un autre facteur a fragilisé Hambourg: la ville était pleine de taudis où s'entassaient les pauvres et les immigrants, alors que Brême était surtout faite de petites maisons, abritant deux familles en moyenne.

Commençait-on à avoir une politique nationale de lutte contre la propagation de l'épidémie ?

Oui, Koch s'est déplacé à Hambourg, envoyé par Berlin. Mais quand il a pressé le Sénat de diagnostiquer le choléra, c'était trop tard. D'abord, on ne transforme pas un système de distribution d'eau du jour au lendemain. En revanche, il existe une mesure très simple: ne boire que des boissons bouillies. Cependant, la mise en place n'a pas été facile, tout comme aujourd'hui. Il ne suffisait pas de prendre la décision, il fallait encore la communiquer à la population, la placarder sur des panneaux dans la ville, qu'il fallait fabriquer, payer et installer. Trois ou quatre jours au minimum sont passés, qui ont suffi à faire perdre le contrôle. Et encore fallait-il que les individus concernés lisent l'allemand et qu'ils aient de quoi faire bouillir l'eau...

Comment cela se passait-il ailleurs ?

Prenait-on la mesure du choléra aussi vite qu'à Brême ou était-on plutôt dans le scénario de Hambourg ?

L'épidémie de choléra à Hambourg a été, en Allemagne, une catastrophe dont il n'y a aucun autre exemple. Les autres villes d'Allemagne ont été peu touchées, sans doute parce que moins concernées par l'afflux des migrants de l'Est. À l'annonce de la progression du choléra en Russie, une mesure préventive de Koch avait été de faire voyager les personnes provenant de ces régions dans des wagons plombés et de les acheminer directement vers les deux ports.

Le cas de la Russie est particulièrement intéressant. Pour diverses raisons politiques et sociales, la gestion du choléra y était désastreuse et la découverte du microbe par Koch n'avait pas changé grand-chose. En revanche, on s'y préoccupait d'une innovation dont on ne parlait pas du tout à Hambourg: le traitement du choléra.

> Ce traitement n'était pas très spécifique: depuis les observations du militaire et statisticien Alexandre Moreau de Jonnés, dans les années 1830, on savait bien qu'il fallait faire boire les malades. Mais très vite, les cholériques vomissaient et étaient dans l'incapacité de boire. Il aurait fallu les réhydrater par voie parentérale, c'est-à-dire par injections. Or, techniquement, on ne savait pas vraiment faire. Pourtant, à l'époque du choléra de Hambourg, les médecins russes formaient une corporation brillante. Dans une thèse soutenue en 1892, une doctoresse de Saint Pétersbourg a même décrit un traitement par injection de litres d'eau salée dans les veines. Cependant, on y découvre aussi qu'ils ne sont pas allés jusqu'au bout de leur essai.

Le malade était en train de mourir par déshydratation et, en quelques heures, se transformait en cadavre, on le réhydratait et il renaissait, sortait du coma, échangeait quelques mots, mais une demi-heure après, la diarrhée et les vomissements recommençaient, et il sombrait de nouveau. On recommençait l'injection d'eau, et voilà qu'il ressuscitait, puis sombrait encore. Mais, chose étrange, les médecins finissaient par abandonner. Ils n'avaient pas l'idée de poursuivre la thérapeutique, pourtant applicable. On ne s'improvise pas réanimateur!

À Hambourg, les médecins n'en étaient pas du tout là: pas d'essai de réhydratation parentérale. On soignait avec du lait de poule et autres remèdes du même genre et les patients décédaient.

Au passage, le cas de la Russie illustre aussi un drame du choléra au XIX^e siècle: un peu partout en Europe, les médecins ont été pris comme boucs émissaires. En France, certains se déguisaient en ouvriers pour se déplacer dans la rue, de peur d'être agressés. Mais la situation était pire en Russie, où des médecins, accusés d'être au service du gouvernement pour tuer les pauvres, étaient assassinés à la campagne et dans les grandes villes.

La querelle entre Robert Koch et Louis Pasteur a-t-elle influé sur la gestion de l'épidémie de choléra ?

Le duel Pasteur-Koch est paradoxal. Les deux savants étaient dans le même camp scientifique: tous deux défendaient une théorie bactérienne des maladies. Mais, du fait de l'antagonisme franco-allemand, surtout au lendemain de la guerre de 1870, l'hostilité entre eux était totale et écartait toute idée de collaboration. Mais l'absence de collaboration n'excluait pas l'espionnage. Quelques rares stagiaires francophones passés par le laboratoire de Koch y ont pris force notes, par exemple sur des tours de main susceptibles d'aider à cultiver les bactéries.

C'est presque amusant de voir comment, aujourd'hui, la situation s'est retournée. Depuis le début de l'épidémie de Covid-19, en France, on est comme obsédé par la comparaison avec l'Allemagne et sa gestion de la crise sanitaire. Il ne s'agit plus de rivalité et de concurrence, mais d'émulation. L'Allemagne est désormais un modèle. C'est un renversement complet par rapport au duel Pasteur-Koch.

QUELQUES CHIFFRES

30 513

C'est le nombre de décès dus au Covid-19 enregistrés en France durant la première vague de l'épidémie, de janvier à août 2020, selon le Centre européen de prévention et de contrôle des maladies, soit 45 pour 100 000 habitants, contre 34 524 (51 pour 100 000) durant la deuxième vague de 2020, de septembre à décembre. L'Allemagne a compté 9 272 décès durant la première vague (11 pour 100 000) et 25 302 durant la seconde (30 pour 100 000).

3

Le nombre de décès au Portugal durant la deuxième vague (5 400, soit 52 pour 100 000) a été 3 fois plus élevé que durant la première (1 796, soit 17 pour 100 000).

400

À la mi-mars 2020, l'Allemagne effectuait déjà plus de 400 tests pour 100 000 habitants par semaine, tandis qu'au même moment, la France n'en effectuait que 109 pour 100 000. Elle n'a dépassé les 400 tests pour 100 000 que début juillet 2020.

A-t-on raison de vouloir prendre l'Allemagne comme modèle ? Pourquoi ne regarde-t-on pas plus du côté des pays scandinaves, par exemple, et de leur gestion qui semble plus responsabiliser les gens ?

On dit souvent que l'Allemagne a fait mieux que notre pays dans la gestion de l'épidémie de Covid-19. C'est vrai durant la première vague, beaucoup moins pour la deuxième. Durant la première vague, grâce notamment à Christian Drosten, virologue de l'hôpital de la Charité, à Berlin, l'Allemagne a massivement testé, alors que la France a testé peu et lentement. Le confinement allemand a aussi été plus léger et moins dramatique pour l'économie. Mais la deuxième vague en Allemagne a été plus meurtrière que la première, ce qui rend la comparaison avec la France moins dissymétrique.

La comparaison entre pays reste néanmoins délicate. Les statistiques de mortalité et de morbidité dont on dispose reposent essentiellement sur les données hospitalières. Et quant aux mesures de gestion, elles s'appliquent à des sociétés différentes, évoluant dans des climats distincts. La Finlande, par exemple, est un pays très froid avec une faible densité de population, où les gens sont naturellement distants les uns des autres. Difficile de comparer sa gestion du Covid-19 avec celle de la France ou de l'Espagne. Il faut aussi prendre en compte la géographie, les institutions sanitaires qui varient d'un pays à l'autre, le mode de vie et surtout l'antériorité.

Qu'entendez-vous par antériorité ?

D'une part, les inégalités sociales – notamment en matière de santé – préexistent à l'épidémie et vont forcément être révélées et aggravées par elle, sans parler du contrecoup des mesures économiques sur le sanitaire. D'autre part, chaque pays a son propre système de soins. En France, l'évolution du système hospitalier ces dernières années est regrettable. Sa gestion bureaucratique dominée par les économies budgétaires l'a considérablement affaibli. Le personnel est désemparé, démoralisé à cause des salaires et des conditions de travail. Durant la première vague, le système de soins a tenu grâce à l'héroïsme de tous, mais l'exploit n'est pas renouvelable indéfiniment. Si l'on ne prévoit pas une réforme en

profondeur, on risque de retrouver la situation antérieure, voire une situation pire.

Comparer les pays, c'est donc aussi comparer les systèmes de santé avant l'épidémie. Au départ, la comparaison était très en faveur de l'Allemagne: davantage de lits de réanimation, de personnel médical... Mais quand on regarde dans le détail, tout n'est pas aussi rose. Par exemple, l'Allemagne a aussi du mal à recruter du personnel soignant... Le rôle du privé y est peut-être aussi différent. De façon générale, la pandémie prouve que la «préparation» passe par la restauration d'un meilleur fonctionnement des hôpitaux, ainsi que par un rapport différent entre l'hôpital et la médecine de ville.

Comparer la façon dont les pays ont géré l'épidémie de Covid-19, c'est aussi comparer les systèmes de santé avant l'épidémie

Et par une réflexion sur la vieillesse...

En effet. En France, les autorités savaient que les Ehpad avaient évolué dramatiquement, pour deux raisons: la population vieillit et, de plus, comprend qu'il est préférable de rester chez soi grâce à quelques aménagements. Les Ehpad sont donc peuplés de gens de plus en plus dépendants. La survie moyenne y est de deux ans. Par conséquent, si l'on tient à conserver les aînés en vie, il faut repenser les Ehpad, les médicaliser davantage et plus intelligemment. Ils ne peuvent plus fonctionner avec un médecin qui passe de temps en temps et encore moins avec des téléconsultations, et avec un personnel qui manque de temps.

La gestion de la vieillesse est donc un élément important à prendre en compte en comparant les pays. Le Portugal, notamment, a plutôt bien géré la première vague. Peut-être parce que les personnes âgées sont prises en

charge par les familles et qu'il y a donc peu d'équivalents des Ehpad.

Mais les nouveaux variants du virus changent la donne et le Portugal souffre actuellement d'une troisième vague particulièrement forte. Quelque chose frappe dans cette pandémie: d'une part, l'urgence dans laquelle il faut prendre des décisions – comme pour le choléra à Hambourg, c'est une question de jours – et, d'autre part, l'incertitude scientifique. On a beau avoir des connaissances qui l'emportent de beaucoup sur celles de 1892, l'incertitude nous bride toujours. «Rien n'est jamais acquis à l'homme», disait Louis Aragon. Des vers particulièrement d'actualité aujourd'hui.

Que pensez-vous de la décision du gouvernement français fin janvier 2021: pas de reconfinement, alors que tout le monde pensait qu'il allait reconfiner?

C'est un scénario que le sociologue allemand Max Weber a bien illustré dans son livre *Le Savant et le Politique* (1919). Dans un premier temps, au moment du premier confinement, le gouvernement s'est complètement abrité derrière les scientifiques. Puis il s'en est peu à peu écarté. Les scientifiques sont aujourd'hui en faveur d'un reconfinement et le gouvernement ne suit pas, et pas seulement au regard d'intérêts économiques sordides. Il est devenu à juste titre plus soucieux des problèmes socioéconomiques que le confinement aggraverait encore.

Comment améliorer les mesures prises?

Le gouvernement a géré le début de la crise de façon totalement verticale, de même que sa communication s'est montrée très infantilisante. Emmanuel Macron a amendé ses propos au fur et à mesure, le «je» a fait place au «nous», mais la gestion reste encore très verticale.

En avril 2020, une lettre ouverte d'acteurs de la lutte contre le sida publiée sur le site Mediapart a rappelé la leçon du sida. On ne peut lutter contre une épidémie qu'en écoutant les gens, en examinant comment ils la vivent et peuvent la contrer à leur niveau. C'est enfin en train de venir timidement, avec l'apparition d'un comité de la vaccination et d'autres structures de concertation qui se mettent en place, mais c'est tardif!

On a raté un essai de démocratie sanitaire en conditions réelles. Évidemment, l'enjeu est complexe, et les difficultés de taille. Ni l'urgence ni les connaissances actuelles ne permettaient de manœuvrer facilement. Il n'empêche qu'on aurait pu saisir davantage cette occasion de tenter la gestion de l'épidémie de façon plus démocratique, ce que peut-être au fond jamais personne n'a encore fait. ■

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

G. Lachenal et G. Thomas, *L'histoire immobile du coronavirus*, dans C. Bonneuil (éd.), *Comment faire ?*, Seuil, 2020, pp. 62-70.

R. J. Evans, *Death in Hamburg*, Penguin Books, 2006.

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul

P.86 Art & science

P.88 Idées de physique

P.92 Chronique de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

P.98 À picorer

ADDITION ET MULTIPLICATION, DES TABLES QUI INTRIGUENT

Combien de nombres différents y a-t-il dans une table d'addition ou de multiplication? Cette question est à l'origine d'une famille de passionnants problèmes arithmétiques.

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).

On croit tout savoir de l'addition et de la multiplication des entiers. Ce n'est pas le cas. L'étude des tables pour les deux opérations a donné naissance à une frénésie de recherches dont le point de départ est un article publié en 1983 dans la revue *Studies in Pure Mathematics* par le prolifique mathématicien hongrois Paul Erdős et son compatriote Endre Szemerédi. Nous verrons que la conjecture principale de leur article reste ouverte mais que, petit à petit, les chercheurs s'approchent de sa résolution.

Vous avez sans doute remarqué que dans une table d'addition, les cases contiennent des nombres plusieurs fois présents. Le 10 est par exemple le résultat de $1+9$, mais aussi de $2+8$, $3+7$, $4+6$, $5+5$, $6+4$, $7+3$, $8+2$ et $9+1$: 10 est présent dans neuf cases. Dans la table de multiplication, on trouve bien $2 \times 6 = 12 = 3 \times 4 = 4 \times 3 = 6 \times 2$, mais, au total, il y a moins de répétitions. Il y a 19 nombres différents dans la table d'addition, alors que dans la table de multiplication on en trouve 42 (voir l'encadré 1). Le phénomène se confirme si, au lieu de prendre les tables pour les nombres entre 1 et 10, on examine les tables pour les entiers entre 1 et 100: la table d'addition contient 199 nombres différents, tandis que la table de multiplication en contient 2906.

Pour certaines séries de nombres autres que celles d'entiers consécutifs, la domination de la multiplication n'est plus vraie. Il faut aller voir de près. Nous allons nous

intéresser aux tables d'addition et de multiplication que l'on obtient quand on se donne n nombres $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, avec $0 < a_1 < a_2 < \dots < a_n$, à la place de $\{1, 2, \dots, 10\}$ des tables apprises à l'école.

TABLES ASSOCIÉES À UNE SUITE D'ENTIERS

Avec $\{1, 2, 5, 7\}$ par exemple, on a les deux tables:

+	1	2	5	7	×	1	2	5	7
1	2	3	5	8	1	1	2	5	7
2	3	4	7	9	2	2	4	10	14
5	6	7	10	12	5	5	10	25	35
7	8	9	12	14	7	7	14	35	49

Avec $\{1, 2, 4, 8\}$ les tables sont:

+	1	2	4	8	×	1	2	4	8
1	2	3	5	9	1	1	2	4	8
2	3	4	6	10	2	2	4	8	16
4	5	6	8	12	4	4	8	16	32
8	9	10	12	16	8	8	16	32	64

Nous avons mis en rouge les nombres au-dessus de la diagonale, symétriques de ceux au-dessous de la diagonale à cause de la commutativité de l'addition et de la multiplication.

Les cases noires dans une telle table sont au nombre de $n(n+1)/2$, car il y en a une sur la première ligne, deux sur la seconde, ..., n sur la dernière, ce qui fait au total: $1+2+\dots+n = n(n+1)/2$. Les cases noires contiennent parfois des nombres tous différents, comme dans les deux tables de $\{1, 2, 5, 7\}$ ainsi que pour la table d'addition de $\{1, 2, 4, 8\}$, mais pas pour la table de multiplication de $\{1, 2, 4, 8\}$.

QUELQUES RÉPÉTITIONS DANS LES TABLES

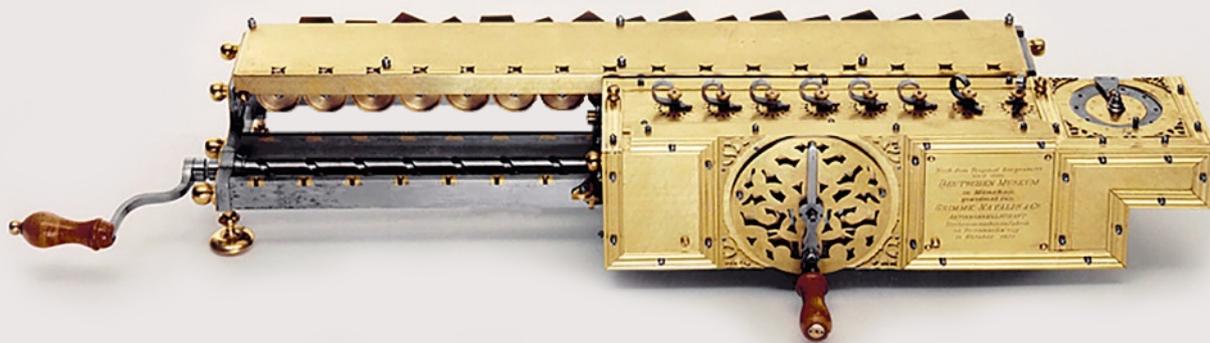
1

Les tables d'addition et de multiplication usuelles (ci-contre) contiennent respectivement 19 et 42 nombres différents. Savoir si cet écart important est un hasard ou s'il existe des résultats et des règles généralisant la remarque est le sujet du présent article. Ci-dessous, la machine à multiplier de Leibniz de 1694.

+	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	×	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	20
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	30
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	40
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	60
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	70
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	80
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90	90
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	100

19 cases différentes

42 cases différentes



Le nombre minimal de cases rouges différentes de la table d'addition est $2n-1$, car l'hypothèse $0 < a_1 < a_2 < \dots < a_n$ entraîne que :

$$a_1 + a_1 < a_2 + a_1 < \dots < a_{n-1} + a_1 < a_n + a_1 < a_n + a_2 < \dots < a_n + a_n$$

Ce nombre minimum est atteint pour les tables d'addition des entiers entre 1 et n . Le minimum pour la table de multiplication est aussi $2n-1$, car :

$$a_1 \times a_1 < a_2 \times a_1 < \dots < a_{n-1} \times a_1 < a_n \times a_1 < a_n \times a_2 < \dots < a_n \times a_n$$

Ce minimum est atteint pour la table de multiplication de $\{1, 2, 4, \dots, 2^{n-1}\}$.

MAXIMUM DE CASES DIFFÉRENTES

Les questions qui agitent les mathématiciens suite à l'article de 1983 concernent justement ce nombre de cases différentes dans les parties rouges des tables. Avant de présenter la grande question posée, nous allons envisager une série de problèmes d'arithmétique plus simples qui nous conduiront à découvrir quelques suites numériques inattendues.

Question 1. Existe-t-il des suites infinies (a_i) telles que, pour tout entier n , la table d'addition de $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ait $n(n+1)/2$ cases rouges différentes? Nous dirons qu'une telle suite est optimale pour l'addition et que les tables d'addition associées sont optimales.

Question 2. Même question pour la table de multiplication. Les suites (b_i) donnant le plus possible de produits seront des «suites optimales pour la multiplication» et les tables

associées seront des «tables optimales pour la multiplication».

Question 3. Même question encore pour les deux tables en même temps. La question est donc: existe-t-il des suites infinies (c_i) telles que, pour tout entier n , les tables d'addition et de multiplication de $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ aient chacune le maximum possible de cases rouges différentes, c'est-à-dire $n(n+1)/2$ chacune?

Question 4. Peut-on trouver des suites infinies (d_i) telles que, pour tout entier n , les tables d'addition et de multiplication de $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ aient chacune exactement $2n-1$ cases différentes, ou au plus kn cases différentes pour un nombre k à préciser?

SUITES ET TABLES OPTIMALES POUR L'ADDITION

Pour la question 1, on cherche donc une suite infinie $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$, avec $0 < a_i < a_j$ quand $i < j$, telles que les tables d'addition associées aux n premiers éléments de la suite aient $n(n+1)/2$ cases différentes. Dit autrement, on veut que toutes les sommes $a_i + a_j$ avec $i \geq j$ soient différentes.

Procédons progressivement pour rechercher une telle suite. Avec $a_1=1$ et $a_2=2$, ça marche, car la table d'addition comporte trois cases rouges correspondant à $1+1=2$, $1+2=3$, $2+2=4$, qui sont trois nombres différents. On essaie $a_3=3$. Cet a_3 ne convient pas car $2+2=1+3$. On essaie donc $a_3=4$. Cette fois, c'est bon, la table d'addition pour $\{1, 2, 4\}$ comporte six >

> cases rouges différentes correspondant à $1+1 = 2$, $1+2 = 3$, $2+2 = 4$, $1+4 = 5$, $2+4 = 6$ et $4+4 = 8$. Quand on applique cette méthode de recherche progressive du plus petit nombre qui convient, on parle d'algorithme glouton. Cette méthode systématique de construction va jouer un rôle important dans toute cette recherche (voir l'encadré 3).

Pour savoir ce que donne l'algorithme glouton pour le problème qui nous concerne, il vaut mieux écrire un petit programme et faire calculer l'ordinateur. En 30 étapes gloutonnes, il trouve la suite: 1, 2, 4, 8, 13, 21, 31, 45, 66, 81, 97, 123, 148, 182, 204, 252, 290, 361, 401, 475, 565, 593, 662, 775, 822, 916, 970, 1016, 1159, 1312, ...

Réussir à trouver 30 nombres ne garantit pas *a priori* qu'on trouvera toujours un nouvel élément à ajouter jusqu'à l'infini. Est-ce que la méthode peut se bloquer? Non, cela ne se produira pas, car, en ajoutant un nombre N plus grand que toutes les sommes déjà dans la table pour $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, on est certain d'obtenir avec ce nouveau nombre une nouvelle ligne $\{N+a_1, N+a_2, \dots, N+a_n\}$ ne comportant que des cases différentes de celles de la table précédente (car dépassant tous les nombres de la table précédente) et composée de nombres différents. Il y

a donc au moins un nombre N qui peut compléter $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$; il y en a donc un plus petit qui sera le a_{n+1} trouvé par l'algorithme glouton.

Malgré le début 1, 2, 4, 8, qui correspond aux puissances de 2, la suite trouvée est finalement assez étrange et semblait inconnue. Heureusement, nous disposons du merveilleux site de l'Encyclopédie en ligne des suites numériques de Neil Sloane (<https://oeis.org>). Si on l'interroge pour la suite calculée, on trouve que c'est la suite A005282 portant le nom de « suite de Mian-Chowla » car elle a été imaginée en 1944 par les chercheurs indiens Abdul Majid Mian et Sarvadaman Chowla.

Pour la suite (a_n) de Mian-Chowla, on sait que $n^2/2 + cn < a_n < n^3/6 + c'n^2$, où c et c' sont des constantes positives, et on conjecture que a_n vaut environ $n^3/(\log n)^2$ quand n devient grand. Les termes de la suite ont été calculés jusqu'à 25000 (<https://oeis.org/A005282/a005282.txt>). Aucune formule connue ne permet d'avoir directement le n -ième terme de la suite!

UN PARADOXE ?

Il se produit quelque chose d'étrange pour la somme des inverses de la suite (a_n) de Mian-Chowla, à savoir $1/1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/13 + 1/21$

2

TABLES OPTIMALES POUR L'ADDITION

Lorsque l'on construit une suite de nombres entiers en partant de $a_1 = 1$ et en s'arrangeant pour ajouter pas à pas des nombres tels que la table d'addition et la table de multiplication de $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ comportent chacune le plus grand nombre possible de résultats différents, c'est-à-dire $n(n+1)/2$, on obtient la suite : 1, 2, 5, 7, 15, 22, 31, 50, 68, 90, 101, 124, 163, 188, 215, 253, 322, 358, 455, 486, 527, 631, 702, 780, 838, 920, 1 030, 1 062, 1 197, 1 289, 1 420, 1 500, 1 689, 1 765, 1 886, 2 114, 2 353, 2 410, 2 570, 2 686, 2 857, 3 063, 3 207, 3 477, 3 616, 3 845, 3 951, 4 150, 4 480, 4 595. Le graphique représente les termes de la suite A337655. Les tables d'addition et de multiplication sont représentées pour $n = 8$.

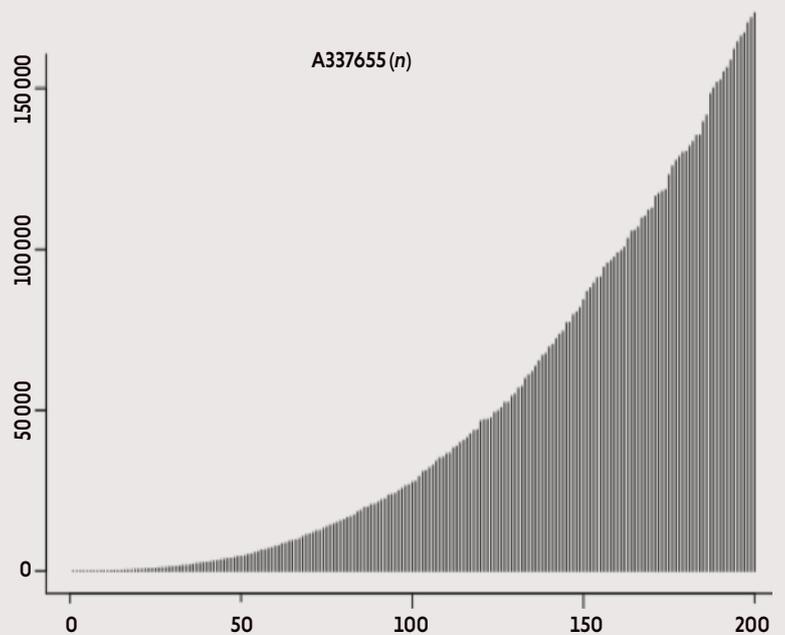


		Table d'addition							
+		1	2	5	7	15	22	31	50
1	1	1	3	6	8	16	23	32	51
2	2	3	4	7	9	17	24	33	52
5	5	6	7	10	12	20	27	36	55
7	7	8	9	12	14	22	29	38	57
15	15	16	17	20	22	30	37	46	65
22	22	23	24	27	29	37	44	53	72
31	31	32	33	36	38	46	53	62	81
50	50	51	52	55	57	65	72	81	100

		Table de multiplication							
×		1	2	5	7	15	22	31	50
1	1	1	2	5	7	15	22	31	50
2	2	2	4	10	14	30	44	62	100
5	5	5	10	25	35	75	110	155	250
7	7	7	14	35	49	105	154	217	350
15	15	15	30	75	105	225	330	465	750
22	22	22	44	110	154	330	484	682	1100
31	31	31	62	155	217	465	682	961	1550
50	50	50	100	250	350	750	1100	1550	2500

+1/31+... Cette somme d'inverses est une façon de mesurer la petitesse des termes de la suite, car plus une suite est petite à l'infini, plus la somme de ses inverses est grande.

Pour construire la suite de Mian-Chowla, on a utilisé à chaque fois le plus petit nombre permettant de compléter ce que l'on connaît déjà (algorithme glouton). On s'attendait donc à ce que la somme des inverses des termes de la suite soit la plus grande possible pour une suite (a_i) vérifiant $0 < a_i < a_j$ pour $i < j$ et ayant toutes les sommes $a_i + a_j$ avec $i \geq j$ différentes.

Or ce n'est pas vrai! Ce résultat provient du chercheur chinois Zhenxiang Zhang. Il a considéré la suite (a_i') ayant les mêmes termes que a_i jusqu'au quatorzième, qui est 182, puis au lieu de prendre 204, il a pris 229, qui convient pour que toutes les cases rouges de la table d'addition de $\{1, 2, 4, 8, 13, 21, 31, 45, 66, 81, 97, 123, 148, 182, 229\}$ soient différentes. Il a alors poursuivi sa suite en utilisant le principe de l'algorithme glouton. Cette nouvelle suite porte le nom bien sûr de « suite de Zhang » et elle est présente dans l'encyclopédie de Neil Sloane sous le numéro A259964: 1, 2, 4, 8, 13, 21, 31, 45, 66, 81, 97, 123, 148, 182, 229, 257, 290, 312, 381, 419, 467, 507, 621, 721, 770, 864, 927, 1050, 1178, 1289, ...

Zhenxiang Zhang a montré que la somme des inverses des termes de la suite de Mian-Chowla est inférieure à 2,1596, alors que la somme des inverses des termes de sa suite est supérieure à 2,1597. Au sens de la somme des inverses, la suite de Zhang est donc meilleure que la suite de Mian-Chowla.

La raison de ce qui apparaît comme un paradoxe est que, même si l'on utilise l'algorithme glouton pour compléter la suite de Zhang après 229, les nombres qui viennent sont un peu plus petits que ceux de la suite de Mian-Chowla et que le léger désavantage que Zhenxiang Chang a accepté en prenant 229 au lieu de 204 est compensé par ce qui vient au-delà. En un mot: Zhenxiang Zhang accepte de se laisser dépasser en prenant 229, mais il compense plus loin ce handicap et termine gagnant!

On ignore aujourd'hui quelle est, dans l'absolu, la suite optimale pour les tables d'addition qui donne une somme des inverses la plus grande possible, ni même si cela existe puisqu'il se peut que toute valeur atteinte par une suite optimale soit battue par une autre. Gregory Yovanof et Herbert Taylor ont cependant démontré en 2000 qu'on pouvait faire mieux que la suite de Zhang et dépasser 2,1600383 pour la somme des inverses. À propos des tables d'addition, on se trouve donc face à une question non résolue et probablement difficile.

Les suites de Mian-Chowla et de Zhang donnent des tables d'addition optimales: leurs cases rouges sont toutes différentes jusqu'à l'infini. Il existe cependant bien d'autres

3



L'ALGORITHME GLOUTON

Pour calculer les suites de l'encadré 2 et de nombreuses suites mentionnées dans le présent article, on utilise des algorithmes « gloutons ». L'idée est de décomposer la recherche d'un objet en une série d'étapes et de se contenter de la meilleure solution possible à chaque étape, en espérant que, quand on regroupera le résultat des étapes successives, on aura la meilleure solution possible globalement. À défaut de produire la meilleure solution recherchée, l'algorithme donne souvent une assez bonne solution. L'intérêt est que ces algorithmes gloutons sont rapides comparés aux méthodes qui rechercheraient dans tout l'espace des solutions possibles. Parfois on démontre que l'algorithme glouton donne globalement la meilleure solution.

Considérons par exemple le problème consistant à atteindre une somme donnée N avec le moins de pièces possibles quand on dispose de pièces de monnaies de 1, 2, 5, 10, 20, 50 et 100 unités. Pour atteindre la somme N , l'algorithme glouton propose d'utiliser étape par étape la plus grande pièce possible inférieure ou égale à la somme qui reste à atteindre. Pour

$N = 66$, il donnera donc la consigne de prendre 50, puis 10, puis 5, puis 1. Quand les pièces disponibles sont 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, on démontre que cette solution, obtenue rapidement, sera toujours la meilleure en nombre de pièces. L'algorithme glouton est dans ce cas parfaitement satisfaisant, heureusement ce sont les dénominations utilisées dans notre monnaie.

En revanche, si les pièces disponibles sont 1, 3, 4, 10, 30, 40 et 100, pour atteindre 66 l'algorithme glouton indiquera « prendre 40, puis 10, puis 10, puis 4, puis 1, puis 1 » alors que « prendre 30, puis 30, puis 3, puis 3 » est meilleur.

Dans cet exemple, l'algorithme glouton est imparfait. Un autre exemple est donné dans le texte avec la suite de Zhang pour trouver une suite dont les tables d'addition contiennent toujours $n(n+1)/2$ éléments différents, et dont on veut aussi que la somme des inverses soit la plus grande possible. Dans ce cas, le problème de maximiser la suite des inverses est associé à un espace de recherche infini et on ne sait pas aujourd'hui le résoudre globalement.

séquences de cette catégorie, dont toutes celles partant d'une séquence convenable finie et procédant ensuite par l'algorithme glouton pour continuer. Les suites obtenues par ce moyen semblent malheureusement toutes plus ou moins aléatoires: pour en connaître les termes, il faut procéder pas à pas et on ne sait pas à l'avance ce qu'on trouvera.

LES PUISSANCES DE 2

Cependant, la suite très simple des puissances de deux, 1, 2, 4, 8, 16, ..., 2^n ,... est aussi optimale pour l'addition et ses termes sont faciles à anticiper et à écrire... du moins en base 2. En effet, deux cases rouges de la table d'addition pour $\{1, 2, 4, 8, 16, \dots, 2^n\}$ ne peuvent pas être égales. Voici le >

TESTS NUMÉRIQUES SUR TABLES DE TAILLE CROISSANTE

4

Le théorème d'Erdős et Szemerédi de 1983 indique que pour toute suite numérique (x_n) , le nombre d'éléments différents de la table d'addition pour $\{x_1, \dots, x_n\}$ ou le nombre d'éléments différents de la table de multiplication augmente plus vite que n .

On a su démontrer depuis qu'il augmente plus vite que $n^{4/3}$ et même que $n^{4/3+2/1.167}$. On conjecture que le $n^{4/3+2/1.167}$ pourrait être remplacé par n^2 . Nous proposons ici quelques données numériques qui vont

$(x_n) = \{1, 2, 3, \dots, n, \dots\}$
Les entiers dans l'ordre

n	ADD	MUL	EXP
10	19	42	1,62
100	199	2906	1,73
1000	1999	248 083	1,79
10 000	19 999	22 504 348	1,84

$(x_n) = \{2^1, 2^2, 2^3, \dots, 2^n, \dots\}$
Les puissances de 2

n	ADD	MUL	EXP
10	55	19	1,74
100	5 050	199	1,85
1000	500 500	1999	1,90
10 000	12 502 500	99 999	1,92

$(x_n) = \{2, 3, 5, 7, 11, \dots\}$
Nombres premiers

n	ADD	MUL	EXP
10	33	55	1,74
100	619	5 050	1,85
1000	8 881	500 500	1,90
5000	53 568	12 501 250	1,92

$(x_n) = \{3, 3^2, 3^3, \dots, 3^n, \dots\}$
Les puissances de 3

n	ADD	MUL	EXP
10	55	19	1,74
100	5 050	199	1,85
1000	125 250	999	1,89
10 000	500 500	1 999	1,90

$(x_n) = \{1^3, 2^3, 3^3, \dots, n^3, \dots\}$
Les cubes

n	ADD	MUL	EXP
10	55	42	1,74
100	5 005	2 906	1,85
1000	498 907	248 083	1,90
5000	12 486 560	5770 203	1,92

$(x_n) = \{3, 5, 7, \dots, 2n + 1, \dots\}$
Les nombres impairs à partir de 3

n	ADD	MUL	EXP
10	19	52	1,72
100	199	4 064	1,80
1000	1999	358 717	1,85
5000	9999	8 502 936	1,87

dans le sens de cette conjecture. Pour des suites (x_n) prises parmi les plus naturelles, et pour diverses valeurs de n , nous calculons le nombre d'éléments différents de la table d'addition (colonne ADD), le nombre d'éléments différents de la table de multiplication (colonne MUL), le maximum MAX de ces deux nombres (en bleu) et l'exposant correspondant EXP tel que $n^{\text{EXP}} = \text{MAX}$.

À chaque fois, il semble bien que EXP s'approche de 2, conformément à la conjecture.

$(x_n) = \{1^2, 2^2, 3^2, \dots, n^2, \dots\}$
Les carrés

n	ADD	MUL	EXP
10	52	42	1,72
100	3 678	2 906	1,78
1000	299 415	248 083	1,83
5000	6 758 920	5 770 205	1,85

$(x_n) = \{1, 1, 2, 3, 5, \dots\}$
La suite de Fibonacci

n	ADD	MUL	EXP
10	38	45	1,65
100	4 853	4 950	1,85
1000	498 503	499 500	1,90
2000	1 997 003	1 999 000	1,91

$(x_n) = \{\log(1), \log(2), \dots, \log(n), \dots\}$
Les logarithmes

n	ADD	MUL	EXP
10	48	45	1,68
100	3 523	4 941	1,84
500	70 687	124 611	1,89
1000	259 861	499 131	1,90

$(x_n) = \{2, 6, 12, \dots, n(n+1), \dots\}$
Produits de deux entiers consécutifs

n	ADD	MUL	EXP
10	49	53	1,72
100	3 441	4 961	1,84
1000	285 600	498 838	1,90
5000	650 3616	12 492 018	1,92

$(x_n) = \{2^2, 3^2, 5^2, 7^2, \dots\}$
Les carrés des nombres premiers

n	ADD	MUL	EXP
10	50	55	1,74
100	3 864	5 050	1,85
1000	398 237	500 500	1,90
5000	10 256 872	12 502 500	1,92

$(x_n) = \{3^3 - 2, 3^2 - 3, 3^3 - 5, \dots\}$
3ⁿ moins le n-ième nombre premier

n	ADD	MUL	EXP
10	55	55	1,74
100	5 050	5 050	1,85
500	125 250	125 250	1,89
1000	500 500	500 500	1,90

> raisonnement qui le démontre. Vous pouvez le passer si vous trouvez que c'est trop compliqué. On suppose que l'on dispose de deux cases rouges contenant le même nombre, c'est-à-dire qu'on a trouvé quatre entiers i, j, a et b tels que : $i \geq j > 0$ et $a \geq b > 0$ et $2^i + 2^j = 2^a + 2^b$. En factorisant 2^j et 2^b , on obtient : $(2^{i-j} + 1)2^j = (2^{a-b} + 1)2^b$.

- Si $i = j$, alors $2^i + 2^j = 2^{i+1}$, donc $(2^{a-b} + 1)2^b$ ne comporte que des 2 dans sa décomposition en facteurs premiers, donc $(2^{a-b} + 1)$ est pair, donc $a = b$. Il s'ensuit que $2^{i+1} = 2^{a+1}$ donc $i = j = a = b$. Les deux sommes $2^i + 2^j$ et $2^a + 2^b$ proviennent donc de la même case.

- Si $i > j$, alors $(2^{i-j} + 1)$ est impair, donc il faut que $(2^{a-b} + 1)$ soit aussi impair, donc $a > b$. L'unicité de la décomposition en facteurs premiers implique que $j = b$, d'où il résulte que $i = a$. De nouveau, les deux sommes $2^i + 2^j$ et $2^a + 2^b$ proviennent de la même case.

Le même genre de raisonnements montre que la suite des puissances de 3 (1, 3, 9, ... 3ⁿ, ...) a aussi la propriété de donner des tables d'additions optimales, et il en va de même pour toutes les suites (kⁿ) si k est un entier plus grand que 2. La suite des factorielles 1!, 2!, ..., n! est un exemple de nature différente de suite optimale pour l'addition.

SUITES ET TABLES OPTIMALES POUR LA MULTIPLICATION

Les considérations faites pour l'addition ont leur équivalent pour la multiplication. C'est l'objet de la question 2 énoncée en début d'article.

En appliquant le principe des algorithmes gloutons et en partant de $b_1 = 1$, on trouve à la main : $b_2 = 2, b_3 = 3, b_4 = 5, b_5 = 7$. On pourrait penser qu'on est tombé sur la suite des nombres premiers; ce n'est pas le cas, puisque l'ordinateur nous indique que la suite optimale pour la multiplication donnée par l'algorithme glouton est : 1, 2, 3, 5, 7, 8, 11, 13, 17, 18, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 50, 53, 59, 60, 61, 67, 71, 73, 79, 81, 83, 89, ...

Tous les nombres premiers sont présents dans cette suite optimale pour la multiplication. C'est normal, car quand un nombre premier p se présente dans l'algorithme glouton, les produits qu'il crée ont tous p dans leur décomposition en facteurs premiers, ce qui n'est le cas d'aucun produit créé avant son arrivée puisque ce sont des produits de nombres plus petits que p ; tous les produits créés sont donc nouveaux et différents, et donc p est sélectionné par l'algorithme glouton.

La suite n'est pas nouvelle et, bien sûr, on la trouve dans l'encyclopédie de Neil Sloane sous le numéro A066720. On apprend qu'elle a été probablement inventée par Jeronimo Wannhoff, mais, contrairement à la suite de Mian-Chowla, peu de travaux lui ont été

consacrés. Comme pour les suites optimales pour l'addition, la suite optimale pour la multiplication donnée par l'algorithme glouton n'est pas la seule, et semble plus ou moins aléatoire. En revanche, le raisonnement indiqué plus haut montre qu'il en existe une autre facile à décrire en peu de mots: la suite des nombres premiers.

Plus généralement, si chaque nouveau terme introduit dans une suite comporte un facteur premier non utilisé avant son introduction, on obtiendra une suite optimale pour la multiplication. La suite des carrés des nombres premiers convient donc aussi, ou la suite des nombres premiers en n'en gardant qu'un sur deux.

L'ADDITION ET LA MULTIPLICATION EN MÊME TEMPS

Venons-en à la question 3. Nous avons vu que pour $\{1, 2, 5, 7\}$, les tables d'addition et de multiplication sont toutes les deux optimales: elles comportent chacune $n(n+1)/2$ éléments différents. Si, comme précédemment, on applique la méthode de l'algorithme glouton pour poursuivre au-delà de 7, on tombe sur la suite (c_n) : 1, 2, 5, 7, 15, 22, 31, 50, 68, 90, 101, 124, 163, 188, 215, 253, 322, 358, 455, 486, 527, 631, 702, 780, 838, 920, 1030, 1062, 1197, ...

L'encadré 2 donne l'exemple des tables d'addition et de multiplication qui, pour les huit premiers termes de la suite, contiennent chacune le maximum possible de nombres différents. Ayant fait calculer la suite assez loin, je l'ai cherchée dans l'encyclopédie de Neil Sloane; elle n'y était pas! Je l'ai signalé à Neil Sloane, qui l'a aussitôt ajoutée. C'est maintenant la suite A337655.

Neil Sloane assemble minutieusement son encyclopédie depuis 1960 et doit régulièrement ajouter de nouvelles suites ayant des définitions simples et naturelles. Il indique qu'il est toujours étonné que l'on construise de nouvelles suites «qu'Euclide lui-même aurait aimées». Il a remarqué que quand on regarde les nombres présents dans les tables d'addition successives associées à la suite A337655, certains entiers manquent indéfiniment. On a donc calculé la suite des nombres absents de ces tables d'addition. Surprise! Cette suite est encore nouvelle. Il l'a donc ajoutée à l'encyclopédie, c'est la suite A337658: 1, 5, 11, 13, 15, 18, 19, 21, 25, 26, 28, 31, 34, 35, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 54, 56, 58, 59, 60, 61, ...

Une autre façon de considérer simultanément l'addition et la multiplication consiste à exiger que les tables d'addition et de multiplication comportent chacune $n(n+1)/2$ éléments différents (c'est l'idée de A337655) en imposant en plus qu'elles n'aient aucun nombre en commun. Le lendemain de l'ajout par Neil

Sloane de ma séquence A337655, Peter Cagey, qui devait être informé des évolutions de l'encyclopédie, a proposé cette seconde façon de prendre en compte addition et multiplication. Cela a donné une nouvelle entrée dans l'encyclopédie, la suite A337946: 1, 3, 7, 12, 22, 30, 47, 61, 85, 113, 126, 177, 193, 246, 279, 321, 341, 428, 499, 571, 616, 686, 754, 854, 975, 1052, 1150, 1317, 1376, 1457, ...

IMPOSSIBLES PETITES TABLES

Venons-en à la quatrième question. La réponse est cette fois négative: non, il n'est pas possible que la table d'addition et de multiplication aient simultanément peu de nombres différents. C'est le résultat de Paul Erdős et Endre Szemerédi de 1983 dont voici l'énoncé précis:

«Il existe deux constantes $C > 0$ et $\epsilon > 0$ telles que, pour tout ensemble E de nombres réels de taille n , le nombre d'éléments différents de la table d'addition de E ou le nombre d'éléments différents de la table de multiplication de E dépasse $Cn^{1+\epsilon}$.» Autrement dit, il est impossible que les tables d'addition et de multiplication soient toutes deux très répétitives.

Le résultat n'est pas réellement étonnant, mais il est difficile à démontrer. Erdős et Szemerédi pensaient qu'on pouvait beaucoup l'améliorer et remplacer le ϵ de leur résultat, dont seule l'existence était affirmée, par n'importe quel nombre $\epsilon < 1$, ce qui signifierait que pour tout ensemble fini de n nombres, l'une des deux tables, d'addition ou de multiplication, aurait un nombre d'éléments différents proche du maximum possible, $n(n+1)/2$.

Pour progresser vers la démonstration de cette conjecture, il fallait d'abord réussir à préciser au moins un $\epsilon > 0$ comme dans le théorème de 1983. Cela a été fait en 2008 par Kevin Ford, qui a montré que ϵ pouvait être pris aussi proche que l'on veut de $1/15$. En 2009, Jozsef Solymosi a remplacé le $1/15$ par $1/3$. Le résultat a encore été amélioré en 2016 par Misha Rudnev, Ilya Shkredov et Sophie Stevens, qui ont remplacé $1/3$ par $1/3 + 1/1509$. En 2018, George Shakan a progressé encore et prouvé le résultat avec $1/3 + 5/5277$. Le dernier progrès a été publié en 2020: Misha Rudnev et Sophie Stevens ont montré que $1/3 + 2/1167$ convient.

Remarquons que:

$$\begin{aligned} 1/15 &= 0,06666... \\ 1/3 &= 0,3333... \\ 1/3 + 1/1509 &= 0,33399602... \\ 1/3 + 5/5277 &= 0,33428084... \\ 1/3 + 2/1167 &= 0,33504712... \end{aligned}$$

Les avancées de $1+\epsilon$ vers 2 ne sont pas très rapides et cela malgré l'intense travail de recherche mené. L'addition et la multiplication ne sont pas sur le point de livrer tous leurs secrets... ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Rudnev et S. Stevens, **An update on the sum-product problem**, prépublication arXiv:2005.11145, 2020 (<https://arxiv.org/pdf/2005.11145.pdf>).

G. Shakan, **On higher energy decompositions and the sum-product phenomenon**, *Math. Proc. Camb. Phil. Soc.*, vol. 167(3), pp. 599-617, 2019.

T. Tao, **The sum-product phenomenon in arbitrary rings**, *Contributions to Discrete Mathematics*, vol.4(2), pp. 59-82, 2009.

G. S. Yovanof et H. Taylor, **B₂-sequences and the distinct distance constant**, *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 39(11), pp. 37-42, 2000.

Z. Zhang, **A B₂-sequence with larger reciprocal sum**, *Mathematics of Computation*, vol. 60, pp. 835-839, 1993.

P. Erdős et E. Szemerédi, **On sums and products of integers**, *Studies in Pure Mathematics*, pp. 213-218, 1983.

A. M. Mian et S. Chowla, **On the B₂-Sequences of Sidon**, *Proc. Nat. Acad. Sci. India A*, vol. 14, pp. 3-4, 1944.

L'AUTEUR



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

GIOTTO

L'ARTISTE GÉOLOGUE

Dans les œuvres que le peintre italien Giotto a consacrées à la vie de saint François d'Assise se cache un véritable manuel de la géologie tourmentée des Apennins.

En traversant vers l'est l'Ombrie, en Italie, sur la route SR147, la plaine laisse soudain la place à un imposant et majestueux bâtiment long de 80 mètres dressé sur un promontoire. Bienvenue à la basilique Saint-François, à Assise. Dans l'édifice, construit sur le flanc du mont Subasio à partir de 1228, à peine deux ans après la mort de François, deux espaces se superposent, l'«église inférieure» achevée

en 1230 et l'«église supérieure» terminée en 1253. La nef de cette dernière sera décorée à la fin du XIII^e siècle par Giotto (1266-1337) dont les fresques retracent la vie de saint François. Précurseur de la Renaissance, le peintre s'affranchit, ici et dans d'autres œuvres, du style byzantin qui prévalait en introduisant d'une part de la profondeur, de la perspective, et d'autre part des éléments naturels comme des arbres, des montagnes... Jusqu'où le réalisme a-t-il été poussé? C'est ce qu'a voulu savoir la géologue Ann Pizzorusso.

Le problème est ardu tant la région est complexe d'un point de vue géologique. En effet, la chaîne des Apennins qui parcourt l'Italie du nord au sud en passant par Assise résulte de processus encore non complètement élucidés. Ainsi, les montagnes se sont dressées il y

a environ 20 millions d'années sous l'effet de forces contradictoires, toujours à l'œuvre aujourd'hui. À l'est, une subduction au niveau de la mer Adriatique a comprimé la croûte terrestre et y a imprimé des plis, les sommets orientaux des Apennins. À l'ouest, les mouvements du manteau terrestre ont entraîné une extension de l'écorce, la fragmentant en blocs dont certains se sont élevés. Comment Giotto s'est-il accommodé de cette géologie mouvementée?

D'abord, ces différents soulèvements concernent des roches sédimentaires, des calcaires constitués des restes de microorganismes marins dont les couleurs varient du blanc au gris en passant par l'ivoire. Ce sont bien les couleurs que l'on retrouve dans les peintures de Giotto, mais il n'y a rien d'étonnant tant ces couleurs sont



Saint François offrant son manteau à un pauvre.

communes. En revanche, certaines constructions semblent roses... Or un calcaire célèbre de la région (le «Scaglia rosso») et dont est fait le mont Subasio est bien de cette teinte. On la doit à l'oxydation du fer contenu dans la roche.

UN CALCAIRE ROSE

Cette roche s'est formée, du Crétacé jusqu'au milieu de l'Éocène (de 137 à 23 millions d'années), de l'amoncellement de foraminifères et de coccolites. Le processus ininterrompu pendant plus de 100 millions d'années offre un enregistrement unique où sont consignées les inversions du champ magnétique terrestre ainsi que la chute de la météorite qui a précipité la disparition des dinosaures. C'est avec ce calcaire rose qu'a été construite la basilique Saint-François d'Assise. Serait-ce donc cette ville que l'on voit sur *Saint François offrant son manteau à un pauvre* (voir ci-dessus à gauche)? Des historiens d'art le pensent, mais pas Ann Pizzorusso, car le reste du paysage n'est pas conforme. De fait, dans l'œuvre, la vallée qui s'étend au pied du mont Subasio est remplacée par une colline. Selon la géologue, Giotto n'a

pas cherché à reproduire précisément la réalité, mais plutôt à proposer des paysages génériques, typiques de la région.

Dans *Saint François recevant les stigmates* (ci-dessus, à droite, en bas), à l'église Santa Croce de Florence, le saint est représenté devant un bloc de calcaire qui a été soulevé, comme en atteste sa forme presque verticale. Les angles arrondis trahissent une érosion. On distingue aussi des fissures, près de l'église, et une grotte qui résultent probablement d'infiltrations pour les premières et de mouvements tectoniques pour la seconde. Selon la légende, François aurait reçu ses stigmates sur le mont Penna, un bloc gigantesque de calcaire, isolé, à 100 kilomètres au sud-est d'Assise, projeté là au moment de la création des Apennins. Dans sa fresque, Giotto aurait bien représenté ce sommet qui présente les mêmes caractéristiques.

Dernier détour géologique dans l'œuvre de Giotto, *Le Miracle de la source* (ci-dessus, à droite, en haut) montre saint François faisant jaillir de l'eau d'une montagne, en l'occurrence un calcaire stratifié et érodé, tout à fait réaliste, ressemblant à celui dit «maïolica», courant dans la



Le Miracle de la source.



Saint François reçoit les stigmates.

région. À l'arrière-plan, on aperçoit là encore des blocs qui ont été redressés. Et dans ce type de contexte tourmenté par des mouvements importants, il est bien fréquent que de l'eau surgisse... sans besoin de miracle.

Comment expliquer le parti pris de Giotto d'incorporer des éléments naturels dans ses compositions? Peut-être par le désir d'ancrer la légende de saint François dans des décors reconnus par les fidèles, et ainsi de l'inscrire dans la réalité. Toujours est-il que ce choix esthétique s'accorde bien avec le message de saint François qui encourageait à voir dans la nature l'image de Dieu, et méritant donc à ce titre respect et protection. Le premier message écologiste! ■

A. Pizzorusso, A portrait of central Italy's geology through Giotto's paintings and its possible cultural implications, *Geosci. Commun.*, vol. 3, pp.427-442, 2020.

LES AUTEURS



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

QUAND LE COURANT PASSE, LE CŒUR BAT

Aux contractions des différentes parties du cœur correspondent des courants électriques. L'électrocardiographie permet de caractériser indirectement ces courants et de vérifier ainsi le bon fonctionnement de l'organe.

Des électrodes disposées aux poignets, aux chevilles et sur le thorax d'un patient et un écran où s'affichent non seulement le rythme cardiaque, mais aussi des signaux caractéristiques: voilà ce à quoi ressemble une électrocardiographie (ECG). Dans cet examen essentiel en cardiologie, on enregistre l'activité du cœur en mesurant sur la peau les différences de potentiel électrique engendrées par les courants électriques qui traversent cet organe lorsqu'il se contracte. En quoi ces mesures nous renseignent-elles sur ce qui se passe dans le cœur?

Le cœur est un muscle singulier: il bat spontanément et régulièrement sans recevoir d'instructions directes de la part du cerveau. Dans cet organe, une sorte d'horloge, le nœud sinusal, donne 80 fois par seconde (en moyenne) le signal de départ à une succession de contractions. Des contractions qui, comme pour tous les autres muscles, sont provoquées par le passage d'un signal électrique, le «potentiel d'action», à travers les cellules. Or cette activité électrique du cœur engendre dans tout le corps des tensions électriques qui se modifient au fil des fractions de seconde durant lesquelles les différentes parties du cœur sont successivement stimulées.

Regardons plus en détail. Lorsqu'une cellule musculaire du cœur est au repos, les différences de concentrations d'ions entre le milieu intracellulaire et le milieu extracellulaire se traduisent par une différence de potentiel électrique de part et d'autre de sa membrane. L'intérieur de la cellule au repos contenant plus d'anions (charges négatives) que de cations (charges positives), ce «potentiel de membrane» est négatif, de l'ordre de -90 millivolts (mV).

LA PROPAGATION D'UNE DÉPOLARISATION

L'arrivée du potentiel d'action déclenche l'ouverture de canaux ioniques dans la membrane, d'où des échanges d'ions entre l'intérieur et l'extérieur. Ainsi, c'est l'arrivée massive d'ions calcium (Ca^{2+}) dans la cellule qui provoque *in fine* la contraction musculaire. D'un point de vue électrique, les changements de concentrations ioniques et donc de charges électriques entraînent un changement de signe du potentiel de membrane, qui passe d'une valeur négative à une valeur positive de quelques millivolts: on dit que la cellule a été dépolarisée (voir l'encadré page ci-contre).

La dépolarisation se déroule en 1 milliseconde environ, tandis que le potentiel d'action se propage à une vitesse de

quelques mètres par seconde. En revanche, le retour à la normale (au repos) a lieu après un laps de temps bien plus long, supérieur à 100 millisecondes. Compte tenu de la taille du cœur, cela signifie que, pour les grandes structures (oreillettes et ventricules), on peut parler de la propagation d'un front de dépolarisation qui sépare une zone en aval, où les cellules sont à l'état de repos (-90 mV), d'une zone en amont, où elles sont dépolarisées ($+10$ mV).

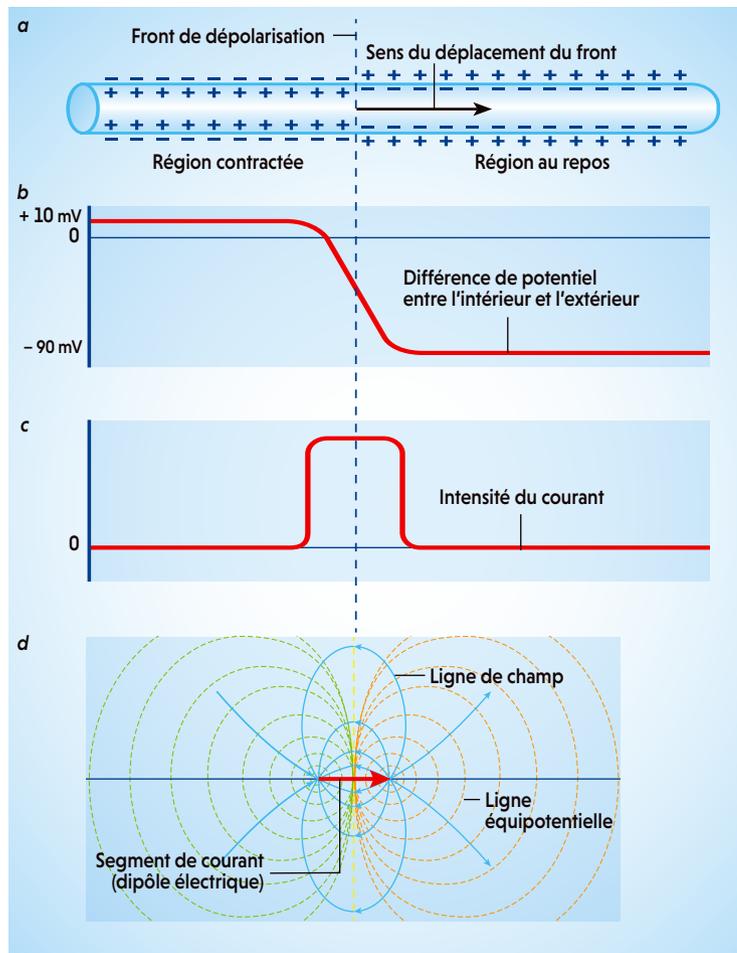
Dans ces deux zones où le potentiel a une valeur homogène, il n'y a pas d'activité électrique. Dans le front, en revanche,



LA DÉPOLARISATION D'UNE FIBRE MUSCULAIRE

L'intérieur d'une cellule musculaire au repos contient des ions négatifs tandis que l'extérieur est riche en ions positifs. La différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur est donc négative (environ -90 mV). À l'arrivée d'un signal, le « potentiel d'action », la fibre se « dépoliarise » grâce à des échanges d'ions à travers sa membrane (a, b). La polarité s'inverse et la différence de potentiel devient positive (environ $+10$ mV). La région dépoliarisée est alors en contraction. La région (millimétrique) de transition est le siège d'un courant d'intensité constante (c) ; ce « segment » de courant crée autour de lui un champ électrique analogue à celui d'un dipôle électrique (d).

Dans un examen d'ECG, on mesure à l'aide d'électrodes posées à différents endroits sur la peau les différences de potentiel électrique créées par l'activité cardiaque.



le potentiel des tissus varie de 100 mV sur une très courte distance, moins de 5 millimètres typiquement. Il en résulte dans cette zone un champ électrique et, comme le milieu cellulaire est conducteur, un courant proportionnel à ce champ apparaît.

Pour simplifier, imaginons une fibre musculaire qui baigne dans le milieu extracellulaire. On a alors un courant en son sein uniquement sur une petite portion de sa longueur. Notons que ce « segment » de courant ne viole pas la loi de conservation de la charge électrique, qui reste valide grâce aux échanges de charges à travers la membrane cellulaire. Le

milieu extracellulaire étant lui-même conducteur, le segment de courant, qui avance le long de la fibre, induit à l'extérieur de celle-ci un champ électrique, donc des courants.

UN CHAMP ÉLECTRIQUE ANALOGUE À CELUI D'UN DIPÔLE ÉLECTRIQUE

Plus précisément, le segment de courant crée un champ non uniforme qui, à des distances très supérieures à la taille du segment, est analogue à celui d'un dipôle électrique, c'est-à-dire un couple de deux charges ponctuelles opposées et

séparées d'une certaine distance (voir l'encadré page 90). Même loin de la fibre, le potentiel électrique n'est pas uniforme. On peut donc déterminer l'activité électrique de la fibre en mesurant, à distance, les différences de potentiel qu'elle crée.

Cependant, un cœur n'est pas formé d'une seule fibre, mais d'une multitude de fibres. Et le cheminement du potentiel d'action dans l'organe est complexe, tout >

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



> comme l'est le front de dépolarisation. Toujours est-il que la somme de tous les segments de courant présents à un instant donné, correspondant à la contraction de multiples fibres musculaires, constitue l'équivalent d'un dipôle électrique. L'amplitude et la direction de ce dipôle électrique équivalent vont beaucoup varier au cours du temps, à mesure que le potentiel d'action se propage dans le cœur et qu'il entraîne, successivement, la contraction des différentes parties de cet organe.

DÉTERMINER LE DIPÔLE ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT

De fait, le dipôle électrique équivalent (plus précisément son amplitude et sa direction) contient l'essentiel de l'information sur l'activité électrique du cœur. L'ECG est une méthode qui permet de le déterminer, et ainsi de diagnostiquer l'activité cardiaque. En pratique, l'ECG exploite une propriété des équipotentielles (régions où le potentiel prend la même valeur) d'un dipôle électrique: la différence de potentiel entre deux points quelconques mais pris à égale distance du dipôle est proportionnelle à la composante du dipôle parallèle à l'axe qui relie les deux points.

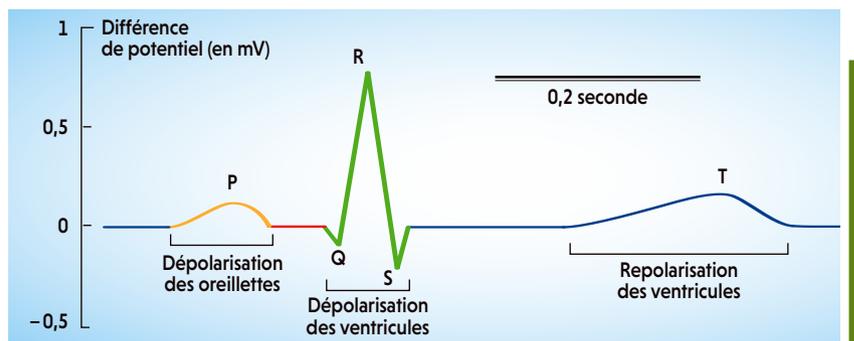
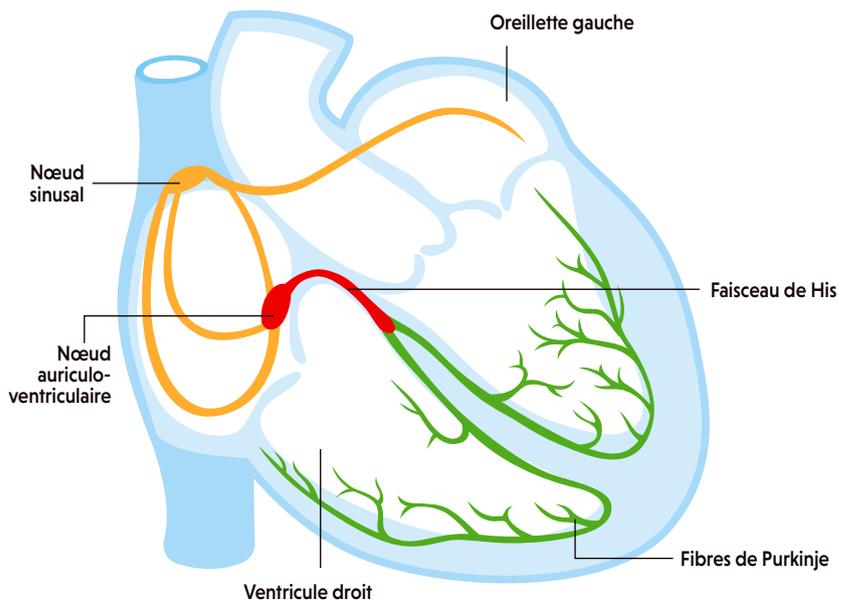
C'est une telle mesure que l'on fait, par exemple, avec les électrodes placées au niveau des poignets ou des chevilles. Elles sont suffisamment éloignées du cœur pour que la localisation exacte du dipôle électrique équivalent n'ait pas vraiment d'importance et elles sont bien, approximativement, à égale distance du cœur. Ainsi, la différence de potentiel entre les deux poignets donne accès à la composante du dipôle parallèle à l'axe reliant les deux épaules.

Un électrocardiogramme typique issu de cette mesure montrera, pour chaque battement du cœur, une succession d'ondes de formes caractéristiques (*voir l'encadré ci-contre*). Celles-ci traduisent la progression du front de dépolarisation dans le cœur et la contraction des parties successives (oreillettes, ventricules) qui s'ensuit, le cycle s'achevant avec une onde qui correspond à la repolarisation des ventricules.

En combinant la mesure de la différence de potentiel entre les deux poignets avec les mesures de tension électrique entre un poignet et une cheville, il est ainsi possible de déterminer la projection du dipôle électrique équivalent dans le plan frontal (le plan du torse), ce qui est utile pour le diagnostic. Par exemple, une anomalie de la direction moyenne du

DES CONTRACTIONS LISIBLES SUR L'ECG

Le signal nerveux qui entraîne un battement de cœur prend sa source dans le nœud sinusal. Après avoir dépolarisé et fait contracter les oreillettes, ce signal traverse le nœud auriculoventriculaire où il est très ralenti. Cela laisse au sang le temps de passer des oreillettes aux ventricules, qui se contractent à leur tour lorsque le signal reprend sa route dans le faisceau de His et atteint les réseaux de fibres de Purkinje. Ces diverses phases de dépolarisation (et de contraction) des muscles cardiaques se traduisent dans l'électrocardiogramme par des « ondes » notées P, Q, R, S et T.



dipôle équivalent lors de la dépolarisation des ventricules, direction qui définit l'« axe électrique du cœur », est en général liée à une anomalie de forme ou d'épaisseur des cavités ventriculaires.

Pour être complet et avoir une visualisation de l'activité électrique à trois dimensions, on dispose des électrodes sur le thorax, afin d'obtenir des informations relatives au plan horizontal (orthogonal à l'axe allant de la tête aux pieds). En revanche, comme ces électrodes sont plus proches du cœur, on n'a pas la simplicité d'interprétation en termes de dipôle équivalent. Il faut alors toute l'expertise et l'expérience du cardiologue pour interpréter correctement les signaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

L.-J. Thoms et al., **Electrocardiography with a smartphone**, *The Physics Teacher*, vol. 57, pp. 586-589, 2019.

A. Dupre et al., **Basic ECG theory, recordings and interpretation**, *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices* (dir. P. A. Iaizzo), pp. 191-201, Humana Press, 2005.

L'AUTEUR



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

NOTRE COUSIN TRICHOPLAX

Curieux et minuscule animal informe, brouteur de biofilms, «*Trichoplax adhaerens*» se révèle pourtant assez proche des bilatériens, dont font partie les vertébrés...

En 1883, le zoologiste allemand Franz Eilhard Schultze trouva, dans un aquarium d'eau de mer provenant du golfe de Trieste, en Italie, un étrange organisme ressemblant à une amibe, qu'il nomma *Trichoplax adhaerens*. Vite oublié, l'organisme fut redécouvert près d'un siècle plus tard par le protistologue allemand Karl Gottlieb Grell, qui l'étudia en détail et le considéra comme l'un des animaux les plus « primitifs », plus simple que les éponges. En 1971, il créa pour lui un embranchement nouveau, celui des placozoaires, qui rassemble depuis peu deux autres espèces.

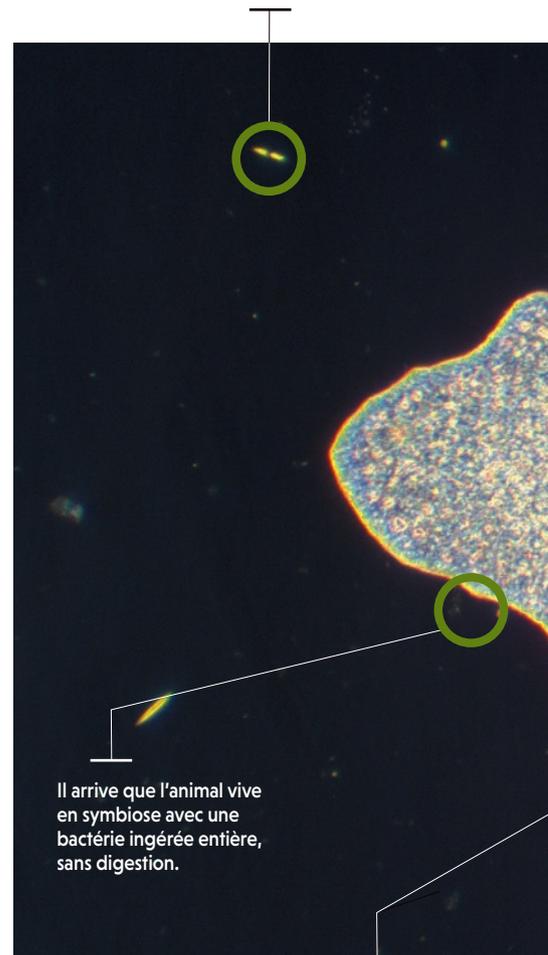
À l'époque, cependant, il était impossible de trouver une place à ce nouvel embranchement dans la classification animale tant ses caractéristiques étaient étranges. Mais ces dernières années, en

s'appuyant sur les progrès de la phylogénie moléculaire (la construction d'arbres de parenté à partir de données génétiques) et sur l'analyse des traits anatomiques des placozoaires, plusieurs équipes ont convergé vers l'idée que ces animaux ont une histoire évolutive bien plus complexe qu'on ne le pensait.

UN ORGANISME SIMPLE

Si, comme certaines amibes, *T. adhaerens* a la forme d'une minuscule crêpe, c'est bien leur seul point commun. Alors que les amibes sont constituées d'une seule cellule atteignant parfois 1 millimètre, le placozoaire est un organisme mou de quelques millimètres formé de deux couches de cellules. L'animal présente même plusieurs types cellulaires. Certes, comme les éponges, il n'a ni neurones ni cellules musculaires. Mais la ressemblance s'arrête là.

L'animal se nourrit de débris organiques, de petites algues et de bactéries. Sa digestion est externe : il se déplace sur sa nourriture, crée une cavité autour d'elle et y libère des enzymes de digestion, puis ingère les molécules produites par invagination de sa membrane.



Il arrive que l'animal vive en symbiose avec une bactérie ingérée entière, sans digestion.

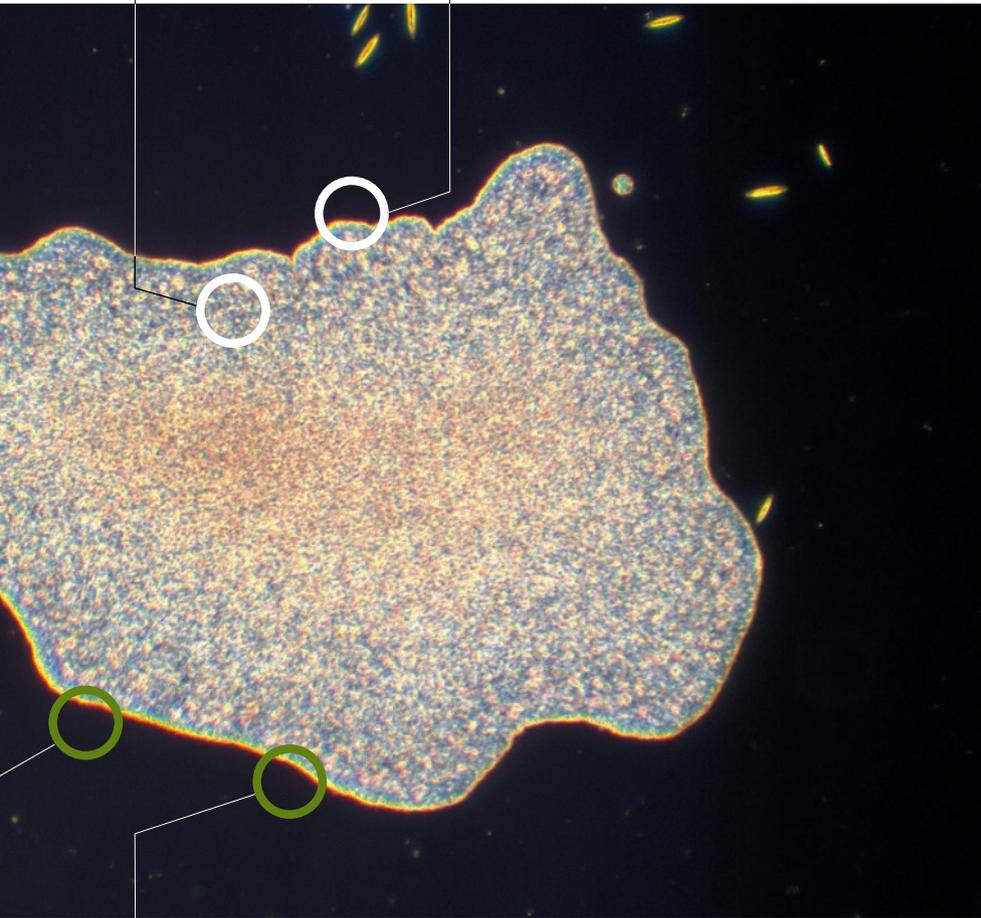
Les cellules lipophiles de sa couche ventrale se projettent à l'intérieur de l'organisme, où elles alternent avec des cellules fibrillaires dont les prolongements entrent en contact avec tous les autres types, y compris les cellules épithéliales dorsales et ventrales (non identiques).



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

Les placozoaires sont couverts de cils qui leur permettent de se déplacer en nageant ou en glissant sur les supports solides.

Sur ses bords, des cellules contenant un cristal biréfringent serviraient peut-être de capteurs de gravité.



Les placozoaires sont des animaux marins que l'on trouve dans de nombreuses mers du globe, notamment dans les régions tropicales et subtropicales, dont la Méditerranée.



Trichoplax adhaerens
(ici le clone de Grell)
Taille: 1 à 3 mm

EN CHIFFRES

3

L'embranchement des placozoaires compte officiellement 3 espèces, mais sans doute au moins 8 : plusieurs sous-espèces pourraient s'avérer des espèces à part entière après le séquençage de leur génome.

98 millions

Le génome de *Trichoplax adhaerens* compte environ 98 millions de paires de bases (pb) et environ 11 500 gènes, dont près de 87 % ressemblent à des gènes d'autres animaux. Presque autant que la mouche du vinaigre *Drosophila melanogaster* (120 millions de pb, 13 000 gènes)... mais beaucoup moins que l'amibe *Polychaos dubium* (670 milliards de pb).

6

T. adhaerens arbore 6 types cellulaires. Sa couche ventrale en comprend la majorité, dont des cellules épithéliales ciliées, d'autres « lipophiles » contenant des granules huileux et d'autres encore « glandulaires », qui sécrètent des molécules de communication. Des cellules en forme de fibre s'étendent entre les deux couches cellulaires de l'animal.

En effet, en 2014, Thomas Reese, des instituts américains de santé de Bethesda, et ses collègues ont montré que certaines cellules, dites « glandulaires », sécrètent des molécules *via* un mécanisme qui s'apparente à celui des neurones : les vésicules qui libèrent les molécules portent plusieurs protéines typiques des vésicules sécrétoires des synapses, les zones de communication entre neurones. De plus, contrairement aux éponges, les placozoaires sont dépourvus d'axe antéro-postérieur, de circulation interne de l'eau ou de cellules « choanoflagellées » (des cellules dotées d'une collerette entourant un flagelle). On comprend pourquoi, du temps de

Grell, il était impossible de leur trouver une place dans la classification animale.

Et, de fait, les premières phylogénies moléculaires, réalisées en 2006 par l'équipe de Sandro Bonatto, à l'université fédérale du Rio Grande do Sul, au Brésil, placent les placozoaires près non pas des éponges, mais des cnidaires (anémones de mer, méduses et coraux) et des bilatériens (les animaux à symétrie bilatérale comme les vertébrés, les arthropodes et les mollusques). Fondées sur quelques gènes, ces phylogénies étaient provisoires, mais elles mettaient la puce à l'oreille. Si un animal plus modeste qu'une éponge se classait avec des animaux dotés d'un système nerveux, sa simplicité n'était sans doute pas ancestrale, mais résultait d'une évolution régressive.

Le séquençage du génome de *T. adhaerens*, en 2008, par l'équipe de Daniel Rokhsar, de l'université de Californie à Berkeley, a apporté de nouvelles données pour le moins surprenantes. Par sa structure et ses gènes, ce génome présente des similitudes avec ceux des eumétazoaires (le principal groupe d'animaux) – y compris le génome humain. En particulier, il contient une riche panoplie de régulateurs de transcription et de gènes connus pour intervenir dans la différenciation cellulaire et le développement >

> d'animaux dotés d'axes et d'un système nerveux. Tout suggère que le génome porte plus de gènes que nécessaire, ce qui est typique d'une simplification évolutive secondaire. Naturellement, l'équipe de Daniel Rokhsar a tenté une phylogénie: elle trouve que *T. adhaerens* représente un groupe frère du couple cnidaires-bilatériens.

UNE BOUCHE GRANDE OUVERTE

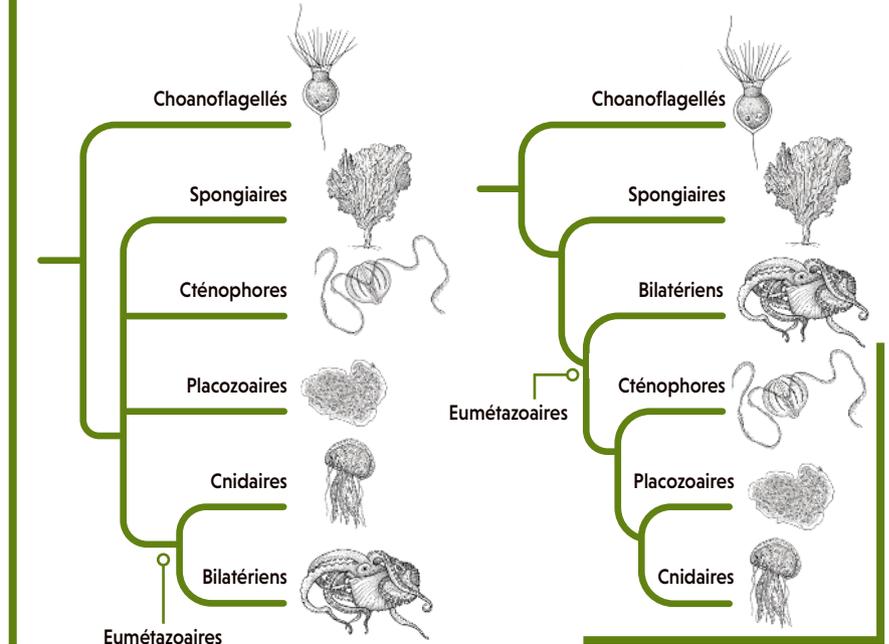
En 2019, pour en savoir plus, l'équipe de Mark Martindale, de l'université de Floride à Saint Augustine, a analysé l'expression de deux gènes, *Chordin* et *Tgfb*, et comparé leurs localisations avec celles chez d'autres animaux. Pourquoi ce choix? Si les placozoaires ne présentent pas de polarité antéro-postérieure, ils ont un axe dorso-ventral. Or c'est justement l'interaction fonctionnelle de ces deux gènes, c'est-à-dire leur influence mutuelle, qui spécifie cet axe chez les bilatériens. Il était donc intéressant de tester si les gènes correspondants chez *T. adhaerens* interagissent aussi.

Les résultats sont encourageants: ces gènes ne s'expriment que dans la couche cellulaire inférieure de l'animal, et selon une organisation similaire à celle observée du côté oral des cnidaires (la région située sous l'ombrelle chez les méduses). Or cette couche joue un rôle majeur: elle rassemble les bactéries qui couvrent le support où rampe le placozoaire. Puis ce dernier se replie sur lui-même et la couche cellulaire forme alors une sorte de cavité digestive. En d'autres termes, *T. adhaerens* ressemblerait à un cnidaire dont la bouche serait totalement ouverte... Les cnidaires seraient-ils ses plus proches parents?

Répondre à cette question nécessite de se pencher sur la base de l'arbre des animaux pluricellulaires. Cinq taxons les rassemblent: spongiaires (les éponges), cnidaires, bilatériens, placozoaires et cténophores (des animaux marins transparents carnivores). Dessiner la base de l'arbre de ces animaux revient donc à les agencer. Or les deux derniers sèment la pagaille! C'est pourquoi de nombreuses phylogénies les excluent (celle de Daniel Rokhsar, notamment, ne prend pas en compte les cténophores). En leur absence, la topologie est simple: les spongiaires sont le groupe frère du couple cnidaires-bilatériens. Mais l'ajout des deux autres embranchements déstructure l'ensemble, car ils sont source d'artefacts de phylogénie moléculaire. Par exemple, la structure des cténophores est proche de

OÙ CLASSER LES PLACOZOAIRES ?

Si l'on est sûr que les choanoflagellés (des animaux unicellulaires) sont le groupe frère des métazoaires (animaux pluricellulaires), et que cnidaires et bilatériens sont proches, des incertitudes existent sur les relations de parenté entre spongiaires, cténophores, placozoaires et eumétazoaires, que l'on indique par un « râteau » (à gauche). Selon le zoologiste Claus Nielsen, de l'université de Copenhague, l'arbre le plus simple rapprocherait les placozoaires des cnidaires (à droite). Les eumétazoaires étant caractérisés par un système nerveux, cela signifierait que les placozoaires l'ont perdu secondairement.



celle des cnidaires et pourtant dans certaines phylogénies moléculaires ils apparaissent à la base de l'arbre, avant les spongiaires! Et les placozoaires sont si peu nombreux que leur branche est très longue, ce qui fragilise sa position dans l'arbre.

En cas d'irrésolution, la sagesse consiste à la signaler sur l'arbre (voir l'encadré ci-dessus). On fait alors intervenir d'autres éléments. Du point de vue moléculaire, une analyse fine à partir de plusieurs placozoaires publiée en 2018 par une équipe autour de Gonzalo Giribet, de l'université Harvard, aux États-Unis, soutient la parenté des placozoaires et des cnidaires. Par ailleurs, en 2019, le zoologiste Claus Nielsen, de l'université de Copenhague, a pris chaque arbre possible et a suivi sur chacun les caractères morphoanatomiques, comme l'apparition des systèmes nerveux et musculaire. Or c'est l'arbre avec les placozoaires et les cténophores proches des cnidaires qui paraît le plus simple, et de même il est plus simple d'envisager une unique invention du système nerveux. Retenons donc cet arbre pour le moment. Mais tout n'est pas optimal en biologie... ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Q. DuBuc et al., « Dorsal-Ventral » genes are part of an ancient axial patterning system : Evidence from *Trichoplax adhaerens* (Placozoa), *Mol. Biol. Evol.*, vol. 36(5), pp. 966-973, 2019.

C. Nielsen, Early animal evolution : A morphologist's view, *R. Soc. open sci.*, vol. 6, article 190638, 2019.

C. E. Laumer et al., Support for a clade of Placozoa and Cnidaria in genes with minimal compositional bias, *eLife*, vol. 7, article e36278, 2018.

M. Eitel et al., Comparative genomics and the nature of placozoan species, *Plos Biol.*, vol. 16(7), article e2005359, 2018.

Biodiversité, inégalité et pauvreté, changements climatiques, alimentation... face à ces enjeux mondiaux, les solutions pour inventer le futur durable de notre planète dépassent les frontières et se construisent ensemble. Ce cycle de rencontres, en duplex de Paris avec les pays du Sud, propose un regard croisé entre chercheurs et acteurs du développement durable sur leurs expériences de terrain.

25 mars

Journée mondiale de l'eau

En duplex avec le Sénégal

27 mai

Journée mondiale de la biodiversité

En duplex avec Madagascar

Accès gratuit sur place (réservation obligatoire) ou en ligne
Informations et réservation : cite-sciences.fr

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



ma planète demain !

tables rondes en duplex

— les jeudis à 19h

cité

sciences
et industrie

**Covid 19, la riposte
des nations africaines**

**tables rondes en duplex
avec l'Afrique**

— 31 mars



**Forum de la recherche et de l'innovation
dans le cadre de la Saison Africa2020**

En Afrique, la riposte face à la Covid-19 est multiple. Comment les institutions, le monde de la recherche, des technologies se mobilisent pour lutter contre la pandémie et répondre aux besoins des populations ? Ce forum donne la parole aux acteurs à travers le continent : jeunes entrepreneurs innovants, médecins, chercheurs, virologues présentent leurs actions.

14h30

La Tech africaine se mobilise contre la Covid-19

18h30

L'Afrique face à la Covid-19, atouts et défis

Accès gratuit sur place (réservation obligatoire) ou en ligne
Informations et réservation : cite-sciences.fr

Manifestation organisée dans le cadre de la Saison Africa2020



EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



cité

sciences
et industrie

L'AUTEUR



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

LE FLAMBAGE RÉDUIT-IL L'ACIDITÉ?

En faisant flamber un vin ou un alcool, on modifie ce liquide.
Mais pas comme on le croit souvent.

Selon certains cuisiniers, le flambage réduirait l'acidité des vins et des alcools employés, ce qui résulterait de l'évaporation d'«acides volatils». Et les hautes températures obtenues changeraient notablement les goûts. Ces affirmations suscitent des doutes. Quels «acides volatils», par exemple?

Faisons l'analyse à rebours. Lorsqu'on chauffe une solution hydroalcoolique, on évapore d'abord l'éthanol, à moins de 80°C, et de l'eau. Bien sûr, des composés odorants sont entraînés, comme on s'en aperçoit en humant les vapeurs formées, mais la température du liquide qui bout est limitée à la température d'évaporation de l'éthanol et, au pire, à la température d'évaporation de l'eau. Certes, en haut d'une flamme, la température est de plusieurs centaines de degrés, mais l'aliment ou le liquide flambé ne subit pas lui-même ces conditions.

D'ailleurs, cette même expérience ne détecte pas d'acidité particulière. On se doute que des acides tels que l'acide acétique, toujours présent, puissent être évaporés, mais leur température d'ébullition est parfois notable (122°C pour l'acide acétique), de sorte que c'est plutôt l'entraînement par la vapeur d'eau qui réduira leur présence.

L'acide sulfurique, lui, est un mythe: si l'on exprime l'acidité des vins et alcools en équivalents d'acide sulfurique, aucun fabricant n'ajoute un tel acide dans ces boissons.

Pour savoir s'il y a réduction d'acidité, il faut expérimenter... et les résultats sont sans appel. Quand on chauffe du cognac, que l'on flambe jusqu'à extinction de la flamme, on observe que la quantité de liquide évaporée est légèrement supérieure à 40% (la teneur en éthanol); cela indique que de l'eau a simultanément été éliminée.

Lors du flambage, certains composés du vin ou de l'alcool utilisés s'évaporent ou sont modifiés.



Et les mesures du pH montrent que ce dernier, qui aurait dû augmenter s'il avait été vrai que le flambage réduit l'acidité, diminue (de une unité), au contraire! D'ailleurs, le chauffage du cognac dans les mêmes conditions, mais sans flamme, réduit aussi le pH de cette même quantité. Pour le vin, de même, il n'y a pas de réduction d'acidité, flamme ou pas. Quant à la mesure des températures, dans le liquide et dans la flamme, elle confirme ce que la physicochimie sait.

L'analyse des phénomènes nous guide: certes, de l'acide acétique qui serait évaporé réduirait l'acidité, mais un vin n'est pas un vinaigre et la quantité initiale d'un tel acide n'est pas considérable. En revanche, l'évaporation conduit à une concentration des acides qui ne sont pas évaporables, tel l'acide tartrique. Pour le cognac, il faut évoquer d'autres mécanismes, à commencer par le fait que la présence d'éthanol peut changer l'équilibre acidobasique de l'eau.

Goûtons: oui, le cognac chauffé, flambé ou non, diffère du cognac non chauffé, et de même pour le vin, mais l'«agressivité» initiale n'est pas exactement une acidité; au total, c'est la sensation de brûlure due à l'éthanol qui disparaît, preuve que nous manquons d'un vocabulaire approprié pour décrire nos sensations gustatives. Hélas, cette confusion terminologique est la cause de la faute. En disant que «l'acidité est réduite par le flambage parce que les

acides volatils s'évaporent», on verse doublement dans l'erreur: une première fois parce que l'acidité ne diminue pas, une seconde fois parce qu'on explique un phénomène inexistant. Déjà en 1687, Fontenelle écrivait: «Assurons-nous bien du fait avant que de nous inquiéter de la cause. Il est vrai que cette méthode est bien lente pour la plupart des gens qui courent naturellement à la cause, et passent par-dessus la vérité du fait; mais enfin nous éviterons le ridicule d'avoir trouvé la cause de ce qui n'est point.» ■



LA RECETTE CANARD FLAMBÉ À L'ORANGE

- 1 Couper un magret de canard en lames épaisses d'un demi-centimètre et les disposer sur une brochette.
- 2 Dans une petite casserole, verser un verre de liqueur à l'orange. Y ajouter des rondelles d'orange pelée et des échalotes émincées.
- 3 Chauffer la liqueur et la faire flamber. Dans la partie supérieure de la flamme, cuire les lames de canard une à une.
- 4 Une fois les lames cuites et la flamme éteinte, poursuivre la cuisson de la liqueur, avec sel et poivre concassé.
- 5 Après quelques minutes de cuisson, ajouter une cuillerée de maïzena dispersée dans de la liqueur froide.
- 6 Ajouter les lamelles de canard flambées, et donner un bouillon pour épaissir la maïzena.



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.92 PLACOZOAIRE

Cet animal en forme de minuscule crêpe ressemble à une amibe, mais celle-ci est constituée d'une seule cellule, tandis que le placozoaire est un organisme mou formé de deux couches de cellules.

P.44 BASISTERNUM

Après avoir réduit la blatte américaine à l'état de zombie, c'est sous cette zone bien précise de la carapace du cafard, au niveau de son thorax, que la guêpe émeraude administre trois de ses piqûres. Le venin y active les neurones moteurs d'un ganglion nerveux, ce qui provoque l'extension de la patte médiane de la blatte. La base de cette patte se dégage alors, et la guêpe peut y pondre et coller son œuf.

P.7 « La lutte contre la pollution sonore est plus simple que celle contre le réchauffement climatique: les sources sont ponctuelles et leur impact disparaît dès qu'on les supprime »

LUCILLE CHAPUIS
bioacousticienne à l'université d'Exeter, en Grande-Bretagne

P.24 78

Du bassin du Tarim, en Chine, à La Puna, au Pérou, en passant par les Alpes, on recense 78 principaux « châteaux d'eau naturels », qui fournissent l'essentiel de l'eau douce utilisée par près de deux milliards de personnes.

P.52 PLOSHCHADKI

Dans les années 1960 en Ukraine, l'archéologie aérienne et les prospections géophysiques ont révélé les vestiges de maisons incendiées vieilles de 6 000 ans, que les archéologues soviétiques ont nommées des *ploshchadki*, terme russe pouvant être compris comme « domaines ». Ces maisons formaient des colonies, qui pouvaient en compter près de deux mille.

P.34 BARYOGENÈSE

En cosmologie, ce terme désigne une période précoce de l'Univers primordial, comprise entre 10^{-32} et 10^{-12} seconde environ après le Big Bang. Cette phase encore mal comprise décrit la formation des baryons, les particules qui composent la matière ordinaire, et l'apparition d'une asymétrie entre la matière et l'antimatière.

P.76 1433

En 1892, une épidémie de choléra a frappé Hambourg, en Allemagne. Elle a coûté la vie à 8 600 personnes, soit 12,5% de la population. En revanche, à Brême, qui ne se trouve qu'à une centaine de kilomètres, la maladie n'a provoqué que 6 décès. Soit 1 433 fois moins !

ON A MENÉ

L'ENQUÊTE

TOUS LES PAPIERS
SE RECYCLENT.

JOURNAUX, MAGAZINES, PAPIERS MÊME AVEC
AGRAFES, ENVELOPPES MÊME SANS FENÊTRE,
CAHIERS MÊME AVEC SPIRALES...

TOUS LES PAPIERS SE RECYCLENT.

EN LES DÉPOSANT DANS LE BAC DE TRI,
VOUS LEUR OFFREZ UNE NOUVELLE VIE.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits



ÉTUDE DE CAS

La vie d'un glacier de montagne...

Au-dessus de la vallée de Chamonix, dans les Alpes françaises, se trouve un glacier appelé la Mer de Glace. Connu pour sa grande taille, ce glacier perd chaque année environ 5 mètres d'épaisseur et 30 mètres de longueur. La simulation en CFD peut être utilisée pour analyser la dynamique de la glace et l'écoulement du glacier afin de mieux comprendre ce phénomène naturel.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/glacier-dynamics



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.