

POUR LA



Edition française de Scientific American

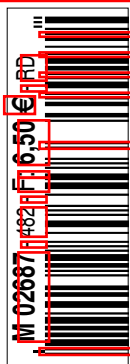
SCIENCE

MATHÉMATIQUES
**COMMENT PAVER
LE PLAN AVEC
UN PENTAGONE**

ASTROPHYSIQUE
**QUAND UN TROU
NOIR DÉVORE
UN SOLEIL**

NEUROSCIENCES
**SÉJOURNER
DANS L'ESPACE
NUIT AU CERVEAU !**

DÉCEMBRE 2017
N° 482



**La nouvelle piste
des sources chaudes terrestres**

**LES VOLCANS
BERCEAU DE
LA VIE ?**

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

170 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe,
assisté de Donovan Thiebaud

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, assistés de Marie Marty

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Laurence Hay et Arthur Peys

Direction financière et direction du personnel:

Marc Laumet

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directrice de la publication et gérante: Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Olivier Baud, Olivier Berné, Maud Bruguère,

Damir Buskulic, Frédéric Foucher, Sophie Gallé-Soas,

Hélène Gélot, Sylvain Guiriec, François Jouve,

Hélène Loevenbruck, Tania Louis, Patrick Michel,

Bruno Moulia, Mathieu de Naurois, Christophe Pichon

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements -

Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres; Benjamin Boutonnet

Tél. 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P. 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

À LA RECHERCHE DES ORIGINES DE LA VIE

Comment et quand est apparu sur Terre cet extraordinaire phénomène qu'est la vie? Et celle-ci existe-t-elle ailleurs dans l'Univers? Ces questions font partie des grandes interrogations auxquelles l'humanité tente d'apporter des réponses. Certains peuvent se contenter de prendre à la lettre les récits contenus dans les textes religieux ou mythiques. Mais libre aux autres de rechercher des explications détaillées, argumentées sur la base d'observations et d'expérimentations précises, et réfutables. Tel est l'esprit de la démarche scientifique.

Au cours des dernières décennies, les recherches sur l'origine de la vie ont ainsi connu plusieurs développements importants, dont la découverte dans le Pacifique, en 1977, de sources hydrothermales profondes, un environnement extrême où vivent notamment des bactéries primitives, grâce à un apport de minéraux et d'énergie. Depuis, domine chez les scientifiques l'hypothèse que les sources hydrothermales profondes - dues au volcanisme sous-marin - ont constitué un milieu propice à l'apparition des premières formes de vie.

Mais dans ce numéro, des chercheurs présentent une nouvelle hypothèse, qui repose sur des expériences et sur l'étude de roches australiennes vieilles de 3,5 milliards d'années recelant des traces de vie microbienne (voir pages 28-35). D'après eux, la vie serait née dans des milieux terrestres riches en sources chaudes et mares d'origine volcanique. Exposé à d'incessants cycles de séchage et de mouillage, cet environnement aurait favorisé, à partir d'ingrédients organiques simples, la constitution de structures de plus en plus complexes et, *in fine*, vivantes.

Cette nouvelle théorie de l'origine de la vie s'imposera-t-elle? Ce n'est pas sûr car, comme d'autres, elle a ses difficultés (voir l'entretien avec Frances Westall, pages 36-38). Mais les trouvailles des futures missions d'exploration de Mars fourniront peut-être des arguments supplémentaires en sa faveur... ■

SOMMAIRE

N° 482 /
Décembre 2017

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Des ondes gravitationnelles issues de la fusion de deux étoiles à neutrons
- Un recensement d'insectes inquiétant
- Les bactéries et la séquestration du carbone
- Un trou de ver liquide
- Un liquide poreux
- 200 000 ans de forêt virtuelle
- La véritable histoire des couleurs de la peau
- L'ADN d'une deuxième femme de Néandertal séquencé
- De l'aile d'avion optimisée au bec d'oiseau

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 22

AGENDA

P. 24

HOMO SAPIENS INFORMATICS

La mutation du billet de train

Gilles Dowek

P. 26

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

De l'exaptation sociale

Gérald Bronner



En couverture :

© Werner Van Steen/Getty Images

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



P. 40

NEUROSCIENCES

LE CERVEAU, INTERDIT DE VOYAGE SPATIAL

Charles Limoli

Des expériences sur des souris montrent que le rayonnement cosmique détruit des connexions neuronales et dégrade les performances cognitives. Un obstacle plus sérieux qu'on ne le pensait pour les voyages interplanétaires habités.



P. 56

ASTRONOMIE

LE TROU NOIR DÉVOREUR DE SOLEILS

Bradley Cenko et Neil Gehrels

Lorsqu'une étoile s'approche trop d'un trou noir supermassif, elle est happée et finit déchiquetée dans une explosion de lumière. Un cataclysme cosmique que l'on détecte depuis peu et qui est riche en informations sur ces ogres tapis au centre des galaxies.



P. 48

ARCHÉOLOGIE

LES PREMIERS SANCTUAIRES DES CHASSEURS-CUEILLEURS

Marion Benz

Il y a 11 000 ans, sur une colline turque surplombant la Syrie, des mégalithes de plusieurs mètres encastés dans des murs formaient de monumentales installations. Les sanctuaires auraient-ils précédé l'agriculture et l'élevage ?



P. 64

PSYCHOLOGIE

LE DISCOURS INTÉRIEUR, UNE FENÊTRE SUR L'ESPRIT

Charles Fernyhough

Converser mentalement avec soi-même fait partie du quotidien de chaque individu. Quel est le rôle de ce langage intérieur et quelles sont ses caractéristiques ? L'imagerie du cerveau en activité apporte un éclairage sur ces questions.



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.72

HISTOIRE DES SCIENCES

LES DESSOUS DE L'ENCYCLOPÉDIE

Pierre Crépel

L'Encyclopédie de Diderot et D'Alembert est loin d'être un texte sans âme écrit au kilomètre. En témoigne une nouvelle édition numérisée critique et collaborative, où l'on se perd avec délice à la recherche des règlements de compte et des opinions passées en douce...

À LA UNE

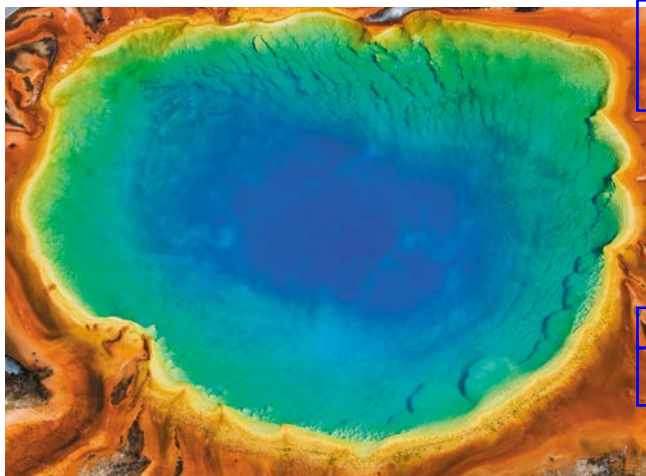
P.28

GEOSCIENCES

LES VOLCANS, BERCEAU DE LA VIE?

Martin J. Van Kranendonk, David Deamer et Tara Djokic

La vie n'a peut-être pas émergé au fond des océans, mais dans des sources chaudes à proximité de volcans. Telle est l'histoire que racontent des bulles récemment trouvées dans des roches de plusieurs milliards d'années.



P.36

« MARS, UN AUTRE LABORATOIRE POUR EXPLORER LES ORIGINES DE LA VIE »

Entretien avec Frances Westall

Où et quand la vie est-elle apparue sur Terre? Différentes hypothèses sont envisagées. Comment influent-elles sur la préparation des deux missions qui partiront en 2020 à la recherche de traces de vie sur Mars, l'europpéenne *ExoMars 2020* et l'américaine *Mars 2020*?

RENDEZ-VOUS

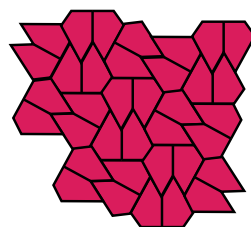
P.80

LOGIQUE & CALCUL

PAVER LE PLAN AVEC UN PENTAGONE CONVEXE

Jean-Paul Delahaye

L'ordinateur est parfois bon géomètre. C'est en l'utilisant qu'un mathématicien français vient de mettre le point final à la solution du problème des polygones convexes permettant de recouvrir le plan.



P.86

ART & SCIENCE

Quand les bateaux font le zèbre

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Retournement temporel pour téléphonie 5G

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

The walking head

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des squelettes croustillants

Hervé This

P.98

A PICORER

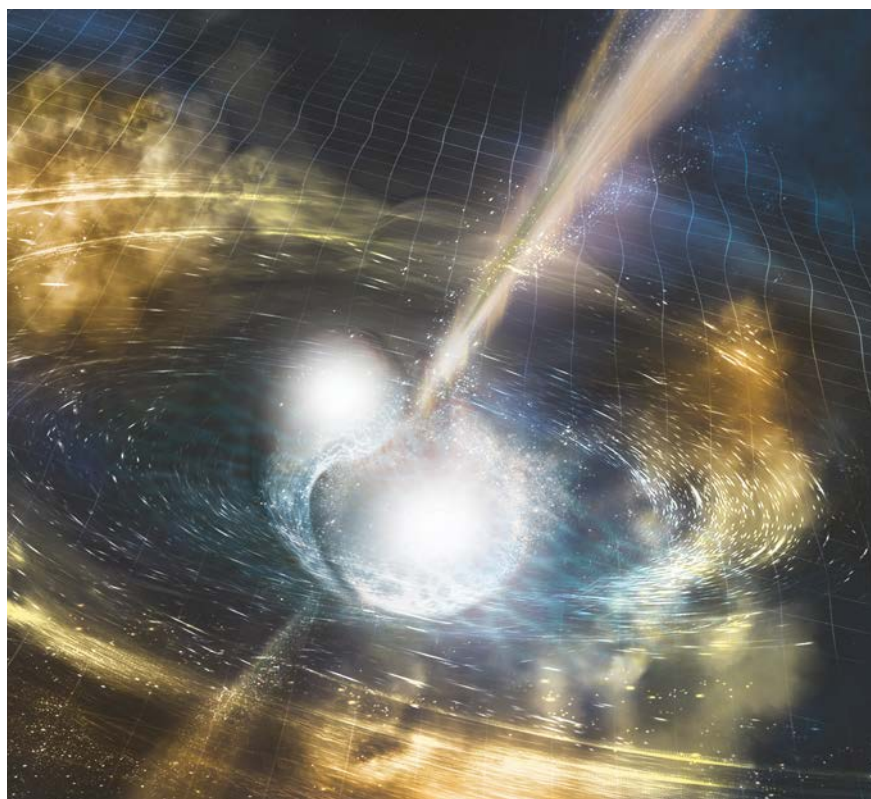
A

CTUALITÉS

P.6 Echos des labos
P.18 Livres du mois
P.22 Agenda
P.24 Homo sapiens informaticus
P.26 Cabinet de curiosités
sociologiques

ASTROPHYSIQUE

LA FUSION DE DEUX ÉTOILES À NEUTRONS A FAIT VIBRER LIGO ET VIRGO



Vue d'artiste de la coalescence de deux étoiles à neutrons avec l'émission d'ondes gravitationnelles et de rayonnement électromagnétique.

Cette source d'ondes gravitationnelles a la particularité d'émettre aussi de la lumière. Un événement que près de 70 observatoires et télescopes ont constaté et étudié.

Le 17 août 2017, les interféromètres laser géants *Ligo* et *Virgo* ont de nouveau détecté des ondes gravitationnelles. L'analyse de ces ondes montre que, contrairement aux précédentes fois, elles ont été émises par la fusion de deux étoiles à neutrons et non de deux trous noirs. Cela a enthousiasmé l'ensemble de la communauté des astrophysiciens, car, en plus d'émettre des ondes gravitationnelles, la coalescence de deux étoiles à neutrons s'accompagne d'importantes émissions électromagnétiques – que de nombreux observatoires

au sol ou dans l'espace ont observées. Pour Laura Cadonati, porte-parole de la collaboration *Ligo*, l'événement, noté GW170817, a été « l'un des événements astrophysiques les plus étudiés à ce jour ». Et les découvertes qui accompagnent cette observation unique en son genre sont déjà nombreuses.

Que s'est-il passé exactement le 17 août 2017, à 14h41 (heure de Paris)? Le programme d'analyse en temps réel des données de *Ligo* a détecté un fort signal d'onde gravitationnelle sur l'un de ses deux interféromètres. À peine 2 secondes plus tard, l'observatoire spatial *Fermi* a

enregistré un sursaut gamma, une bouffée intense de rayonnement électromagnétique de haute énergie. Pendant ce temps, les logiciels d'analyse ont confirmé la présence de l'onde gravitationnelle dans les données des deux interféromètres de *Ligo* et de celui de *Virgo*. Du fait de la simultanéité des divers signaux, il est quasi certain qu'ils provenaient d'une source unique.

Par triangulation, à partir de l'intensité des signaux et le moment exact de leur arrivée sur les trois interféromètres, cette source a été localisée dans une région d'environ 30 degrés carrés (soit environ 120 pleines lunes) dans l'hémisphère Sud, dans la constellation de l'Hydre. Cette information a aussitôt été transmise à près de 70 observatoires et télescopes dans le monde. À peine 12 heures plus tard, l'équipe utilisant le télescope *Swope*, au

Chili, a annoncé avoir identifié la présence d'un nouveau point lumineux – la source des ondes gravitationnelles et du sursaut gamma – dans la galaxie NGC 4993, située à 130 millions d'années-lumière.

Le signal gravitationnel capté a duré près de 100 secondes. Son analyse a établi que les masses des astres impliqués étaient comprises entre 1,1 et 1,6 fois la masse du Soleil, des masses typiques des étoiles à neutrons. Ces dernières sont le stade ultime de l'évolution de certaines étoiles massives qui ont explosé en supernovæ en laissant un cœur dense. Ce cœur, l'étoile à neutrons, a un diamètre d'environ 20 kilomètres et il est si dense qu'un dé à coudre de sa matière pèse de l'ordre du milliard de tonnes.

La contrepartie électromagnétique du signal gravitationnel a fourni de nombreuses informations intéressantes et confirme certains modèles. Par exemple, le sursaut gamma observé par *Fermi* est classé comme sursaut court (car il a duré moins de 2 secondes). Or les astrophysiciens suspectaient qu'une partie des sursauts courts étaient produits par la coalescence de paires d'étoiles à neutrons. L'événement GW170817 leur donne raison.

Un autre résultat important porte sur la matière expulsée au moment de la fusion des deux astres. Cette matière initialement très chaude s'est vite refroidie en émettant de la lumière dans différentes longueurs d'onde. On parle de kilonova; ce phénomène, que l'on avait prédit théoriquement, est donc désormais observé.

Par ailleurs, d'après les modèles, la coalescence de deux étoiles à neutrons est le siège de réactions nucléaires qui conduisent à la synthèse d'éléments plus lourds que le fer. Or parmi les nombreux observatoires qui ont scruté le rayonnement de GW170817 pendant les heures, les jours, voire les semaines qui ont suivi la fusion, l'observatoire américain *Gemini*, le VLT européen et le télescope spatial *Hubble* ont détecté dans l'infrarouge des indices de production de plomb, d'or et de platine. On aurait ainsi observé pour la première fois ce qui est probablement l'un des principaux processus de production d'éléments lourds dans l'Univers.

On le voit: l'«astronomie multimessagers», qui combine ondes gravitationnelles et ondes électromagnétiques, tient ses promesses! ■

SEAN BAILLY

B. P. Abbott *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 848, n° 2, 2017

Un recensement d'insectes inquiétant

En moins de trente ans, les populations d'insectes volants ont subi une baisse de 75 % de leur biomasse. Cette estimation est le fruit d'une étude de longue durée réalisée en Allemagne à partir de captures d'insectes dans des zones protégées. Jean-François Silvain revient sur les causes et les impacts de ce résultat alarmant.



Propos recueillis par DONOVAN THIEBAUD

JEAN-FRANÇOIS SILVAIN
chercheur à l'IRD et
président de la Fondation
pour la recherche
sur la biodiversité

Comment Caspar Hallmann et ses collègues ont-ils réalisé ce recensement ?

L'étude repose sur une méthode simple. Elle consiste en l'usage de pièges d'interception non sélectifs, ou « tentes Malaise » (du nom de leur inventeur, René Malaise), installés depuis 27 ans dans 63 zones protégées en Allemagne. Les chercheurs ont collecté des insectes et estimé l'évolution de ces populations.

Plusieurs aspects sont intéressants dans cette étude. Sa durée, tout d'abord, mais aussi son caractère non sélectif qui est assez rare. De plus, les prélèvements ont été réalisés dans des zones protégées, relativement préservées de l'urbanisation. Les chercheurs ont ainsi constaté une diminution de plus de 75 % de la biomasse des insectes volants.

Les causes de cette baisse sont-elles identifiées ?

Les chercheurs ont considéré divers facteurs dont ils ont estimé l'influence dans cette perte de biomasse. Par exemple, les effets liés au réchauffement climatique ne semblent pas intervenir. Par ailleurs, en réalisant leur étude dans des zones protégées, l'équipe a écarté deux autres hypothèses souvent avancées pour expliquer la disparition des insectes : les changements paysagers dus à l'activité humaine – une forêt transformée en zone agricole par exemple – et les pratiques agricoles qui conduisent à un déclin de la biodiversité végétale.

En revanche, ils n'excluent pas la piste des pesticides. En effet, ces produits passent très facilement des zones cultivées aux zones protégées. Cette hypothèse rejoint de nombreux travaux actuels portant sur l'influence de ces pesticides, en particulier des néonicotinoides, sur la biodiversité. Mais ces études se focalisent en général sur des espèces particulières, inconvénient que ne présente pas l'étude allemande.

Les résultats de cette étude, qui a eu lieu en Allemagne, sont-ils généralisables ?

Dans la publication, les chercheurs citent l'exemple d'une étude anglaise de 2009 assez similaire. Les résultats montrent une baisse drastique des populations d'insectes sur un site où l'activité agricole a été intensifiée. Il n'y a pas de raisons de penser que les conclusions valables en Allemagne et en Angleterre ne le seraient pas en France et plus globalement en Europe occidentale et en Amérique du Nord. Dans tous ces pays, l'agriculture est intensive et utilise massivement des pesticides. Un exemple simple pour constater cette diminution des insectes est le « phénomène du pare-brise ». Partout en Europe de l'Ouest, dans les années 1990, vous ne pouviez pas rouler à pleine vitesse plus de 200 kilomètres sans avoir à laver votre pare-brise, en raison des impacts d'insectes. Tout le monde peut constater que ce n'est plus le cas aujourd'hui.

Quelles sont les conséquences ?

Cette diminution de la biomasse d'insectes retire un socle majeur à l'échelle trophique. De nombreux oiseaux se nourrissent d'insectes et on compte aussi beaucoup de mammifères insectivores. Il faut donc s'attendre à des phénomènes en cascade conduisant à des chutes de population dans toutes les chaînes trophiques. Deuxième conséquence, de nombreuses fonctionnalités écologiques sont assurées par des insectes. La pollinisation en est un exemple. On a beaucoup parlé de la baisse du nombre d'abeilles, mais en fait, ce sont tous les pollinisateurs qui sont menacés.

Les risques associés à la perte de la biodiversité ont souvent été négligés, notamment par rapport aux défis que pose directement le changement climatique. Les études récentes sur la baisse de biodiversité des vertébrés et ce nouveau résultat sur les insectes soulignent que la situation est réellement alarmante. ■

C. A. Hallmann *et al.*, *PLoS One*, vol. 12(10), e0185809, 2017

GÉOSCIENCES

LES BACTÉRIES INFLUENT SUR LA SÉQUESTRATION DU CARBONE

La séquestration du carbone dans les roches basaltiques paraît prometteuse, mais les bactéries vivant dans ces milieux réagissent à l'injection de CO₂.

Une équipe internationale dirigée depuis l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP) par Bénédicte Ménéz vient de glisser un grain de carbonate dans les espoirs de séquestration du dioxyde de carbone (CO₂) au sein des basaltes profonds. Les chercheurs ont montré que lorsqu'on y injecte de l'eau saturée en dioxyde de carbone, les bactéries qui vivent dans les eaux de ces aquifères basaltiques réagissent fortement et influencent la fixation du carbone.

Depuis 2007, la séquestration du dioxyde de carbone dans les basaltes est l'objet du projet de recherche international *Carbfix* mené sur des basaltes islandais et soutenu par l'Union européenne. Publiés en 2016, les résultats d'un essai d'injection de 175 tonnes de dioxyde de carbone dans les basaltes d'une coulée de lave sont très encourageants : ils suggèrent qu'en deux ans, la quasi-totalité du carbone injecté s'est minéralisée.

En fonction des évolutions du pH ambiant, les silicates de magnésium, de fer, de calcium et d'autres minéraux formant le basalte réagissent en effet avec le dioxyde de carbone apporté par l'eau injectée pour former des carbonates de fer (sidérite), de calcium (calcite), de magnésium (magnésite), etc. Il semble que la formation de carbonates soit optimale lorsque le pH est assez élevé pour qu'elle ait lieu, mais pas trop pour éviter les formations de zéolithes (des aluminosilicates) et de smectites (des argiles), lesquelles concurrencent les carbonates. Dans les basaltes testés, où la température est basse (20-50 °C), le pH optimal se situerait entre 5,2 et 6,5 – point dont il faudrait tenir compte en préparant les eaux d'injection.

Mais à des températures aussi modérées, les aquifères basaltiques contiennent aussi de la vie. C'est pourquoi les géomicrobiologistes de l'IPGP se sont intéressés à ses effets sur la séquestration du dioxyde de carbone. Les chercheurs ont montré que les nombreuses communautés bactériennes des basaltes profonds réagissent fortement et en quelques semaines à l'arrivée d'eaux acidifiées par la dissolution de dioxyde de carbone. Les ions de fer, de magnésium et de calcium et des composés aromatiques contenus dans la matrice siliceuse



Prélevée sur le site d'injection du dioxyde de carbone dans l'aquifère basaltique islandais, cette carotte révèle la présence de minéraux carbonatés à l'intérieur de la roche.

95 %

DU CARBONE INJECTÉ DANS LE BASALTE AURAIT ÉTÉ FIXÉ DANS LA ROCHE SOUS LA FORME DE CARBONATES EN DEUX ANS, ONT CLAMÉ LES AUTEURS DE L'ESSAI CARBIFIX EN 2016. TOUTEFOIS, C'ÉTAIT COMPTER SANS LES BACTÉRIES, DONT LES EFFETS RESTENT À PRÉCISER...

constituent en effet autant de nutriments et de sources d'énergie pour les bactéries. Leur libération par l'arrivée d'eau acide entraîne la prolifération de certains types de bactéries. Ainsi, l'équipe de l'IPGP a mis en évidence l'efflorescence de bactéries chimiolithoautotrophes (se nourrissant de minéraux contenus dans la roche) ferroxydantes qui utilisent le CO₂ comme source de carbone et d'autres qui servent pour dégrader les composés aromatiques complexes.

Ces activités microbiennes influent sur le devenir du CO₂ injecté de plusieurs façons : tout d'abord, une partie du carbone est convertie en biomasse au lieu de l'être en carbonate ; ensuite, en oxydant le fer, les bactéries modifient la disponibilité des éléments nécessaires à la formation des carbonates et l'efficacité de la dissolution des silicates, la principale composante des basaltes. Enfin, dans des environnements de basse température où le vivant peut se développer – en clair, partout où la température est inférieure à 120 °C –, l'efficacité du stockage minéral pourrait être réduite à long terme. Les chercheurs s'attellent à quantifier cet effet. ■

FRANÇOIS SAVATIER

R. Trias et al., *Nature Communications*, en ligne, 20 octobre 2017

ORANG-OUTAN, UNE TROISIÈME ESPÈCE

En 1997, une population isolée d'orangs-outans avait été découverte près de Batang Toru, à Sumatra. L'analyse génétique et morphologique effectuée par Alexander Nater, de l'université de Zurich, et ses collègues a montré qu'il s'agit d'une nouvelle espèce. Cela porte à sept le nombre de grands singes non humains connus (trois espèces d'orangs-outans, deux de gorilles, les chimpanzés et les bonobos). *Pongo tapanuliensis* se serait séparé génétiquement des autres orangs-outans il y a 3,4 millions d'années. Sa population ne comptant que 800 individus, l'espèce est menacée d'extinction.

UNE EXOPLANÈTE HORS NORME

De la taille de Jupiter, mais en orbite autour d'une étoile deux fois plus petite que le Soleil, NGTS-1b est, rapportée à la taille de son étoile, la plus grande exoplanète connue. Pour Daniel Bayliss, de l'université de Genève, et ses collègues, cette planète remet en question les modèles de formation de ces corps. En effet, on pensait qu'autour d'une petite étoile, trop peu de matière (gaz et poussières) est disponible pour former une planète si grande.

L'ODEUR DU DURIAN DÉCRYPTÉE

Le durian (*Durio zibethinus*) est un fruit d'Asie du Sud-Est très consommé dans la région. Mais, mûr, le fruit dégage une odeur si désagréable qu'il est interdit dans certains lieux publics. Bin Tean Teh, de l'institut de biologie moléculaire et cellulaire de Singapour, et ses collègues ont séquencé le génome du durian. Avec ses 46 000 gènes (le double de l'homme), il serait un lointain parent du cacao. Les chercheurs ont aussi identifié une classe de gènes très actifs qui régulent la production de composés volatils sulfurés à l'origine de l'odeur.

UN TROU DE VER LIQUIDE

Prenons un canal de 7 mètres dans lequel circule de l'eau. Une bosse au fond du canal accélère le courant de sorte qu'une vague qui remonte le courant est trop lente pour franchir l'obstacle et est réfléchiée vers l'aval. Cependant, en prenant en compte les effets microscopiques de tension de surface, on remarque qu'une petite onde, dite capillaire continue à se propager vers l'amont. Elle est toutefois vite dissipée par les effets de viscosité. Germain Rousseaux et Léo-Paul Euvé, du laboratoire Pprime à Poitiers, ont montré expérimentalement que l'onde peut néanmoins dépasser l'obstacle et redonner une onde normale qui poursuit sa course vers l'amont.

L'intérêt de cette expérience est l'analogie mathématique qu'elle présente avec un trou de ver astrophysique, une solution des équations de la relativité générale qui relie deux régions distinctes de l'Univers. Dans les années 1980, le physicien canadien William Unruh avait proposé d'utiliser des systèmes hydrodynamiques pour étudier les trous noirs (des régions de l'Univers où l'espace-temps est si courbé que même la lumière ne peut s'en échapper) du fait de certaines analogies. En 2016, Léo-Paul Euvé, Germain Rousseaux et leurs collègues ont ainsi mis en évidence dans un courant d'eau un phé-



Un trou de ver est un objet théorique qui relie deux régions distantes de l'Univers.

nomène analogue à la faible émission des trous noirs, le rayonnement de Hawking.

Cette fois, leur expérience s'apparente à un hypothétique trou de ver entre un trou noir et un trou blanc, le renversement temporel d'un trou noir. Or de nombreuses questions se posent sur ces trous de vers: se réalisent-ils dans la nature? Sont-ils stables? Peuvent-ils être traversés dans les deux sens? À cette dernière interrogation, les deux chercheurs viennent de répondre par l'affirmative... tout du moins dans sa version hydrodynamique! ■

S. B.

L.-P. Euvé et G. Rousseaux, *Phys. Rev. D*, vol. 96, article 064042, 2017

COELACANTHE SUISSE MUTANT

Les coelacanthes actuels passent souvent pour des «fossiles vivants», car certains traits de leur anatomie ont très peu changé par rapport à ceux des anciens représentants connus du groupe, il y a 400 millions à 70 millions d'années. Mais le fossile d'une nouvelle espèce datée de 240 millions d'années, *Foreya maxkuhni*, découvert en Suisse, révèle que leur morphologie était déjà plus variée qu'on ne le pensait. L'animal présente un aspect curieux, avec son crâne pointu, sa petite mâchoire et son corps court. Lionel Cavin, du Muséum d'histoire naturelle de Genève, et ses collègues attribuent cette différence à une évolution hétérochrone, c'est-à-dire qu'une unique mutation sur l'un des gènes du développement s'exprimant au stade embryonnaire aurait produit des changements importants.



Vue d'artiste du coelacanth dont le fossile a été retrouvé en Suisse. Il vivait probablement en eaux peu profondes.

Ce «saut évolutif» a peut-être constitué un avantage sélectif pour ce poisson. Doté de cette morphologie, il a pu coloniser des zones côtières peu profondes, alors que les coelacanthes actuels vivent dans les profondeurs. ■

S. B.

L. Cavin et al., *Scientific Reports*, vol. 7, article 13695, 2017

EN IMAGE

UN MICROROBOT QUI VOLE, PLONGE, NAGE ET REFAIT SURFACE

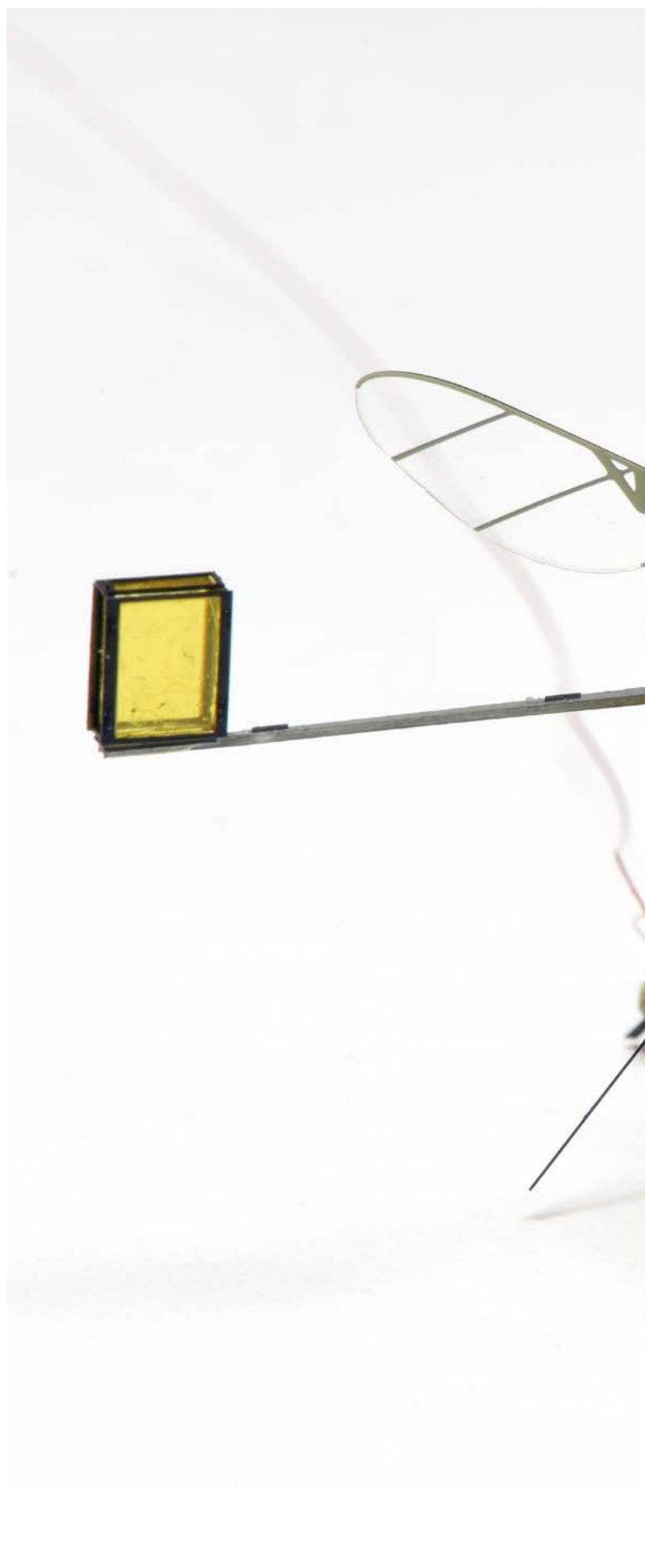
RoboBee, nouvelle génération de robots ailés de quelques centimètres, pesant 175 milligrammes, est environ 1 000 fois plus léger que ses prédécesseurs capables de voler et nager. Évoluer entre air et eau pose de nombreux défis. L'eau étant beaucoup plus dense que l'air, il est d'abord nécessaire d'adapter le rythme du battement des ailes en fonction du milieu où le robot se trouve. Si la fréquence de battement dans l'air est trop faible, la portance est insuffisante et le robot tombe; si la fréquence de battement dans l'eau est trop élevée, les ailes cassent. Le robot peut se mouvoir sans difficulté dans les deux milieux en adaptant la fréquence: de 220 à 300 hertz dans l'air, entre 9 et 13 hertz dans l'eau.

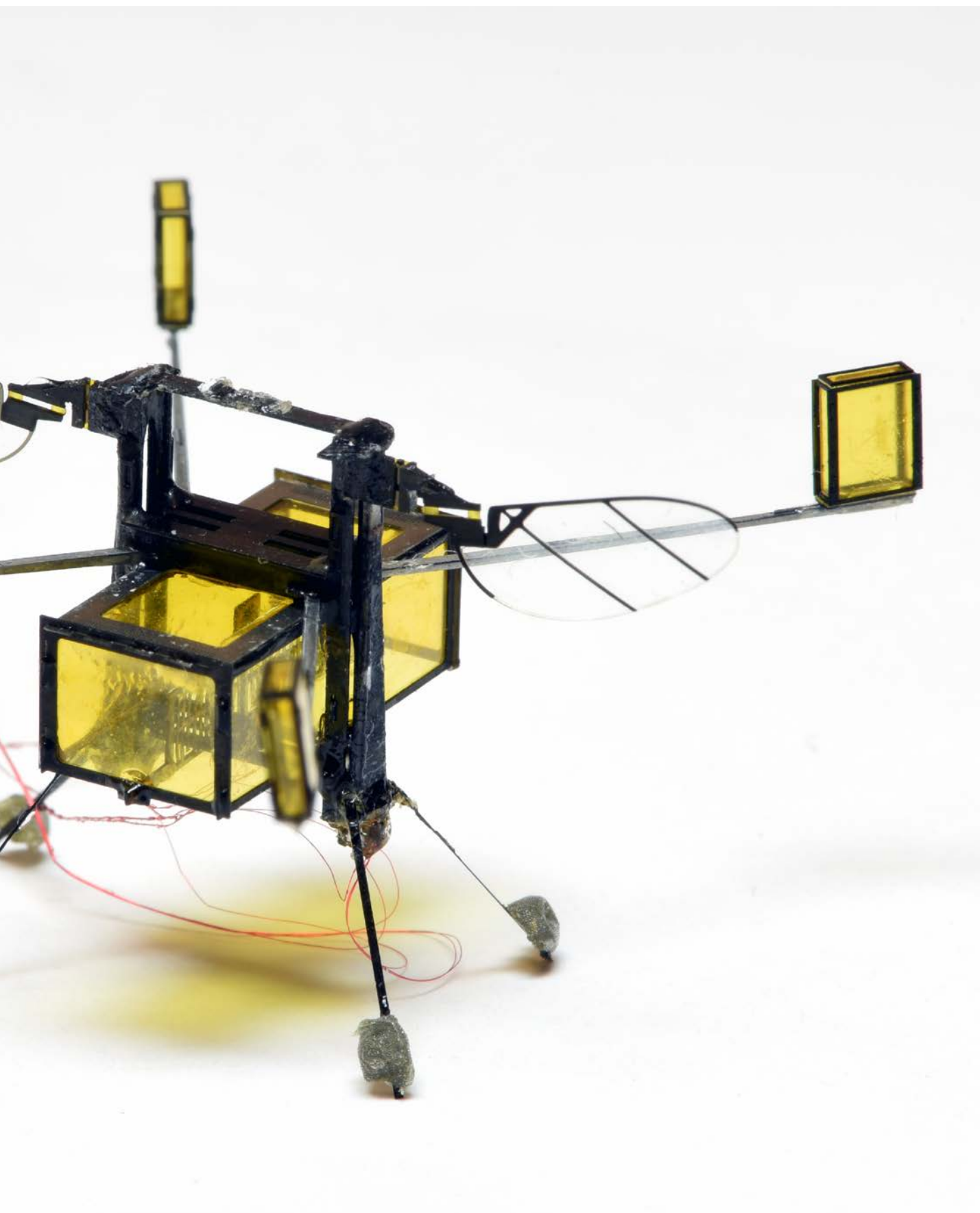
Par ailleurs, l'interface air-eau constitue un défi complexe pour un robot de poids plume. En effet, la tension de surface, qui permet à certains insectes de marcher sur l'eau sans couler, rend difficile la pénétration dans le milieu liquide pour le robot. L'impact et des bords acérés permettent de percer cette barrière. Mais, encore plus difficile, comment ressortir de l'eau et redécoller? Les concepteurs de RoboBee, Yufeng Chen, de l'université Harvard, et ses collègues, ont imaginé une stratégie originale. Lorsque le robot arrive près de la surface, un système de plaques électrolytiques produit du gaz à partir de l'eau, de l'oxyhydrogène (mélange H_2 - O_2 en proportions 2:1) qui remplit un compartiment sous le robot. L'augmentation de la poussée d'Archimède pousse alors le robot vers le haut et fait émerger ses ailes. Pour arracher le robot du fluide, une étincelle déclenche la combustion du gaz, qui propulse le robot dans l'air.

De nombreuses applications sont envisagées pour de tels robots volants et plongeurs, depuis la surveillance de l'environnement à des missions de recherche pour aider des équipes de secours. ■

S. B.

Y. Chen et al., *Science Robotics*,
vol. 2, article eaao5619, 2017





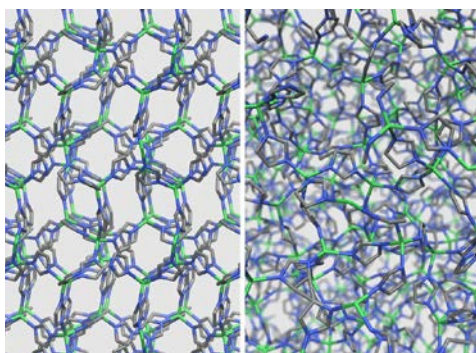
PHYSICOCHIMIE

UN LIQUIDE POREUX

Les réseaux métallo-organiques ou MOF (*metal-organic framework*) sont des matériaux poreux: leur structure contient de nombreux trous ou pores de taille nanométrique. Leurs applications sont diverses: adsorption ou séparation de gaz, catalyse, transport ionique, etc. Cependant, leur caractère cristallin restreint les possibilités d'utilisation. En 2015, des chercheurs ont découvert que certains MOF pouvaient être transformés en phase liquide ou amorphe comme du verre. Pour préciser les propriétés des MOF dans ces phases, François-Xavier Coudert, chercheur du CNRS à Chimie ParisTech, et ses collègues ont étudié l'un d'eux, le ZIF-4.

Cette molécule est constituée d'un ion de zinc associé à quatre ligands d'imidazolate. Elle a une forme tétraédrique avec une cavité au milieu, où des molécules de gaz peuvent s'insérer. Les chercheurs ont étudié le point de fusion – le ZIF-4 fond à une température de 865 kelvins (592°C) –, la phase liquide et la phase amorphe (obtenue en laissant refroidir à température ambiante un échantillon liquide).

Grâce à la diffraction de neutrons et de rayons X, ainsi qu'à des simulations numériques, l'équipe a montré que jusqu'à 1200 kelvins, l'ion zinc reste préférentiellement lié à



Dans sa phase solide et cristalline, le ZIF-4 a une structure poreuse (à gauche). En phase liquide, la porosité est conservée, malgré la structure désordonnée (à droite).

quatre ligands, mais des échanges de ligands entre ions métalliques voisins s'effectuent rapidement, ce qui confère un caractère liquide au matériau. Et même à plus haute température, la présence de pores est préservée en phase liquide: le volume poreux moyen à 300 ou à 2000 kelvins est quasi équivalent. On peut donc parler de liquide poreux.

François-Xavier Coudert résume ainsi les perspectives de ces MOF: «L'avantage du liquide réside dans un aspect pratique pour les applications, puisque de nombreux procédés de séparation en phase liquide existent et peuvent être facilement adaptés.» ■

S. B.

R. Gaillac et al., *Nature Materials*, en ligne, 9 octobre 2017

INFORMATIQUE

GO: L'IA QUI APPREND SEULE

En 2016, l'intelligence artificielle AlphaGo battait le Sud-Coréen Lee Sedol, un champion mondial au jeu de go. Ce résultat a mis en lumière la puissance de l'apprentissage dit profond sur des réseaux de neurones artificiels. Pour atteindre ce niveau, l'entraînement d'AlphaGo s'est déroulé en deux temps. Le programme a d'abord analysé de nombreuses parties jouées par des humains, puis a joué contre lui-même – une phase dite d'apprentissage par renforcement. AlphaGo Zero, le nouveau logiciel développé par l'entreprise DeepMind, apprend à jouer à ce jeu sans utiliser de données humaines.

La stratégie adoptée repose uniquement sur l'apprentissage par renforcement. Connaissant *a priori* seulement les règles, le programme joue contre lui-même et utilise la configuration du plateau de jeu comme donnée pour calculer les



Le programme AlphaGo Zero apprend tout seul à jouer au jeu de go et domine son prédécesseur AlphaGo.

probabilités de gagner. En accumulant des essais et des erreurs, le programme met à jour son réseau de neurones et améliore ses chances de victoire. AlphaGo Zero apprend à jouer en trois jours, contre plusieurs mois pour AlphaGo. Et l'efficacité est sans appel. En opposant les deux programmes, AlphaGo Zero a dominé son prédécesseur par 100 victoires contre 0! ■

S. B.

D. Silver et al., *Nature*, vol. 550, pp. 354-359, 2017

EN BREF

LE MIEL CONTAMINE PAR LES PESTICIDES

Environ 75 % des miels du monde sont contaminés par les néonicotinoïdes. Edward Mitchell, de l'université de Neuchâtel, et ses collègues ont analysé des échantillons de miel provenant de 198 sites couvrant tous les continents du globe. L'équipe a recherché cinq molécules de cette famille de pesticides. Résultat : 30 % des miels en contenaient une et 45 % en contenaient au moins deux. Les chercheurs mettent ainsi en évidence l'exposition globale des abeilles à ces produits.

UN ASTÉROÏDE BINAIRE EXOTIQUE

En 2011, l'astéroïde numéroté 300163 a montré des signes d'activité cométaire avec la formation d'un halo gazeux et d'une queue, ce qui lui a valu un nom de comète, 288P. Grâce à des observations récentes avec le télescope spatial *Hubble*, Jessica Agarwal, de l'institut Max-Planck à Göttingen, et ses collègues ont montré qu'il s'agissait d'un astéroïde binaire : deux corps de masses comparables en orbite l'un autour de l'autre à une distance d'environ 100 kilomètres. Un cas unique.

TRACES DE PAS MILLÉNAIRES EN NORMANDIE

Dans une carrière située à la confluence de la Seine et de l'Eure, l'arrivée de sédiments apportés par une crue a figé des empreintes de pas animales et humaines. La présence de ces fugaces traces de vie est liée à la proximité d'un habitat de l'âge du Bronze implanté autour de 2100-1900 avant notre ère. Les traces, mises au jour par Cyril Marcigny et son équipe de l'Inrap, témoignent du passage rapide de cochons ou de sangliers, de bovidés, et de celui de personnes accompagnées de chiens. Des éleveurs sans doute.

DE LA NEIGE SUBLIMÉE

L'équipe d'Alexis Berne, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, vient de mettre en évidence un phénomène qui pourrait avoir de grandes conséquences sur le bilan de masse de la calotte glaciaire en Antarctique. Puisque les forts vents qui dévalent des hauts plateaux du continent transportent un air très sec, ils entraînent la sublimation (évaporation sans passage par l'état liquide) des flocons de neige aux basses altitudes, ce qui diminue sensiblement la quantité de précipitations neigeuses au sol. Comparé à son maximum en altitude, le cumul de précipitations au sol sur l'ensemble du continent est ainsi diminué de 17%. Le phénomène est accru au niveau des côtes, où la baisse atteint 35%. Pour obtenir ce résultat, l'équipe a utilisé différents instruments météorologiques de la base Dumont-d'Urville et des modèles numériques. ■

D. T.

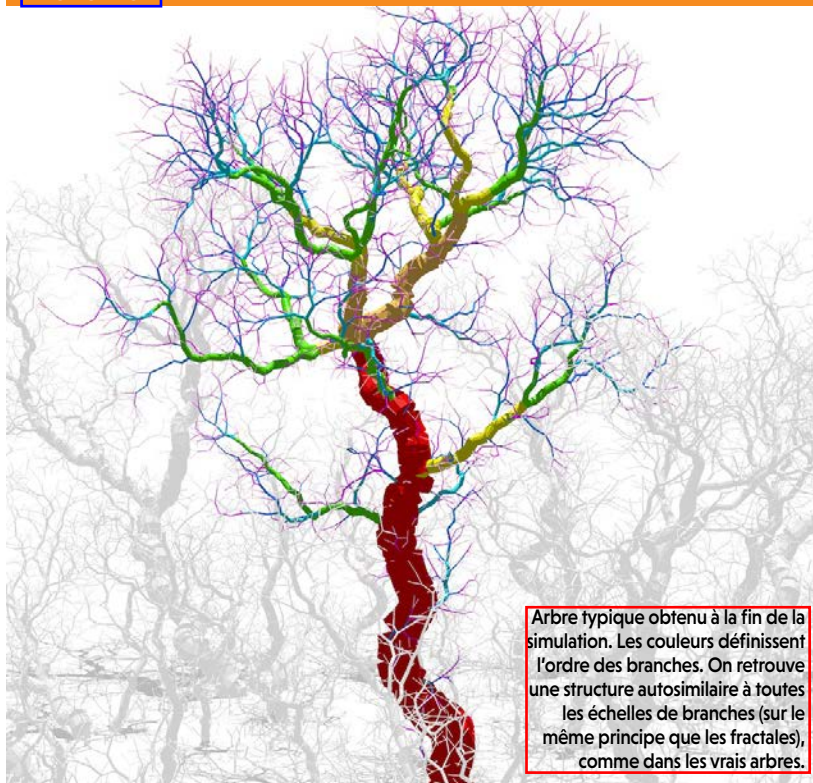
J. Grazioli et al., *PNAS*, vol. 114(41), pp. 10858-10863, 2017

POUSSIÈRES DE NANODIAMANTS

L'Univers est la source de nombreux rayonnements dont certains sont encore mal compris. C'est le cas de l'ERE (*Extended Red Emission*) observé il y a environ quarante ans. Si on sait que ce phénomène est lié aux poussières interstellaires, la nature précise de sa source n'était toujours pas clairement identifiée. Pour Hsiao-Chi Lu, du Centre taiwanais de recherche sur le rayonnement synchrotron, et ses collègues, il pourrait être dû à des nanodiamants. Les chercheurs ont en effet montré que des nanodiamants présentant un type de défauts cristallins (un atome d'azote remplaçant un atome de carbone) soumis à du rayonnement ultraviolet produit par un synchrotron réémettent dans le rouge avec des caractéristiques semblables à celles d'ERE. Mais pour confirmer cette hypothèse, il faudra détecter la trace de ces diamants dans les poussières interstellaires qui émettent l'ERE, car d'autres molécules pourraient aussi expliquer ce rayonnement (hydrocarbures aliphatiques, fullerènes...). ■

MARTIN TIANO

Hsiao-Chi Lu et al., *Angewandte Chemie Int. Ed.*, en ligne, 12 octobre 2017



Arbre typique obtenu à la fin de la simulation. Les couleurs définissent l'ordre des branches. On retrouve une structure autosimilaire à toutes les échelles de branches (sur le même principe que les fractales), comme dans les vrais arbres.

200 000 ANS DANS LA VIE D'UNE FORÊT VIRTUELLE

La géométrie des arbres suit certaines relations mathématiques simples, nommées lois d'échelle allométriques; par exemple, une formule relie la hauteur de l'arbre à son diamètre. Les explications avancées sont d'origine mécanique et hydraulique: les arbres se conforment à cette loi géométrique afin de ne pas s'effondrer sous leur propre poids et afin d'apporter la sève jusqu'aux feuilles des extrémités des branches.

Pour savoir quels facteurs ont influé sur l'évolution de la structure des arbres, Christophe Eloy, de Centrale Marseille, et ses collègues ont développé un modèle numérique, MechaTree, qui simule la croissance d'une forêt sur plusieurs générations. Chaque arbre transmet ses caractéristiques à sa descendance, mais avec des valeurs pouvant varier de façon aléatoire. Les chercheurs rendent compte ainsi de l'apparition de mutations. Le programme calcule l'influence de divers facteurs extérieurs, l'exposition au soleil et la résistance des branches au vent. Des effets sur la croissance récemment mis en évidence par les biologistes sont intégrés, telle la capacité des arbres de percevoir les déformations liées au vent et la lumière qui arrive sur leurs bourgeons, et d'y réagir en modulant leur croissance.

Quels ont été les résultats après 200 000 ans? Les arbres les mieux adaptés finissent par dominer la forêt, et certains ressemblent à un vrai pin. Les chercheurs ont retrouvé toutes les lois d'échelle connues. Ils ont pu identifier le rôle de chaque facteur dans ce résultat. Ainsi, la compétition pour l'accès à la lumière et la transparence du feuillage déterminent la dimension fractale de l'arbre, tandis que la réaction au vent contrôle le diamètre des branches. ■

S. B.

C. Eloy et al., *Nature Communications*, vol. 8, article 1014, 2017

GÉNÉTIQUE

LA VÉRITABLE HISTOIRE DES COULEURS DE LA PEAU

Des mutations génétiques impliquées dans la pigmentation de la peau sont antérieures à *Homo sapiens*, révèle une étude génomique de grande ampleur sur des populations africaines.

Si la diversité des couleurs de la peau est un trait marquant de l'homme moderne, ses causes génétiques sont encore mal connues. Or une vaste étude génomique sur des populations africaines a identifié plusieurs variants de gènes impliqués dans la pigmentation de la peau. Ils révèlent que l'histoire de la couleur de la peau est bien plus ancienne qu'on ne le pensait.

Les paléanthropologues s'accordent à dire que nos ancêtres australopithèques étaient probablement clairs de peau sous les poils. Avant cette étude, ils privilégiaient le scénario suivant : il y a plus de 2 millions d'années, nos ancêtres avaient perdu la plupart de leurs poils ; leur peau aurait alors évolué rapidement en s'assombrissant, ce qui les protégeait des effets néfastes des rayons ultraviolets ; puis, quand les humains ont migré hors d'Afrique vers des latitudes plus élevées, moins ensoleillées, leur peau aurait évolué vers une couleur plus claire. La nouvelle étude, réalisée par une équipe internationale conduite par Sarah Tishkoff, à l'université de Pennsylvanie, révèle un scénario plus compliqué.

Ces chercheurs ont séquencé les génomes de 2 092 Africains d'origines variées, vivant en Éthiopie, Tanzanie et au Botswana, et les ont comparés à des génomes de populations ouest-africaines, eurasiennes et australo-mélanésiennes. Ces travaux indiquent qu'une grande partie des mutations associées aux couleurs de la peau sont apparues avant même l'émergence d'*Homo sapiens* (il y a quelque 300 000 ans). Notamment, ils suggèrent que des variants de deux des gènes connus pour être associés à des yeux, une peau et des cheveux clairs chez les Européens seraient en fait apparus il y a 1 million d'années... en Afrique. Ils se seraient ensuite répandus en Europe et en Asie.

Les biologistes ont aussi confirmé des hypothèses déjà proposées, comme les migrations « back to Africa ». En effet, un variant de « dépigmentation » du gène *SLC24A5*, lié à une peau pâle et connu pour s'être répandu en Europe, s'est révélé fréquent en Afrique de l'Est, même chez des individus à la peau sombre (signe que ce variant n'agit pas seul pour donner une peau claire). Ce variant serait apparu en Eurasie



En Afrique, la diversité des couleurs de peau est un indice d'une histoire génétique riche et complexe.

assez récemment, il y a environ 29 000 ans, s'y serait totalement répandu il y a 6 000 ans, et aurait migré en retour depuis le Moyen-Orient vers l'Afrique de l'Est.

En fait, des scénarios complexes sont à envisager pour l'histoire de chaque mutation. Celles du gène *MFSD12* sont intéressantes. Deux mutations identifiées sur ce gène en diminuent l'expression et sont associées à une couleur foncée de peau, ce qui a été confirmé par des modèles de souris et de poisson-zèbre. Or ces mutations se retrouvent chez des populations mélanésiennes et aborigènes australiennes, appuyant l'hypothèse d'une sortie de l'Afrique il y a 80 000 ans par la corne africaine.

« Tout cela reste à valider par des études encore plus larges, en incluant des populations hors d'Afrique, mais ce travail énorme éclaire l'histoire évolutive des traits que l'on observe aujourd'hui », commente Paul Verdu, chercheur du CNRS au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Une chose est sûre, s'il était encore besoin de la démontrer : la diversité des humains est telle, et leur histoire évolutive est d'une telle complexité, qu'il ne saurait exister de race. ■

NOËLLE GUILLON

N. G. Crawford et al., *Science*, en ligne, 12 octobre 2017

LE SENS DU TOUCHER DE LA BACTÉRIE

A lors que les bactéries ne présentent pas d'organes sensoriels, deux équipes, celle d'Urs Jenal, de l'université de Bâle, et celle d'Yves Brun, de l'université de l'Indiana, ont mis en évidence deux mécanismes permettant à la bactérie *Caulobacter crescentus* de savoir si elle est en contact avec une surface afin de s'y fixer. Des signaux sont déclenchés lorsque les pili, des cils courts à la surface de la bactérie, se rétractent au contact de la surface, ou que le flagelle, qui d'habitude tourne pour propulser la bactérie, se bloque contre la surface.

ASTÉROÏDE EN VISITE

S'il a une trajectoire hyperbolique, un astéroïde quitte a priori le Système solaire à jamais. Un tel corps a souvent été dévié de son chemin initial sous l'influence d'une planète. Mais ce scénario n'explique pas le cas de A/2017 U1, un corps repéré en octobre par le télescope Pan-STARRS 1. Cet astéroïde pourrait bien être le premier corps interstellaire de passage dans le Système solaire formellement identifié. Après un tour autour du Soleil, il s'en éloigne à grande vitesse.

UN ANTIDOULEUR BACTÉRIEN

La souche *Escherichia coli* Nissle 1917 du colibacille est utilisée comme antalgique dans divers troubles intestinaux, dont le syndrome de l'intestin irritable, maladie chronique qui touche environ 11 % de la population mondiale. Toutefois, son mécanisme d'action était mal connu. Teresa Pérez-Berezo, de l'université Paul-Sabatier, à Toulouse, et ses collègues ont montré que cette bactérie libère un neurotransmetteur qui, en se liant à un lipide, passe la barrière intestinale et diminue l'activité de neurones sensitifs du ventre. Une nouvelle piste d'antidouleurs ?

CRISE CHEZ LE POISSON-CLOWN

Les coraux ne sont pas les seuls à blanchir sous le coup du réchauffement climatique. Les anémones de mer subissent le même sort. Ricardo Beldade, du Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement, à Perpignan et à Moorea, et ses collègues ont montré que ce phénomène conduit à une baisse de la fécondité des poissons-clowns.

Chaque anémone de mer vit en symbiose avec une algue microscopique – l'une ne peut pas vivre sans l'autre. Cette algue donne notamment sa couleur à l'animal. Cependant, lors d'une hausse trop importante de la température de l'eau, comme lors de l'événement El Niño qui a provoqué en 2016 un réchauffement de l'océan Pacifique, l'algue peut mourir, entraînant ainsi le blanchiment de son anémone hôte.

Pendant 14 mois, les chercheurs ont étudié 13 anémones sur les récifs de l'île de Moorea, en Polynésie française, et ont constaté le blanchiment de la moitié d'entre elles, suite à El Niño. L'équipe s'est ensuite intéressée au sort du couple de poissons-clowns hébergé par chacune des anémones blanchies. Elle a constaté une baisse de 73 % du nombre d'œufs viables par rapport aux poissons-clowns installés dans une anémone saine.



L'équipe a alors effectué des prélèvements sanguins, qui ont montré que les résidents des anémones blanchies présentaient un taux élevé d'hormones liées au stress et un faible taux d'hormones relatives à la reproduction, prouvant ainsi les conséquences directes du blanchiment sur les semblables du petit Nemo.

Trois ou quatre mois après l'épisode de réchauffement dû à El Niño, l'état de santé des anémones et des poissons s'est amélioré. Le phénomène semble donc réversible, mais il est difficile de savoir ce qu'il en serait pour un épisode de réchauffement plus intense ou de plus longue durée. ■

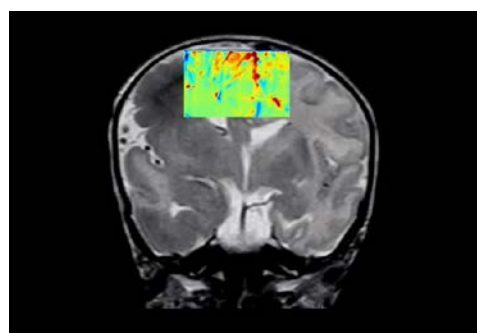
D. T.

R. Beldade et al., *Nature Communications*, vol. 8, article 716, 2017

ÉCHOGRAPHIE CÉRÉBRALE

Pour visualiser l'activité vasculaire du cerveau d'un nouveau-né, l'IRM ou la tomographie par émission de positrons posent divers problèmes, notamment celui du déplacement de l'enfant auprès des machines. Depuis 2009, une technique d'échographie ultrarapide par ultrasons était à l'étude sous la direction du physicien Mickael Tanter, de l'institut Langevin, à Paris. Après des années d'essais sur l'animal, ces chercheurs, avec des cliniciens du service de réanimation néonatale de l'hôpital Robert Debré, ont prouvé que cette technique est utilisable chez les bébés avec un équipement léger pouvant être apporté auprès de leur lit.

L'équipe a observé chez des nouveau-nés en bonne santé les activités vasculaires liées aux différentes phases du sommeil. Et les chercheurs ont étudié la situation chez deux bébés atteints



En diffusant par la fontanelle du nouveau-né, les ultrasons visualisent l'activité vasculaire du cerveau du bébé.

de convulsions liées à une malformation du cortex. Outre son intérêt pour le diagnostic, les chercheurs espèrent utiliser cette technique de neuro-imagerie fonctionnelle pour étudier la croissance du cerveau ou décrypter les mécanismes de déclenchement des épilepsies. ■

N. G.

C. Demene et al., *Science Translational Medicine*, vol. 9, article eaah6756, 2017

PALÉOGÉNÉTIQUE

L'ADN D'UNE DEUXIÈME FEMME DE NÉANDERTAL SÉQUENCÉ

Une vaste équipe dirigée par Svante Pääbo, de l'institut Max-Planck pour l'anthropologie évolutive, à Leipzig, vient de séquencer un second génome néandertalien complet. Cette avancée est tout sauf anodine, tant les données génétiques sur l'humain fossile *Homo neanderthalensis* sont encore limitées.

Précisons à quel point: on a obtenu pour la première fois un génome néandertalien entre 2010 et 2014. Mais comment? En séquençant avec une fiabilité très médiocre le génome d'une chimère génétique, un ADN obtenu en raboutant les séquences provenant des fossiles de trois individus de la grotte de Vindija. Ce n'est qu'en 2014 que le véritable génome de l'homme de Néandertal – en réalité celui d'une femme passée par la grotte de Denisova, dans l'Altaï sibérien – a été séquencé. Ulérieurement, l'ADN d'un enfant de la grotte de Mezmaiskaya, dans le Caucase, a aussi été lu, mais avec une très mauvaise fiabilité.

Le nouveau génome néandertalien provient d'un fossile de la grotte de Vindija, en Croatie. Comme l'ADN complet d'un ours des cavernes qui y est mort avait pu être séquencé, l'équipe de Svante Pääbo s'attendait à ce que les nombreux fragments osseux de cette cavité, où des

Néandertaliens ont vécu jusqu'à il y a 44 000 ans, rendent possible le séquençage d'un génome humain complet. C'est dans le fragment 33.19, appartenant à une femme, qu'ils ont trouvé le plus d'ADN nucléaire. Toutefois, ils ont dû en discriminer l'ADN de celui d'un mâle néandertalien qui l'avait légèrement contaminé et tenir compte, à l'aide d'un algorithme bio-informatique, des substitutions de nucléotides dues aux effets du temps.

Que dit le nouveau génome séquencé? Tout d'abord, il précise avec un haut degré de fiabilité la proportion néandertalienne du génome des Eurasiens modernes: toutes les populations non africaines, hors celle d'Océanie, portent entre 1,8 et 2,6% d'ADN néandertalien. Il confirme ensuite ce qui avait déjà été constaté dans l'ADN de la femme de Denisova: les gènes néandertaliens ont joué un rôle positif dans l'adaptation de nos ancêtres au froid eurasiens, mais favorise aujourd'hui plusieurs maladies liées aux niveaux sanguins du «mauvais» cholestérol (LDL), de la vitamine D ainsi que l'obésité, l'arthrite rhumatoïde, la schizophrénie et certaines maladies de la peau. ■

FRANÇOIS SAVATIER

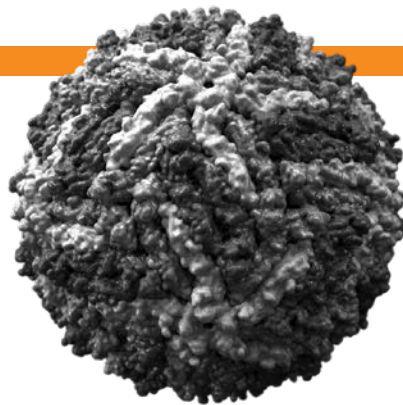
K. Prüfer et al., *Science*, en ligne, 5 octobre 2017

VIROLOGIE

CE QUI A RENDU ZIKA AGRESSIF

Depuis 2013, les épidémies du virus Zika sont accompagnées de symptômes neurologiques graves. Or ce virus découvert il y a soixante-dix ans était jusque-là considéré comme inoffensif. D'après Ling Yuan, de l'Académie chinoise des sciences, et ses collaborateurs, une substitution d'un unique acide aminé dans l'une des dix protéines du virus a augmenté drastiquement sa virulence vis-à-vis des cellules nerveuses, et ainsi rendu le virus dangereux.

L'équipe a comparé chez la souris la virulence de deux souches du virus isolées en 2015 et en 2016 avec leur ancêtre commun, isolé au Vietnam en 2010. Ce dernier était beaucoup moins agressif, voire mortel, que les souches récentes. En comparant le génome des trois virus, les chercheurs ont identifié sept mutations importantes.



Reconstruction en 3D du virus Zika.

Par élimination, ils ont montré que la substitution d'un seul acide aminé, notée S139N, a suffi pour obtenir de la souche de 2010 une agressivité nettement accrue. Ils ont aussi inversé cette mutation à partir d'un virus de 2016, c'est-à-dire qu'ils ont rétabli pour cette seule substitution l'acide aminé ancestral: la virulence de la souche ainsi créée a diminué. ■

M. T.

L. Yuan et al., *Science*, en ligne, 28 septembre 2017

EN BREF

UNE CAVITÉ DANS LA PYRAMIDE DE KHÉOPS

Une cavité de 30 mètres de long vient d'être découverte dans la pyramide de Khéops grâce aux observations de la mission ScanPyramids, un projet qui utilise des techniques non invasives. Leurs détecteurs captent des muons, des particules produites par les rayons cosmiques, qui traversent en partie la roche. Les images tomographiques obtenues montrent que cette structure est similaire à celle de la grande galerie. Sa fonction reste inconnue à ce stade.

LA FOISSONNANTE VIE DES CANIVEAUX PARISIENS

Les eaux qui servent à nettoyer les rues parisiennes proviennent de la Seine. Conséquence: des microalgues, bactéries et autres microorganismes prolifèrent dans les caniveaux. Pascal Jean Lopez, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et ses collègues ont constaté avec surprise la richesse de ce microbiote: plus de 6 900 espèces potentielles d'eucaryotes, dont des diatomées et des champignons. Reste maintenant à comprendre le fonctionnement de cet écosystème particulier.

CONTRER LES TRYPANOSOMES

L'équipe de Yaser Hashem, de l'université de Strasbourg, a peut-être découvert une piste pour lutter contre les parasites de la famille des trypanosomes, responsables notamment de la maladie de Chagas et de la maladie du sommeil. Les humains et ces parasites sont des eucaryotes et les points communs entre leurs machineries cellulaires font que les traitements sont souvent toxiques pour le patient. Mais, dans les ribosomes des parasites, des organites impliqués dans la synthèse des protéines, les chercheurs ont identifié une protéine spécifique et indispensable à leur survie.

NEUROSCIENCES

PISTE CONTRE LA DÉPRESSION

L'usage médical des drogues hallucinogènes a montré des résultats positifs contre la dépression. Mais l'origine de ces bienfaits restait mal comprise. L'équipe de Robin Carhart-Harris, de l'Imperial College de Londres, commence à combler cette lacune.

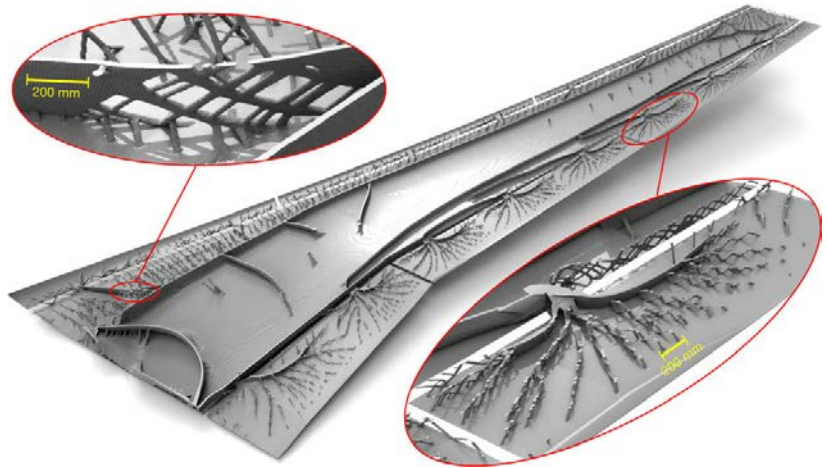
L'étude porte sur une vingtaine de personnes, dont la dépression résistait à tous les traitements. Les patients ont pris deux doses de l'hallucinogène psilocybine à une semaine d'intervalle. Les symptômes de la dépression ont diminué dès le lendemain du traitement. Grâce à l'IRM fonctionnelle, les chercheurs ont observé une diminution de l'activité dans l'amygdale des patients, un centre cérébral des émotions (notamment de la peur et de l'anxiété). Cinq semaines après, l'amélioration avait persisté chez la moitié des personnes traitées. ■

GUILLAUME JACQUEMONT

R. Carhart-Harris *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 7, article 13187, 2017

TECHNOLOGIE

DE L'AILE D'AVION OPTIMISÉE AU BEC D'OISEAU



Pour optimiser une aile de Boeing 777, un algorithme a créé une multitude de microstructures qui rappellent celles que l'on trouve à l'intérieur du bec et des os d'oiseaux.

GÉNÉTIQUE

RÉPARATION DE MUTATIONS

Dans la molécule d'ADN, la désamination spontanée de la cytosine provoque une transition de la paire de bases cytosine (C)-guanine (G) en thymine (T)-adénine (A). Cette réaction est responsable de la moitié des pathologies humaines dues à la substitution d'une seule base. Des chercheurs de l'institut Broad du MIT et de l'université Harvard ont développé deux techniques pour réparer ces mutations.

En s'inspirant du système CRISPR-Cas9, qui permet de modifier avec précision l'ADN, Feng Zhang et son équipe ont conçu CRISPR-Cas13, qui modifie les bases de l'ARN sans toucher au génome. Le système change une base A en inosine (interprétée comme une base G lors de la synthèse des protéines). Nicole Gaudelli et ses collègues ont réalisé la même substitution directement sur l'ADN au moyen d'une enzyme fusionnée à une version de CRISPR-Cas9 qui repère la base à changer, mais ne coupe pas l'ADN. ■

S. B.

D. B. T. Cox *et al.*, *Science*, en ligne, 25 octobre 2017 ;
N. M. Gaudelli *et al.*, *Nature*, en ligne, 25 octobre 2017

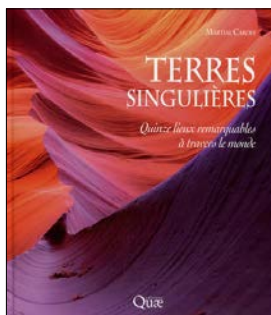
Les algorithmes d'optimisation sont utilisés quotidiennement dans l'industrie automobile et aérospatiale pour concevoir des pièces robustes, mais légères. On estime que cette approche a permis de baisser de 20 à 40 % le poids de certains éléments structurels dans les voitures modernes. Mais étendre l'utilisation de ces algorithmes à des objets de grande taille est difficile, car cette approche requiert une grande résolution spatiale et donc une puissance de calcul gigantesque. Toutefois, Ole Sigmund, de l'université technique du Danemark, et ses collègues ont conçu un programme qui permet d'appliquer ces techniques d'optimisation à de grandes structures, telles qu'une aile d'avion de 27 mètres.

L'équipe a utilisé les données publiques de la Nasa qui caractérisent la géométrie extérieure de l'aile et les forces qui s'appliquent sur elle en vol. À partir de ces données, l'algorithme devait optimiser la rigidité en répartissant de la matière à l'intérieur de l'aile, tout en minimisant son poids. Une résolution spatiale optimale implique un maillage très précis, qui conduit à découper l'aile en 1 milliard de voxels (l'équivalent 3D des pixels), contre quelques millions dans les programmes précédents. L'algorithme doit évaluer simultanément tous les voxels, ce qui ne peut être réalisé qu'à l'aide d'un supercalculateur, en l'occurrence le supercalculateur Curie du CEA, qui dispose de 8000 processeurs.

Les chercheurs ont constaté qu'après une centaine d'itérations, l'algorithme d'optimisation a formé des microstructures rappelant celles de l'intérieur des os d'oiseau et notamment leur bec, qui allient robustesse et légèreté. Aux échelles de temps près, le processus d'optimisation numérique et les processus de croissance des os soumis à la sélection naturelle sont assez similaires. Les chercheurs danois ont montré que le résultat était 2 à 5 % plus léger qu'une aile classique. Il s'ensuivrait une économie de carburant de 40 à 200 tonnes par avion et par an. Mais la réalisation industrielle de ce type d'aile n'est pas envisageable avec les techniques actuelles : il faudra attendre des imprimantes 3D à métal fonctionnant à grande échelle. ■

D. T.

N. Aage *et al.*, *Nature*, vol. 550, pp. 84-86, 2017



GÉOLOGIE

TERRES SINGULIÈRES

Martial Caroff

Quæ, 2017

158 pages, 25 euros



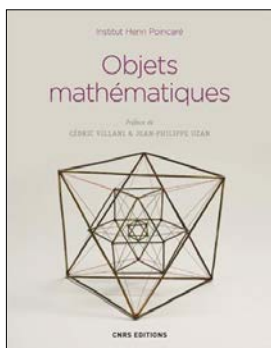
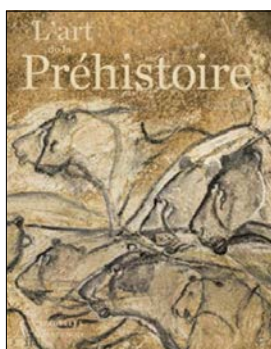
ENTOMOLOGIE

MA VIE DE LIBELLULE

Daniel Magnin et Alain Cugno

Salamandre, 2017

144 pages, 29 euros



Depuis que les Romantiques ont changé notre vision de la nature sauvage, falaises, rochers, déserts et montagnes sont appréciés pour leur grandeur, leur étrangeté et leur beauté. Mais au-delà de l'admiration esthétique, comprendre ces paysages et leur histoire souvent longue et complexe ne peut qu'ajouter à la satisfaction qu'on ressent à les contempler.

Dans ce livre, Martial Caroff utilise son savoir de géologue pour décrypter quinze sites naturels remarquables à travers le monde. Certains, comme le parc de Yellowstone et ses geysers, dans le Wyoming, sont connus dans le monde entier; d'autres, même proches de nous, ne sont guère connus du grand public, ainsi le chaos granitique des Pierres Jaumâtres, dans la Creuse. Mais tous recèlent des curiosités géologiques remarquables de nature à attirer les curieux, même si certains, comme les vallées de Mc Murdo, dans l'Antarctique, ne sont pas aisément accessibles, pour ne rien dire des Montes Apenninus, qui ne sont pas les Apennins d'Italie, mais ceux de la Lune!

L'auteur a choisi ces lieux avec un évident souci d'éclectisme. Certains sont le résultat du simple jeu de la tectonique et de l'érosion, d'autres doivent leur origine à des phénomènes plus rares, comme la caldera de l'île de Santorin, formée lors d'une énorme éruption volcanique entre 1600 et 1500 avant notre ère, ou la structure de Vredefort, en Afrique du Sud, témoin d'un gigantesque impact météoritique survenu il y a quelque 2 milliards d'années. La qualité de l'illustration s'ajoute à celle du texte, d'une grande rigueur scientifique mais agréable à lire, pour faire de ce beau livre une réussite.

ERIC BUFFETAUT / CNRS, ENS

Pourquoi encore un livre sur les libellules? Parce que l'aspect bizarre, voire extravagant mais toujours très beau de ces animaux nous fascine. Ce livre original veut présenter l'histoire naturelle des Odonates du point de vue... des libellules elles-mêmes. Il y avait là un risque d'anthropocentrisme lourd, superbement évité par une approche poétique du texte, qui le rend léger tout en donnant l'essentiel de ce que vous avez toujours voulu savoir sur la vie privée des libellules...

Les auteurs présentent des photographies de libellules qui sont autant d'œuvres d'art, attestant de l'infinie patience dont ont fait preuve les auteurs pour capter des instants remarquables de la vie d'insectes bien connus pour leur méfiance et leur rapidité de vol. À ce propos, nous, humains, sommes encore très loin d'imiter leur vol, fait de surplace, de reculs et de brusques changements de direction. Ces insectes sont aussi très anciens, même si leurs lointains ancêtres du Carbonifère (325 millions d'années) n'avaient pas les mêmes «compétences», puisque les structures fondamentales de leurs ailes n'ont été vraiment acquises qu'au Permien.

Malheureusement, même si les libellules sont des prédateurs redoutables, agressifs à tous les stades de leur vie, elles sont aussi très menacées par le déraisonnable *Homo sapiens*, qui détruit ou pollue toute l'eau douce de la planète. À ce propos, j'ai été surpris de constater que les auteurs insistent – à juste titre – sur l'idée que les humains devraient observer les libellules, mais semblent aussi trouver le mouton «à sa place quand il écrase» et détruit toutes les larves de libellules d'une mare. Pour «naturel» qu'il nous semble, le mouton est en réalité une redoutable tondeuse artificielle que nous avons introduite en nombre dans la nature. Au-delà de cette réaction de chercheur en entomologie, ce livre somptueux va vous faire aimer les libellules, et c'est bien!

ANDRÉ NEL / MNHN, PARIS

PRÉHISTOIRE

L'ART DE LA PRÉHISTOIRE

Carole Fritz (dir.)

Citadelles & Mazenod, 2017

626 pages, 205 euros

Cet impressionnant ouvrage s'impose comme une référence sur l'art des sociétés de la Préhistoire, entendue ici comme l'ère qui a précédé l'écriture. Cette magnifique œuvre collective nous convie à une préhistoire de l'art mondial à la croisée de l'édition d'art et du livre scientifique. Elle constitue une fenêtre ouverte sur près de cinquante millénaires de productions artistiques sur parois et sur objets de chasseurs-collecteurs, de pasteurs, et encore d'agriculteurs-éleveurs, à travers les cinq continents.

Le discours est aussi accessible que rigoureux. Il est excellemment mis en images par des illustrations nombreuses et de très grande qualité. Certains des plus grands spécialistes internationaux ont collaboré afin d'offrir un large panorama de l'art rupestre mondial, mettant en lumière des traditions d'une beauté et d'une sensibilité exceptionnelles, encore méconnues du public français.

Une seconde partie permet

de découvrir le rôle de ces productions dans la quête de l'archéologie. Éléments essentiels de la spiritualité des sociétés, ces témoignages constituent aussi des indices primordiaux pour retracer les territoires et pister les individus devenus spécialistes. Véritable objet à s'émerveiller et rêver face à la splendeur de ce patrimoine culturel de l'humanité dans toute sa diversité et sa richesse, ce beau livre devient également matière à s'interroger et à réfléchir sur la place et les enjeux des images dans les sociétés humaines du passé comme du présent.

CAMILLE BOURDIER / UNIV. DE TOULOUSE

MATHÉMATIQUES

OBJETS MATHÉMATIQUES

Collectif

CNRS Éditions, 2017

191 pages, 25 euros

Les objets mathématiques de l'institut Henri-Poincaré sont, selon Man Ray, qui les a photographiés, « des formes nées de la folie des mathématiciens sans autre dessein que de donner une expression concrète à une vision abstraite ». Les modèles amènent une perception vivante de la géométrie, préliminaires à des applications que l'abstraction n'aide pas à imaginer. Ce caractère « artisanal » de la géométrie l'a probablement desservi : en mathématiques comme en peinture, le figuratif a laissé la préséance à l'abstraction. Ce snobisme parfois inutile a été vilipendé par Henri Lebesgue : « [...] des savants éminents s'efforçaient de ne jamais dévoiler les idées directes et simples qui les avaient guidés et de faire dépendre leurs résultats élégants d'une théorie générale abstraite qui, souvent, ne s'appliquait que dans les cas particuliers [...] ».

Le livre décrit la genèse de ces objets mathématiques nés parfois d'une épure de géométrie descriptive, comme celle de Joseph Caron, sur laquelle a peiné le jeune Henri Lebesgue, épure résultant de recherches toutes fraîches de Gaston Darboux. Ces objets font revivre une géométrie oubliée des dernières générations de mathématiciens : c'est peut-être la première fois que des pans entiers de la connaissance sont passés à la trappe. Bien sûr, la monstration ne remplace pas la démonstration, mais la visualisation peut amener le mathématicien à prendre conscience d'une erreur.

Les articles de l'ouvrage, écrits par les spécialistes de la géométrie, de l'histoire des sciences et de la fabrication de ces objets sont une exploration d'un territoire reconquis. Œuvre utile, savoureuse et belle !

PHILIPPE BOULANGER

ET AUSSI



ICE

Philippe Bourseiller

La Martinière, 2017

296 pages, 45 euros



Douze connaisseurs à divers titres des environnements glaciaux nous

parlent de leur expérience, dont Jean-Louis Étienne, Isabelle Autissier, Janot Lambert, Jean Jouzel.

Les photographies montrent la glace dans nombre de ses états, et, une fois de plus, force est de constater que, à petite, moyenne ou grande échelle, elle crée des formes et des reflets somptueux. Une grande œuvre d'art et un livre intelligent.

LA BELLE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE

Christelle Langrand et Jacques Cattelin

De Boeck, 2017

384 pages, 27 euros

Dans ce bel ouvrage illustré, les inventions qui ont fait progresser la science physique sont passées

en revue. Six périodes de progrès sont distinguées : Préhistoire et Antiquité, Moyen Âge et Renaissance, ^{xviii} et ^{xviii} siècles, ^{xix} siècle, ^{xx} siècle, ^{xxi} siècle. De nombreux concepts ou détails historiques remarquables, tels la notion de théorie, les « physiciens ambulants » du ^{xviii} siècle ou encore au ^{xxi} siècle la « Marche pour la science » (!), sont traités au sein de pages dédiées. Les belles illustrations ajoutent à la fascination pour l'histoire de cette science capitale.

LE GRAND LIVRE DU BIOMIMÉTISME

Veronika Kapsali

Dunod, 2017

240 pages, 39 euros

Saviez-vous que la tour Eiffel est biomimétique ? Que les premiers avions imitaient les oiseaux ?

Que les sous-marins ont une forme de mammifère marin ? Que la peau de requin a inspiré des revêtements pour avion ou combinaison de nage, qui ont déjà fait la preuve de leur efficacité ? Que les éponges ont inspiré... nos éponges de cuisine, mais aussi des filtres ? Les retombées de l'observation des formes biologiques et de leurs fonctions sont immenses. Elles sont ici mises en valeur par de nombreuses photographies commentées avec efficacité et intelligence par son auteur, un designer britannique. Des chapitres sur les formes, surfaces, structures, fabrications : il y en a pour tous les goûts.

DE 13 À 113 ANS

**LES MÉSAVENTURIERS
DE LA SCIENCE**

Jim Jourdane et 25 scientifiques

Eidola, 71 pages, 17 euros, 2017



Non, décidément, la vie des chercheurs de terrain n'est pas un long fleuve tranquille: avaler par mégarde un fossile; se retrouver collé à la glu ultraforte sur le dos d'un crocodile; voir exploser 65 fioles remplies de sang d'éléphant dans sa valise; se faire attaquer par une colonie de fourmis tueuses, ou mordre les fesses par un phoque; uriner au pied d'un arbre déjà marqué par un jaguar, et comprendre que le fauve va vous suivre constamment pendant 3 semaines... Telles sont les véritables mésaventures vécues par les jeunes scientifiques interrogés par le dessinateur Jim Jourdane.

Passionné de sciences, l'illustrateur angoumoisin raconte avec un indéniable talent les tribulations vécues par ces chercheurs aventuriers. Au passage, on apprend beaucoup sur la réalité des campagnes de terrain: comment marcher sur une coulée de lave fraîche, comment attacher une balise à une raie manta ou mesurer un arbre en forêt. Et pourquoi le cuisinier est si important lors des missions. Original et passionnant, ce livre, publié grâce à un financement participatif, en fera rire plus d'un au pied du sapin. ■

DÈS 7 ANS

LES ROBOTS

R. Gelin - Illust. : A. Cantou

Le Pommier, 63 pages,
8,90 euros, 2017



Antoine, 10 ans, est en fauteuil roulant depuis un accident de skate. Heureusement, il a de bons copains et, pour l'aider, toute une équipe de robots que lui a fabriqués son bricoleur de père. Mais voilà qu'en l'absence de ses parents, il va devoir piéger de mystérieux cambrioleurs... Une histoire haletante qui fait réfléchir: pourquoi un robot ne sait-il pas tout faire? Peut-il devenir méchant? Un récit ciselé par Rodolphe Gelin, chercheur en intelligence artificielle et créateur du robot humanoïde Roméo. ■

À PARTIR DE 12 ANS

**LA FOLLE HISTOIRE
DU SYSTÈME SOLAIRE**

Florence Porcel

Dunod, 192 pages, 14,90 euros, 2017



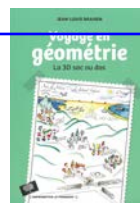
Quel adolescent d'aujourd'hui n'est pas adepte de Youtube? Pour lui faire découvrir l'astronomie et le spatial, vous pouvez lui conseiller de regarder la chaîne de Florence Porcel, infatigable et dynamique youtubeuse, spécialiste des sciences de l'Univers. Ou encore, pour les jours sans wifi, lui offrir son dernier livre adapté de sa série vidéo, *La Folle Histoire de l'Univers* et consacré au Système solaire. Sur un ton résolument décalé, la jeune auteure raconte avec beaucoup d'humour les résultats très sérieux des recherches menées par les scientifiques: pourquoi Mars est-elle si petite? Comment va mourir le Soleil? Mais aussi, quelle est la différence entre les plutoïdes et les plutinos? (Réponse page 24) ■

À PARTIR DE 14 ANS

VOYAGE EN GÉOMÉTRIE

Jean-Louis Braham

Le Pommier, 142 pages,
23 euros, 2017



« La Géométrie est l'un des quatre États de l'Union mathématique. (...) Pour visiter la Géométrie, le mieux est d'entrer par le poste-frontière de Cubville et de repartir par l'Océan: c'est l'itinéraire touristique le plus complet. » Ainsi commence ce joli livre d'introduction à la géométrie 3D, écrit par un architecte, Jean-Louis Braham, également enseignant et illustré par les dessins d'une de ses jeunes élèves. Un livre de mathématiques doté d'une dimension poétique savoureuse, qui réconciliera les matheux et les dessinateurs en herbe. ■

DÈS 10 ANS

BONJOUR LES TERRIENS!

M. ter Horst - Ill. : W. Panders

L'École des Loisirs, 116 pages,
16 euros, 2017



Quelle planète extraordinaire que la Terre! Pour tout savoir sur notre fabuleuse planète, sur sa naissance lorsqu'elle sentait l'œuf pourri, dans la fameuse zone Boucle d'or; sur la vitesse phénoménale à laquelle elle nous fait tourner autour du Soleil: 108 000 km/h; sur les secrets de ses entrailles... Plongez sans retenue dans ce livre très joliment illustré, qui explique avec pédagogie et humour beaucoup de notions complexes et passionnantes. ■

A PARTIR DE 9 ANS

UN LABO DANS TA MAISON

Collectif

Gallimard Jeunesse, 160 pages,
19,95 euros, 2017



Pour les longues soirées d'hiver et les week-ends pluvieux, rien de tel que de s'éloigner des écrans et de sortir un bon livre d'expériences amusantes comme celui-ci. Avec du matériel tout ce qu'il y a de plus ordinaire, les enfants peuvent fabriquer du slim bien gluant, un amplificateur de smartphone, une pile au citron, des sels de bain effervescents. Et surtout comprendre comment cela marche. On conseillera de terminer la séance par la réalisation d'une omelette norvégienne ou de marshmallows géants pour se remettre de ses émotions. ■

DÈS 6 ANS

LAÏKA DANS L'ESPACE

P. Baudry - Ill. : S. Aghassian
Hachette Enfants, 32 pages,
8,90 euros, 2017

Le spationaute français Patrick Baudry rend ici hommage à Laïka, petite chienne bâtarde de 6 kilos récupérée dans les rues de Moscou par l'équipe du programme spatial soviétique, et qui, après un difficile entraînement à Baïkonour, finit par décoller le 3 novembre 1957 dans *Spoutnik 2*, pour se satelliser autour de la Terre. L'histoire mouvementée de la véritable pionnière de la conquête spatiale, dans une version plutôt édulcorée, mais très finement illustrée par Stan Aghassian, déclenchera certainement quelques vocations. ■



DÈS 7 ANS

MON LIVRE NATURE TOUT-EN-UN

Collectif

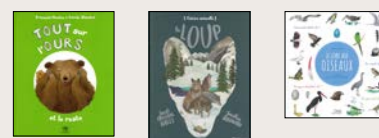
Glénat Jeunesse, 64 pages, 16,95 euros, 2017



Prendre le temps de s'arrêter, d'examiner attentivement une feuille d'arbre, de planter et regarder pousser des haricots, de comparer des papillons, de collectionner des plumes d'oiseaux... Voilà ce que propose ce beau livre consacré à la découverte de la nature et qui réussit à dépoussiérer les Sciences nat' avec des illustrations rétro! Il s'agit, à travers de magnifiques dessins, de jeux, de coloriages ou de petites expériences, d'apprendre en s'amusant le cycle de vie de la grenouille, les noms bizarres des champignons ou à reconnaître les empreintes laissées par les animaux. Pour ne plus confondre guêpe et abeille, grenouille et crapaud. ■



ET AUSSI



TOUT SUR L'OURS ET LE RESTE

François Moutou et Carole Xénard

Le Pommier, 61 pages, 18 euros, 2017

François Moutou, vétérinaire de son état et grand pédagogue, livre cette année un album fort facétieux sur l'ours. Ou plutôt sur tous les ours qui habitent notre planète. On apprend ainsi que les ours noirs sont parfois roux, cannelle, blancs... et même bleus. Que les ours bruns n'hibernent pas vraiment, que les ours polaires seraient capables de sentir un phoque à 32 kilomètres de distance ; que les ours lippus dévorent fourmis et termites grâce à leur très longue langue ; et que les pandas ont tous six doigts à la main. À découvrir avec ses parents dès 5 ans.

LE LOUP

S. Prasadham-Halls - Ill. : J. Woodward

Glénat Jeunesse, 48 pages, 16,95 euros, 2017

Qui a peur du grand méchant loup ? Peut-être pas les enfants qui auront découvert la vie de ce mythique prédateur dans ce livre. Oui, bien sûr, le loup est doté de 40 dents larges et tranchantes plantées sur des mâchoires trois fois plus puissantes que les nôtres, qui lui permettent de déchiqueter sa proie et de la dévorer sans en laisser le moindre petit morceau. Oui, il se déplace sans bruit, la nuit, faisant des pointes à 65 km/h. Mais ces carnivores ont peur des humains, chassent pour se nourrir, et les petits, nés aveugles et sourds, sont joueurs et affectueux... comme les petits humains. À partir de 7 ans.

LE LIVRE AUX OISEAUX

Nathalie Tordjman

Belin Jeunesse, 77 pages, 17,90 euros, 2017

De quelle couleur est l'œuf de la corneille noire ? Et celui de la mésange bleue ? Comment mangent les oiseaux alors qu'ils n'ont pas de dents ? Quelle est la différence entre le vol battu et le vol ondulé ? Quelle est la différence entre le nid de la cigogne et celui de l'hirondelle de fenêtre ? Le premier, en brindilles, peut peser jusqu'à 500 kilos. Le second est construit avec plus de 2 000 boulettes de boue ! Bref vous saurez tous les secrets des oiseaux après avoir lu cet ouvrage très complet. En prime, des astuces pour construire un nichoir, des jeux et une série de flashcodes pour écouter et apprendre à distinguer le chant d'une vingtaine de volatiles. À lire dès 8 ans.

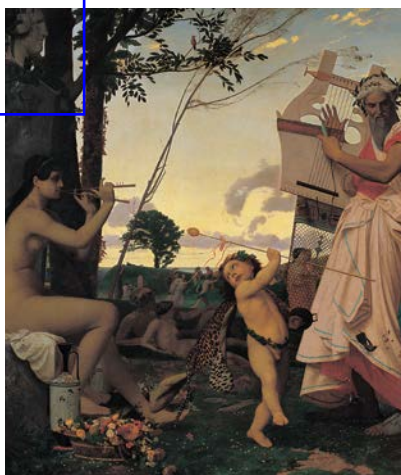
LENS

JUSQU'AU 15 JANVIER 2018

Musée du Louvre-Lens
www.louvre-lens.fr

Musiques! Échos de l'Antiquité

Avec plus de 370 œuvres présentées – des vestiges d'instruments, des fragments de notations musicales, de nombreuses représentations de musiciens –, cette exposition offre un vaste panorama de ce que représentait la musique dans l'Antiquité grecque, romaine, égyptienne et moyen-orientale. Couvrant une période qui s'étend de 2900 avant notre ère jusqu'à la fin du IV^e siècle, elle témoigne de l'importante place qu'avait la musique dans ces civilisations anciennes. De fait, cet art, outre son rôle de loisir, était adossé aux cérémonies, aux rituels religieux ou de magie, à la cour des rois et aux manifestations de pouvoir, aux champs de bataille... Mais à quoi ressemblaient les musiques antiques? Le visiteur pourra s'en faire une idée grâce à quelques reconstitutions sonores, bien qu'elles soient incertaines. ■



ET AUSSI

Jusqu'au 8 janvier 2018
Paris - Bibliothèque de l'institut Henri-Poincaré
www.ihp.fr

DÉMASQUER

Une quinzaine d'œuvres d'artistes contemporains d'Afrique de l'Ouest sont exposées, interrogeant leurs liens avec les sciences, notamment la géométrie, l'écologie, le monde numérique...

Mardi 12 décembre, 20 h 30
Espace des sciences, Rennes
www.espace-sciences.org

LES ENJEUX FUTURS DE LA VACCINATION

Une conférence d'Alain Fischer (médecin, chercheur et professeur au Collège de France) sur un important problème de santé publique et de société, à l'heure où réapparaissent des maladies que l'on croyait éradiquées et où l'utilité et la sécurité des vaccins sont contestées par certains.

{ Partagez les savoirs }

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE

UN CHERCHEUR, UN LIVRE

Lundi 4 décembre – 18h : *Météorites, entre ciel et terre*, Catalogue officiel, Éd. Muséum national d'Histoire naturelle, 96 p., 15 €
Et *Une belle Histoire des météorites*, Ed. Muséum national d'histoire naturelle/Flammarion, 128 p., 25 €
De et présenté par **Matthieu Gounelle**, astrophysicien, commissaire scientifique de l'exposition *Météorites, entre ciel et terre*. Suivi par une séance de dédicaces.

Lundi 18 décembre – 18h : *Jamais seul*, Ed. Actes Sud, 352p., 24,50 €. Avec **Marc-André Selosse**, botaniste, Muséum. Présentation par l'auteur suivie d'une séance de dédicaces, vente sur place.

CONFÉRENCES-DÉBATS

Lundi 11 décembre – 18h : *De rouille et d'eau : quelques singularités de notre planète au sein du système solaire*
Comment identifier une empreinte chimique unique à la Terre ? Que nous dit-elle sur les conditions de formation et d'évolution de notre planète ? Nous aborderons ces questions à travers les signatures terrestres du fer et de l'eau.
Mathieu Roskosz, cosmochimiste, Muséum

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire Paris 5^e



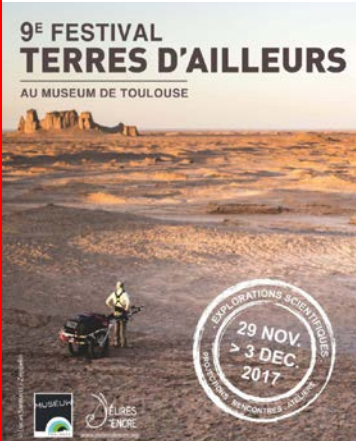
TOULOUSE

DU 29 NOVEMBRE AU 3 DÉCEMBRE 2017

Muséum de Toulouse
www.deliresdence.org

Festival Terres d'ailleurs

Organisé par l'association Délire d'encre et le Muséum de Toulouse, ce neuvième festival Terres d'ailleurs permet, comme les précédents, de rencontrer des explorateurs, des scientifiques, des réalisateurs ou des artistes partis voyager dans des territoires remarquables et méconnus. Avec, en filigrane, le souhait de faire comprendre au grand public la nécessité de préserver ces endroits.



9^E FESTIVAL TERRES D'AILLEURS
AU MUSÉUM DE TOULOUSE

La manifestation comprend aussi deux tables rondes, l'attribution de deux prix littéraires, une exposition, des ateliers artistiques (payants) et quelques projections-rencontres hors-les-murs, dans des communes de la région de Toulouse. ■

GENÈVE

JUSQU'AU 7 JANVIER 2018

Muséum de Genève
www.ville-ge.ch/mhng



Cristaux uniques

À l'occasion des 50 ans de la Société genevoise

de minéralogie, société savante qui compte aujourd'hui 120 membres, le Muséum d'histoire naturelle de Genève présente pour la première fois certaines pièces d'exception. Les visiteurs pourront notamment admirer un groupe de quartz fumés des Alpes suisses d'environ 200 kilogrammes, un cristal de quartz fumé de 90 kilogrammes, un groupe de fluorites d'un beau vert (photographie ci-dessus)... ■

ET AUSSI

Samedis 2, 9 et 16 décembre
Réserve naturelle du Bagnas, Agde (Hérault)
Tél. 04 67 01 60 23

L'ÉTANG DU BAGNAS

Une demi-journée de promenade sur les bords de l'étang du Bagnas, accompagnée d'un guide. Les participants pourront observer, avec des jumelles ou des longues-vues, la riche faune avienne qui passe l'hiver dans cette zone humide classée.

Mardi 5 décembre, 20 h 30
Espace Mendès-France, Poitiers
<https://emf.fr>

LES ÉNERGIES EN 2050

Pierre Papon, professeur honoraire à l'ESPCI et ancien directeur général du CNRS, présente dans cette conférence une prospective de l'énergie et les perspectives de la politique française en la matière.

Mardi 12 décembre, 17 h
Acad. des sciences, Paris
www.academie-sciences.fr

EXOPLANÈTES

Dans le cadre du cycle « Rencontre avec un académicien », un exposé de l'astronome Pierre Léna sur les planètes extrasolaires, suivi d'une discussion.

Dimanche 17 décembre
Seine-et-Marne
www.snpn.com

OISEAUX D'EAU À JABLINES

Une matinée d'observations sur la base de loisirs de Jablines, vaste étendue d'eau qui accueille en hiver de nombreux oiseaux. Le rendez-vous est fixé à Villepinte (93).

Jusqu'au 15 avril 2018
Musée de la nature du Valais, Sion (Suisse)
www.musees-valais.ch

NOCTUELLES SUISSES

Les noctuelles, riche famille de papillons de nuit (plus de 600 espèces en Suisse), font l'objet de cette exposition d'une partie de la collection scientifique du musée et des 62 planches originales de Hans-Peter Wymann, réalisées de 2000 à 2014 pour une monographie.

PARIS

JUSQU'AU 28 JANVIER 2018

Musée de l'Armée - Hôtel national des Invalides
www.musee-armee.fr

Dans la peau d'un soldat

La vie quotidienne du soldat, depuis l'Antiquité romaine jusqu'à nos jours, vue à travers ses vêtements et son équipement : ainsi peut-on résumer le propos de cette exposition originale. Les objets (vêtements, tentes, gamelles, outils, etc. – plus de 300 pièces sont présentées) témoignent des conditions de vie des soldats réguliers ou non, de leur confort ou inconfort, de la culture matérielle de leur époque, de leur univers mental, des relations qu'ils entretiennent avec leurs proches et avec l'arrière... Au-delà des inévitables différences de civilisation ou d'époque, le visiteur pourra



remarquer des constantes, comme le poids porté par le fantassin ou la composition de la ration alimentaire quotidienne. Une spectaculaire galerie chronologique composée d'une vingtaine de mannequins grandeur nature, des reportages photographiques et des dispositifs multimédias complètent cette exposition dont il ressort un côté humain et quasi ethnographique. ■



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LA MUTATION DU BILLET DE TRAIN

Un billet ne représente plus seulement la part des frais payés par le voyageur. Il est devenu pour les entreprises ferroviaires un outil permettant d'optimiser le trafic et l'affluence.



Aujourd'hui, un billet de train ou d'avion comporte de nombreuses informations sur le voyageur et son trajet.

Tous ceux qui prennent le train aujourd'hui et qui l'ont aussi fait en des temps reculés du xx^e siècle ont constaté une différence: nos billets de train sont de plus en plus souvent valables à un horaire particulier, alors que ceux du passé, comme les tickets de métro, étaient valables n'importe quand. Cette différence traduit une transformation de la fonction des billets de train, elle-même conséquence d'une transformation plus profonde du rôle des machines dans notre monde.

De la fin du xviii^e siècle au milieu du xx^e siècle, les machines ont de mieux en mieux maîtrisé les processus de transformation de l'énergie: les trains sont devenus plus rapides, plus fiables, plus économes, etc. Mais personne ne savait, avec précision, qui voyageait dans ces trains. Ainsi, beaucoup de trains étaient bondés, quand d'autres roulaient à moitié vides, car ceux qui décidaient des trajets et des horaires avaient une idée très vague du nombre de personnes qui voulaient voyager d'un endroit à un autre à un moment donné.

Depuis le milieu du xx^e siècle, les machines maîtrisent non seulement les processus de transformation de l'énergie, mais aussi ceux de transformation de l'information – pour reprendre les mots du philosophe Michel Serres: non seulement «le dur», mais aussi «le doux». De ce fait, il devient possible de tenter de

**Aux xix^e et xx^e siècles,
nous fabriquons
des trains pour
qu'ils roulent vides**

faire rouler des trains où chacun a une place et où chaque place est attribuée.

Mais, pour ce faire, il n'est pas suffisant que les machines maîtrisent les processus de transformation de l'information, il faut aussi que les voyageurs expriment leurs intentions, par exemple en achetant un billet valable dans un train unique.

C'est ainsi que la fonction des billets de train a changé: outre faire payer aux voyageurs leur part des frais, ils servent aussi à véhiculer de l'information, indiquant, à ceux qui organisent le trafic, qui veut voyager où et quand. Plus les voyageurs fournissent cette information tôt, mieux le trafic peut être organisé. C'est pourquoi les entreprises de chemin de fer accordent une réduction à ceux qui la fournissent le plus tôt. D'ailleurs, l'information voyage dans les deux sens, puisque les entreprises de chemin de fer nous indiquent également quels sont les trains bondés et les trains encore relativement vides, en nous incitant, par une modulation des prix, à prendre ceux-ci plutôt que ceux-là.

Aux xix^e et xx^e siècles, nous fabriquons des trains pour qu'ils roulent vides, des voitures pour les laisser au garage, des perceuses pour les utiliser moins de dix minutes par an. Parce que nous maîtrisons désormais les processus de transformation de l'information, nous pouvons optimiser l'utilisation de ces objets, et ainsi en fabriquer moins.

Nous pouvons nous demander jusqu'où cette transformation ira. Par exemple, nous réservons nos places à l'opéra un an à l'avance, mais nos places de cinéma quelques minutes avant la projection. De ce fait, les cinémas sont parfois bondés et d'autres fois vides. Nous pourrions imaginer déclarer notre intention de voir un film plus tôt, afin que les exploitants puissent mieux s'organiser. D'ailleurs, un film pourrait n'être tourné que si suffisamment de personnes ont déclaré leur intention d'aller le voir – ce que réalisent partiellement les plateformes de financement communautaires...

Cette volonté d'éviter le gaspillage va dans le bon sens, à moins que nous ne décidions que déclarer ainsi nos intentions en permanence est trop fastidieux, et que nous ne préférions finalement continuer à fabriquer des trains pour qu'ils roulent vides. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

DE L'EXAPTATION SOCIALE

Le motif qui orne le drapeau européen fait-il de ce dernier un symbole religieux ? Non, même si ce motif a peut-être des origines religieuses.



L'Apocalypse selon saint Jean évoque la vision d'une femme (Marie) portant une « couronne de douze étoiles sur sa tête ». Comme pour le drapeau de l'Union européenne ?

Le drapeau européen a été le sujet récemment en France d'une polémique: il serait un symbole religieux inspiré de la médaille pieuse mariale et devrait, pour cette raison, être retiré de l'enceinte de l'Assemblée nationale.

C'est en 1955 qu'un vote unanime de l'Assemblée parlementaire européenne fit du drapeau bleu azur orné d'étoiles le symbole de l'Europe. En réalité, plusieurs projets avaient été discutés, dont certains avaient été écartés précisément parce qu'ils comportaient un symbole religieux (une croix en l'occurrence). Mais il est bien vrai que l'artiste strasbourgeois Arsène Heitz, catholique convaincu, a déclaré quelques années après ce vote que, lors de la participation au projet, il s'était inspiré de la vision mariale de Jean dans l'Apocalypse.

Difficile d'établir *a posteriori* si c'est bien la compulsion religieuse qui a été la cause nécessaire et suffisante à l'adoption dudit drapeau, mais, compte tenu de la façon dont s'est déroulé le vote, cette interprétation est peu convaincante.

Quand bien même, l'inspiration religieuse suffirait-elle pour faire de ce drapeau un symbole religieux gênant ? Autrement dit, la fonction conçue à l'origine d'un phénomène social dans le passé doit-elle prévaloir quant à son interprétation présente ?

Quand on interprète des phénomènes, une erreur fréquente est d'inférer les raisons de leur apparition à partir de leur

La fonction initiale d'un phénomène n'indique pas forcément sa fonction actuelle

  ventuelle fonction présente. C'est un point que la biologie a bien vu en forgeant d'utiles concepts comme celui d'exaptation. Ce terme, introduit en 1982 par les paléontologistes américains Stephen Jay Gould et Elisabeth Vrba, désigne le fait que certains agencements initiaux simples

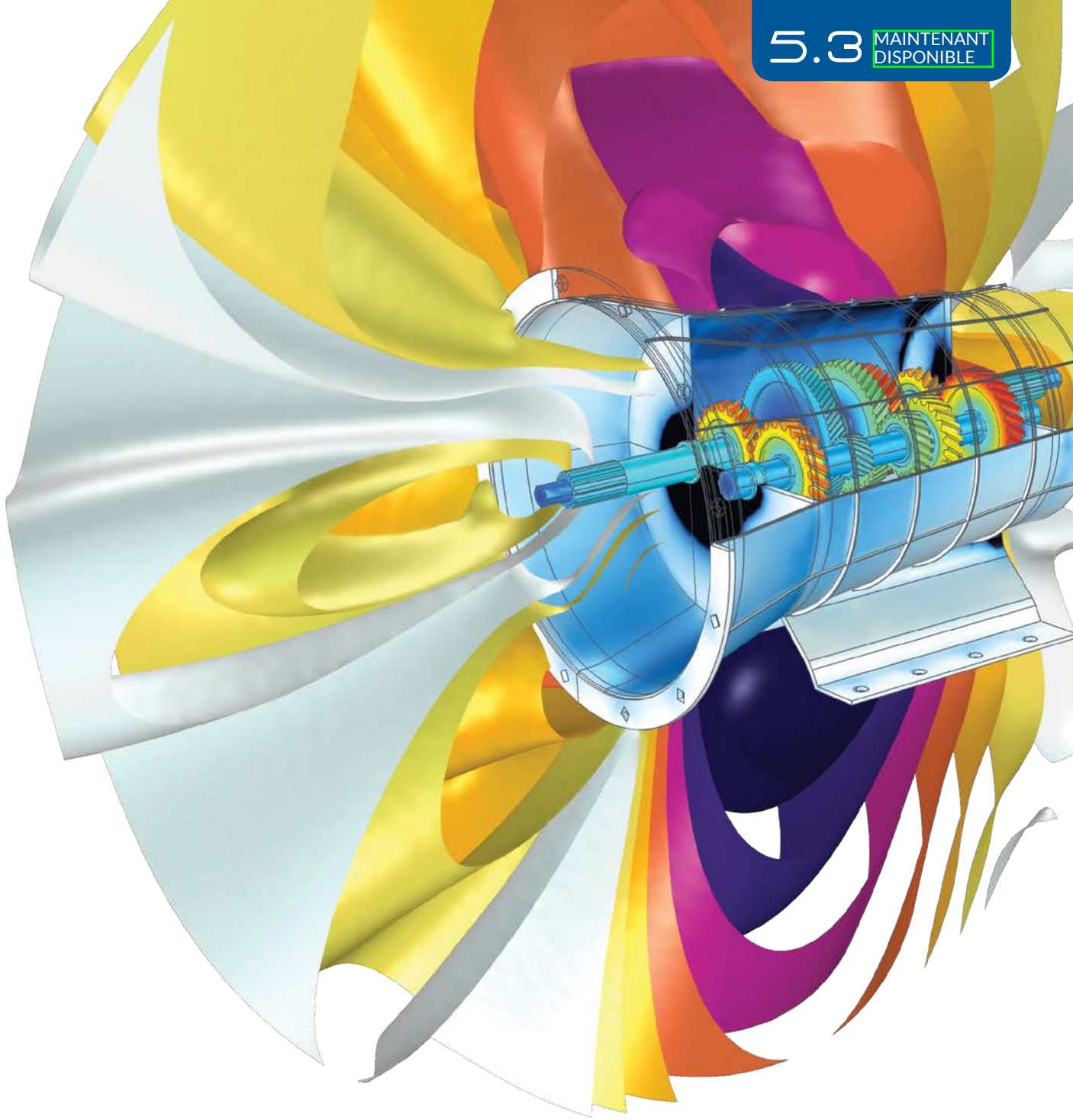
peuvent évoluer et aboutir à des structures remplissant une autre fonction. Par exemple, les plumes de certains tétrapodes bip  des assuraient initialement la thermorégulation de ces animaux et ont peu à peu favorisé l'adaptation au vol.

En d'autres termes, la fonction initiale d'un phénomène n'indique pas nécessairement, dans la nature, la fonction observée au présent. Il n'en va pas différemment dans la « culture », et cet effort qu'ont produit les biologistes doit pouvoir être réalisé aussi concernant l'interprétation de phénomènes sociaux, même lorsqu'ils revêtent des enjeux politiques et passionnels.

Certains sociologues ont intégré cette réalité des phénomènes sociaux depuis longtemps. Pour en prendre un exemple célèbre, Max Weber a montré dans *L'  thique protestante et l'esprit du capitalisme* que la doctrine de la prédestination (chacun d'entre nous est élu, ou non, par Dieu pour la vie éternelle) revêtait un caractère si douloureux qu'elle a inspiré des stratégies de réconfort (il est possible de trouver des signes d'élection, notamment l'enrichissement personnel par la réussite professionnelle), lesquelles ont elles-mêmes contribué à l'émergence du capitalisme, bien que ce système économique n'ait pas été l'objectif de ceux qui l'ont produit.

Autre exemple: initialement, Internet a en partie été conçu dans un cadre militaire, celui du département américain de la Défense. Serait-il raisonnable pour autant de faire de ce réseau une manifestation contemporaine d'un esprit guerrier ? Conviendrait-il que tous les pacifistes du monde en demandent l'arrêt ? Il existe en fait d'innombrables exemples qui doivent inciter l'esprit rationnel à ne pas juger selon l'éclairage du passé des expressions présentes d'un symbole ou d'une institution. Ce n'est pas qu'un éclairage historique ne soit jamais utile, loin s'en faut, mais il faut alors avoir à l'esprit l'existence du phénomène fréquent d'exaptation sociale. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.



LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

avec COMSOL Multiphysics®

Les outils de simulation numérique
viennent de franchir une étape majeure.

Dépassez les défis de la conception avec COMSOL Multiphysics®. Avec ses puissants outils de modélisation et de résolution, obtenez des résultats de simulation précis et complets.

Développez des applications personnalisées à l'aide de l'Application Builder, et déployez-les au sein de votre organisation et auprès de vos clients partout dans le monde, avec une installation locale de COMSOL Server™.

N'attendez plus. Bénéficiez de la puissance des simulations multiphysiques.

[comsol.fr/products](https://www.comsol.fr/products)

L'ESSENTIEL

> Deux éléments ont été indispensables à l'apparition de la vie : de l'énergie pour créer des molécules complexes et des conditions favorisant la rencontre de ces molécules.

> Un système de mares et de sources chaudes volcaniques terrestres fournit tous les ingrédients nécessaires, ainsi

que des cycles de mouillage et de séchage favorisant les interactions moléculaires et la sélection naturelle.

> Si la vie est née dans de telles mares et non au fond de l'océan, cela orientera les recherches de traces de vie dans le système solaire vers des lieux différents.

LES AUTEURS



MARTIN J. VAN KRANENDONK
directeur du Centre d'astrobiologie australien, à l'université de Nouvelle-Galles du Sud, à Sydney



DAVID DEAMER
biologiste à l'université de Californie, à Santa Cruz



TARA DJOKIC
doctorante en géologie à l'université de Nouvelle-Galles du Sud

Les volcans, berceau de la vie?



LA VIE N'A PEUT-ÊTRE PAS ÉMERGÉ AU FOND
DES OCÉANS, MAIS DANS DES SOURCES
CHAUDS À PROXIMITÉ DE VOLCANS.
TELLE EST L'HISTOIRE QUE RACONTENT
DES BULLES ANCIENNES RÉCEMMENT
TROUVÉES DANS DES ROCHES
AUSTRALIENNES.

La vie serait-elle apparue dans
un bassin d'eau chaude similaire
au Grand Prismatic Spring, dans le parc
de Yellowstone, aux États-Unis ?

Il fait nuit noire. Nous nous frayons un chemin à travers les épais sous-bois du nord-ouest de l'Australie, guidés par notre GPS. La lueur de l'écran, qui éclaire nos pas, est trop faible pour révéler les branches d'arbres jonchant le lit asséché du cours d'eau que nous suivons. Nous trébuchons sans cesse. Le plateau où nous avons garé notre véhicule paraît à des années-lumière et nous ne sommes pas certains que notre GPS aura assez de batterie pour le retour. Une infinité d'étoiles illuminent le ciel de cette nuit de juin 2014. Malheureusement, ce spectacle n'est d'aucun secours à des scientifiques cherchant leur chemin à travers le Pilbara, une région reculée du pays.

Nous sommes deux géologues – Tara Djokic et Martin Van Kranendonk – et, si nous nous trouvons à cet endroit en pleine nuit, c'est parce que nous avons passé la journée captivés par une découverte de Tara Djokic dans une formation de roches sédimentaires âgées de 3,48 milliards d'années nommée le Dresser. Certaines roches de cette formation, les geyserites, sont constituées de strates plissées orange et blanches. Un geyser volcanique les a créées à la surface de la Terre. Elles se sont révélées contenir des bulles dont les caractéristiques sont telles qu'elles se sont sans doute formées quand du gaz a été piégé dans un film collant, très probablement produit par une fine couche de microorganismes semblables à des bactéries. Ces roches et les indices de biofilm suggèrent une nouvelle réponse à l'une des plus grandes énigmes de notre planète: comment et où la vie est apparue. L'événement a pu se produire dans des sources chaudes et des mares volcaniques terrestres il y a environ 3,5 milliards d'années.

Ce tableau de l'origine de la vie est bien différent de celui dépeint par les scientifiques depuis 1977. Cette année-là, le sous-marin *Alvin* a découvert dans les profondeurs de l'océan Pacifique des sources hydrothermales d'où jaillissaient des minéraux contenant du fer, du soufre et des gaz comme le méthane et le sulfure d'hydrogène. Dans cet environnement extrême vivaient des bactéries primitives et de longs vers. Les biologistes ont depuis émis l'hypothèse que ces lieux, protégés des cataclysmes frappant la Terre il y a environ 4 milliards d'années, auraient fourni les ingrédients nécessaires à l'apparition de la vie: un abri, des nutriments et de l'énergie. Mais cette théorie a des faiblesses. En particulier, l'océan est vaste, et les molécules s'y éparpillent probablement trop vite pour interagir et former des membranes cellulaires et des métabolismes primitifs. Comme d'autres chercheurs, nous estimons que des mares terrestres qui, à répétition, s'assèchent et se remplissent à nouveau, seraient des endroits bien plus adaptés à l'apparition de la vie. Les mares cumulent plusieurs avantages: de la chaleur pour catalyser les réactions



chimiques, des périodes d'assèchement pendant lesquelles les polymères peuvent s'assembler à partir d'unités plus simples, des phases où l'eau, de retour, brasse les polymères, et de nouvelles périodes sèches qui les confinent dans de petites cavités où ils peuvent interagir, voire se concentrer dans des compartiments d'acides gras – les prototypes des membranes cellulaires.

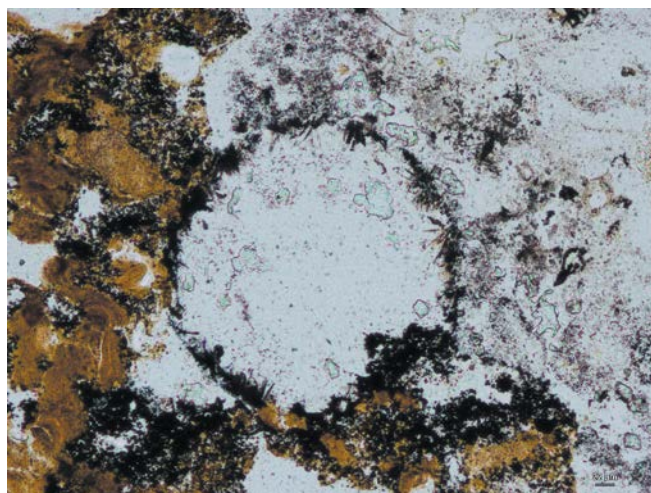
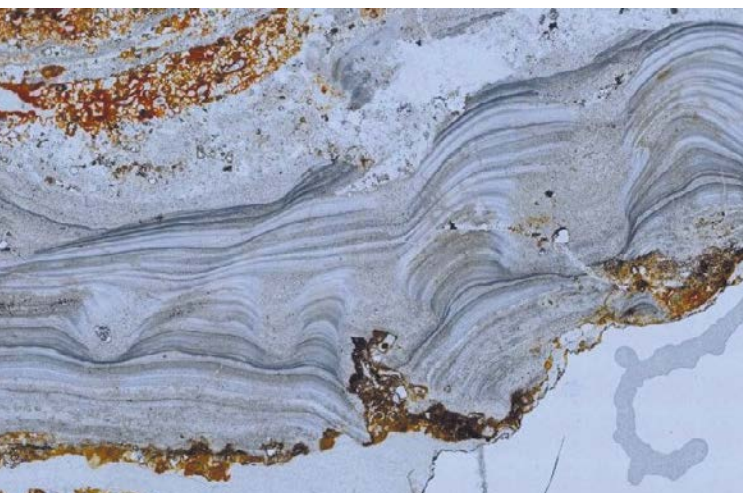
Grâce à sa découverte, Tara Djokic a apporté une preuve géologique majeure que le Dresser, devenu un environnement chaud et aride, a un jour été une terre semblable aux mares de vapeur et aux geysers en éruption du parc de Yellowstone, une zone géothermale active. Or partout dans le Dresser, on trouve des signes de vie fossilisée intimement liés à l'ancien système de sources chaudes. Ainsi, même si le Dresser n'est pas le lieu de la vie la plus primitive (des traces de vie plus anciennes de 500 millions d'années auraient été découvertes ailleurs), on sait désormais que les environnements hydrothermaux terrestres étaient présents très tôt dans l'histoire de la Terre. En 1871, Charles Darwin a suggéré que la vie microbienne était apparue dans quelque petit étang chaud. Aujourd'hui, nombre de scientifiques de différents domaines pensent qu'il a eu là une intuition importante. Et les implications de ces idées s'étendent bien au-delà de notre planète: elles orientent nos recherches de vie extraterrestre dans le Système solaire vers d'autres endroits et d'autres planètes que la théorie d'une apparition de la vie dans les fonds océaniques.

DES BULLES DANS DES ROCHES

Dans le Pilbara, en Australie, des roches orange nommées geyserites sont constituées de projections minérales issues de geysers, des sources chaudes jaillissant par intermittence (à gauche). Observées de plus près (au centre, un zoom de largeur 1 cm), ces roches portent une signature typique: une succession de bandes sombres, riches en titane, et claires, enrichies en potassium. Dans les régions marron, ferrugineuses, les auteurs ont observé des bulles minéralisées de quelques dizaines de micromètres (à droite). Préservées depuis 3,5 milliards d'années, elles se seraient formées dans des biofilms collants.

UNE MOUSSE BLANCHE DANS UNE MARE BOUILLONNANTE

Dix ans avant notre excursion nocturne au craton de Pilbara, un autre d'entre nous, David Deamer, avait montré que des sources volcaniques pouvaient favoriser l'assemblage de membranes, les frontières essentielles de toute vie cellulaire. Il avait mené un groupe de scientifiques à Mutnovsky, un volcan actif dans la péninsule de Kamchatka, à l'est de la Russie. Le



groupe explorait un analogue de site prébiotique: une région qui donne une idée de la Terre il y a quatre milliards d'années, avant que la vie n'émerge. David Deamer pensait qu'exposées aux cycles de mouillage et de séchage caractéristiques de sources chaudes terrestres, des molécules élémentaires s'assembleraient en polymères porteurs d'information comme les acides nucléiques, ingrédients indispensables à la réplication de toute vie primitive. D'autres polymères clés, les peptides, se formeraient de même à partir d'acides aminés. Enfin, des lipides se regrouperaient au sein de compartiments microscopiques qui protégeraient les acides nucléiques. La vie aurait ainsi tous les éléments pour se mettre en route. Or Mutnovsky regorge de sources chaudes et de geysers où tester ce scénario.

David Deamer avait apporté une bouteille de poudre blanche contenant les ingrédients probablement présents sur la Terre prébiotique: quatre acides aminés (les constituants des protéines), quatre bases azotées qui composent les acides nucléiques, ainsi que des phosphates, des glycérols et des lipides. Il versa ce mélange au centre d'une mare bouillonnante. Quelques minutes plus tard, une mousse blanche apparut sur les rebords de la mare. La mousse était composée d'innombrables petites vésicules, chacune contenant des constituants qui devaient être présents dans la soupe originelle.

Si les vésicules s'asséchaient, leurs contenus, déjà à proximité, s'assembleraient-ils en polymères? Pour le savoir, de retour au laboratoire, David Deamer et ses collègues ont mélangé des acides nucléiques simples (des nucléotides) avec des lipides. Ce cocktail a ensuite été soumis aux cycles de mouillage et de séchage, dans des conditions d'acidité et de haute température comparables à celles du bassin de Kamchatka. Résultat: de longs polymères de 10 à plus de 100 nucléotides sont apparus. Par la suite, leur analyse par diffraction aux rayons X a montré qu'ils ressemblaient à de l'acide ribonucléique,

ou ARN. En outre, ces polymères se trouvaient encapsulés au sein de compartiments lipidiques microscopiques, nommés protocellules. Si ces protocellules ne sont pas considérées comme des entités dotées de vie, elles sont en tout cas une étape cruciale vers le vivant.

Dans ses expériences, David Deamer n'a soumis son mélange qu'à quelques cycles de mouillage-séchage et a obtenu des molécules relativement simples. L'un de ses collègues de l'université de Californie à Santa Cruz, l'informaticien Bruce Damer, soupçonnait qu'un nombre plus important de cycles ajouterait une nouvelle donnée: la survie du plus apte. Chaque



La vie a pu apparaître dans des sources chaudes et des mares volcaniques terrestres



phase sèche causerait l'ouverture de la membrane des vésicules, provoquant le mélange des polymères et des nutriments. Ensuite, en présence d'eau, les membranes réencapsuleraient de nouvelles combinaisons de polymères. Les protocellules les plus complexes auraient les meilleures chances de survie: grâce à la plus grande diversité de leur mélange moléculaire, elles résisteraient mieux à des conditions variées. Elles transmettraient ainsi leurs combinaisons de polymères aux protocellules formées pendant le cycle suivant.



➤ En 2015, l'informaticien ajouta une troisième phase au cycle: une étape intermédiaire entre les phases mouillées et sèches. L'idée lui vint lors d'une sortie de terrain sur le Dresser à la recherche de stromatolithes, des strates fossilisées de tapis bactériens qui représentent l'une des plus anciennes formes de vie sur Terre. Bruce Damer avançait dans le désert quand son regard fut attiré par des tapis microbiens bruns asséchés, logés dans de petits creux de l'affleurement rocheux. Par curiosité, il y versa de l'eau: les tapis bactériens, devenant verts et semblables à du gel, reprirent vie. Il comprit que si les cycles de mouillage-séchage incluaient aussi une phase de gélification pendant laquelle les protocellules qui ont résisté aux phases précédentes restaient au contact les unes des autres au sein d'un gel de ce type, les polymères et les nutriments pourraient se mélanger et s'échanger à travers les barrières membranaires. Cette communauté de protocellules coopérantes aurait encore plus de chances de trouver les meilleures molécules pour leur survie.

DES BASSINS PROPICES À LA VIE

Les études que nous avons menées ces dernières années nous ont convaincus que les bulles et la composition minérale observées par Tara Djokic dans la formation de Dresser en font un endroit particulièrement propice à un cycle en trois étapes. Lorsque nous nous sommes aperçus que la surface du Dresser avait été recouverte de sources chaudes volcaniques terrestres, nous avons compris qu'elle avait aussi contenu nombre d'ingrédients et de structures requises pour que la vie émerge.

On y trouvait une source d'énergie sous la forme de fluides hydrothermaux circulants, riches en hydrogène et chauffés par le magma en dessous. Les roches contenaient des quantités importantes de bore, un ingrédient crucial de la synthèse du ribose, un sucre entrant dans la composition des acides nucléiques comme l'ARN. De plus, des minéraux de phosphate dissous, provenant des roches sous-jacentes, y rejoignaient la circulation des fluides hydrothermaux acides. Or le phosphate est un constituant non seulement des acides nucléiques, mais aussi de l'ATP, la molécule qui fournit de l'énergie aux cellules. De surcroît, les sources hydrothermales et les dépôts des lacs volcaniques évaporés du Dresser contiennent de fortes concentrations de zinc et de manganèse, des constituants de nombreuses enzymes. Enfin, le Dresser offrait aussi de l'argile, qui peut agir comme catalyseur dans la synthèse de molécules organiques complexes grâce aux couches chargées électriquement des surfaces minérales qu'il contient.

Le trait le plus excitant du Dresser est peut-être son incroyable diversité. Aujourd'hui, le Dresser est sec et rocheux, mais dans leur jeunesse, des zones de sources chaudes

LES PRÉMICES DE LA VIE

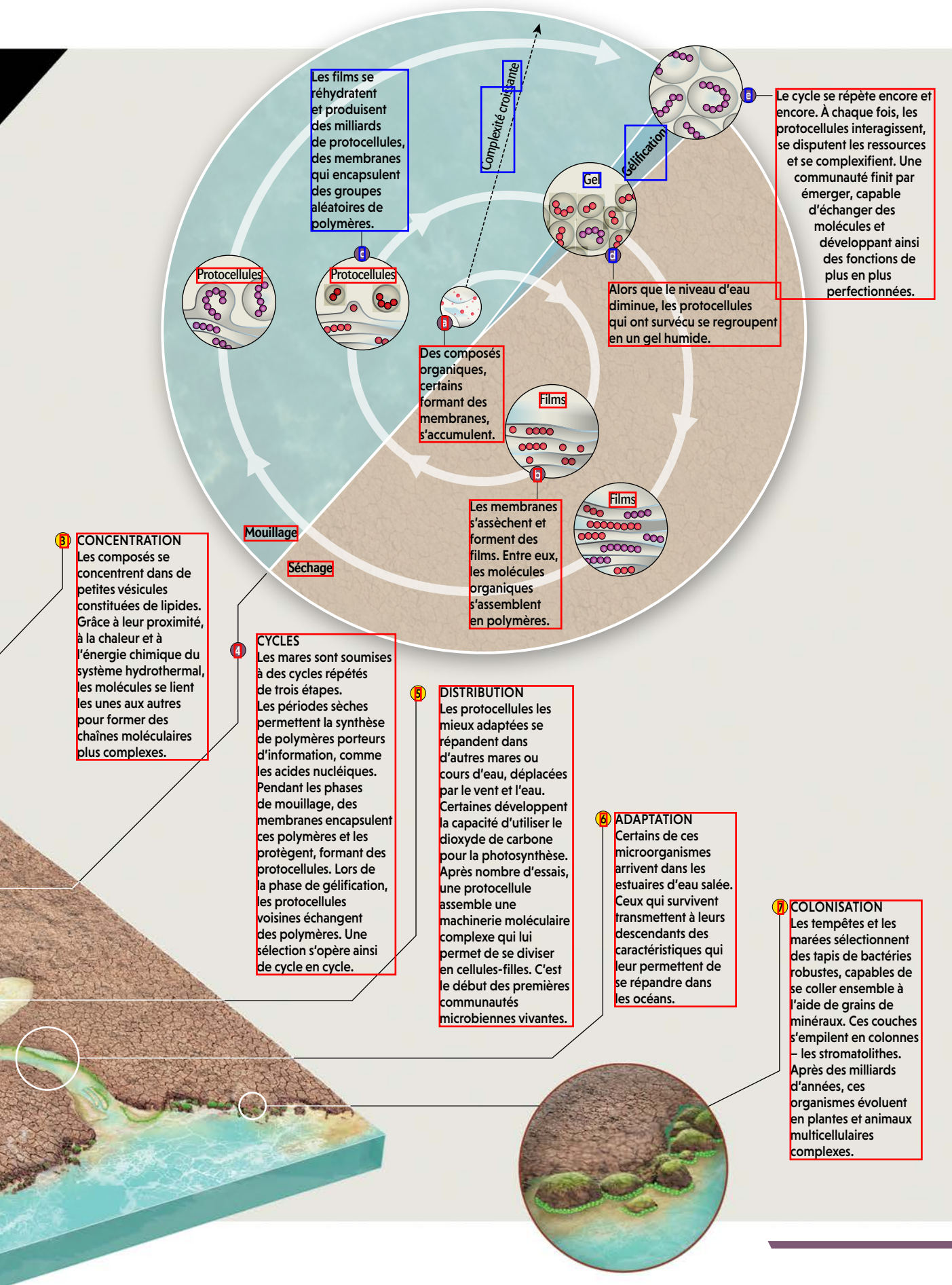
Des terres volcaniques émergées émaillées de sources chaudes, mares et geysers auraient déclenché les processus chimiques nécessaires à l'apparition de la vie sur Terre, selon un des scénarios proposés. Le procédé aurait compté sept étapes, de la synthèse chimique à la colonisation d'un nouveau territoire.

1 SYNTHÈSE
La plupart des blocs élémentaires de la vie, tels que les acides aminés, sont formés dans l'espace puis tombent sur Terre.

2 ACCUMULATION
Dans une région volcanique, les molécules organiques venant de l'espace s'accumulent dans des mares hydrothermales, de même que celles produites dans les sources chaudes alentour.



© Jose M. Que Mayo (Illustration) et Julien Christiansen (Géologie)



UN PAYSAGE À TRAVERS LES ÂGES

Quand j'ai mis les pieds pour la première fois sur les terres vieilles de 3,5 milliards d'années du Pilbara, qui abritent des traces des débuts de la vie, j'ai été extrêmement déçu. C'était en 1994. J'avais conduit avec entrain depuis la ville de Port Hedland sur la côte ouest, mais pendant les 150 premiers kilomètres, seule la vue de quelques arbres décharnés et brûlés par le soleil était venue tromper la monotonie des plaines poussiéreuses qui s'étendaient à perte de vue. Je me sentais désespéré, assommé par une chaleur intense, à laquelle s'ajoutaient les piquûres d'innombrables moustiques.

Mais tandis que nous filions sur l'autoroute en direction de Marble Bar, la ville la plus chaude du pays, de grandes collines commencèrent à pointer à l'horizon. Nous croisions désormais des criques sablonneuses et des rivières.

Alors que nous suivions une piste de terre, les paysages désertiques laissaient peu à peu place à des collines recouvertes d'une herbe à la fois stupéfiante et diabolique: le spinifex. Cette plante pousse en buissons de quelques dizaines de centimètres à un mètre de diamètre, dont les brins s'effilent en aiguilles tranchantes constituées presque exclusivement de silice pure. Ces terribles aiguilles s'insinuent partout. Mon directeur enfila des guêtres, mais il ne m'avait pas averti du danger. Sans équipement approprié, je me suis transformé en porc-épic en quelques minutes, la peau constellée de bouts d'aiguilles qui y restèrent pendant des mois.

Mais je n'ai pas regretté le déplacement. Je marchais là sur des roches parmi les plus anciennes et les mieux



Le Pilbara, en Australie, aujourd'hui une terre sèche parsemée de spinifex, a hébergé à une lointaine époque des sources chaudes et des geysers.

préservées sur Terre, contenant des traces de vie remontant presque aux débuts de notre planète. Alors que je regardais des structures ridées qui reposaient sous d'anciens sédiments, j'ai pris conscience que je contemplais les restes de nos plus lointains ancêtres: les précurseurs de toute vie complexe sur Terre.

J'ai pris conscience que je contemplais les restes de nos plus lointains ancêtres

Le Pilbara a beaucoup changé depuis sa formation il y a 3,5 milliards d'années. À cette époque, j'aurais eu sous les yeux une terre volcanique noire, dépourvue de toute végétation. Au-delà des collines, j'aurais peut-être entrevu une mer verte, riche en fer, sous un ciel orangé chargé en dioxyde de carbone et dénué d'oxygène. À proximité, j'aurais traversé des champs de sources chaudes, premières taches colorées sur le sol sombre. Des traînées blanches, jaunes et rouges auraient témoigné de la présence de soufre, d'argile et de fer au milieu des mares de boue bouillonnante et des jets des geysers. Et dans certaines mares, peut-être aurais-je

aperçu des touches de beige, de rouge et de violet: des colonies de microbes adaptés à la chaleur et à la chimie locales. Voire quelques pointes de vert, provenant d'organismes photosynthétiques primitifs.

Si une machine à voyager dans le temps pouvait me transporter un milliard d'années plus tard, je verrais le Pilbara disparaître sous des coulées de lave et de sédiments volcaniques; j'assisterais au mouvement des masses continentales à la surface du globe, puis à leur collision, entraînant la formation des chaînes de montagnes.

Il y a environ 2,5 milliards d'années, j'observerais les océans s'emplir de vie, les mers peu profondes se garnir de stromatolithes, ces petits monticules édifiés couche après couche par des cyanobactéries. Le ciel deviendrait bleu à mesure que ces cyanobactéries photosynthétiques libéreraient de l'oxygène dans l'atmosphère en échange de dioxyde de carbone.

Près de deux milliards d'années plus tard, la planète fut entièrement recouverte d'un manteau de glace, effaçant presque toute forme de vie. Quand celui-ci fondit, la concentration d'oxygène dans l'atmosphère augmenta à nouveau. La vie put enfin s'épanouir. Les animaux et de nouveaux types de plantes ont lentement colonisé les continents. La Terre verdit pour de bon et une grande diversité d'organismes apparut dont, malheureusement pour moi, le spinifex.

M. V. K.

➤ géothermales comme celle-ci comportent des centaines de mares, chacune avec une acidité et une température légèrement différentes, et des compositions et concentrations variées en ions et autres substances chimiques dissoutes. En outre, la complexité chimique est riche dans des terrains comme celui-ci parce qu'ils contiennent trois interfaces très réactives: entre l'eau et la roche, entre la roche et l'air, et entre l'eau et l'air.

Mélangez le tout: les cycles de mouillage-séchage se produisant plusieurs fois par jour, les conditions chimiques variées des bassins, les interfaces hautement réactives, la capacité des mares à échanger des composants par le biais des geysers, et un réseau de fractures souterraines, interconnectées et remplies de liquide. Faites le calcul, et vous verrez qu'un terrain géothermal contenant une centaine de sources chaudes peut produire un million ou plus de nouvelles combinaisons de conditions chaque année! Ce nombre suggère que la vie a pu apparaître et commencer à évoluer en seulement 10 millions d'années et ce, dès l'installation d'une croûte stable émaillée de masses volcaniques terrestres au milieu des océans, il y a plus de quatre milliards d'années.

SUR TERRE OU DANS L'OcéAN?

Tous les scientifiques ne partagent pas notre conviction. L'hypothèse des sources hydrothermales sous-marines a toujours le vent en poupe. Au laboratoire Jet Propulsion de la Nasa, le biochimiste Michael Russell a ainsi développé un modèle alternatif élégant (mais pas encore prouvé) à partir de la découverte du sous-marin *Alvin*. Dans son modèle, des membranes minérales qui constituent de minuscules pores à l'intérieur des roches des cheminées séparent l'eau alcaline de l'eau plus acide. Cela produit un gradient d'acidité qui constitue une forme d'énergie exploitable: les bactéries actuelles l'utilisent pour produire l'ATP dont elles ont besoin. L'autre source d'énergie de ces lieux provient du mélange de gaz dissous tels que l'hydrogène et le dioxyde de carbone. Michael Russell et ses collègues ont émis l'hypothèse que lorsque l'hydrogène sortait de la cheminée hydrothermale et se mélangeait avec le dioxyde de carbone présent dans l'eau de mer ancestrale, un transfert d'électrons s'opérait de l'hydrogène vers le dioxyde de carbone, offrant de l'énergie pour synthétiser plus de composés organiques complexes. Dans ce modèle, les compartiments minéraux ressemblent aux cellules, et l'énergie issue du gradient d'acidité et de l'hydrogène évoluerait en un métabolisme primitif nécessaire aux toutes premières formes de vie.

Les implications de ces deux scénarios s'étendent au-delà des recherches des plus anciennes traces de vie sur Terre: le choix du modèle influe aussi sur la stratégie à adopter dans la quête de vie sur d'autres planètes et

leurs lunes. Si la théorie des sources hydrothermales sous-marines est correcte, les océans glacés d'Encelade, lune de Saturne, et d'Europe, lune de Jupiter, sont des cibles pertinentes. En revanche, si notre modèle est juste, il est peu probable que ces lieux hébergent la vie.

Qu'en est-il de Mars? Des traces témoignent de la présence sur cette planète de mers peu profondes dans un passé lointain, mais pas de l'existence d'un vaste océan ni de zones tectoniques comme celles qui ont créé des cheminées hydrothermales sous-marines sur Terre. Si la vie

Seulement dix millions d'années auraient suffi pour que la vie émerge et commence à évoluer

est apparue dans de telles cheminées, il est peu probable qu'elle ait émergé sur Mars. Mais si elle a débuté sur Terre dans des sources chaudes volcaniques, alors un phénomène similaire a aussi pu se produire sur la planète rouge. En effet, en 2008, le robot explorateur Spirit a découvert sur Mars, dans les collines Columbia, des dépôts de sources chaudes vieux de 3,65 milliards d'années.

L'origine de la vie est comme un puzzle comportant beaucoup de pièces, dont nous ignorons encore trop de choses pour placer chaque morceau au bon endroit. Concernant le Dresser, par exemple, nous ne savons pas ce qui augmente la concentration de certains éléments dans différentes mares ni comment les zones géothermales évoluent, ni même comment leurs différents composants interagissent pour synthétiser ou dégrader des molécules organiques. Des expériences plus sophistiquées de chimie prébiotique dans une série de petites mares chaudes, où l'on étudie comment les molécules organiques complexes se forment, interagissent et se combinent lorsqu'elles sont encapsulées au sein de membranes, nous en diront certainement plus. La route est encore longue, mais, que ce soit sur terre ou dans la mer, les lois de la chimie et de la physique livrent peu à peu des indices pour compléter le puzzle. Et c'est particulièrement grisant de voir ainsi le chemin se dessiner vers la solution. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Djokic et al., **Earliest signs of life on land preserved in ca. 3.5 Ga hot spring deposits**, *Nature Communications*, vol. 8, article n° 15263, 2017.

B. Damer, **A field trip to the archaean in search of Darwin's warm little pond**, *Life*, vol. 6(2), article n° 21, 2016.

D. W. Deamer et al., **Hydrothermal conditions and the origin of cellular life**, *Astrobiology*, vol. 15(12), pp. 1091-1095, 2015.

D. Deamer, **First life : Discovering the connections between stars, cells, and how life began**, University of California Press, 2011.

**FRANCES
WESTALL**

est exobiologiste au Centre de biophysique moléculaire, à Orléans, et membre de l'équipe scientifique de la mission européenne *ExoMars 2020*.



Mars, un autre laboratoire pour explorer les origines de la vie

OÙ ET QUAND LA VIE EST-ELLE APPARUE SUR TERRE ? DIFFÉRENTES HYPOTHÈSES SONT ENVISAGÉES. COMMENT INFLUENT-ELLES SUR LA PRÉPARATION DES DEUX MISSIONS QUI PARTIRONT EN 2020 À LA RECHERCHE DE TRACES DE VIE SUR MARS, L'EUROPÉENNE EXOMARS 2020 ET L'AMÉRICAINNE MARS 2020 ? LE POINT AVEC FRANCES WESTALL.

Pensez-vous que la vie a pu apparaître dans des sources chaudes terrestres, comme le suggèrent David Deamer et ses collègues (voir l'article page 28)?

Le travail en laboratoire de David Deamer et ses collègues est intéressant: dans les années 1990, ils ont fait subir à un mélange de nucléotides et de lipides des cycles de sécheresse et d'humidité, dans des conditions d'acidité et de température qui imitaient celles observées dans les sources terrestres actuelles, et ils ont obtenu des sortes de précurseurs de cellules: des molécules ressemblant à de l'ARN encapsulées dans des vésicules lipidiques.

Leurs protocoles sont assez plausibles. L'hypothèse de l'apparition de la vie dans des sources chaudes terrestres présente cependant plusieurs problèmes. D'une part, l'eau d'une source arrive à la surface de la Terre sous pression. Lorsqu'elle sort de terre, la pression chute, ce qui entraîne des recombinaisons moléculaires. Ainsi, en sortant de sa source sur la Terre primitive et en arrivant dans une atmosphère constituée essentiellement de CO_2 , l'eau chaude a dû se dissocier pour produire de l'eau oxygénée (H_2O_2), laquelle a sans doute oxydé toute matière organique.

D'autre part, les sources chaudes terrestres étaient très probablement des environnements instables et peu fréquents. Enfin, si jamais des protocellules sont apparues à la surface du peu de terres émergées qui existaient alors, comment ont-elles survécu, notamment, au rayonnement ultraviolet intense et aux impacts causés par le volcanisme proche, ou par des

météorites? Et comment sont-elles arrivées jusqu'à l'océan? Sans compter le flux rapide de l'eau à la sortie du geyser, qui risquait de les détruire... Ainsi, il se peut tout à fait qu'il y ait eu des processus prébiotiques dans ces environnements, mais la survie des molécules prébiotiques produites, voire des protocellules, y est peu probable.

Quelles sont les autres thèses envisagées?

Selon l'un des scénarios proposés, des radeaux de pierre ponce – une roche volcanique très poreuse – flottant à la surface de l'océan ont pu offrir des conditions propices à l'apparition de la vie: les pores auraient joué le rôle de miniréacteurs, favorisant la concentration de composants prébiotiques dans un environnement protégé de l'extérieur, à une température inférieure à 70 °C. Puis les protocellules éventuellement produites auraient aussi été protégées, tout en recevant continuellement des nutriments. Toutefois, des expériences en laboratoire ont montré que cette géométrie ne favorise pas la formation de ribose, un sucre clé dans la fabrication de l'ARN. De plus, la pierre ponce ne contient pas de carbone. Comment celui-ci, nécessaire à la vie, y est-il arrivé?

D'après un autre scénario, la vie serait née dans des bassins d'eau marine sur les flancs des volcans, semblables à ceux qui bordent des îles volcaniques comme La Réunion. Mais comme les sources terrestres, ces bassins n'offrent pas de protection contre les rayons ultraviolets ni contre les impacts liés aux éruptions volcaniques. De plus, l'acidité n'y favorise pas non plus la formation de ribose.

Les scénarios qui me paraissent les plus probables sont ceux qui font apparaître la vie dans des systèmes hydrothermaux sous-marins, qu'il s'agisse de minéraux poreux dans des sources hydrothermales sous-marines ou de sédiments marins poreux à proximité de flux hydrothermaux. La température, comprise entre 50 et 150 °C, et l'acidité y facilitent les interactions moléculaires. Leurs surfaces favorisent les interactions des molécules réactives qui les constituent avec la matière organique. L'environnement est protégé des ultraviolets et des impacts, et le flux des fluides hydrothermaux, assez important, diffuse les nutriments. Ce sont, enfin, des environnements très répandus...

Où en est-on de la compréhension des traces potentielles de vie vieilles de plus de 3,7 milliards d'années découvertes au Groenland en 1999?

Il existe peu de roches de la Terre primitive préservées à cause de la destruction de la croûte par la tectonique des plaques. Les roches de plus de 3,5 milliards d'années sont très métamorphisées

Après un voyage de neuf mois, la mission *ExoMars 2020* déposera un rover (ci-dessous) sur un site martien où des traces de vie ont pu être préservées. Ce dernier effectuera des prélèvements en profondeur et les analysera à la recherche de telles traces.



elles ont subi beaucoup de transformations. Aussi, même s'il y a eu de la vie sur ces roches, ses traces sont très altérées.

C'est pourquoi Minik Rosing, du Muséum géologique de Copenhague, et ses collègues ont recherché, en 1999, des indices indirects de la présence de vie, tels qu'une signature isotopique particulière du carbone, dans des roches de plus de 3,7 milliards d'années. Ils ont ainsi repéré, dans des roches sédimentaires et minérales de la formation d'Isua, dans l'Ouest du Groenland, une abondance de l'isotope carbone 13 compatible avec un métabolisme biologique. L'analyse des isotopes de plomb de ces roches leur a alors indiqué que l'uranium avait été plus abondant que le thorium dans ces roches, avant que l'un et l'autre ne se désintègrent en un isotope (différent) de plomb.

Pour Minik Rosing et ses collègues, l'abondance de l'uranium suggère que cet élément a été séparé chimiquement du thorium via une réaction d'oxydation, c'est-à-dire en présence d'oxygène. L'oxygène aurait été apporté par une forme de photosynthèse produisant de l'oxygène à partir de la lumière. C'est possible, mais peu probable. De plus, il reste un doute dû au fait que l'on ne sait pas quel effet l'altération métamorphique a eu sur les molécules étudiées, notamment sur la signature isotopique...

En 2016, Allen Nutman, de l'université de Wollongong, en Australie, et ses collègues ont découvert dans la même formation des structures de 3,7 milliards d'années ressemblant aux stromatolithes de Pilbara, en Australie. Ils y voient, comme à Pilbara, des traces de vie ancienne, mais on ne peut exclure qu'il s'agisse de strates rocheuses plissées par la pression. Si leur hypothèse se confirme, elle renforcerait aussi celle de Minik Rosing.

Une équipe japonaise vient de publier la découverte d'une trace de vie remontant à 3,95 milliards d'années au Canada. Qu'apporte cette découverte au débat sur le lieu où la vie a pu émerger ?

Takayuki Tashiro, de l'université de Tokyo, et ses collègues ont analysé la composition isotopique de graphite trouvé dans des roches métasédimentaires (des dépôts sédimentaires qui se sont solidifiés et ont subi des transformations métamorphiques) vieilles de 3,95 milliards d'années. Comme l'équipe de Minik Rosing, ils ont détecté une teneur en carbone 13 qui suggère que le matériau a été produit par des microorganismes. Avant toute interprétation ou conjecture, il faut déjà confirmer l'âge de ces roches. Par ailleurs, là aussi, on ignore quel a été l'effet de la transformation métamorphique sur la composition isotopique...

Un retour d'échantillons martiens est envisagé, mais ne sera pas possible avant 2030

Où cherche-t-on les plus anciennes traces de vie aujourd'hui ?

Les plus anciennes traces de vie bien préservées se trouvent dans des roches de l'Archéen inférieur (il y a environ 3,5-3,3 milliards d'années), surtout en Afrique du Sud, où les mieux préservées sont à Barberton, et en Australie, dans le Pilbara. Ces roches sont étudiées par des méthodes diverses et de plus en plus pointues. Il s'agit aussi de chercher de nouveaux types de biosignatures qui permettraient de détecter des traces très subtiles, comme celles qu'auraient pu laisser des bactéries chimiotrophes.

Quelles sont les implications de ces recherches pour les missions d'exobiologie ?

Tous les travaux montrent la difficulté de déterminer les biosignatures et d'être sûr que les phénomènes dégagés sont vraiment issus de la vie. Cela signifie qu'il sera difficile pour des missions *in situ* sur Mars, comme *ExoMars*, d'être sûres d'avoir trouvé des traces de vie. Néanmoins, si *ExoMars* arrive à identifier de la matière organique martienne, et si cette matière est bien d'origine biologique et est préservée, il est possible que l'on soit capable d'y détecter des traces chimiques de la vie, comme la structure des molécules et leur chiralité. La matière organique préservée dans le sous-sol de Mars devrait être mieux conservée que sur Terre, car la gravité de Mars est beaucoup moins importante, et donc les effets du métamorphisme aussi. Mars est de fait un autre laboratoire très prometteur pour explorer les origines de la vie. Mais si *ExoMars* trouve un indice, il faudra alors rapporter le matériel sur Terre pour des analyses plus approfondies.

Un retour d'échantillons sur Terre est-il réellement envisagé ?

Oui, mais ce ne sera sans doute pas possible avant les années 2030...

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

F. Westall et al., **A hydrothermal-sedimentary context for the origin of life**, *Astrobiology*, sous presse.

J. L. Vago et al., **Habability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars rover**, *Astrobiology*, vol. 17, pp. 471-510, 2017.

T. Tashiro et al., **Early trace of life from 3,95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada**, *Nature*, vol. 549, pp. 516-518, 2017.

A. P. Nutman et al., **Rapid emergence of life shown by discovery of 3,7-million-year-old microbial structures**, *Nature*, vol. 537, pp. 535-538, 2016.

M. Rosing et R. Frei, **U-rich archaean sea-floor sediments from Greenland – indications of >3 700 Ma oxygenic photosynthesis**, *Earth and Planet. Sci. Lett.*, vol. 217, pp. 237-244, 2004.

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY JACQUES CHIRAC

En librairie
le 6 décembre
2017

LA REVUE GRADHIVA★



En croire ses sens

L'intérêt croissant des anthropologues pour les cultures matérielles a fourni ces dernières années un nouveau cadre méthodologique et théorique à l'étude des religions, montrant que celles-ci ne relèvent pas uniquement du domaine de la pensée ou de la foi.

Elles sont le produit de gestes ordinaires et répétitifs, de contraintes relationnelles, économiques et spatiales, de déterminismes techniques et de potentialités médiatiques. Les récents travaux sur la fabrication d'objets culturels, l'action des humains et non-humains sur les espaces liturgiques, l'exécution de gestes rituels ou encore l'éducation corporelle des pratiquants, plaident pour une approche pragmatique du fait religieux. Dans la continuité de cette démarche, ce numéro porte l'attention sur le faire plus que sur le croire et développe une réflexion sur les dimensions matérielles et sensorielles de l'expérience religieuse.

Comment la sensorialité structure-t-elle l'expérience, l'imagination et la praxis ?

À partir d'ethnographies détaillées qui font dialoguer les mondes afro-cubains, chrétiens et musulmans, il explore la manière dont la religiosité s'expérimente en marchant, touchant, récitant, lisant, entendant ou voyant. Quels types de connaissances émergent-ils des divers modes de contact avec la matière ? En quoi les qualités esthétiques conduisent-elles à la formation, la transmission et l'incorporation de savoirs spécifiques ?

L'ESSENTIEL

> Les voyages dans l'espace ont toujours été dangereux, mais de nouveaux résultats montrent que les rayons cosmiques sont encore plus nocifs pour le cerveau qu'on ne le pensait.

> Pour simuler les effets des rayons cosmiques sur les astronautes, des chercheurs ont exposé des souris à un flux de particules chargées. Ils ont

observé à la fois des altérations comportementales et des dommages neuronaux.

> Des blindages renforcés pour les vaisseaux, des combinaisons spatiales plus performantes et des médicaments pour protéger le cerveau seront nécessaires pour permettre aux humains de séjourner de longues durées dans l'espace.

L'AUTEUR



CHARLES LIMOLI
neuroscientifique et
radiobiologiste à la faculté
de médecine de l'université
de Californie à Irvine,
aux États-Unis

Le cerveau, interdit de voyage spatial

DES EXPÉRIENCES SUR DES SOURIS MONTRENT QUE LE RAYONNEMENT COSMIQUE DÉTRUIT DES CONNEXIONS NEURONALES ET DÉGRADE LES PERFORMANCES COGNITIVES. UN OBSTACLE PLUS SÉRIEUX QU'ON NE LE PENSAIT POUR LES VOYAGES INTERPLANÉTAIRES HABITÉS.

Depuis des millénaires, les hommes regardent le ciel et rêvent de voyager vers les étoiles. Maintenant que certains ont marché sur la Lune et vécu parfois plusieurs mois en orbite dans la Station spatiale internationale, il semble inévitable que nous tentions d'aller plus loin : Mars, le reste du Système solaire, voire au-delà. Ce rêve est partagé par de nombreuses cultures et occupe les agences spatiales de plusieurs nations.

Et pourtant, nous savons que l'espace est un milieu hostile. Chaque fois que des astronautes quittent la Terre, ils sont confrontés à un froid extrême, à l'absence d'atmosphère, à la microgravité et à l'exposition au rayonnement cosmique. Ces dangers ont jusqu'à présent été considérés comme surmontables : essentiellement des problèmes que les ingénieurs font leur possible pour régler et des risques que les courageux voyageurs spatiaux acceptent de prendre. Mais plusieurs équipes, dont la mienne, ont montré récemment que les

radiations dans l'espace pourraient être plus nocives que nous ne le pensions, en particulier pour le cerveau humain, un organe fragile et néanmoins essentiel. Les chercheurs suspectaient depuis des décennies un tel impact, mais ce n'est que depuis peu que nous avons des indices concrets donnant toute la mesure des effets des rayons cosmiques sur le cerveau.

En soumettant des souris à un rayonnement comparable à celui auquel s'exposent les astronautes dans l'espace, mes collègues et moi avons observé des troubles cognitifs importants et durables, qui se retrouveraient probablement chez les humains et compromettraient potentiellement le succès des missions spatiales. Si les astronautes de la Station spatiale internationale, qui est en orbite relativement basse (à environ 400 kilomètres d'altitude), sont dans une large mesure protégés par le champ magnétique terrestre, le risque pour les voyageurs vers Mars et au-delà est autrement plus sérieux.

Notre capacité à réduire ces dangers pour les astronautes est pour l'instant limitée. En



► améliorant le blindage des vaisseaux spatiaux, nous pourrions arrêter une partie de ce rayonnement délétère, mais aucun matériau connu n'est à la fois assez léger pour être transporté en orbite et efficace pour protéger les astronautes. Et nous n'en sommes qu'aux premiers balbutiements dans le développement de médicaments susceptibles de combattre les effets du rayonnement à l'intérieur du corps. À moins que nous ne trouvions une solution qui fonctionne vraiment, le rêve humain de voyager dans le Système solaire et au-delà pourrait rester à jamais hors de portée.

UN BOMBARDEMENT COSMIQUE CONSTANT

Le rayonnement cosmique est pernicieux : nous ne pouvons ni le voir ni le sentir, et pourtant il emplit chaque centimètre cube de ce qui semble être de l'espace vide. Or il peut provoquer des dégâts importants dans les tissus biologiques. Le plus grand danger pour les astronautes est celui des rayons cosmiques d'origine galactique, principalement des noyaux atomiques ionisés (88% d'hydrogène, 9% d'hélium, des traces d'éléments plus lourds, mais aussi des photons) qui se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière. Ils sont probablement produits et accélérés dans les supernovæ, de violentes explosions d'étoiles en fin de vie.

À ces rayons cosmiques galactiques qui imprègnent le cosmos de façon quasi uniforme, il faut ajouter les particules du vent solaire et celles des éjections de masse coronale lors des éruptions solaires. Ces particules (également des ions en majorité) sont expulsées à des vitesses comprises entre 300 et 800 kilomètres par seconde pour le vent solaire, et jusqu'à 2500 kilomètres par seconde lors des éjections de masse coronale. Moins énergétiques que les rayons cosmiques galactiques, elles sont cependant plus nombreuses (voir la figure page ci-contre).

Qu'elles soient d'origine solaire ou galactique, ces particules ont assez d'énergie pour traverser la coque des vaisseaux spatiaux et le corps des astronautes. Sur Terre, le champ magnétique de la planète protège les organismes vivants en déviant la plupart de ces particules cosmiques, qui n'atteignent pas le sol. Il s'étend jusqu'à environ 60000 kilomètres d'altitude du côté du Soleil et s'étire bien plus loin du côté « nuit ». Ainsi, les voyages au-delà de cette magnétosphère (la Lune est par exemple située à près de 400000 kilomètres de la Terre) conduisent inévitablement à une exposition accrue aux rayons cosmiques et à leurs interactions avec les tissus humains.

Que se passe-t-il lorsque les ions du rayonnement cosmique traversent le corps humain ? Ils laissent derrière eux une partie de leur

énergie et ionisent des atomes des tissus biologiques, c'est-à-dire qu'ils leur arrachent des électrons. Ces atomes, initialement neutres, se transforment en ions chargés. Ces derniers se propagent à leur tour dans l'organisme, arrachant au passage d'autres électrons à d'autres atomes, ce qui a pour effet d'élargir encore le sillage destructeur. Et plus la particule initiale du rayon cosmique est un ion lourd, plus elle aura d'énergie et plus elle ionisera d'atomes.

L'arrachage des électrons des atomes entraîne la rupture de liaisons moléculaires. Des protéines, des lipides, des acides nucléiques et d'autres molécules vitales des cellules et des tissus du corps sont alors endommagés. Les atomes et les molécules privées de certains de leurs électrons deviennent des radicaux libres, des composants qui deviennent très réactifs et prompts à s'apparier avec des atomes ou des molécules voisines afin de récupérer des électrons et retrouver une configuration plus stable. Ce faisant, les radicaux libres transforment les molécules de l'organisme en nouveaux composés chimiques qui ne remplissent plus la fonction initiale. Quand des radicaux libres rencontrent de l'ADN, par exemple, ils peuvent casser son ossature de sucres et de phosphates, ou endommager les bases d'acides nucléiques.

L'exposition aux radiations est mesurée en termes de « dose absorbée », qui correspond à l'énergie déposée dans le corps (par unité de masse corporelle) par le rayonnement ionisant. Dans le système international, l'unité pour la dose absorbée est le gray (Gy) ; 1 gray correspond à l'absorption de un joule par kilogramme.

La dose absorbée n'est pas le seul critère important. Les scientifiques caractérisent aussi le rayonnement en fonction de la densité d'ionisation qu'il produit par unité de dose. On parle de transfert linéique d'énergie (TLE). Cette grandeur indique la quantité d'énergie transférée au corps au voisinage de la trajectoire (sous la forme d'électrons secondaires arrachés aux atomes) par unité de distance parcourue. Par conséquent, pour une dose donnée, un rayonnement de TLE élevé est plus dangereux que celui de TLE faible, parce qu'il provoque l'ionisation d'un plus grand nombre d'atomes. Mais surtout, à l'échelle moléculaire, les chercheurs observent que les ions lourds et énergétiques ayant un TLE élevé créent des zones de tailles nanométriques riches en radicaux libres où se concentrent les dommages. À l'inverse, les ions légers, mais aussi les photons (tels les rayons X et gamma), produisent peu des zones concentrées de radicaux libres. Dans les zones à forte concentration de radicaux libres, les dégâts sont plus importants et difficiles à réparer pour la cellule.

EN CHIFFRES

0,03 mGy

(1 mGy = 10^{-3} Gy)

Dose de rayons cosmiques absorbée au cours d'un vol de New York à Los Angeles

0,1 mGy

Dose absorbée pendant une radiographie de la poitrine

0,7 mGy

Dose absorbée pendant une mammographie

3-4 mGy

Exposition moyenne accumulée pendant une année due à toutes les sources naturelles (sol, rayons cosmiques, radon, etc.)

4 Gy

Dose pour laquelle on estime à 50 % les risques de décès

Ainsi, la partie du rayonnement spatial ayant un TLE élevé est bien plus dangereuse que les types de rayonnements ionisants classiques que l'on rencontre sur Terre. Les implications pour les voyages dans l'espace profond sont considérables, comme nous allons le voir.

REPRODUIRE LE RAYONNEMENT COSMIQUE SUR TERRE?

Il est difficile de produire sur Terre un rayonnement aux caractéristiques similaires à celles des rayons cosmiques, afin d'en étudier les effets sur l'organisme. Un des seuls endroits où il est possible de réaliser des expériences dans des conditions proches est le Laboratoire du rayonnement spatial, dans l'État de New York, une installation inaugurée en 2003, financée par la Nasa et gérée par le laboratoire national de Brookhaven, dont l'un des accélérateurs sert de source en ions énergétiques.

Avec mes collègues, nous avons étudié l'effet de ce rayonnement ionisant sur des souris. Les tests montrent de quelle façon des types particuliers de rayonnement cosmique, à diverses doses, affectent les tissus vivants. Récemment, nous avons exposé des souris à de faibles doses (0,05 à 0,30 Gy) de flux d'ions (oxygène et titane, par exemple). Nous avons ensuite évalué comment les radiations affectaient le comportement, la mémoire et les facultés de raisonnement des rongeurs. Pour ce faire, les souris effectuaient des tâches de type reconnaissance d'objets nouveaux (RON) et d'objets déplacés (OD). Dans un premier

temps, les animaux exploraient une boîte vide d'environ un mètre carré. Nous introduisions ensuite divers jouets dans la boîte et laissons les souris se familiariser avec eux. Plus tard (dans certains cas après quelques minutes seulement, et dans d'autres après plusieurs heures ou une journée entière), nous remplaçons ces jouets par de nouveaux objets (RON) ou nous les déplaçons dans la boîte (OD).

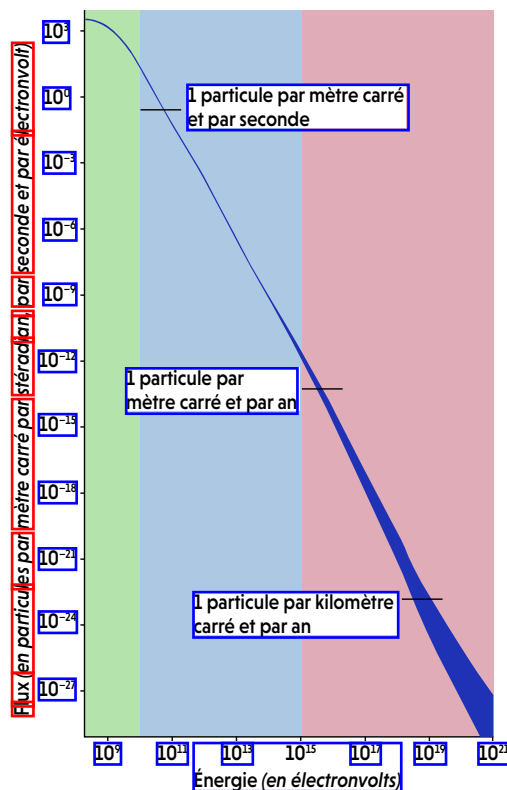
Un rongeur en bonne santé s'intéressera surtout à ce qui est nouveau dans son environnement. Il passera davantage de temps à explorer le nouveau jouet ou l'objet déplacé, plutôt que ceux qui n'ont pas changé. Une souris aux capacités diminuées passera moins de temps à fureter. Ces tests classiques sont des indicateurs fiables de différents types de fonctions de l'hippocampe (mémoire et apprentissage) et du cortex (raisonnement). Nous mesurons les performances d'un animal en comparant le temps passé sur le nouvel objet ou le nouvel emplacement et le temps total passé à explorer à la fois les situations nouvelles et les anciennes.

DES SOURIS MOINS CURIEUSES

Nos expériences avec les tâches RON et OD ont montré que l'irradiation diminue considérablement l'attrait d'une souris pour ce qui est nouveau. Six semaines après l'exposition au rayonnement, les performances des souris avaient chuté d'environ 90%, une variation qui était presque indépendante de la dose. De plus, des tests récents ont indiqué que ces effets perduraient encore 12, 24 et même 52 semaines après l'exposition. D'après ces résultats, l'exposition aux rayons cosmiques pourrait être problématique pour l'astronaute qui devra prendre des décisions ou résoudre des problèmes afin de mener à bien sa mission.

Mais que se passait-il dans le cerveau des souris irradiées? Mes collègues et moi avons étudié des coupes cérébrales de ces rongeurs et nous avons découvert que les ions énergétiques qui se propagent à travers le cerveau modifient le câblage neuronal. Pour voir spécifiquement le lien entre des dommages dans le cerveau et les modifications du comportement des souris, nous avons utilisé des souris qui avaient été génétiquement modifiées de telle sorte que leur cerveau présente des neurones fluorescents, visibles en microscopie à haute résolution. Nous avons recueilli une série d'images en fluorescence de diverses profondeurs dans des zones particulières du cerveau, que nous avons ensuite réunies et assemblées pour créer une représentation tridimensionnelle du cerveau.

Cette reconstruction a fait apparaître des modifications importantes dans les connexions des neurones. Le corps cellulaire d'un neurone comprend deux types d'extensions, l'axone qui transporte le signal du neurone jusqu'à une



Le flux de rayons cosmiques qui arrivent au voisinage de la Terre dépend de l'énergie de ses particules. Les moins énergétiques sont les plus nombreuses. Elles proviennent principalement du Soleil (zone verte) avec des flux supérieurs à une particule par mètre carré et par seconde. Les rayons cosmiques d'énergie intermédiaire (zone bleue) ont une origine galactique avec des flux supérieurs à une particule par mètre carré et par an. Les particules les plus énergétiques (zone rouge) sont extrêmement rares, de l'ordre d'une par kilomètre carré et par an. Elles sont d'origine extragalactique mais les mécanismes qui leur confèrent de telles énergies ne sont pas encore connus.

synapse (la zone de contact entre deux neurones) et les dendrites qui conduisent les signaux de la synapse vers le neurone. Lors de précédentes études au sein de mon laboratoire, nous avons observé que des rayons X et gamma peu ionisants (à faible TLE) entraînaient une réduction importante de la longueur, de la surface et des ramifications des dendrites pendant 10, voire 30 jours après l'exposition au rayonnement. Nous avons utilisé le terme de «réduction de la complexité dendritique» pour qualifier l'ensemble de ces dommages. Plus récemment, en 2015, nous avons mis en évidence que de très faibles doses de particules chargées provoquent des pertes significatives et persistantes de complexité dendritique.

De plus, nous avons observé ces changements dans une région spécifique du cerveau, le cortex préfrontal médian, une zone connue pour intervenir dans la mémoire, et dont nous soupçonnions qu'elle pourrait être endommagée au vu de nos tests du comportement des rongeurs. Et ces résultats n'excluent pas que d'autres régions du cerveau ou d'autres circuits neuronaux puissent être endommagés.

ÉLAGAGE DE L'ARBRE NEURONAL

En améliorant encore la résolution de nos images, nous avons recherché des signes d'altération sur d'autres structures dans le cerveau telles que les épines dendritiques, des excroissances minuscules (moins d'un micromètre, soit une fraction de l'épaisseur d'un cheveu humain) de la dendrite qui jouent un rôle important dans les fonctions d'apprentissage et de mémorisation. Si les dendrites sont les branches d'un arbre, les épines dendritiques en sont les feuilles. Les épines dendritiques contiennent les mécanismes synaptiques qui permettent aux dendrites de recevoir des signaux neuronaux.

Nos expériences avec des rayons X et d'autres avec des ions ont révélé une sensibilité marquée des épines dendritiques à l'irradiation. Et nous avons trouvé que la densité d'épines dendritiques diminuait nettement après l'exposition d'une souris, avec des effets visibles sur des périodes courtes (10 jours) ou longues (6 semaines). Ces effets persistants attestent de la capacité des ions des rayons cosmiques à provoquer des changements structuraux importants en réduisant le nombre de connexions synaptiques dans le cerveau, changements qui compromettent la capacité des neurones à assurer leur rôle.

Et effectivement, avec un suivi individuel des performances des souris, nous avons montré que lorsque la densité dendritique diminuait, les capacités cognitives en faisaient de même. Les animaux dont les performances étaient les plus mauvaises (c'est-à-dire dont la curiosité et

l'exploration de la nouveauté étaient réduites) présentaient aussi la plus faible densité d'épines dendritiques. Cela suggérerait que la perturbation de la cognition était au moins en partie liée à la réduction du nombre d'épines dendritiques.

Tous ces résultats semblent ainsi confirmer ce que la Nasa soupçonnait depuis des années: les rayons cosmiques peuvent nuire aux performances cognitives des astronautes. Jusqu'à présent, ces craintes se fondaient en grande partie sur la littérature clinique documentant toute une gamme d'effets cognitifs chez des patients ayant survécu à une radiothérapie crânienne dans le cadre du traitement d'un cancer. Mais par le passé, les chercheurs hésitaient à

Le rêve de voyager dans le Système solaire et au-delà pourrait rester à jamais hors de portée

extrapoler ces résultats aux astronautes parce qu'il s'agit d'individus exposés à des doses et des types de rayonnement différents.

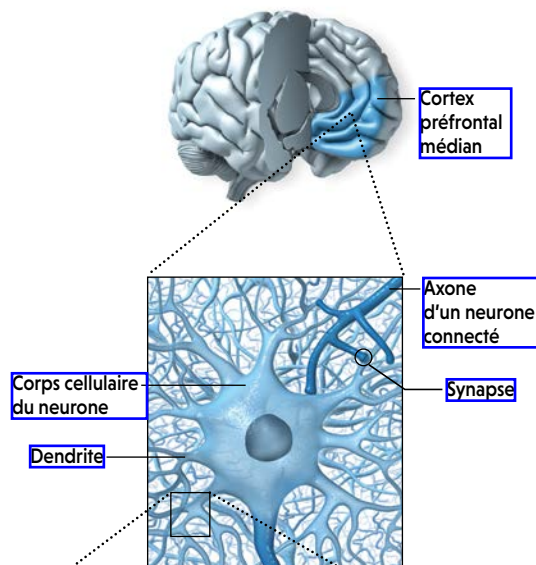
En clinique, une dose journalière typique (2 Gy) dépasse la plupart des estimations de la dose absorbée au cours d'une mission vers Mars (en comptant un an de voyage pour faire l'aller-retour et un an sur place). Les doses interplanétaires sont de l'ordre de 0,48 milligray par jour et la moitié seulement sur Mars (la masse de la planète bloque le rayonnement arrivant par en dessous). Par ailleurs, bien que les doses utilisées en clinique soient beaucoup plus élevées que dans l'espace, les rayons X et gamma utilisés pour traiter les tumeurs sont peu ionisants (TLE faible) alors que les particules chargées qui nous inquiètent dans l'espace ont un fort pouvoir ionisant (TLE élevé). Pour ces raisons, il est difficile d'extrapoler les conséquences pour les astronautes à partir des traitements de radiothérapie.

Cependant, pour être complet, quelques précautions sont à prendre dans l'interprétation de nos résultats. Nous avons utilisé des doses de rayonnement comparables à celles que recevraient des voyageurs spatiaux, mais nous n'avons pas pu administrer ces doses au même rythme que celui auquel les astronautes

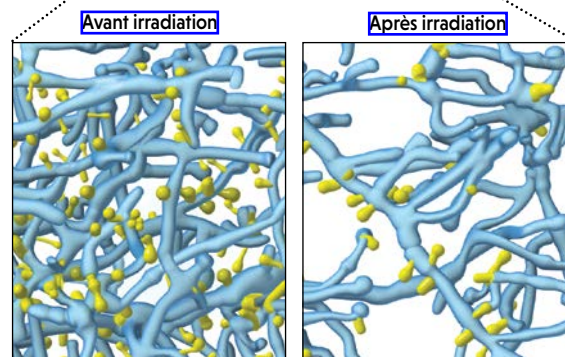
L'IMPACT DES RAYONS COSMIQUES SUR LE CERVEAU

Pour tenter d'évaluer les dommages causés par les rayons cosmiques au cerveau des astronautes, les chercheurs ont exposé des souris à un flux de particules chargées reproduisant au mieux celui qui se propage dans l'espace. Ils ont étudié à la fois la baisse des performances cognitives des rongeurs et les dommages physiques dans leur cerveau.

Le rayonnement simulant celui régnant dans l'espace endommage une région du cerveau des souris nommée cortex préfrontal médian, qui est associée à la mémoire. Dans cette région, le nombre et la taille de certaines excroissances des neurones ont diminué à la suite de l'irradiation.



Les dendrites reçoivent des signaux chimiques émis par d'autres neurones. Six semaines après l'exposition à une dose de rayonnement de 0,3 gray, les souris présentaient une réduction de 20 % à 40 % du nombre de leurs épines dendritiques (en jaune), petites excroissances de la branche principale de la dendrite qui jouent un rôle dans l'apprentissage et la mémorisation.



seraient soumis en conditions réelles. Dans l'espace, l'exposition des astronautes aux rayons cosmiques s'étale sur plusieurs mois ou plusieurs années. Parce que nous ne disposons que d'un accès limité à l'accélérateur, nous devons administrer la même dose en quelques minutes seulement.

Une question cruciale se pose donc: si la dose est administrée à un rythme plus lent, les cellules auraient-elles le temps de se réparer et de guérir? Il est peu probable que la différence de rythme d'exposition ait un effet marqué, parce que la dose totale est faible. En outre, les particules cosmiques les plus préoccupantes sont celles à TLE élevé, qui produisent des dommages cellulaires très localisés et dont il est difficile de se remettre, quelle que soit la rapidité d'administration. De plus, la plupart des régions du cerveau sont incapables de générer de nouveaux neurones facilement, ce qui entrave

encore davantage une éventuelle guérison. Et bien que nos découvertes concernent des rongeurs, et non les humains, nous n'avons aucune raison de penser qu'un neurone humain présenterait une réaction au rayonnement cosmique différente de celle des neurones de souris.

Pour envoyer des humains aux quatre coins du Système solaire, la liste des obstacles vient donc de s'allonger. Les astronautes auront besoin de fusées plus puissantes que celles disponibles aujourd'hui, et une fois arrivés à destination ils auront besoin d'habitats et de moyens pour exploiter les ressources sur place afin de produire de l'eau et des ergols. Nous devons maintenant, en plus, prendre en compte la nécessité de protéger les colons spatiaux des rayons cosmiques, et ce dernier point pourrait être l'obstacle le plus difficile à surmonter.

La première solution possible serait de construire des boucliers qui arrêteraient les

Rayons cosmiques avant qu'ils ne puissent faire des dégâts dans l'organisme. Ces blindages seraient placés soit sur le vaisseau et les habitats, soit dans les combinaisons spatiales et les vêtements. Pour le moment, la seule méthode que les scientifiques connaissent pour protéger des rayons cosmiques est d'utiliser des matériaux denses, tels que le plomb. Ils sont efficaces, mais l'idée n'est pas envisageable : envoyer de grandes quantités de plomb dans l'espace, du fait de son poids, coûterait excessivement cher. Des efforts sont en cours pour concevoir des matériaux de blindage innovants, légers et efficaces.

Une autre idée est de limiter le blindage à certaines zones stratégiques de la coque où les astronautes pourraient se réfugier en cas d'éruption solaire par exemple. Les ingénieurs cherchent aussi à concevoir des casques et des combinaisons spatiales qui maximiseraient la protection contre les rayons cosmiques pendant les sorties dans l'espace ou même les heures de sommeil. Mais il faudrait trouver un matériau plus protecteur que tous ceux existant aujourd'hui.

Plutôt que d'utiliser des blindages lourds, une idée à l'étude est de créer un champ magnétique qui engloberait le vaisseau spatial. Mais ce champ devra être très intense (de l'ordre de 20 teslas) et on ignore les effets à long terme d'un tel champ sur l'organisme.

Une autre stratégie repose sur des médicaments et aliments que les astronautes absorberaient régulièrement ou après une exposition aiguë aux rayons cosmiques. Des compléments à base d'antioxydants, par exemple, pourraient neutraliser les radicaux libres et limiter leur action dans l'organisme. Les chercheurs ont aussi fait des progrès dans la conception de substances chimiques pouvant consolider les circuits neuronaux et les aider à maintenir leur fonction quand des dommages se sont produits.

Mais toutes ces approches n'en sont qu'aux premiers stades de développement, et aucune n'a le potentiel d'offrir une protection parfaite. Le mieux que nous puissions espérer est de réduire, et non pas éliminer, les dommages. Nous devons également continuer à explorer les effets du rayonnement cosmique sur le cerveau, ainsi que sur le corps entier, afin d'élucider plus complètement les risques sur la santé à court et à long terme.

NOTRE AVENIR DANS L'ESPACE ?

Quand on pense aux effets d'un rayonnement ionisant, le premier risque qui vient à l'esprit est celui du développement de cancer. Ce danger est mieux connu que celui que nous avons étudié sur la réduction des performances cognitives et les dommages produits sur le cerveau. Cependant, ce risque pourrait être d'une certaine façon moins critique pour une mission

spatiale car la plupart des cancers radiogéniques mettent du temps à se développer. En revanche, nous avons montré que même de petites quantités de rayonnement cosmique entraînent rapidement chez la souris des dommages neuronaux et des déficiences cognitives. Et tout laisse à penser que les rayons cosmiques pourraient avoir le même effet sur les humains.

La persistance de ces altérations induites par le rayonnement est une autre source d'in-

Les performances cognitives des souris avaient chuté d'environ 90 %

quiétude. Les chercheurs n'ont aucun élément permettant de penser qu'une fois endommagées par l'exposition aux rayons cosmiques, la complexité dendritique et la densité d'épines pourraient se rétablir. Et même s'il est prématuré de qualifier ces dégâts de permanents, nous n'avons pas d'indications selon lesquelles les neurones peuvent guérir après ce type d'atteintes. Par conséquent, jusqu'à ce que les chercheurs trouvent des interventions spécifiques capables de promouvoir et accélérer la guérison de ces tissus cérébraux irradiés, nos meilleures options semblent être limitées à protéger nos circuits neuronaux existants.

L'exposition au rayonnement cosmique pourrait bien représenter l'un des plus grands obstacles pour un voyage vers Mars, et encore davantage pour les missions plus longues destinées à explorer des planètes les plus distantes. Bien que certains puissent trouver discutable l'interprétation de ces résultats, il paraît difficile d'éluder ces données et leurs implications potentielles sur l'exploration spatiale. Cela signifie-t-il que nous sommes à jamais liés à la Terre ? Pas forcément. Ces résultats représentent peut-être simplement un obstacle supplémentaire que les chercheurs doivent affronter et surmonter tandis que nous nous préparons à nous embarquer dans ce qui pourrait être le défi le plus redoutable de l'humanité, mais aussi peut-être, qui sait, sa plus grande réussite... ■

BIBLIOGRAPHIE

V. K. Parihar et al., **What happens to your brain on the way to Mars**, *Science Advances*, vol. 1(4), e1400256, 2015.

F. A. Cucinotta et al., **Space radiation risks to the central nervous system**, *Life Sciences in Space Research*, vol. 2, pp. 54-69, 2014.

N. Pattyn et P.-F. Migeotte, **Vivre dans l'espace**, *Pour la Science*, n° 422, décembre 2012.

Livre
conseillé par
POUR LA
SCIENCE

Le vivant, demain, à l'ère digitale

la singularité

DEPUIS LES DOMAINES DU DIGITAL ET DE LA BIOLOGIE MOLÉCULAIRE, ON NOUS

du vivant

ANNONCE QUE TOUS LES MÉCANISMES BIOLOGIQUES VONT ENFIN

miguel

ÊTRE RÉVÉLÉS, MODÉLISÉS, DÉPASSÉS.

benasayag

ON SE PASSERA DU MONDE RÉEL ET DU VIVANT LUI-MÊME



[MANIFESTE LE POMMIER !]

224 pages, 17 €

Le temps serait venu
de se passer
du monde réel et
du vivant lui-même,
désormais réductible
à ses composants,
à une mécanique.
Mais est-ce cela,
la vraie vie ?

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr


Éditions
Le Pommier

Göbekli Tepe est un complexe de sanctuaires construits pendant la Préhistoire, des siècles avant l'agriculture et l'élevage.



L'ESSENTIEL

> Il y a 11 000 ans, des chasseurs-cueilleurs ont érigé en Asie mineure des lieux de culte à moitié souterrains, qui semblent annoncer de grandes mutations sociales.

> Si nous ignorons l'essentiel des rituels qui y étaient pratiqués, quelques rares représentations suggèrent une possible forme de chamanisme.

> Beaucoup de ces sanctuaires ont fini par être volontairement détruits et comblés, pendant que d'autres de moindre dimension étaient construits ailleurs.

> Les archéologues voient dans ces constructions monumentales un marqueur du passage vers le nouveau mode de vie qu'impliquait l'économie paysanne.

L'AUTEURE



MARION BENZ
archéologue, spécialiste
des mutations sociales
au Proche-Orient
préhistorique

Les premiers sanctuaires des chasseurs-cueilleurs

IL Y A 11 000 ANS, SUR UNE COLLINE TURQUE SURPLOMBANT LA SYRIE, DES MÉGALITHES DE PLUSIEURS MÈTRES ENCASTRÉS DANS DES MURS FORMAIENT DE MONUMENTALES INSTALLATIONS. LES SANCTUAIRES AURAIENT-ILS PRÉCÉDÉ L'AGRICULTURE ET L'ÉLEVAGE ?

Göbekli Tepe, c'est-à-dire, en turc, la « Colline au nombril », porte-t-elle en son ventre les plus anciens sanctuaires de l'humanité ?

Oui, pour Oliver Dietrich, qui se souvient encore du jour où il a pour la première fois été confronté à ses mégalithes : « Je me sentais écrasé et ne pouvais croire que ce que je voyais avait 11 000 ans ! » Cet archéologue berlinois fouille depuis dix ans ce complexe de sanctuaires découvert en 1995 au sein d'un tell, c'est-à-dire de l'une de ces buttes artificielles constituées par des occupations humaines successives dont regorgent le Levant et la Mésopotamie. Déjà impressionnant en soi, ce tell l'est aussi par son implantation : il se trouve à 800 mètres d'altitude au nord du plateau de Harran, dans le sud-est de la Turquie, de sorte que par beau temps, depuis Göbekli Tepe, on aperçoit la Syrie.

Les archéologues turcs et allemands fouillent le complexe de sanctuaires ensemble. Lee Clare, de l'Institut archéologique allemand, coordonne le travail. Il a succédé à Klaus Schmidt (1953-2014), qui initia les fouilles en 1995. Leurs équipes ont déjà mis au jour six installations culturelles monumentales, et les images satellitaires en révèlent quatorze de plus. Toutes partagent les mêmes caractéristiques principales : elles consistent en espaces ovales d'une douzaine de mètres de long creusés dans le substrat rocheux et bordés de murs de pierres sèches ; dans chacun d'eux, une douzaine de mégalithes en forme de T d'environ 2 mètres de haut sont à moitié encastrés dans les murs ; deux autres mégalithes en T, qui peuvent excéder 5 mètres de haut, se dressent au milieu de l'ovale.

Le fait que ces installations étonnantes datent de 11 000 ans stupéfie les archéologues parce que cela les place plusieurs siècles avant

➤ L'agriculture et l'élevage, qui ont commencé au cours de la première moitié du IX^e siècle avant notre ère au Proche-Orient. De fait, à Göbekli Tepe, les archéologues n'ont mis au jour aucun os d'animal domestique parmi ceux qu'ils ont découverts; en revanche, les restes de gazelles, d'aurochs, d'ânes sauvages, de cervidés, de sangliers et de plantes sauvages abondent. Le fait que les bâtisseurs des sanctuaires de la colline étaient des chasseurs-cueilleurs est donc une évidence.

Cela est d'autant plus remarquable que Göbekli Tepe se trouve sur la bordure nord du Croissant fertile, cet arc géographique allant de l'Égypte à la Mésopotamie en passant par le Levant et l'Anatolie du Sud, où les premières domestications de plantes et d'animaux se sont produites. Plus fort: jamais de telles installations cultuelles n'auraient pu être érigées sans la participation durable de groupes importants de travailleurs bien coordonnés. Cela implique l'existence d'une structure sociale rendant de telles entreprises collectives possibles. Ainsi, tant l'ampleur architecturale du complexe de sanctuaires de Göbekli Tepe que la façon dont il a été réalisé illustrent l'amplitude des transformations des sociétés de chasseurs-cueilleurs qui furent à l'origine de l'avènement du paysan.

DES MOIS POUR PRODUIRE UN SEUL MÉGALITHE

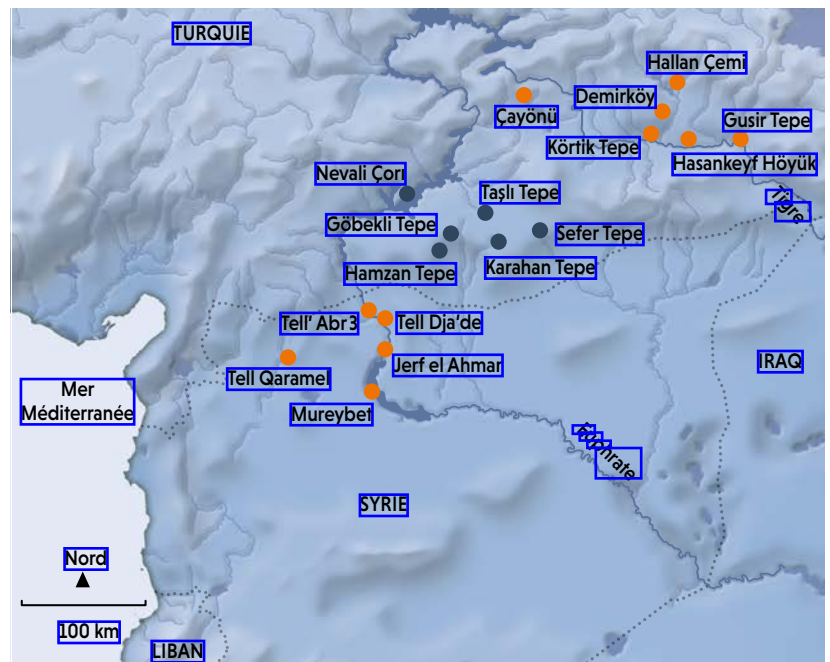
Si cette amplitude est étonnante, les préhistoriens savent depuis longtemps que les mutations économiques et sociales qui ont conduit au Néolithique se sont produites par petites étapes différant d'une région à l'autre (ils évitent désormais de parler de «révolution néolithique»). S'il est clair que les chasseurs-cueilleurs du X^e millénaire avant notre ère vivaient encore de la nature, ils exploitaient déjà les plantes sauvages d'une façon systématique et entretenaient sans doute aussi des cheptels d'animaux sauvages. C'est ainsi qu'ils auraient progressivement acquis les connaissances clés nécessaires à la domestication de plantes et d'animaux. Même s'ils étaient toujours chasseurs, ils s'installaient de façon saisonnière et parfois définitive dans des habitats fixes, où ils n'employaient pas encore la céramique pour stocker, préparer ou consommer leur nourriture. Les installations cultuelles de Göbekli Tepe relèvent de ce stade culturel proto-néolithique dit du Néolithique précéramique A, une période d'un millénaire à peu près, qui s'étend de 9600 à 8600 avant notre ère.

Les tailleurs de pierre et les maçons qui réalisèrent les sanctuaires de la Colline au nombre durent certainement travailler des mois d'affilée sur le site. «Pour façonner les piliers des sanctuaires, ils ont taillé la roche des affleurements calcaires des bords du plateau Harran», explique

Oliver Dietrich (voir la photo page ci-contre). Or, dans un cas au moins, cette opération a échoué: un bloc a été abandonné, qui, s'il avait pu être exploité, aurait donné un pilier de 7 mètres de haut! Une chance pour les archéologues, qui ont pu ainsi reconstituer les techniques de taille et observer les marques d'outils des tailleurs. «Ils s'y prenaient en taillant la forme du pilier dans le calcaire, avant de tenter d'extraire le bloc en T résultant à l'aide de leviers, décrit Oliver Dietrich. Nous ignorons comment les choses se passaient une fois le bloc dégagé, mais il est probable qu'on le faisait avancer sur des rondins jusqu'au lieu où le mégalithe devait être dressé.» Un groupe d'étudiants de l'université de Halle, à qui l'on a demandé de tailler un pilier similaire en calcaire, a calculé que les efforts de vingt personnes pendant plusieurs mois d'affilée sont nécessaires pour obtenir un mégalithe...

La forme en T des mégalithes est certainement une allusion à la silhouette humaine, la tête étant représentée par la traverse supérieure. Détail qui le confirme, des bras repliés ont été sculptés sur certains exemplaires. Nombre de mégalithes portent des bas-reliefs représentant des animaux et/ou des formes géométriques. Les tailleurs de ces piliers avaient certainement une idée très claire du résultat auquel ils voulaient arriver. «Les hauts-reliefs sont travaillés avec une telle précision qu'il ne peut s'agir que de l'œuvre de spécialistes», estime Lee Clare.

Les étapes qui venaient après l'extraction des piliers exigeaient aussi beaucoup



OÙ LA SEDENTARISATION A COMMENCÉ

Sur le cours supérieur de l'Euphrate et du Tigre, la nature était si généreuse au X^e millénaire avant notre ère que les chasseurs-cueilleurs s'y sont sédentarisés. Ci-dessus, leurs habitats connus (en orange et en noir), dont ceux qui comportaient des mégalithes en T (en noir).



LES SANCTUAIRES OVALES DE LA COLLINE AU NOMBRIU

Plusieurs sont visibles ci-dessus : leurs parois en murs de pierres sèches accueillent une douzaine de piliers en T ornés, taillés dans des affleurements calcaires tels ceux visibles en arrière-plan.

d'expérience et de coordination. Pour créer un sanctuaire, on creusait une forme ovale à quelque 2 mètres de profondeur dans le substrat rocheux, que l'on terminait par un mur de pierres sèches. Des plans inclinés réalisés en terre servaient probablement à introduire les piliers à l'intérieur de l'ovale. Deux mégalithes particulièrement grands étaient dressés au milieu de l'espace cultuel, tandis que les autres étaient insérés dans des niches ménagées dans les murs. Les fondations n'étant pas assez profondes pour soutenir de tels mégalithes, une structure de soutènement ou un toit de bois semblent avoir été nécessaires pour achever de les stabiliser.

Dietmar Kurapkat, chercheur en architecture à l'université des sciences appliquées de Regensburg et archéologue du bâti, pense pour sa part que ces structures étaient dotées d'un toit. Sans cela, les pluies d'automne ou d'hiver les auraient inondées. Le très bon état de conservation des reliefs fournit un autre

indice dans ce sens, car si le tendre calcaire dans lequel ils étaient sculptés était resté des siècles exposé aux éléments, ceux-ci les auraient bien plus dégradés.

La plupart de ces sanctuaires mi-souterrains ne comportent apparemment pas d'entrée. Pour Dietmar Kurapkat, on accédait donc à l'espace cultuel par des ouvertures ménagées dans le toit, comme si l'on descendait dans le monde souterrain. La demi-pénombre créée par un éclairage à base de torches ou de lampes à huiles devait conférer à l'espace cultuel une ambiance magique.

Les deux grands mégalithes centraux devaient contribuer particulièrement à cette ambiance. Sans doute, afin de renforcer leur apparence imposante, les habillait-on d'une ceinture, d'un pagne imitant la peau de renard ou de panthère et d'une étole jetée par-dessus l'épaule. Les têtes en T étaient volontairement laissées anonymes : ni bouche ni yeux ne révélaient l'identité de ces êtres de pierre. À moitié intégrés au mur, d'autres piliers étaient recouverts de reliefs d'animaux, par exemple de serpents, de scorpions, de panthères et de lions. Des corps animaux sortaient aussi des murs, ce qui, dans la lumière vacillante, devait créer des ombres dansantes.

PAS DE DIEU, PAS DE TEMPLE

Personne ne saura jamais si les colossaux piliers centraux représentaient des dieux, des ancêtres ou des héros. C'est pourquoi les chercheurs ont maintenant cessé d'identifier à des temples les installations cultuelles de Göbekli Tepe. Un temple est par définition dédié à des dieux. Or rien sur la Colline au nombril n'évoque leur présence. Quoi qu'il en soit, «la construction d'une installation aussi monumentale a, de tout temps, été une démonstration de force», estime Joachim Bauer, un neurobiologiste de Fribourg qui aide à l'interprétation de Göbekli Tepe. «La réalisation du site a aussi eu pour effet de lier les gens qui y ont participé, ainsi que tous les curieux que le spectacle attirait. Être membre d'une communauté humaine menant de tels projets est hautement désirable.»

L'approvisionnement des équipes qui travaillaient sur le site a aussi dû constituer un défi logistique. Klaus Schmidt estimait que la réalisation d'une installation comportant douze piliers demandait le travail de trois cents personnes, ce qui est impensable sans la coordination de toute une communauté. Dès lors, cette dernière ne pouvait se lancer dans un tel projet que si celui-ci était très utile. C'est pourquoi les archéologues supputent que la Colline au nombril servait aux rites et au culte de nombreux groupes vivant dans un territoire environnant vaste.

Les sanctuaires de Göbekli Tepe ne sont pas les seules installations remarquables du >



Néolithique précéramique A connues dans le Croissant fertile, mais ce sont les plus imposantes. Sur l'Euphrate moyen en Syrie, des équipes syro-françaises ont en effet découvert des structures ressemblant beaucoup à celles de la Colline au nombril et qui leur sont à peu près contemporaines : à la fin des années 1990, l'archéologue Danielle Stordeur, de la maison de l'Orient, à Lyon, a découvert de telles structures dans le village de Jerf el Ahmar, un habitat datant du Néolithique précéramique A situé au bord de l'Euphrate. Son collègue syrien Thaer Yartah en a découvert de similaires sur le site qu'il a fouillé (Tell 'Abr 3).

Dans chacun de ces cas, un grand espace rond avait été creusé dans le sol et équipé d'une banquette octogonale décorée, appuyée au mur (*voir la photo ci-dessus*). Des traces caractéristiques d'une longue usure de ce banc confirment sa très longue utilisation. À Tell 'Abr 3, sous la banquette, les fouilleurs ont aussi découvert des vases de pierre, des os animaux et des plaques de pierre portant des images gravées. Les restes d'enduits sur les murs sont particulièrement intéressants, de même que la présence de nombreuses cavités.

Des poteaux de bois d'un diamètre pouvant aller jusqu'à 30 centimètres occupaient par ailleurs les angles de ces banquettes octogonales. Ils étaient enduits de terre, de sorte que les motifs triangulaires gravés sur les plaques de calcaire constituant le flanc des banquettes pouvaient y être continués. Sans doute s'agissait-il de produire l'impression d'une construction en pierre, annonciatrice de l'architecture de Göbekli Tepe ou la rappelant.

À quoi servaient donc ces bâtiments spéciaux, qu'il s'agisse de ces maisons rondes enfoncées dans le sol de villages ou des sanctuaires imposants de Göbekli Tepe ? Danielle Stordeur voit dans ceux des villages protonéolithiques des « bâtiments communautaires » parce que la présence de certains artefacts tels des meules attestent que l'on y préparait de la nourriture et donc que l'on y mangeait ensemble. Les compartiments équipant certains de ces bâtiments pourraient en outre avoir constitué des espaces de stockage. Pour de nombreux chercheurs, cette interprétation minimaliste ne suffit pas. Il leur semble en revanche très clair qu'au X^e millénaire avant notre ère, les habitants de la Mésopotamie septentrionale partageaient les mêmes rituels et symboles, et que la construction de ces bâtiments a joué un rôle clé dans ces rituels.

DES CHASSEURS-CUEILLEURS QUI CULTIVAIENT

De fait, plusieurs indices vont dans ce sens. Les fouilles et les relevés de sites des vingt dernières années montrent que pendant le X^e millénaire, toute la Mésopotamie septentrionale était assez densément peuplée. Il semble que les populations de chasseurs-cueilleurs y trouvaient des ressources suffisantes pour s'installer de façon durable. Leurs premiers habitats s'étirent le long des rives de l'Euphrate, du Tigre et de leurs affluents, sans doute parce que le gibier, notamment les oiseaux aquatiques, y abondait ainsi que le poisson. Ces premiers villages couvraient en général moins de deux hectares, et de cent cinquante à trois cents personnes y habitaient.

Le bâtiment communautaire de Jerf el Ahmar, avec ses compartiments présumés être des silos, est entouré de maisons villageoises quadrangulaires, dont la forme venait d'être inventée.

Les accumulations de centaines de meules et de mortiers que l'on retrouve suggèrent que les villageois s'étaient installés définitivement. Ces ustensiles sont en effet bien trop lourds pour qu'on les transporte avec soi quand on se déplace d'un lieu à l'autre! La présence de ce matériel atteste aussi de l'exploitation intensive des pistaches, des glands, des amandes et des graminées. Les études archéobotaniques qui ont été menées à Körtik Tepe, l'un des plus anciens villages sur le Tigre, suggèrent en outre que des céréales sauvages étaient déjà cultivées. L'ADN de l'engrain – l'une des toutes premières graminées domestiquées – pointe du reste vers une origine de nos céréales en haute Mésopotamie.

Vivre près du fleuve était une bénédiction, mais aussi un malheur: Yilmaz Erdal, de l'Institut anthropologique d'Ankara, a montré que les habitants de Körtik Tepe souffraient d'une inflammation chronique de l'oreille moyenne. Beaucoup d'enfants mouraient et les adultes vivaient rarement plus de trente-cinq ans. La mort faisait manifestement partie de la vie quotidienne. Du reste, l'équipe de Vecihi Özkaya, le directeur des fouilles de Körtik Tepe, a déjà mis au jour les squelettes de plus de huit cents défunts enterrés dans les maisons. Un nombre extraordinairement élevé!

L'inhumation de certains de ces défunts s'est accompagnée d'actes spectaculaires: des vases précieux à la décoration recherchée, des haches et des massues de pierre ont été volontairement brisés avant d'être déposés sur les corps. De tels rituels devaient être inoubliables pour ceux qui y assistaient.

La chose est étrange, mais les bâtiments communautaires à vocation culturelle présumée n'ont jusqu'à présent pas livré de tombe. À Jerf el Ahmar, Danielle Stordeur a cependant découvert deux crânes isolés semblant constituer une sorte de dépôt de fondation du bâtiment. Ils se trouvaient à l'intérieur de deux trous de poteaux superposés.

UNE JEUNE FEMME SACRIFIÉE?

Dans un autre bâtiment commun du même site, un troisième crâne était caché dans une niche murale. En outre, une grande surprise y attendait les archéologues: le bâtiment contenait aussi les ossements d'une jeune femme. Elle était couchée bras et jambes étendus comme si on l'avait jetée au milieu de la pièce peu avant que le bâtiment ne brûle. Fut-elle sacrifiée? Sa mort est-elle la raison de l'incendie du bâtiment?

Un détail de cette découverte intrigue: le crâne de la jeune femme manquait, alors que

Selon Klaus Schmidt, on offrait des cadavres aux grands oiseaux charognards...



Des suites de symboles gravés sur des plaquettes de seulement quelques centimètres de long servaient à propager des informations. Une première forme de communication par un système de signes?

toutes les vertèbres cervicales étaient présentes. Pour les anthropologues, il s'agit là de l'indication claire du fait que le crâne a été prélevé seulement une fois qu'il n'a plus été relié aux vertèbres cervicales. En d'autres termes, après l'incendie du bâtiment, quelqu'un est venu prélever le crâne et cette personne savait exactement où le trouver.

Klaus Schmidt suspectait déjà que le sanctuaire de la Colline au nombril jouait un rôle particulier dans le culte des morts. Selon lui, on y offrait des cadavres aux grands oiseaux charognards. Cette façon de traiter les morts a plus tard été pratiquée par le zoroastrisme, l'une des plus anciennes religions monothéistes de l'humanité, probablement fondée en Asie centrale au II^e millénaire avant notre ère. La présence d'os de vautours et de corbeaux dans le remplissage des sanctuaires de Göbekli Tepe va dans le sens de la thèse de Klaus Schmidt, que la quasi-absence de squelettes humains tendrait en revanche à réfuter.

Le fait que les maisons rondes semi-enterrées des villages et les sanctuaires imposants de Göbekli Tepe jouaient un rôle dans le monde des croyances du Protonéolithique mésopotamien est aussi attesté par les représentations animales que l'on y trouve. Celles des piliers et de quelques découvertes de Göbekli Tepe attestent que, comme à Körtik Tepe, on « bannissait » les serpents, les scorpions, en les représentant sur des objets tels que des vases façonnés dans la pierre, des plaques de chlorite ou encore des pendentifs en os.

Les animaux représentés ne faisaient pas partie du gibier, mais vivaient plutôt dans d'autres sphères que les humains: les serpents rampent au sol et sortent de terriers,

> donc en pratique vivent sous terre; les oiseaux dominent les airs et ceux qui sont aquatiques maîtrisent les deux espaces. Nombre d'entre eux, tels les sangliers, les aurochs ou les panthères, sont dangereux. Pour les chasseurs du nord de la Mésopotamie, le renard était sans doute d'abord un concurrent, mais jouait peut-être aussi un rôle symbolique, puisque dans certains mythes d'Asie orientale, il apparaît en tant que compagnon d'une puissante déesse ou encore comme un démon tapi dans la pénombre que l'on doit calmer par des offrandes.

Or ce sont justement les animaux dangereux ou à caractère mythique qui, dans le chamanisme que pratiquent encore certains groupes humains, revêtent une grande importance. Leur rôle est d'agir comme guide ou aide dans le monde des esprits; il arrive que les chamanes eux-mêmes se transforment en de tels animaux, par exemple pour rechercher les causes d'une maladie. Sur un vase de pierre découvert à Körtektepe, un humain déguisé en oiseau semble figuré. Les grues représentées à Göbekli Tepe ont pour leur part des jambes humaines. Et à Çatalhöyük, au centre de la Turquie, dans le village néolithique du VII^e millénaire avant notre ère (des milliers d'années après la période d'activité de Göbekli Tepe), on réalisait des représentations similaires.

LA FIN DES GRANDS SANCTUAIRES

Aujourd'hui, personne ne peut dire ce que les gens du Néolithique précéramique A ressentaient face à l'architecture monumentale et aux sculptures des sanctuaires. « Dans un monde où les images étaient rarissimes, ces représentations faisaient certainement forte impression », pointe Oliver Dietrich. Elles constituaient un langage symbolique que comprenaient tous les habitants de la région entre les cours supérieurs et moyens de l'Euphrate et du Tigre et qui était certainement profondément ancré dans leur pensée.

Toutefois, les traditions des gens du Protonéolithique étaient menacées, car leur monde était en mutation. Les villages croissaient sans cesse, ce qui ne pouvait que provoquer des tensions. Il fallait s'approvisionner dans la nature. L'augmentation ininterrompue des effectifs des groupes humains signifiait aussi que l'on se trouvait de plus en plus souvent dans la situation de ne pouvoir partager avec tous. La proximité caractéristique de la vie en petits groupes disparaissait progressivement et, avec elle, la confiance.

« Avec l'émergence de la production alimentaire et du mode de vie associé, certains sites majeurs des cultures de chasseurs-cueilleurs, tel celui de Göbekli Tepe, perdirent leur importance », explique Harald Hauptmann, le

Cette tête sculptée d'une trentaine de centimètres de haut fait partie de quelques sculptures de pierre qui ont traversé les siècles dans les ruines du village néolithique de Nevalı Çori (Néolithique précéramique B, 8600 à 7000 avant notre ère). Point extraordinaire, quelques-unes d'entre elles sont anthropomorphes.



directeur des fouilles de Nevalı Çori, un village où la mutation sociale est particulièrement lisible. Au cours des fouilles de la fin des années 1980, les archéologues y ont mis au jour un bâtiment de 188 mètres carrés à moitié enfoncé dans une pente. Comme à Göbekli Tepe, des piliers en pierre en ornèrent autrefois le centre et d'autres étaient incrustés dans des niches murales. Ce bâtiment commun fut réalisé vers le milieu du IX^e millénaire avant notre ère, donc à une époque où la culture et l'élevage de moutons, de chèvres et de cochons étaient déjà pratiqués.

Il semble que la pratique religieuse conduisait à modifier régulièrement l'aménagement des édifices cultuels pour finir par les enterrer. Beaucoup d'entre eux ont été nettoyés et abandonnés, d'autres brûlés; le sanctuaire de Göbekli Tepe fut comblé de terre, ce qui explique sa conservation exceptionnelle après 11 000 ans.

Dans une phase ultérieure (entre 8600 et 8000 environ avant notre ère), de nouveaux sanctuaires, bien moins impressionnants, furent construits: les piliers n'y mesurent que deux mètres de haut et les sculptures d'animaux dangereux y sont sommaires. Presque partout sur le plateau du Harran, les archéologues turcs sont tombés sur des piliers en T similaires quoique de plus petites dimensions que ceux de Göbekli Tepe. Il semble que les grands projets collectifs n'étaient plus nécessaires. La vie en village s'était établie, et la culture et l'élevage dominaient la vie quotidienne. Revenir en arrière était impensable. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Yartah, **Typologie de bâtiments communautaires à Tell 'Abr 3 (PPNA) en Syrie du Nord**, *Neo-Lithics*, vol. 2/16, pp. 29-49, 2016.

M. Benz et J. Bauer, **On Scorpions, birds and snakes – Evidence for shamanism in Northern Mesopotamia during the Early Holocene**, *Journal of Ritual Studies*, vol. 29, pp. 1-24, 2015.

Danielle Stordeur, **Le village de Jerf el Ahmar (Syrie 9500-8700 av. J. C.). L'architecture, miroir d'une société néolithique complexe**, CNRS Éditions, 2015.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

OFFRE
SPÉCIALE
NOËL

**FORMULE
INTÉGRALE
-46%**



99€

**FORMULE
PASSION
-33%**



79€

**FORMULE
DÉCOUVERTE
-33%**



59€



EN CADEAU AVEC VOTRE ABONNEMENT LE LIVRE "RELATIVITÉ ET QUANTA : UNE NOUVELLE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE..."

LHC, particules, trous noirs, cosmologie... Enfin un point clair et concis sur la dernière révolution scientifique ! Ces trois dernières années, les moissons scientifiques ont été exceptionnellement fructueuses, de la découverte du boson de Higgs à celles des ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs massifs, et aux observations du fond cosmologique par le satellite Planck. L'humanité vient alors d'atteindre un nouveau palier dans la compréhension du monde quantique et du monde de la gravitation : nos bases théoriques, expérimentales et technologiques forment un socle scientifique solide pour aller plus loin et tenter de répondre aux nouvelles questions qui surgissent suite à ces découvertes... Enquête et mise au point sur une révolution en cours.



BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN, JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ **FORMULE INTÉGRALE**

12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

11A99EK4

99€
Au lieu de 189,45€*

☐ **FORMULE PASSION**

12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

11A79EK2

79€
Au lieu de 118,45€*

☐ **FORMULE DÉCOUVERTE**

12 n° de Pour la Science
+ Le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..."

11A59EK2

59€
Au lieu de 98,45€*

INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Téléphone

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule)

@

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

• Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

N°

Date d'expiration :

Clé (Les 3 chiffres au dos de votre (B) :

Signature obligatoire

PAG174810

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives et la valeur du livre. Vous pouvez également si vous le souhaitez acquérir séparément le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..." au prix de 10€, chaque n° de Pour la Science au tarif de 6,50€, notre n° spécial au tarif de 6,95€ et nos hors-séries au tarif de 7,50€. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/2018 en France métropolitaine uniquement et dans la limite des stocks disponibles. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Photos non contractuelles.

L'ESSENTIEL

> Au centre de certaines galaxies se cachent des trous noirs supermassifs.

> Une étoile passant trop près d'un tel trou noir sera déchiquetée par les forces de marée. En tombant dans le trou noir, la matière stellaire, soumise à de fortes frictions, chauffe et brille intensément.

> Cette fin stellaire est visible loin dans l'Univers. De nouveaux télescopes, dits à grand champ, permettent aux astronomes d'étudier en détail ces événements cataclysmiques.

> En observant de tels épisodes, les chercheurs espèrent mieux comprendre comment les trous noirs croissent et évoluent.

LES AUTEURS



BRADLEY CENKO
astrophysicien au centre de vol spatial Goddard de la Nasa et professeur à l'université du Maryland



NEIL GEHRELS
ancien directeur du laboratoire de physique des astroparticules au centre de vol spatial Goddard de la Nasa

Le trou noir dévoreur de soleils

LORSQU'UNE ÉTOILE S'APPROCHE TROP D'UN TROU NOIR SUPERMASSIF, ELLE EST HAPPÉE ET FINIT DÉCHINETÉE DANS UNE EXPLOSION DE LUMIÈRE. UN CATACLYSME COSMIQUE QUE L'ON DÉTECTE DEPUIS PEU ET QUI EST RICHE EN INFORMATIONS SUR CES OGRES TAPIS AU CENTRE DES GALAXIES.



Vue d'artiste
d'une étoile déchirée
par les forces
de marée qu'exerce
sur elle un trou noir
supermassif.

Au cœur de la Voie lactée et de presque toutes les grandes galaxies spirales réside une énigme cosmique : un trou noir supermassif. Personne ne sait vraiment expliquer comment de tels objets, qui concentrent des millions, voire des milliards de fois la masse du Soleil dans une région plus petite que le Système solaire, ont pu se former. Mais en étudiant de près leur comportement et leur évolution, les astrophysiciens espèrent élucider les secrets de la naissance et de l'évolution des galaxies elles-mêmes.

L'obstacle majeur à l'étude des trous noirs est le fait que ces objets n'émettent pas de lumière. En effet, d'après la théorie de la relativité générale, ils courbent l'espace-temps à un tel point que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière. Les trous noirs passent donc l'essentiel de leur temps dans un état endormi, où ils sont invisibles à nos yeux. Mais parfois, ils prennent vie lorsqu'ils « s'alimentent ». Quand de la matière passe trop près du trou noir, elle est piégée et fortement accélérée par les forces gravitationnelles de celui-ci. Et si le mets est de taille non négligeable, les agapes qui s'ensuivent se voient de très loin. Mais ces repas sont très rares : la majeure partie du gaz, de la poussière et des étoiles qui tournent autour du trou noir supermassif occupe des orbites stables et ne sera jamais consommée.

Depuis cinquante ans, les astrophysiciens ont essentiellement observé un seul type de trous noirs en train de faire bombance : les quasars. Découverts par l'astronome néerlandais Maarten Schmidt en 1963, les quasars sont les centres ultraluminescents de galaxies actives, visibles depuis les confins de l'Univers, et brillant chacun davantage que des milliards de soleils. On pense qu'ils correspondent à des nuages massifs de gaz et de poussière qui plongent sur un trou noir supermassif : cette matière se comprime, chauffe et en luit tandis qu'elle décrit des spirales de plus en plus proches du trou noir, cette plongée pouvant durer des centaines de milliers ou des millions d'années.

Mais les quasars sont loin d'être des objets d'étude idéaux. Ces événements extrêmes sont rares et souvent lointains. Et ils ne sont représentatifs que d'une petite fraction de la vie d'un trou noir supermassif. Ils n'en livrent qu'un aperçu limité et laissent les astronomes dans l'inconnu quant à la façon dont les trous noirs supermassifs se comportent, se nourrissent et évoluent la plupart du temps.

Il existe cependant d'autres moyens d'étudier les trous noirs supermassifs. Une méthode consiste à chronométrer les étoiles en orbite rapprochées qui filent à toute vitesse autour de ces trous noirs. Mais, pour que les télescopes

actuels puissent distinguer des étoiles individuelles, ces mesures ne sont envisageables que pour des trous noirs supermassifs suffisamment proches (au cœur de la Voie lactée ou dans l'une des galaxies voisines).

En 1988, l'astronome britannique Martin Rees a proposé une troisième façon d'étudier les trous noirs supermassifs, qui a récemment commencé à porter ses fruits. Au lieu de traquer la lueur stable des quasars ou la vitesse des étoiles en orbite, les astronomes peuvent guetter de brefs et intenses sursauts de lumière au voisinage d'un trou noir. Ces « événements de destruction par effet de marée » ou TDE (pour *tidal disruption events*) se produisent lorsqu'un trou noir supermassif happe une étoile malchanceuse. Ces épisodes ne durent que quelques mois, et non de longs millénaires comme pour les quasars. Les chercheurs peuvent dans ce cas assister au repas du trou noir du début à la fin, et ces TDE sont suffisamment brillants pour être observés même dans des galaxies lointaines.

COMMENT DÉTRUIRE UNE ÉTOILE

Un événement de destruction par effet de marée est infiniment plus brutal et spectaculaire que les sages marées qui animent le paysage de nos côtes, mais le principe n'en est pas si différent. Les marées de la Terre sont principalement dues à l'attraction gravitationnelle exercée par la Lune, qui tire plus fort du côté de la Terre le plus proche d'elle. La différence entre l'attraction gravitationnelle de la Lune du côté proche et du côté éloigné engendre ce qu'on nomme une force de marée. Laquelle soulève une bosse, ou marée haute, à la fois du côté de la Terre qui fait face à la Lune et, plus paradoxalement, du côté opposé aussi. Et dans les directions orientées à 90 degrés de l'axe Terre-Lune, on obtient des marées basses.

Quand une étoile arrive dans le voisinage d'un trou noir supermassif, peut-être poussée là par les chiquenaudes gravitationnelles d'une autre étoile, les très intenses forces de marée du trou noir peuvent la déchirer en lambeaux. Les détails du trépas de l'astre dépendent de sa taille et de celle du trou noir supermassif. Face aux forces de marée, un petit objet compact, une naine blanche par exemple, sera beaucoup plus résilient qu'une étoile plus grosse et diffuse de type solaire, de la même façon qu'une boule de bowling serait plus difficile à déchirer qu'une boule de barbe à papa.

Les plus gros des trous noirs supermassifs, contenant des milliards de masses solaires, sont trop gros pour créer des événements de destruction par effet de marée : ils auront tendance à avaler les étoiles tout entières avant que les forces de marée ne deviennent suffisamment intenses pour les dépecer. En

tels des phares cosmiques, les quasars brillent fortement. Ces objets lointains sont produits par des trous noirs supermassifs qui accrètent de grandes quantités de gaz. Mais ces phases d'activité des trous noirs sont trop rares, trop lointaines et durent trop longtemps pour révéler pleinement comment se nourrissent les trous noirs géants. Des détails peuvent être obtenus en observant des trous noirs avaler une étoile entière.

revanche, les forces de marée dues à un trou noir de quelques millions de masses solaires déchireront la plupart des étoiles qui s'approchent à moins de 50 millions de kilomètres – à peu près la distance de Mercure au Soleil.

Le démembrement total de l'étoile n'est que le début du feu d'artifice. Après la destruction initiale, les débris stellaires se dispersent et dévient progressivement de la trajectoire initiale de l'étoile. Les lois de la mécanique indiquent que la moitié environ des débris seront expulsés sous forme de longs filaments de matière loin du voisinage du trou noir, tandis que l'autre moitié retombera vers le trou noir en formant un disque d'accrétion, une structure d'anneaux décrivant des spirales qui chutent lentement vers le trou noir.

Lors de ce processus, le matériau du disque est accéléré et atteint des vitesses proches de celle de la lumière. Les forces gravitationnelles et la friction compriment et chauffent ce disque à des températures approchant 250 000 degrés. Ce disque se met alors à briller intensément. En quelques semaines ou quelques mois, un événement de destruction par effet de marée typique se traduit par la transformation d'un trou noir auparavant dormant et invisible en un objet dont l'éclat éclipsé toutes les étoiles de sa galaxie.

Bien que les théoriciens aient prédit les événements de destruction par effet de marée il y a plusieurs décennies, les astronomes ont dû attendre les années 1990 et le début des années 2000 pour en détecter. Ce délai est en partie dû à la rareté des TDE (on estime qu'il s'en produit un tous les 100 000 ans dans une

galaxie comme la Voie lactée). Par ailleurs, ces événements sont difficiles à voir. En effet, les modèles théoriques suggéraient que le rayonnement du disque d'accrétion d'un TDE devrait être maximal dans certaines portions du spectre électromagnétique, les rayons X dits mous et l'ultraviolet lointain. Or ces longueurs d'onde sont difficiles à étudier car les poussières interstellaires présentent des émissions similaires et elles sont efficacement absorbées par l'atmosphère terrestre.

PESER LE TROU NOIR

Malgré ces obstacles observationnels, les astrophysiciens étaient motivés par la recherche des TDE, notamment parce qu'ils permettent d'estimer avec précision la masse du trou noir, une information cruciale pour étudier comment un trou noir évolue et comment il influe sur son environnement galactique. Pour mesurer la masse d'un trou noir, les astronomes doivent chronométrer le temps nécessaire au TDE pour atteindre sa brillance maximale (ce qui montre à quelle rapidité un disque d'accrétion se forme et nourrit le trou noir). Du fait de leur extraordinaire luminosité, les TDE permettent aux chercheurs de préciser les masses pour un éventail de trous noirs supermassifs plus large qu'avec n'importe quel autre phénomène connu.

Les premiers candidats TDE ont été trouvés dans les données des télescopes spatiaux *Rosat* (rayons X) et *Galex* (ultraviolet). Ils se présentaient sous la forme d'événements éruptifs durant quelques semaines à quelques mois et provenant du centre de galaxies jusque-là



inactives. En tant que premières manifestations de ce phénomène prédit depuis longtemps, ces découvertes ont été particulièrement importantes et ont inauguré un nouveau champ d'étude. Mais parce que l'on trouvait ces candidats pour l'essentiel dans des données anciennes, les astronomes étaient dans l'impossibilité de les étudier à diverses longueurs d'onde en temps réel afin d'avoir une vue complète de ces événements. Pour prendre les TDE sur le vif, il fallait que les astronomes aient beaucoup de chance, ou qu'ils soient en mesure de surveiller en continu de gigantesques portions du ciel.

LA TRAQUE DEVIENT POSSIBLE

Or, grâce aux progrès continus en termes de stockage de données et de sensibilité des détecteurs durant la dernière décennie, des relevés aussi ambitieux sont désormais possibles. Un détecteur optique haut de gamme peut aujourd'hui obtenir une image de un degré carré du ciel en une prise unique, ce qui revient plus ou moins à voir le ciel avec un objectif panoramique après des années passées à l'étudier en regardant à travers une paille. En surveillant régulièrement de vastes régions du ciel et en comparant numériquement les images résultantes afin d'y identifier des événements peu lumineux et éphémères, les astronomes sont maintenant en mesure de découvrir et d'étudier plus facilement les TDE et une foule d'autres phénomènes astrophysiques transitoires.

Ces nouveaux relevés à grand champ, tels *Pan-STARRS* (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*, télescope de relevé panoramique et système de réponse rapide), *PTF* (*Palomar Transient Factory*, usines à sources transitoires du mont Palomar) et *ASAS-SN* (*All-Sky Automated Survey for Supernovae*, relevé automatisé sur tout le ciel des supernovæ), ont été conçus principalement pour identifier les supernovæ et les astéroïdes. Or, comme ils sont capables de capter l'image de millions de galaxies chaque nuit, ils sont aussi sensibles aux événements plus exotiques, tels que les TDE.

En 2010, peu de temps après la mise en service de *Pan-STARRS*, une équipe dirigée par Suvi Gezari, astrophysicienne à l'université du Maryland, a découvert un événement de destruction par effet de marée; nommé PS1-10jh, il s'est produit autour d'un trou noir d'à peu près 2 millions de masses solaires dans une galaxie située à quelque 2,7 milliards d'années-lumière de la Terre. Et comme ce TDE a été détecté peu de temps après l'enregistrement des données, Suvi Gezari et ses collègues ont pu, pour la première fois, suivre la quasi-totalité du processus en longueurs d'onde optiques et ultraviolettes. Mais ce qu'ils ont vu a constitué un véritable choc.

UNE RENCONTRE RARE MAIS FATALE

En s'aventurant trop près des trous noirs supermassifs tapis au centre de la plupart des galaxies, les étoiles se déchirent sous l'effet de l'intense champ gravitationnel. Elles envoient un flot de gaz vers le trou noir; ce gaz se comprime, chauffe et luit pendant sa chute. Nommés événements de destruction par marée, ou TDE, ces explosions sont parmi les phénomènes les plus lumineux de l'Univers et éclairent le processus d'alimentation et de croissance des trous noirs supermassifs.

Etoile

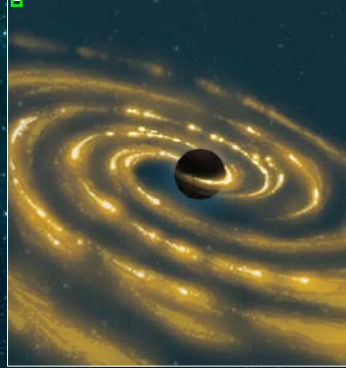
LE DÉBUT...

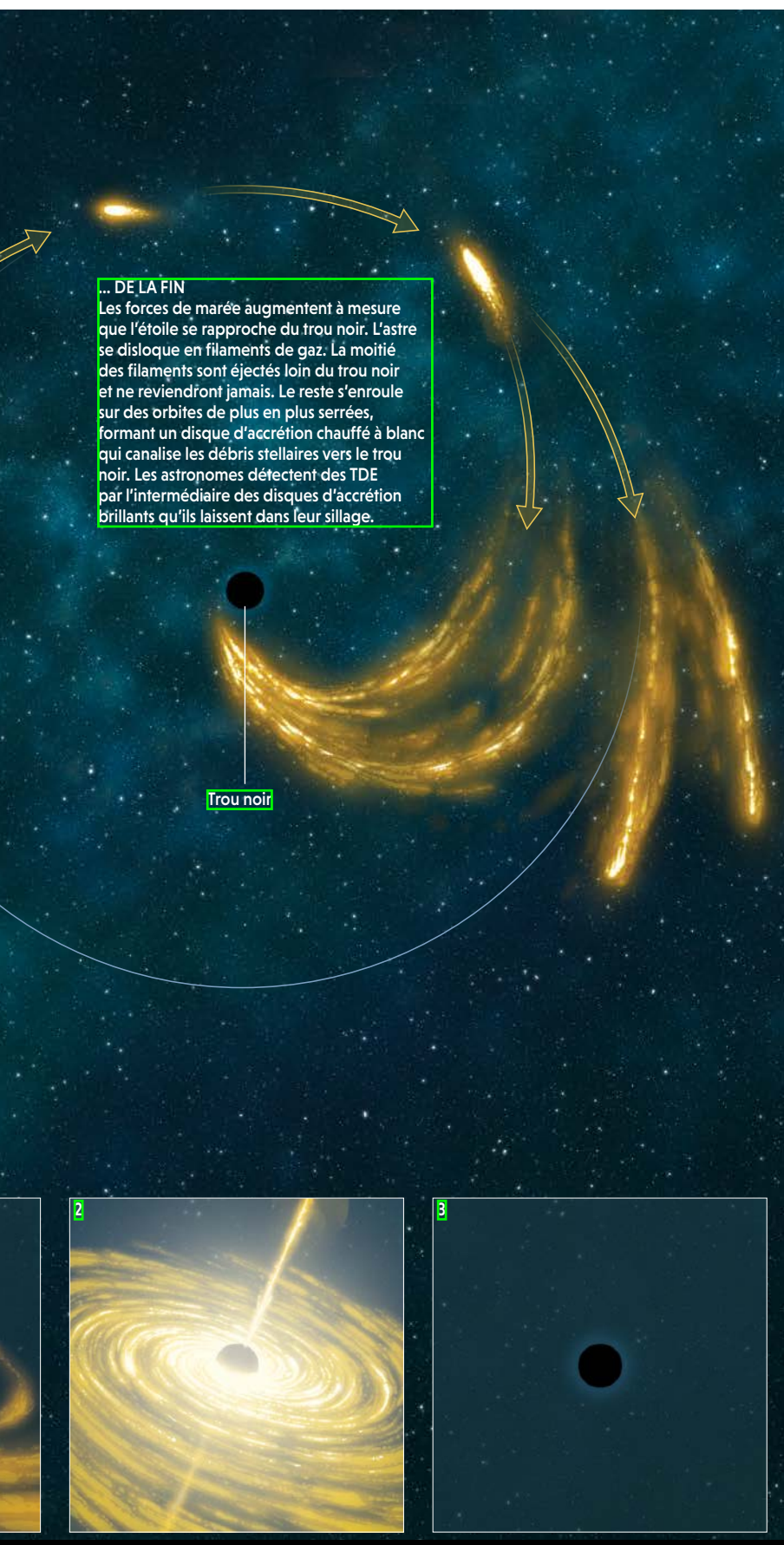
Un TDE démarre quand un trou noir supermassif exerce une attraction gravitationnelle plus forte du côté proche que du côté éloigné d'une étoile de passage. L'intensité de ces « forces de marée » dépend de la masse du trou noir et de la densité de l'étoile. Ici, une étoile de masse solaire commence à s'étirer comme de la barbe à papa en s'approchant d'un trou noir d'environ un million de masses solaires.

UNE OCCASION UNIQUE

Un TDE est la seule situation qui permet aux astrophysiciens d'assister au spectacle d'un trou noir qui se réveille, prend son repas et retourne dormir. En fonction du temps que met un disque d'accrétion à se former (1), atteindre sa luminosité maximale (2) et disparaître (3), les chercheurs évaluent la taille de l'étoile engloutie ainsi que la masse du trou noir et sa vitesse de rotation. Pendant que le trou noir se nourrit, les chercheurs peuvent également suivre les ondes de choc dans son disque d'accrétion, ainsi que la formation de jets relativistes (des faisceaux de particules libérées à des vitesses proches de celle de la lumière, émanant des pôles du trou noir). Aucun autre événement cosmique n'offre une vision aussi détaillée des processus extrêmes régnant autour des trous noirs.

1





D'après les mesures détaillées du spectre électromagnétique de son rayonnement, ce TDE était beaucoup trop froid. À seulement 30000 kelvins, il était près de 8 fois plus froid que ne le prédisaient la plupart des modèles décrivant les disques d'accrétion. De plus, au lieu de disparaître progressivement en quelques semaines tandis que le disque d'accrétion se refroidissait et se dissipait, PS1-10jh s'est maintenu à une température constante pendant plusieurs mois après la découverte initiale. Plus étrange encore, *Pan-STARRS* a détecté dans l'émission rémanente des signes de la présence d'hélium ionisé, ce qui n'était possible qu'avec des températures supérieures à 100000 kelvins. Et bien que le TDE semblât riche en hélium, il paraissait dépourvu d'hydrogène, l'élément le plus abondant de l'Univers et le principal ingrédient des étoiles. Les théoriciens se sont donc mis au travail pour trouver ce que traduisaient ces si déconcertants résultats.

Pour expliquer le manque d'hydrogène de PS1-10jh, l'équipe de *Pan-STARRS* a suggéré que l'étoile disloquée par le trou noir a pu perdre son épaisse enveloppe d'hydrogène à un moment antérieur; peut-être lors d'une précédente interaction avec le trou noir, et qu'il ne serait resté que le cœur riche en hélium de l'étoile pour alimenter le disque d'accrétion observé.

Mais ce scénario ne pouvait expliquer à lui seul les étranges anomalies thermiques du TDE: sa température étonnamment basse et, en totale contradiction, l'abondance d'hélium ionisé, possible uniquement à haute température. Pour résoudre cette énigme, d'autres théoriciens ont postulé que le disque d'accrétion qui enserrait le trou noir de PS1-10jh n'était en réalité pas observé directement. Les astronomes auraient en fait vu un voile de gaz enveloppant le lieu du crime, beaucoup plus loin, et qui absorberait l'intense rayonnement produit par le disque d'accrétion et le réémettrait à des températures plus basses. Ce voile aurait la vertu supplémentaire d'expliquer aussi l'apparente absence d'hydrogène sans avoir recours à un scénario de TDE exotique avec une étoile au cœur riche en hélium. Avec les bonnes températures et une densité assez élevée, un tel voile pourrait potentiellement masquer la présence d'hydrogène.

Seul problème: pour qu'un tel voile de gaz explique les observations, il aurait dû être situé à une certaine distance du trou noir, distance où ce nuage de gaz aurait été instable. Avec le temps, il aurait dû soit être happé totalement par le trou noir, soit se dissiper et devenir invisible. Les origines troubles des observations de PS1-10jh font encore l'objet de débats intenses, mais se résument essentiellement à deux possibilités, toutes deux liées à la dynamique d'un trou noir en plein repas.

D'après l'une des pistes, tandis que les vestiges d'une étoile disloquée forment un disque

⊠ d'accrétion, des ondes de choc s'y forment et peuvent se propager vers l'extérieur, jusqu'à bonne distance du disque. Ces ondes retardent la chute d'une partie des débris qui constituent un écran temporaire de matière, le voile qui expliquerait les observations. Autre possibilité, le disque d'accrétion du TDE nouveau-né pourrait initialement canaliser tellement de matière vers l'intérieur que cela dépasserait momentanément la capacité du trou noir à s'alimenter, formant des vents ou des écoulements transitoires dirigés vers l'extérieur aux abords du trou noir, qui auraient pour effet de repousser les débris stellaires au-delà du disque d'accrétion, à des distances bien plus grandes.

Tandis que les astronomes tentaient de comprendre PS1-10jh et les TDE qui ont été rapidement découverts par la suite, ils ont pris conscience que les événements de destruction par effet de marée étaient des processus beaucoup plus complexes que tout ce que l'on avait supposé jusque-là. Mais la plus grande surprise était encore à venir.

LES RÉVÉLATIONS CHOC DE SWIFT

Cette surprise est arrivée aux premières heures du 28 mars 2011, avec une alerte automatisée envoyée à tous les téléphones portables d'une équipe d'astronomes un peu partout dans le monde. Le satellite *Swift* venait de détecter une impulsion de lumière de haute énergie venue des profondeurs de l'espace.

Construit par la Nasa, en partenariat avec des instituts de recherche italiens et britanniques, *Swift* est un télescope spatial particulièrement adapté à l'étude d'explosions cosmiques en tous genres. Ses principales cibles sont les sursauts gamma, des explosions stellaires cataclysmiques qui sont les événements astrophysiques les plus lumineux de l'Univers. À chaque fois qu'un torrent de rayons gamma pénètre dans les capteurs de *Swift*, le télescope se réoriente rapidement pour observer la source en rayons X et en lumière visible, et déclenche une chaîne complexe d'avertissements vers la Terre. Dans les instants qui suivent une telle alerte, les astronomes se précipitent pour réquisitionner les télescopes les plus grands et les plus puissants au monde pour traquer toute « braise » d'émission rémanente associée à un sursaut gamma avant qu'il ne s'éteigne pour toujours.

Depuis son lancement en 2004, *Swift* a découvert plus de 1 000 sursauts de rayons gamma, mais cet événement-là, surnommé par la suite Swift J1644+57, allait être unique en son genre parmi toutes les observations du satellite.

Comme le suggère leur nom, les sursauts gamma ont tendance à être brefs, leur durée typique allant d'une fraction de seconde à quelques minutes. Quand nous avons braqué

nos télescopes sur Swift J1644+57 en ce matin de mars, nous nous attendions à voir l'émission rémanente classique d'un éphémère sursaut gamma.

Au lieu de cela, nous avons observé un flux intense et variable de rayons gamma qui a duré une journée entière, suivie de plusieurs mois d'émissions de rayons X, intenses mais décroissantes. Nous avons rapidement localisé l'explosion dans une galaxie distante de 3,8 milliards d'années-lumière dans la constellation du Dragon. L'un de nos collègues, Joshua Bloom, de l'université de Californie à Berkeley, a suggéré que nous avions assisté à un TDE. Mais alors que tous les TDE précédents avaient été détectés à de plus grandes longueurs d'onde, donc d'énergie plus faible, correspondant à l'émission thermique du disque d'accrétion d'une étoile déchiquetée, il s'agissait là de tout autre chose.

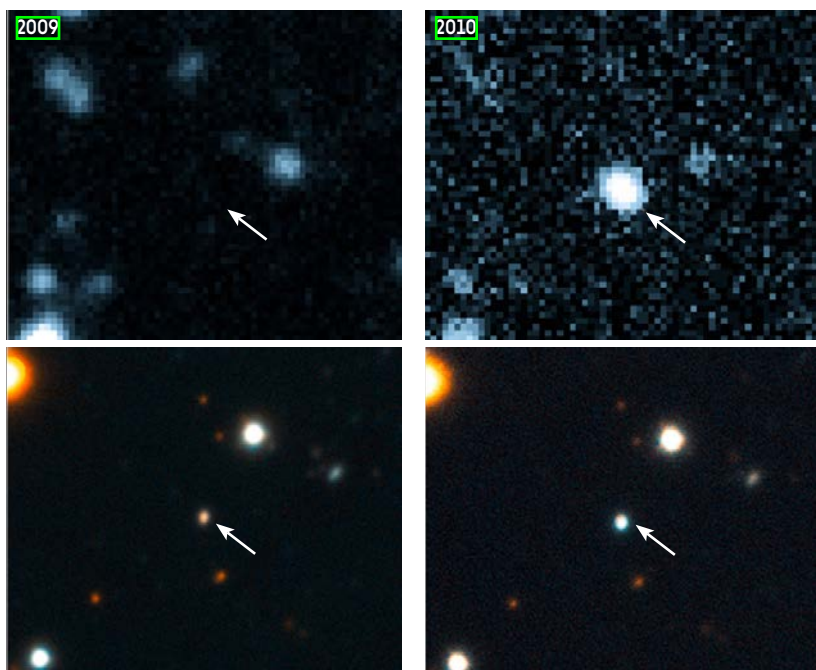


En moyenne, le trou noir au centre d'une galaxie telle que la Voie lactée avale une étoile tous les 100 000 ans



Comment donc un TDE pouvait-il produire des rayons gamma? La meilleure réponse que nous pouvions proposer était que les trous noirs mangent salement! Un trou noir dévore la majeure partie du gaz d'une étoile déchirée, l'emprisonnant pour toujours derrière un horizon des événements (la frontière à l'intérieur de laquelle l'attraction gravitationnelle du trou noir est tellement forte que même la lumière ne peut pas s'en échapper). Mais une petite partie des débris pourrait échapper à la chute.

En effet, tous les trous noirs sont probablement en rotation et ce mouvement pousserait une fraction du gaz vers les pôles du trou noir, où il serait accéléré et éjecté sous la forme d'étroits jets de particules animées de vitesses proches de celle de la lumière. Ces jets relativistes émettent des rayons gamma et X qui fendent le cosmos. *Swift* s'était apparemment trouvé pile sur la trajectoire du jet de Swift J1644+57. C'était un coup de chance: tous les TDE ne déclenchent pas de telles



L'événement PS1-10jh correspondrait à la dislocation d'une étoile par le trou noir supermassif au centre d'une galaxie. Il a été observé par les programmes d'observation *Galex* (en haut, en ultraviolet) et *Pan-STARRS* (en bas, dans les domaines visible et infrarouge). Les images à gauche sont prises en 2009 avant l'événement, celles de droite en 2010, tandis que le trou noir avalait l'étoile.

rafales relativistes, et la plupart de ceux qui le font passent hors de notre ligne de visée.

Avec la détection de Swift J1644+57, l'équipe de *Swift* a entamé une recherche concertée d'autres événements du même type. Début 2017, deux nouveaux TDE émetteurs de jets de rayons gamma ont été trouvés. La découverte de ces aspects si rares et intenses du trépas d'une étoile offre aux chercheurs l'occasion unique d'étudier un sujet important de l'astrophysique des hautes énergies : la formation de jets de particules relativistes et leurs propriétés.

MORTS PLANÉTAIRES

Que ce soit par les émissions thermiques des disques d'accrétion de débris stellaires ou bien à travers les rayons gamma qui se déversent des jets relativistes d'un trou noir en train d'avalir une étoile, les TDE ouvrent une nouvelle fenêtre pour comprendre le comportement et l'évolution des trous noirs supermassifs.

Un aspect essentiel des TDE est sa durée. Les quasars présentent aussi des jets et des disques d'accrétion, mais ils sont plus larges et durables, car produits par d'immenses nuages de gaz tombant sur un trou noir supermassif, et il n'est pas possible d'en étudier le cycle complet. À l'inverse, les astronomes ont déjà trouvé et étudié du début à la fin une vingtaine de TDE. Cela leur permet de scruter les plus petits détails de ces catastrophes stellaires et de révéler certaines surprises qu'il reste à comprendre ou des choses que l'on pensait impossible à observer. Par exemple, en mesurant avec précision l'éclat fluctuant des TDE, les astronomes obtiennent non

seulement des renseignements précieux sur les trous noirs, mais également des détails sur la composition et la structure interne des étoiles qui sont déchiquetées à plusieurs milliards d'années-lumière de nous.

Les chercheurs espèrent même un jour parvenir à obtenir des informations sur les compagnons d'une étoile – ses planètes, elles aussi englouties par le trou noir. Chaque scintillement en provenance d'une galaxie lointaine pourrait marquer la mort d'une planète entière. Les relevés des étoiles de la Voie lactée ont montré qu'elles hébergent presque toutes des planètes ; des planètes accompagnent donc probablement la plupart, sinon toutes, les étoiles victimes de TDE.

Et si les planètes n'étaient pas directement consommées, elles pourraient se retrouver sur la trajectoire des jets relativistes transitoires produits par certains TDE, qui s'étendent sur plusieurs années-lumière au-delà du trou noir. L'éventuelle vie sur une telle planète, frappée par un faisceau de particules énergétiques, serait rapidement anéantie. Un jour peut-être, les astronomes verront un TDE dans notre propre jardin cosmique, si jamais une étoile perdue vient à être consommée par le trou noir de 4 millions de masses solaires qui se tapit au centre de la Voie lactée, où il sommeille en raison de la raréfaction du gaz. L'événement serait très brillant, mais sans risque puisque nous sommes trop loin du centre galactique pour que les effets les plus dangereux du TDE nous atteignent sur Terre.

L'avenement de relevés du ciel encore plus performants annonce une nouvelle ère de découvertes pour les TDE. Le *LSST* (*Large Synoptic Survey Telescope*, grand télescope d'étude synoptique), en cours de construction au Chili, couvrira 10 degrés carrés du ciel et mettra au jour à lui seul des milliers de ces explosions dans la décennie qui suivra sa mise en service. À certains égards, le plus grand défi sera de passer au crible la multitude de découvertes de sources transitoires. Des projets d'observatoires radio, tels que le SKA (*Square Kilometer Array*, réseau de un kilomètre carré), en cours de construction en Australie et en Afrique du Sud, sont particulièrement adaptés à l'identification de jets relativistes, même si ces derniers ne pointent pas directement le long de notre ligne de visée.

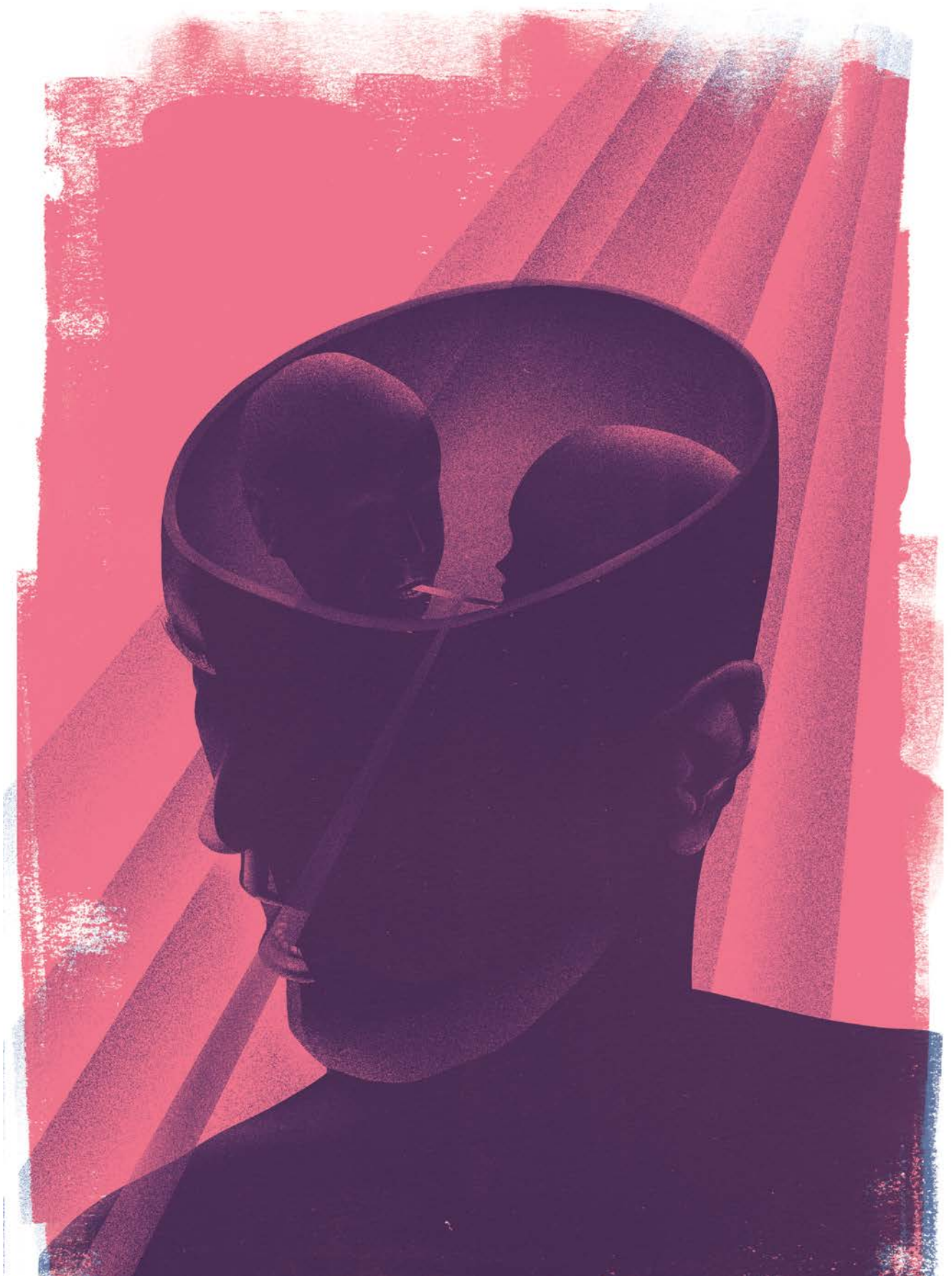
Dans un avenir assez proche, les astronomes auront assemblé un catalogue de TDE répertoriant des milliers d'événements, plus qu'un seul homme pourrait étudier en une vie entière. Il en résultera un éclairage nouveau sur la masse et le comportement de ces monstres affamés que sont les trous noirs supermassifs, tapis au cœur des galaxies partout dans l'Univers. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Gezari et al., **PS1-10jh continues to follow the fallback accretion rate of a tidally disrupted star**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 815(1), L5, 2015.

S. Gezari et al., **An ultraviolet-optical flare from the tidal disruption of a helium-rich stellar core**, *Nature*, vol. 485, pp. 217-220, 2012.

J. S. Bloom et al., **A possible relativistic jetted outburst from a massive black hole fed by a tidally disrupted star**, *Science*, vol. 333, pp. 203-206, 2011.



L'ESSENTIEL

> Pour la plupart d'entre nous, il est habituel de parler dans sa tête. Les psychologues nomment discours ou langage intérieur ce phénomène.

> La conversation avec soi-même a notamment pour fonction de nous aider à planifier, à réguler nos émotions et à être créatif. Mais elle a été peu étudiée.

> Récemment, en partie grâce à des techniques d'imagerie du cerveau en activité, des découvertes notables ont été réalisées.

> Ces travaux révèlent des fondements neuronaux de ces conversations mentales et mettent en lumière certains aspects du fonctionnement de l'esprit.

L'AUTEUR



CHARLES FERNYHOUGH
professeur de psychologie
à l'université de Durham,
en Angleterre

Le discours intérieur, une fenêtre sur l'esprit

CONVERSER MENTALEMENT AVEC SOI-MÊME
FAIT PARTIE DU QUOTIDIEN DE CHAQUE INDIVIDU.
QUEL EST LE RÔLE DE CE LANGAGE INTÉRIEUR
ET QUELLES SONT SES CARACTÉRISTIQUES ?
L'IMAGERIE DU CERVEAU EN ACTIVITÉ APPORTE
UN ÉCLAIRAGE SUR CES QUESTIONS.

La sonnerie du réveil m'arracha à mon sommeil. Il était tôt. J'étais dans une chambre d'hôtel, à Londres, pas très loin du siège de la BBC. J'avais mal dormi. Quand je me suis regardé dans le miroir de la salle de bain, j'y ai aperçu un être pâle et légèrement apeuré. J'étais un peu nerveux et c'était bien normal. Dans l'heure qui allait suivre, j'allais m'adresser en direct à la radio à des millions d'auditeurs dans l'émission phare de la BBC, *Start the Week*. Soudain, le regard plongé dans le miroir, je me rendis compte que je parlais silencieusement dans ma tête. Les paroles que je m'adressais me rassuraient : « Détends-toi, ce n'est pas la première fois que tu participes à cette émission. » Certes, j'avais l'impression de me parler à moi-même, mais j'entendais aussi une petite voix interne et familière.

Nous vivons tous cette situation au quotidien : des pensées, des images et des sensations nous traversent l'esprit quand nous sommes dans notre bain, en train d'émincer des oignons ou d'attendre l'ascenseur. Quand on leur demande de décrire ce qui se passe dans leur

tête, les gens disent souvent que leur vie intérieure est peuplée d'une multitude de mots. Les psychologues utilisent les termes de discours ou langage intérieur pour décrire ce phénomène.

Le « discours privé », consistant à se parler à soi-même de manière audible, est son cousin. Si vous vous dites : « N'oublie pas d'acheter du café », ou : « Concentre-toi sur ton objectif » sans émettre un son, alors vous utilisez le discours intérieur. Si vous dites à peu près la même chose à voix haute, il s'agit de discours privé.

Ces deux formes d'expression semblent avoir plusieurs objectifs, dont ceux de planifier et contrôler notre comportement. Elles ont aussi pour fonction de réguler nos émotions et d'encourager notre créativité. Chez l'adulte, le discours intérieur tend à être plus fréquent que le discours privé ; il intéresse tout particulièrement les psychologues, car c'est sans doute la forme de langage qui occupe la plus grande place dans notre pensée. C'est probablement aussi la plus difficile à étudier.

Quand j'ai entamé mes travaux de recherche dans les années 1990, il n'existait pratiquement aucune littérature scientifique sur le sujet. Depuis deux ou trois décennies, la situation a

beaucoup changé, notamment parce que les chercheurs ont mis au point de nouvelles techniques expérimentales pour étudier le discours intérieur. Nous avons maintenant une idée plus précise de la façon dont il fonctionne et de ses différentes formes. De même, nous savons mieux en quoi il peut être bénéfique ou nuire à celui qui pense et raisonne. En fait, nous commençons à prendre conscience que l'existence du discours intérieur permet de répondre à certaines grandes questions relatives à l'intellect et au cerveau.

LE DISCOURS PRIVÉ ET LE DISCOURS INTÉRIEUR

Henri est allongé sur son tapis de jeu, un petit train dans chaque main, s'extasiant devant la ville imaginaire qu'il s'apprête à construire. «D'abord, les voitures. Et puis un grand train», se dit-il. Henri a trois ans. Entrez dans n'importe quelle crèche ou école maternelle, n'importe où dans le monde, et vous verrez (et entendrez) quelque chose de similaire. Une classe entière d'enfants pensant tout haut, c'est même assez bruyant. Or ce phénomène naturel qu'est le discours privé fournit des éléments significatifs sur les zones de notre cerveau d'où proviennent ces mots.

Les spécialistes se penchent depuis longtemps sur le discours privé des jeunes enfants. Dans les années 1920, Jean Piaget, psychologue suisse spécialiste du développement cognitif, avançait que ce type de monologue reflétait l'incapacité des jeunes enfants à prendre en compte le point de vue des autres et à adapter leur discours à ceux qui les écoutent. Dans cette optique, le discours privé résulterait d'une incapacité à communiquer avec autrui. C'est pourquoi on pensait que ce type de discours était abandonné au fur et à mesure que l'enfant grandissait et devenait plus apte à prendre en compte le point de vue de ses interlocuteurs.

Dans les années 1930, un psychologue russe du nom de Lev Vygotski émit une autre hypothèse, selon laquelle les enfants réutilisent délibérément des termes qu'ils ont déjà réussi à employer dans le cadre d'une interaction sociale avec d'autres personnes. Au lieu d'influer sur le comportement d'autrui, ils s'en serviraient pour se contrôler eux-mêmes. Au cours des récentes décennies, les recherches sont venues étayer la théorie de Vygotski sur la façon dont le discours intérieur se développe et acquiert peu à peu ses fonctions.

J'ai découvert les écrits de Vygotski sur la psychologie du développement quand j'étais étudiant, et je me souviens d'avoir été frappé par la simplicité de son idée. J'avais alors le sentiment que la théorie du développement de la pensée verbale devait être autrement compliquée. Mais bien que l'idée de base ait été claire, ses ramifications se révélaient assez complexes. Vygotski sous-entendait que le monologue

silencieux, dans lequel on s'engage lorsqu'on est adulte, est une version intériorisée des conversations que nous avons avec les autres lorsque nous sommes des enfants en plein développement. Près d'un siècle plus tard, moi-même et d'autres spécialistes du langage intérieur ne faisons que commencer à décortiquer ce que les intuitions et réflexions de Vygotski apportent à la compréhension du fonctionnement des mots dans notre pensée.

L'une des implications les plus importantes de la théorie de Vygotski est que le discours intérieur aurait la même structure que la conversation à voix haute: c'est-à-dire la qualité d'un dialogue entre différents points de vue. Cette conception de la pensée vue comme un dialogue intérieur n'est pas nouvelle – elle remonte au moins jusqu'à Platon –, mais elle est fascinante

Dans les années 1930, Lev Vygotski avance des idées différentes de celles de Jean Piaget sur le discours intérieur

car elle permet précisément de redéfinir certains mystères de la cognition humaine.

L'un d'entre eux a trait au contrôle: comment se fait-il qu'un système intelligent puisse trouver, et mettre en œuvre, de nouvelles idées sur la manière d'agir? Un robot peut être tout à fait capable de réagir à ce qui survient dans son environnement, mais qu'est-ce qui pourrait bien lui donner l'idée de faire quelque chose pour lui-même? Si le système a besoin qu'on lui dise quoi faire, alors il lui manque l'une des essences de l'intelligence.

Ce qui m'intéressait au plus haut point dans le dialogue, c'est que, par sa nature même, il permet l'autorégulation. Lorsque vous conversez avec quelqu'un, il n'y a pas de tierce personne maniant une baguette de chef d'orchestre pour vous indiquer quel tour doit prendre la conversation. Vous et votre interlocuteur la gérez vous-mêmes à travers le processus normal du questionnement, de la réponse, de la contestation, de l'accord, et ainsi de suite. Comprendre le monologue en ces termes

▢ demandé de mener intérieurement une conversation entre deux points de vue. Dans les deux cas, nous avons proposé un thème, par exemple une visite du participant de son ancienne école. En ce qui concernait le monologue, les participants devaient prononcer un discours devant des élèves. Pour le dialogue, ils devaient discuter avec l'ancien principal de leur collège.

DES DIFFÉRENCES ENTRE MONOLOGUE ET DIALOGUE

Nous prédisions que ces deux types de discours intérieur feraient appel aux systèmes de langage classiques qui s'activent quand on demande à des personnes de parler : en particulier, les aires cérébrales situées à la frontière entre les lobes frontal et temporal de l'hémisphère gauche du cerveau et une zone située davantage à l'arrière, au niveau du gyrus temporal supérieur. En outre, nous pensions que le discours intérieur, lui, présenterait des spécificités en ce sens qu'il solliciterait aussi des parties du cerveau connues pour être impliquées dans la prise en considération de ce que pensent les autres. Ces régions du cerveau soutiennent ce qu'on appelle notre système de cognition sociale. Celui-ci fonctionne pour nous aider à nous représenter ce que pensent, croient ou désirent les autres personnes.

Les résultats obtenus étaient en accord avec ces prédictions. Lorsque les participants étaient

engagés dans un dialogue intérieur, le réseau de langage semblait fonctionner conjointement avec une partie du système de cognition sociale, située dans l'hémisphère droit, près de la jonction entre le lobe temporal et le lobe pariétal. Ce schéma n'apparaissait pas quand les participants produisaient un monologue silencieux. Bien qu'il soit nécessaire de reproduire ces résultats pour les confirmer, ces données fournissent les indices préliminaires d'une collaboration, recouvrant les deux hémisphères cérébraux, entre deux systèmes dont on suppose généralement qu'ils ont des fonctions différentes. Ce lien neuronal entre le langage et la cognition sociale semble corroborer les intuitions de Lev Vygotski selon lesquelles, lorsque les gens se parlent à eux-mêmes, ils s'engagent dans une véritable conversation.

L'interprétation des données obtenues par neuro-imagerie exige de la prudence, notamment quand elles viennent, comme c'est ici le cas, contredire ce qui était admis jusque-là. Dans la plupart des études précédentes, on avait simplement demandé aux participants de se répéter, silencieusement, dans leur tête, un certain nombre de phrases, sous la forme d'un monologue intérieur, comme on le fait au supermarché quand on essaie de se souvenir des derniers articles inscrits sur la liste des courses. C'est extrêmement utile lorsque la situation l'exige, mais très loin des dialogues



x = independently organized TED event

@CentraieSupélec
30 NOVEMBRE 2017
➤ à 17h00

PRÉSENTE

AU SERVICE DU VIVANT

BIG DATA

ALGORITHMES

BLOCKCHAINS

GÉNÉTIQUE

Serons-nous capables de mettre en oeuvre la recherche et l'innovation au service de la vie ?

www.tedxsaclay.com














flexibles et créatifs qui surviennent intérieurement lorsque nous nous imaginons participer mentalement à un échange social.

Notre équipe a mis l'accent sur les propriétés conversationnelles du discours intérieur, même si ce que nous demandions aux participants restait, somme toute, assez peu naturel: se parler à soi sur demande et non pas attendre que le discours intérieur surgisse spontanément. Le problème est que les chercheurs en neurosciences cognitives ont besoin de contrôler les choses pour comprendre ce que signifient réellement les résultats d'une expérience. Attendre que le discours intérieur apparaisse de manière spontanée semble aller à l'encontre de l'idée qu'on se fait d'une méthode expérimentale rigoureuse.

Il nous faut trouver des moyens de capter le discours intérieur au moment où il se produit. Notre équipe a récemment fait un pas dans cette direction en utilisant une méthode élaborée, nommée sondage descriptif de l'expérience subjective, qui permet de recueillir la description que les gens font de leur expérience intérieure. En quoi consiste-t-elle?

Les participants sont entraînés à rendre compte de ce qu'ils expérimentent en eux-mêmes au moment où un signal sonore se déclenche. Ce procédé incite le sujet à se concentrer sur ce qu'il était en train de penser, ressentir, entendre, etc., juste avant que le signal sonne, et à prendre brièvement en note ces expériences au moment où elles surviennent. Le jour suivant, les volontaires sont interrogés en détail sur chacune de ces expériences captées au moment du déclenchement du signal sonore, de telle façon que les chercheurs puissent savoir s'il s'agit de parole intérieure, d'expérience sensorielle ou de l'un des autres phénomènes intérieurs répertoriés.

Mes collègues et moi avons réalisé une première en associant cette méthode performante à l'imagerie cérébrale par IRM fonctionnelle. Nous avons ainsi mené l'expérience classique sur la parole intérieure en demandant à chaque participant de prononcer dans sa tête, en silence, des mots particuliers, alors qu'il était allongé dans le tunnel de l'appareil d'IRM. Nous avons aussi utilisé la méthode du sondage descriptif de l'expérience subjective pour capter les moments de discours intérieur survenant spontanément. Nous avons sélectionné ceux pour lesquels nous étions quasiment certains qu'il s'agissait de parole intérieure, en nous fondant sur les entretiens que nous avons eus avec les volontaires, et nous avons comparé les activations cérébrales avec celles obtenues avec la tâche standard.

Les différences étaient frappantes. Alors que la méthode habituelle stimulait l'aire de Broca (partie du cerveau souvent impliquée dans la production de parole interne et externe), le discours intérieur spontané était associé à des régions activées plus à l'arrière, au niveau du

lobe temporal, dans le gyrus de Heschl. En termes de configuration de l'activation cérébrale, il y a un assez grand contraste entre le discours intérieur survenant de manière naturelle et celui qui a été provoqué sur demande.

Ces découvertes ont de vastes répercussions sur les méthodes d'investigation de l'expérience intérieure. Elles soulèvent des questions fondamentales sur la façon dont les chercheurs abordent l'étude du discours intérieur et sur ce que l'on peut supposer à propos de *tout* type d'expérience mentale susceptible d'être provoquée sur demande. Elles mettent en évidence le besoin de ce que j'appellerais une *slow neuroscience*: mettre les techniques neuroscientifiques au service de descriptions très minutieuses de l'expérience humaine.

Il existe d'autres raisons de prendre soin de bien décrire le discours intérieur sous toutes ses formes. Selon la théorie de Vygotski, le dialogue et le monologue ne sont pas les seules variables de cette conversation que l'on a avec soi-même. L'une des caractéristiques de son hypothèse réside dans l'idée que, le langage devenant intériorisé pour constituer un discours privé puis intérieur, sa forme change.

LE DISCOURS INTÉRIEUR TEND À ÊTRE CONDENSÉ

Vygotski voyait plusieurs façons dont cela pouvait se traduire, notamment par différents types d'expressions abrégées ou condensées. Quand j'étais anxieux dans ma chambre d'hôtel londonienne, je me suis surpris à prononcer toute une phrase qui m'était totalement adressée: «Ce n'est pas la première fois que tu participes à cette émission.» D'habitude, le langage que j'utilise pour me parler à moi-même est beaucoup plus dépouillé. Quand je cuisine, par exemple, si j'entends un son strident je peux me dire: «C'est la minuterie du four qui sonne.» Mais il est beaucoup plus probable que je m'écrie: «Le minuteur!»

Vygotski a noté que le discours intérieur et le discours privé étaient souvent abrégés, comparés aux paroles que l'on prononce quand on s'adresse à autrui. Quand on se parle à soi-même, il est en général inutile de composer des phrases complètes. L'écrivain Vladimir Nabokov avait remarqué combien notre pensée peut prendre une forme condensée, comparé à ce que nous pourrions exprimer à haute voix. «Nous ne pensons pas en mots, mais en ombres de mots», avait-il écrit dans ses notes prises pour son roman *Feu pâle*, d'après un entretien qu'il a accordé en 1964.

Bizarrement, jusqu'à une époque récente, personne n'avait exploré cet aspect du langage interne. Simon McCarthy-Jones, actuellement au Trinity College de Dublin, et moi avons mis en ligne un questionnaire pour interroger les gens sur les différents aspects du discours

interieur. Notre équipe a aussi utilisé une application sur smartphone pour réunir ce type de données pendant que les gens vaquent à leurs occupations quotidiennes.

Les résultats de cette étude initiale, publiés en 2011, attribuent quatre principales caractéristiques au discours intérieur: sa nature dialogique, sa tendance à être condensé, la possibilité qu'il inclue la voix d'autres personnes, et son rôle dans l'évaluation et la motivation de notre comportement. Seule une minorité de gens ont indiqué que leur discours intérieur avait tendance à être condensé, mais cette caractéristique est suffisamment courante pour justifier des investigations supplémentaires.

Surtout, ces travaux de recherche fondés sur des questionnaires confirment l'idée que le discours intérieur n'est pas uniforme. Il semble apparaître sous divers aspects pouvant s'adapter à diverses fonctions et qui ont probablement différents substrats neuronaux. À l'avenir, il sera fondamental d'essayer de comprendre si le cerveau traite de la même manière le discours intérieur condensé et sa forme extensive, développée. Pour ce faire, il faut soit trouver le moyen de susciter expérimentalement le discours intérieur dans sa forme condensée lors d'un examen par imagerie cérébrale, soit tenter de le capter quand il surgit naturellement. Le discours intérieur reste un sujet de recherche assez insaisissable.

LA CLÉ DE LA CRÉATIVITÉ

L'étude du discours intérieur a fait de grandes avancées depuis les années 1990. L'une des facettes de la vie mentale, que la science avait tendance à considérer comme impénétrable, a pu être explorée grâce aux nouvelles méthodes expérimentales et techniques neuroscientifiques. En l'occurrence, cet aspect intime de la conscience pourrait offrir un éclairage sur certaines caractéristiques de l'esprit humain.

Pour commencer, le discours intérieur peut fournir des indices sur l'origine de la créativité humaine. Lorsqu'on est doté de l'architecture permettant de mener à bien une conversation interne, on peut l'utiliser de toutes sortes de manières, pour discuter avec soi-même ou mener une conversation avec une entité non présente. Parce que nous avons intériorisé les dialogues que nous avons eus avec certaines personnes, nous pouvons envisager de nous entretenir avec d'autres interlocuteurs, qu'ils soient présents ou non, vivants ou non, réels ou inventés. Mes dialogues avec Dieu, un parent décédé ou un ami imaginaire peuvent être aussi riches et créatifs que ceux que j'ai avec moi-même. Se poser des questions puis y répondre peut se révéler un dispositif crucial pour pousser nos pensées vers de nouveaux territoires.

Une autre expérience familière liée au discours intérieur se produit lorsque nous lisons un roman. Les neuroscientifiques ont montré que

lire le discours d'un personnage de fiction active les mêmes zones du cerveau que celles mises en œuvre pour traiter la voix d'autres personnes. Dans un sondage en ligne, notre équipe a récemment interrogé un vaste échantillon de lecteurs assidus sur les «voix» qu'ils entendaient quand ils lisaient un livre. À peu près un sur sept a répondu que la voix des personnages de son roman résonnait dans sa tête de façon aussi vivante que si quelqu'un parlait réellement dans la même pièce que lui.

Des participants nous ont donné de plus amples détails sur l'expérience qu'ils avaient des voix des héros peuplant leurs lectures. À l'aide d'outils d'analyse narrative utilisés en recherches et études littéraires, nous avons examiné leurs descriptions afin d'obtenir davantage d'indices sur la façon dont la littérature avait le pouvoir de coloniser nos pensées. Chez certains, la voix des personnages de fiction continue de résonner en eux bien après qu'ils ont refermé leur livre. Quelques-uns, même, vivent avec leurs personnages. Par exemple, ils aiment observer ce qui se passe dans leur vie quotidienne à travers les yeux de Mrs Dalloway (l'héroïne du roman éponyme de Virginia Woolf). Ces observations nous fournissent des indices essentiels sur la façon dont notre mental représente la voix et le caractère des êtres sociaux que nous côtoyons.

La nouvelle science du discours intérieur nous dit qu'il est tout sauf un processus solitaire. Sa puissance vient en grande partie de la façon dont il orchestre le dialogue entre différents points de vue. Comme la collaboration que mes collègues et moi avons perçue entre la fonction du langage située dans l'hémisphère gauche et le réseau de cognition sociale de l'hémisphère droit, le discours intérieur doit être capable de se connecter aux autres systèmes neuronaux selon les besoins de la situation – lorsque nous pensons verbalement au passé et à l'avenir, quand nous utilisons des mots pour nous encourager à accomplir certaines tâches ardues, ou quand, tout simplement, notre esprit vagabonde, sans objectif particulier. L'étude de la pensée verbale devrait nous aider à élucider toutes ces caractéristiques de notre cognition.

Le discours intérieur est, somme toute, si banal qu'il a été, jusqu'ici, l'objet de bien peu d'attention de la part des scientifiques. Néanmoins, la prochaine fois que vous vous motiverez verbalement pour relever un défi ou faire face à une difficulté, que vous vous surprenez à vous adresser à vous-mêmes en plein dilemme, que vous vous réprimandez après avoir commis une bêtise, ou que vous planifierez votre soirée en vous parlant à voix haute, interrogez-vous sur ce petit prodige de votre vie intime et sur les mots que vous vous dites. Dans la vie de tous les jours, comme au sein d'un laboratoire, les voix du discours intérieur ont beaucoup à nous apprendre. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Alderson-Day et al., **Uncharted features and dynamics of reading : Voices, characters, and crossing of experiences**, *Consciousness and Cognition*, vol. 49, pp. 98-109, 2017.

M. Perrone-Bertolotti et al., **Langage intérieur**, dans S. Pinto & M. Sato (éds.), *Traité de neurolinguistique*, De Boeck Supérieur, pp. 109-123, 2016.

B. Alderson-Day et al., **The brain's conversation with itself : Neural substrates of dialogic inner speech**, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, vol. 11(1), pp. 110-120, 2016.

S. Kühn et al., **Inner experience in the scanner : Can high fidelity apprehensions of inner experience be integrated with fMRI ?**, *Frontiers in Psychology*, vol. 5, article 1393, 2014.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ

OFFRE
SPÉCIALE
NOËL

FORMULE
INTÉGRALE

-46%



FORMULE
PASSION

-34%



FORMULE
DÉCOUVERTE

-33%



8,20€*

6,50€*

4,90€*

EN CADEAU AVEC VOTRE ABONNEMENT LE LIVRE "RELATIVITÉ ET QUANTA : UNE NOUVELLE RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE..."

LHC, particules, trous noirs, cosmologie... Enfin un point clair et concis sur la dernière révolution scientifique !

Ces trois dernières années, les moissons scientifiques ont été exceptionnellement fructueuses, de la découverte du boson de Higgs à celles des ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs massifs, et aux observations du fond cosmologique par le satellite Planck. L'humanité vient alors d'atteindre un nouveau palier dans la compréhension du monde quantique et du monde de la gravitation : nos bases théoriques, expérimentales et technologiques forment un socle scientifique solide pour aller plus loin et tenter de répondre aux nouvelles questions qui surgissent suite à ces découvertes... Enquête et mise au point sur une révolution en cours.

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ **OUI**, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ FORMULE **INTÉGRALE**

12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996
+ Le livre "Relativité et quanta :
une nouvelle révolution scientifique..."

8,20€
Par mois
-46%

PPV8E20K9

☐ FORMULE **PASSION**

12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries
+ Le livre "Relativité et quanta :
une nouvelle révolution scientifique..."

6,50€
Par mois
-34%

PPV8E50K8

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**

12 n° de Pour la Science
+ Le livre "Relativité et quanta :
une nouvelle révolution scientifique..."

4,90€
Par mois
-33%

DPV4E90K2

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____
Ville : _____
Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____ @ _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

7AG17481r

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) : _____
IBAN : _____
(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives et la valeur du livre. Vous pouvez également si vous le souhaitez acquérir séparément le livre "Relativité et quanta : une nouvelle révolution scientifique..." au prix de 10€, chaque n° de Pour la Science au tarif de 6,50€, notre n° spécial au tarif de 6,95€ et nos hors-séries au tarif de 7,50€. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/03/2018 en France métropolitaine uniquement et dans la limite des stocks disponibles. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélevement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.

La nouvelle édition numérique de l'*Encyclopédie* s'appuie sur l'un des rares exemplaires complets de sa première édition (1751-1772), conservé à la bibliothèque Mazarine, à Paris. Jusqu'au 19 janvier 2018, l'exposition « Oser l'*Encyclopédie* » y met en relation l'édition numérique et cet exemplaire original.



L'ESSENTIEL

> L'*Encyclopédie* de Diderot et D'Alembert regorge de petites histoires, querelles et mésaventures, qui, hors de leur contexte, échappent au lecteur.

> Depuis une vingtaine d'années, des historiens démêlent cet écheveau afin d'en proposer une édition numérisée critique accessible.

> Celle-ci, enfin disponible et augmentée en permanence, invite à de nombreux voyages.

> Balbutiements de la chimie, querelles hydrodynamiques, hésitations sur la nature du froid, critiques glissées dans des articles consacrés à d'innocents noms de lieux... Bienvenue dans le monde souterrain de l'*Encyclopédie* !

L'AUTEUR



PIERRE CRÉPEL
membre de l'Académie
des sciences et
belles-lettres de Lyon et
de l'équipe de l'ENCCRE

Les dessous de l'*Encyclopédie*

L'ENCYCLOPÉDIE DE DIDEROT ET D'ALEMBERT EST LOIN D'ÊTRE UN TEXTE SANS ÂME ÉCRIT AU KILOMÈTRE. EN TÉMOIGNE UNE NOUVELLE ÉDITION NUMÉRISÉE CRITIQUE ET COLLABORATIVE, OÙ L'ON SE PERD AVEC DÉLICE À LA RECHERCHE DES RÈGLEMENTS DE COMPTE ET DES OPINIONS PASSÉES EN DOUCE...

Le 19 octobre, l'Édition numérique collaborative et critique de l'*Encyclopédie* de Denis Diderot et Jean le Rond D'Alembert – ENCCRE – a été mise en ligne par l'Académie des sciences. Pourquoi produire une nouvelle édition, me direz-vous ? Il en existe de multiples réimpressions sur papier. Et de toutes sortes sont déjà en ligne, tant en mode image qu'en mode texte ! Vous objecterez aussi peut-être que certes, le « Discours préliminaire » de D'Alembert ou quelques grands articles de Diderot, Voltaire, Rousseau, Turgot, Quesnay, d'Holbach valent encore le déplacement ; certes, les planches sont jolies ; mais 95 % du reste n'a plus guère d'intérêt et seuls quelques spécialistes ont besoin de les consulter occasionnellement. Alors ? Pour le comprendre, un petit voyage dans le dédale de ce best-seller des Lumières n'est pas inutile.

Sa rédaction a eu lieu entre le milieu du XVIII^e siècle et la Révolution. Les questions agitées à son sujet par les historiens et les philosophes depuis au moins deux siècles sont nombreuses : l'*Encyclopédie*, est-ce plutôt

Montesquieu ? Plutôt Voltaire ? Ou Rousseau ? Ou d'Holbach ? Ou autre chose ? Sert-elle plutôt la bourgeoisie montante ? La noblesse éclairée ? Quelles relations entretient-elle avec l'Église (le Vatican, les évêques, les jésuites, les jansénistes, les dévots) ? Avec le pouvoir (le roi, Choiseul, la marquise de Pompadour, Malesherbes, les parlements...) ? A-t-elle « préparé » la Révolution ? Est-elle à la pointe ou non du « progrès », des sciences et techniques de son temps ? Les planches, la description des arts et métiers sont-elles une de ses spécificités, une nouveauté absolue ou une reprise ?

Je ne répondrai à aucune de ces questions. Mais si l'on veut tenter de donner son avis sur celles-ci et sur bien d'autres, il faut non seulement cesser de travailler sur du matériel flou ou brouillé, écrasé dans le temps et dans l'espace, comme si tout s'était passé à Paris en 1751, mais aussi déjouer les pièges, comprendre dans le détail ce qu'étaient à l'époque un livre, un libraire-imprimeur, un éditeur (quant à la vie intellectuelle, à la production, au commerce), comment on contournait la censure. Il faut acquérir de la lucidité sur l'état

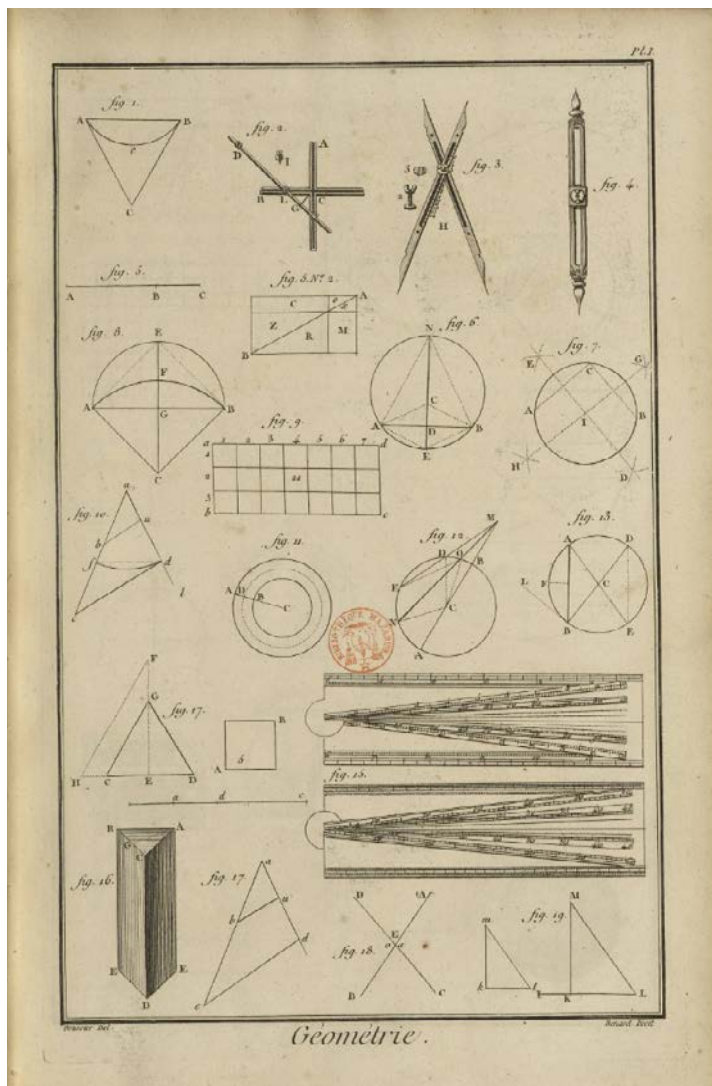
de la culture, de la lecture, des connaissances, sur ce que l'on n'appelait pas encore les «réseaux sociaux». Se limiter à l'étude de quelques articles phares, c'est déjà un biais. À défaut d'être un «bloc», l'*Encyclopédie* est un tout. La compréhension de ses parties médiocres ou erronées est nécessaire: la médecine y est plus proche de celle de Molière que de l'après Claude Bernard; la chimie est d'avant Lavoisier et, pour l'essentiel, fille de la pharmacie et de la minéralogie; de nombreuses régions du monde ne sont connues que par les missionnaires. Donc, même pour des questions scientifiques ou factuelles, il faut s'imprégner du contexte; cela est évidemment encore plus indispensable dans les domaines moraux, politiques et philosophiques.

UN ÉCHEVEAU INEXTRICABLE

D'abord, quelques données brutes et souvent mal connues. L'*Encyclopédie*, c'est 17 volumes in-folio de 1000 pages de texte chacun (1751-1765), 11 volumes de planches (1762-1772), plus 5 de *Supplément* (1776-1777) et 2 de table (1780). Soit 28 volumes pour la toute première édition, 35 avec le *Supplément* et la table. Une édition d'époque, complète, est introuvable ou sort parfois à des prix dépassant l'imagination. Il existe une réimpression en fac-similé de l'ensemble, parue vers le bicentenaire de la mort de Diderot en 1984, sous forme «compacte», c'est-à-dire en format réduit – quatre pages en une, ce qui représente 5 énormes volumes –, qu'on trouve dans toutes les grandes bibliothèques. Pour le reste, ce ne sont que des morceaux choisis de «discours» ou de planches, tous plus ou moins subjectifs.

Ont également été publiés, dans les décennies passées, au sein des œuvres complètes de tel ou tel grand auteur, l'ensemble de ses articles. C'est parfois assez facile: François Quesnay, le fondateur de la Secte des Physiocrates, le pionnier du traitement scientifique de l'économie, en a écrit cinq, dont trois seulement ont été effectivement publiés dans l'*Encyclopédie* («Évidence», «Fermiers» et «Grains»). Mais que faire pour D'Alembert, qui en a écrit environ 1700, Diderot (environ 6000), le chevalier de Jaucourt (environ 17000)? Et d'ailleurs, extraire des articles individuels d'un ensemble pensé collectivement, n'est-ce pas trahir?

À cela s'ajoute un écheveau parfois intricable de problèmes d'attribution d'articles non signés, mal signés, cosignés. Quant aux recueils d'articles par thèmes (philosophie, histoire, mathématiques...), ils ont été rarement tentés ce dernier siècle et n'ont débouché que sur des échecs, tant les découpages sont arbitraires et en général même indéfinissables. En conclusion, mis à part le fac-similé (et encore), il n'y a presque rien de propre.



Mais l'affaire est bien plus grave. Présenté naïvement, comme ci-dessus, l'ouvrage apparaît comme un objet achevé, statique, mort, alors que c'était, c'est et ce sera une affaire en devenir, dynamique, vivante. Rien que pour la première édition, dite de Paris, il existe des variantes de tirage et la définition d'un texte de référence n'est pas univoque. Plus fondamentalement, le processus regorge d'avant-textes, de variantes, d'après-textes, d'errata, de renvois, de débats internes, de commentaires instantanés. Il existe aussi des manuscrits (mais très peu), des travaux préparatoires, des consignes aux auteurs, des correspondances, des critiques, des réceptions immédiates dans les journaux, etc. Tout cela a des incidences sur les contenus. Déjà, un livre individuel, imprimé sous une seule édition, est toujours, pour un écrivain, un certain dialogue avec ses collègues, avec ses lecteurs, avec son temps. Raison de plus pour un ouvrage collectif aux éditions multiples.

En outre, il s'agit d'un dictionnaire encyclopédique, donc d'abord du «pillage» (ce

La première planche de mathématiques de l'*Encyclopédie* parut en 1767 (dans le volume V des planches). Les premiers lecteurs de l'article «arc», publié en 1751, ont ainsi dû attendre 16 ans avant de découvrir la figure associée (la figure 6 sur cette planche)...



LE PROJET ENCCRE

120 chercheurs de tous horizons, historiens des différents domaines de l'Encyclopédie, ingénieurs, étudiants et bénévoles font revivre cette œuvre majeure du XVIII^e siècle à travers une interface numérique qui permet non seulement d'en consulter une édition originale complète, mais aussi d'y naviguer facilement, grâce notamment à des éclairages ponctuels articulés avec le contenu. <http://enccre.academie-sciences.fr>

terme n'était pas péjoratif, c'était la loi du genre; d'ailleurs, à l'époque, ce que nous appellerions aujourd'hui les droits d'auteur était tout à fait confus), en partie avoué, en partie occulté, de deux, trois, dix dictionnaires qui l'ont précédé. En partie avoué, parce qu'il est clamé dès le *Prospectus* (l'ouvrage que Diderot publia pour annoncer le lancement de l'*Encyclopédie*) et le «Discours préliminaire»: le projet n'était au départ que la traduction améliorée de la *Cyclopaedia* anglaise d'Ephraïm Chambers (publiée à partir de 1728), laquelle avait déjà puisé largement dans le *Dictionnaire de Trévoux* (édition de 1721).

Des «vacataires» (dont D'Alembert) ont été payés à la page pour traduire «au kilomètre» l'ensemble de la *Cyclopaedia* et la distribuer aux collaborateurs en leur donnant comme consigne: vous pouvez laisser le texte tel quel, ou le corriger, ou l'amputer, ou ajouter ce que vous voulez, ou le mettre au panier et en écrire un autre. Une circulaire a même été rédigée spécialement à cette fin par le premier maître d'œuvre de l'entreprise, l'abbé de Gua de Malves, avant la reprise en main par Diderot et D'Alembert. Le signataire d'un article peut donc, de fait, n'en avoir pratiquement pas écrit une ligne et l'avoir entièrement copié. Inversement, un article signé Chambers ou jouissant d'une double signature (par exemple «Chambers. (O)», c'est-à-dire Chambers revu par D'Alembert), peut tenir son intérêt principal des petites modifications à la marge du réviseur, le reste étant banal.

Ce n'est pas tout. Pour le moment, nous avons fait comme s'il n'existait guère qu'une

à elle des différences importantes. Imprégnée de culture germanique et suisse, d'obédience plutôt protestante, elle diffère aussi dans les parties scientifiques, par exemple en physiologie et en astronomie. Des extraits sont aussi publiés un peu partout, même en feuilleton dans les périodiques comme le *Journal encyclopédique*. Et tout cela du vivant de Diderot et D'Alembert, à qui l'on n'a en général pas demandé l'avis. Ne parlons même pas des multiples projets avortés.

Puis, à partir de 1781, voire avant, se met en place une refonte totale «par ordre des matières», c'est-à-dire non plus par ordre alphabétique total, mais en trois volumes de mathématiques, cinq volumes de physique, trois volumes de jurisprudence, etc. L'aventure s'étend sur un demi-siècle. Les volumes – ou plutôt des «demi-volumes» – paraissent de 1782 à 1832, sans que leur articulation soit toujours parfaitement claire, en particulier pour les volumes de planches: il n'existe pas deux bibliothèques qui aient le même inventaire de ces quelque 200 volumes. Cela s'appelle l'*Encyclopédie méthodique*.

Au départ, l'entrepreneur libraire-imprimeur Charles-Joseph Panckoucke a distribué, aux maîtres d'œuvre des différents dictionnaires thématiques, des copies des articles de leur discipline, en les chargeant de les conserver tels quels ou de les modifier en fonction de leurs défauts ou de l'évolution des idées et découvertes. Pour certaines matières, les livres qui en sont sortis ressemblent à l'*Encyclopédie* de départ – c'est le cas pour les mathématiques, où disons 80% sont repris de D'Alembert et de l'abbé de la Chapelle; pour d'autres, cela n'a rien à voir. Entre-temps, Panckoucke est mort, la majorité des anciens collaborateurs aussi et tous les cas sont possibles. Entre-temps aussi, il y a eu la Révolution, l'Empire, la Restauration, voire la Monarchie de Juillet!

QUAND L'ORDRE ALPHABÉTIQUE S'ÉTALE SUR 20 ANS

Revenons à la première édition de l'*Encyclopédie*, celle dite de Paris, de 17 volumes de discours et 11 volumes de planches. Elle s'étend sur vingt ans et est lourdement tributaire de l'ordre alphabétique, du contexte politique, du recrutement ou du départ de collaborateurs et de leurs trajectoires de vie.

Les volumes de texte (I-VII) sortent au rythme approximatif d'un par an de 1751 à 1757, puis tous les autres (VIII-XVII) ensemble en 1765 après la crise et l'interdiction de 1758-1759 pour motifs religieux et idéologiques. Quant aux volumes de planches (XVIII-XXVIII), ils sont édités par matières, s'échelonnent entre 1762 et 1772 et leur parution n'a aucun rapport avec l'ordre alphabétique des articles, même si elle a un vague lien avec l'ordre

L'Encyclopédie regorge de variantes, d'errata, de renvois, de débats, de commentaires...

édition de ce qu'on appelle l'*Encyclopédie*. Mais ce n'est pas du tout le cas. Plusieurs autres, très proches (sans ou avec les Suppléments), toutes en français, ont été publiées à l'étranger – Lucques, Livourne, Genève, Neuchâtel, Lausanne, Berne – sous des formats divers. L'édition d'Yverdon, en Suisse, présente quant

▢ alphabétique des matières. Ainsi, un article de géométrie de la lettre A, paru en 1751, s'il fait appel à des figures, ne sera compréhensible par le lecteur qu'en 1767, lors de la parution des planches de cette discipline (voir la figure page 74).

Cet ouvrage immense, dont certains passages sont critiqués vis-à-vis des autorités établies, qu'elles soient politiques, religieuses ou économiques, se heurte aux pouvoirs en place et à leurs fluctuations. Il connaît deux interdictions. La première, très temporaire en 1752, a pour prétexte l'article « Certitude ». Cet article porte l'astérisque, signature de Diderot, mais, de fait, reproduit explicitement la thèse de l'abbé de Prades, qui prône une théologie libérale et moderne, condamnée par la Sorbonne. La seconde, plus longue, en 1759, est déclenchée par l'article « Genève » de D'Alembert, paru en 1757 dans le tome VII. Fortement inspiré des idées de Voltaire, cet article a suscité de vives protestations. Comme le dit Condorcet dans la *Vie de Voltaire*: « L'insurrection fut générale. Le *Journal de Trévoux*, la *Gazette ecclésiastique*, les journaux satiriques, les jésuites et les jansénistes, le clergé, les parlements, tous, sans cesser de se combattre ou de se haïr, se réunirent contre l'*Encyclopédie*. »

L'*Encyclopédie* connaît donc une phase « montante » de 1751 à 1757, avec un succès éditorial croissant, l'arrivée de nouveaux collaborateurs les plus prestigieux (dont Voltaire, Turgot, etc.), puis une phase « descendante » à partir de 1758, avec le retrait de D'Alembert de la codirection et le départ d'auteurs célèbres (certes en partie remplacés par d'autres de qualité), mais aussi la perte (sauf pour les planches) du « privilège royal » (c'est-à-dire l'autorisation d'imprimer et une certaine protection vis-à-vis des contrefaçons) et une impression à Neuchâtel, hors du royaume. Tout cela est connu, mais les conséquences sur les contenus des articles sont en général sous-estimées, voire éludées, par ceux qui lisent et commentent l'ouvrage aujourd'hui.

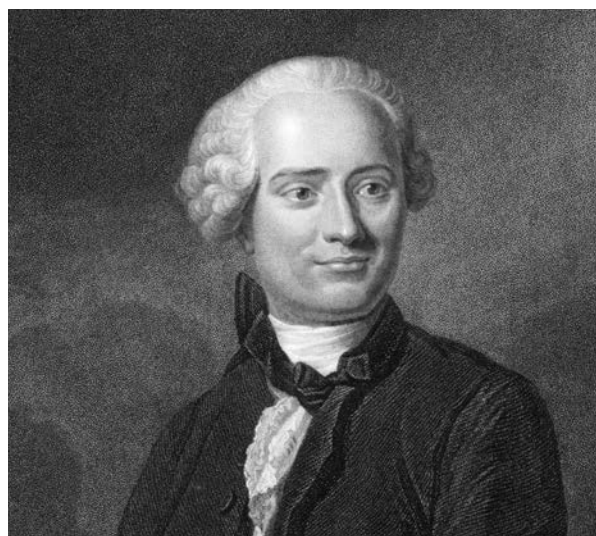
RÈGLEMENTS DE COMPTE

Les retombées perverses de l'ordre alphabétique ne touchent pas que les sujets politiquement ou idéologiquement brûlants. Elles concernent aussi les sciences; en voici quelques exemples. D'Alembert est en compétition et en relations tendues avec Daniel Bernoulli à propos de la mécanique des fluides. Il utilise alors certains articles, dans l'ordre où le hasard alphabétique a bien voulu les mettre, à la fois pour égrener les résultats de ses recherches nouvelles et pour régler ses comptes (fort poliment) avec son adversaire. L'article « Hydrodynamique » (tome VIII, 1765, mais prêt vers 1758) complète ainsi « Fluide » (tome VI, 1756); il y aura aussi des ajouts à

D'ALEMBERT À 300 ANS

Né le 16 novembre 1717, Jean le Rond, baptisé du nom de l'église parisienne au pied de laquelle il avait été abandonné (auquel il ajouta par la suite le nom D'Alembert), est surtout célèbre aujourd'hui comme codirecteur de l'*Encyclopédie* avec Diderot. Mais les étudiants se souviennent de

la « règle de D'Alembert » pour la convergence des séries en mathématiques, du « principe de D'Alembert » à la base de la mécanique ou de l'opérateur « d'alembertien », utilisé pour l'étude des ondes, voire du « théorème de D'Alembert » en algèbre. C'est son *Traité de dynamique*, publié en 1743, qui l'a rendu célèbre à 26 ans. Une édition critique et commentée de ses œuvres complètes est en cours depuis une vingtaine d'années : outre l'ENCCRE, sept volumes sont déjà publiés (CNRS Éditions), un autre paraît à l'occasion du tricentenaire et une quarantaine sont encore prévus...



« Résistance des fluides » (XIII, 1765). Voici un exemple, parmi d'autres, tiré de l'article « Hydrodynamique »:

M. Daniel Bernoulli a employé le principe des forces vives dans des cas où il n'aurait pas dû en faire usage. J'ajoute que ce grand géomètre a d'ailleurs employé ce principe sans le démontrer, ou plutôt que la démonstration qu'il en donne n'est point satisfaisante; mais cela n'empêche pas que je ne rende avec tous les savants, la justice due au mérite de cet ouvrage.

Prenons maintenant les articles consacrés aux nombres de 0 à 12. Ils sont insérés, non pas dans cet ordre, mais alphabétiquement, c'est-à-dire: cinq, deux, ... zéro. Tous sont très courts et sans intérêt sauf trois d'entre eux: « Huit », « Neuf » et « Onze ». Pourquoi? Parce qu'ils se situent au milieu de l'alphabet. Or à l'époque où les volumes correspondants sont rédigés, D'Alembert a recruté un homme passionné d'arithmétique, qui avait envoyé d'intéressants

mémoires à l'Académie des sciences au milieu des années 1750, à savoir Jean-Joseph Rallier des Ourmes, lequel a collaboré quelque temps à l'*Encyclopédie*, avant de se retirer. «Huit» contient des considérations sur la parité et les multiples de 2, «Neuf» et «Onze» des développements sur la base 10 (voisins de la preuve par 9, notamment), parce qu'ils sont respectivement 10-1 et 10+1.

De même, l'intérêt des articles «Froid», «Glace» et «Neige», également situés au milieu de l'alphabet, est lié au physicien Étienne-Hyacinthe de Ratte que D'Alembert a fait collaborer à peu près dans les mêmes années. La thermodynamique ne sera en effet constituée et élucidée qu'au XIX^e siècle. Vers 1750, le chaud et le froid étaient encore bien mystérieux et, pour l'essentiel, confinés dans de la physique empirique non mathématisée; la *Dissertation sur la glace* de Jean-Jacques Dortous de Mairan, qui a servi de base à ces articles, en est un témoignage représentatif. Il est souvent aussi instructif de voir les savants hésiter, tâtonner que de les voir exposer une théorie bien finie (voir la figure page 78).

DE L'ALCHIMIE À LA CHIMIE MODERNE

Les articles d'une matière donnée peuvent aussi totalement changer de couleur du fait de la mort ou du retrait de son principal auteur et de l'arrivée d'autres collaborateurs. La chimie, d'abord traitée par Paul-Jacques Malouin, pourtant membre de l'Académie des sciences, était fort médiocre dans les premiers volumes. Avec l'arrivée de Gabriel Venel (pharmacien du Languedoc) et du baron d'Holbach (très versé en minéralogie et dans la culture germanique), la chimie apparaît bien dans sa période de transition: on perçoit l'évolution entre une époque où elle se dégageait assez mal de l'alchimie, puis la période où le médecin et chimiste allemand Georg Stahl a développé la théorie du phlogistique (qui expliquait la combustion en postulant l'existence d'un élément-flamme au sein des corps combustibles) et, enfin, la révolution qui eut lieu à la fin du XVIII^e siècle autour d'Antoine-Laurent Lavoisier, le père de la chimie moderne.

La médecine, de son côté, a végété dans les premières lettres de l'alphabet, ballottée entre des morceaux de traduction du *Dictionnaire universel de médecine* du médecin anglais Robert James et la participation fugace d'Urbain de Vandesesse, docteur-régent de la Faculté de médecine de Paris, qui allait bientôt mourir. Elle trouve sa stabilité avec Jaucourt, élève de Herman Boerhaave – un botaniste, médecin et chimiste hollandais qui a renouvelé la didactique médicale –, et surtout Arnulphe d'Aumont, de l'école de Montpellier. Mais celui-ci

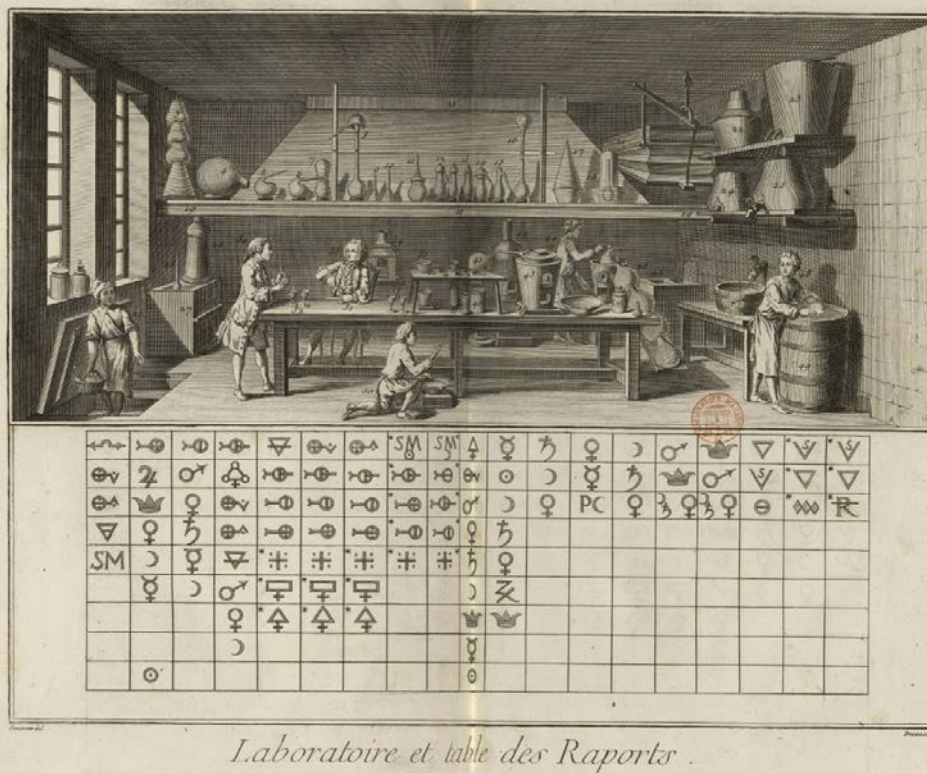
renonce (comme Voltaire et bien d'autres) à partir de l'interdiction de 1759, c'est-à-dire du tome VIII. Aux lettres H-I-J, il est remplacé par Jean-Joseph Menuret de Chambaud, qui en est assez proche. Diderot et Jaucourt se sont ainsi retrouvés, pour ce tome VIII, avec deux articles envoyés indépendamment, «Ictère» et «Jaunisse», qui disaient à peu près la même chose et ils ont choisi le second. On ne connaît le premier, en manuscrit, que parce que son auteur l'a envoyé à l'Académie des sciences, belles-lettres et arts de Lyon, comme témoignage de ses talents, en vue d'obtenir une place d'académicien associé.

DES BIOGRAPHIES CLANDESTINES

L'influence de l'ordre alphabétique et, plus généralement, de la façon concrète dont l'*Encyclopédie* est manufacturée, a d'autres incidences inattendues. Les encyclopédistes ont décidé,

La verrerie; la manufacture de porcelaine; l'art des émaux; la peinture sur le verre, qui n'est pas un art perdu malgré l'opinion publique; la poterie; la zymotechnie, ou l'art de disposer certaines substances végétales à la fermentation, qui comprend l'art de faire les vins; l'art du brasseur, & celui du vinaigrier; la halotechnie, ou l'art de préparer les fels; la pyrotechnie, ou l'art des feux d'artifice; celui du tanneur; la manufacture du savon; l'art des vernis; celui de graver à l'eau-forte; la teinture; la préparation des cornes, des écailles, & des poils des animaux; l'art du distillateur, celui du confiseur, & celui du limonadier, qui sont proprement trois branches de la Pharmacie; l'art du boulanger, panificium; la cuisine, &c. sont des arts tout chimiques. Voyez ces articles particuliers.

À l'époque où le pharmacien Gabriel Venel écrivit l'article «Chimie», les physiciens dédaignaient cette discipline, vue comme une sorte de parent pauvre de la leur. Dans son texte, Venel défend l'autonomie de la chimie et en souligne notamment ses nombreuses utilités (ci-contre). La planche ci-dessous, première de la série «Chimie», illustre le laboratoire chimique et la table des affinités entre certaines substances.



➤ au début, de ne pas faire d'entrées aux noms de personnes. Cela n'empêche pas l'existence de passages historiques et biographiques sur Aristote ou Descartes, à «Aristotélisme» et «Cartésianisme», où l'on ne peut pas ne rien dire sur la vie de ces grands hommes. Mais, au fur et à mesure des volumes, donc de l'alphabet, les éditeurs s'aperçoivent qu'une encyclopédie sans biographies, c'est boiteux. Alors on instille quelques remarques sur la vie des personnages, peu à peu, dans les articles consacrés à leur lieu de naissance.

Le premier que nous ayons trouvé est «Champagne» où Diderot signale en passant, juste à la fin, que La Fontaine y est né (il considérait que Château-Thierry était en Champagne). Ensuite, on trouve «Cos», où Jaucourt note que cette île «a eu l'honneur d'être la patrie d'Hippocrate et d'Appelles, les deux plus grands hommes du monde pour la médecine et la peinture». Il y ajoute même une anecdote significative, dont il s'excuse presque.

Jaucourt continue petitement à la lettre F, mais il faut attendre la lettre J et «Joinville» pour voir un développement, une vraie notice biographique à un nom de lieu: il s'agit alors de régler son compte au cardinal de Lorraine, catholique fanatique, qui a participé à la Saint-Barthélémy. La méthode va monter en puissance, d'autant plus qu'il s'agit de rattraper le temps et les mots perdus au début de l'alphabet. Elle atteint ses sommets à la lettre W: on y dénombre 96 notices biographiques, dont 17 couvrent plus d'une colonne.

LES TRÉSORS DU W

Cette lettre W, essentiellement composée de noms géographiques britanniques, allemands, hollandais, est une occasion d'introduire des informations sur les cultures et religions (protestantes) de ces pays, fort négligées aux lettres précédentes. «Wolstrobe», ville natale d'Isaac Newton, permet d'insérer une biographie du savant et une idée de ses travaux. Dans le même tome XVII, à l'entrée «Vitri-le-François», Jaucourt a donné un intéressant aperçu (inspiré de Fontenelle) de l'œuvre d'Abraham de Moivre, disciple de Newton, non sans égratigner la révocation de l'Édit de Nantes (de nombreux protestants quittèrent la ville à ce moment-là, dont de Moivre, qui s'exila à Londres); et, à l'entrée «Wight l'île de», il a fourni un exposé assez détaillé des recherches de Robert Hooke, à certains points de vue concurrent de Newton. Ainsi trouvons-nous, dans ce dernier tome de l'*Encyclopédie*, de quoi nous remettre à flot sur quelques grands moments de l'apogée de la science anglaise, notamment autour des *Principia* de Newton, c'est-à-dire du calcul infinitésimal et de l'attraction universelle. On arriverait à des conclusions similaires pour bien

d'autres domaines de la connaissance, en médecine, en philosophie, en droit.

La religion n'est pas épargnée non plus. De nombreux historiens, philosophes et littéraires ont étudié les rapports de l'*Encyclopédie* aux religions et aux églises. Si pratiquement tous les encyclopédistes étaient hostiles aux «dévots», aux fanatiques et à ceux qui suivaient l'Église par pur intérêt, ils n'en étaient pas moins très divers à ce sujet, à commencer par Diderot, Rousseau et Voltaire. Nécessairement, cela se ressent dans les articles, selon les auteurs. Par ailleurs, les parlements (plutôt jansénistes), les jésuites (encore puissants dans la décennie 1750), l'entourage royal, la censure veillent au grain et on ne peut écrire n'importe quoi. Il faut donc présenter une vitrine conformiste, en l'occurrence l'abbé Mallet, ainsi présenté dans le *Discours préliminaire*: «La théologie est de M. Mallet, docteur en théologie de la Faculté de Paris, de la maison et société de Navarre, et professeur royal en théologie à Paris. Son savoir et son mérite seul, sans aucune sollicitation de sa part, l'ont fait nommer à la chaire qu'il occupe, ce qui n'est pas un petit éloge dans le siècle où nous vivons.»

L'abbé Mallet n'est pas un fanatique, mais il donne une image assez lisse, neutre et banale de la religion et de ses institutions. Ce qui peut être piquant va se trouver non dans des articles comme «Dieu», «Église», «Prêtre», «Religion», mais à des endroits où on a davantage de mal à les débusquer. En outre, on ne peut pas tout à fait dire la même chose en 1751, en 1757 (lorsqu'on a le privilège royal) ou en 1765 (quand on est imprimé à Neuchâtel, protégé par Frédéric II, sans privilège et après l'expulsion des jésuites). Voici quelques exemples de points de vue sur des auteurs religieux introduits par le chevalier de Jaucourt, pour

Le froid lie les corps ; il leur donne de la fermeté & de la consistance ; il augmente la solidité des uns, il diminue la fluidité des autres ; il rend même entièrement solides la plupart de ces derniers, lorsqu'il a atteint un certain degré, susceptible de plusieurs variétés déterminées par les circonstances, & qui d'ailleurs n'est pas le même, à beaucoup près, pour tous les fluides dont il est ici question. On ne sauroit nier au-moins qu'il n'accompagne toujours la congélation. Le froid produit beaucoup d'autres effets moins généraux, qui paroissent se rapporter à ceux que nous venons d'indiquer.

Dans l'article «Froid» de l'*Encyclopédie*, assez long, la nature du froid est discutée à travers les idées de différents savants et philosophes, fondées sur l'expérience. Puis viennent les réflexions, toutes aussi empiriques, sur la cause du froid. L'*Encyclopédie* témoigne des tâtonnements de l'époque, ici pour comprendre le chaud et le froid avant l'avènement de la thermodynamique.

Il s'agit alors de régler son compte au cardinal de Lorraine, catholique fanatique

BIBLIOGRAPHIE

A. Cernuschi et al., **Oser l'Encyclopédie, un combat des Lumières**, EDP Sciences, 2017.

Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie, 51 numéros, 1986-2016 : rde.revues.org

P. Crépel, D'Alembert, mathématicien des Lumières, *Les Génies de la Science*, n° 39, 2009.

J. Proust, **Diderot et l'Encyclopédie**, Armand Colin, 1962.

Cet article est une adaptation de : P. Crépel, **L'Encyclopédie : Pourquoi une nouvelle version électronique ?**, *La Pensée*, n° 390, avril-juin 2017. Nous remercions la revue *La Pensée* pour son aimable autorisation.

l'essentiel à la lettre W: Brentius, né à Weil en 1499, est présenté comme un pasteur plus modéré et plus doux que Luther; Barlow (West-Morland) est montré comme un des premiers calvinistes timidement tolérants; Mill (West-Morland) est décrit à travers ses doutes sur le culte de la Vierge Marie, Wharton (Worsted) par sa position contre le célibat des prêtres et Hunnius (Wurtemberg) par son combat contre les luthériens fanatiques; quant à Hooper (Worcestershire), c'est surtout son traité du carême qui intéresse, car il y défend que durant cette période, on fait un peu comme on veut, entre 1 et 40 jours de jeûne...

On notera, dans le même tome XVII, deux articles sur Jean Wiclef, professeur de théologie à l'université d'Oxford au xiv^e siècle: l'un à «Wiclefites», non signé, est une charge d'un catholique contre ce précurseur des protestants; l'autre de Jaucourt à «Yorck-shire», dit à peu près le contraire! Ce n'est pas la seule incohérence voulue, soit à l'insu des auteurs, soit de leur plein gré (soit à l'insu de leur plein gré, même s'il n'existe pas d'entrée «Virenque» dans l'*Encyclopédie*).

LE PASTEUR MOUCHON

Je voudrais maintenant dire un mot de la seule personne qui ait lu entièrement l'*Encyclopédie* et le *Supplément* depuis deux siècles et demi. Il me paraît impossible de saisir cet immense ouvrage sans avoir à côté de soi, en permanence, l'extraordinaire table que le pasteur Mouchon a confectionnée de 1772 à 1780 à un rythme d'enfer. Le pasteur donne, pour chaque article, avec une certaine pertinence, une table analytique, c'est-à-dire un résumé des thèmes ou idées qui y sont contenus, paragraphe par paragraphe. Mais surtout, à la suite de cet article, il ajoute une sorte d'index de ce qui a rapport au même sujet dans le reste des 17 volumes de texte et des 11 volumes de planches. C'est alors un jeu d'enfant de trouver les lois de Hooke à «Wight l'île de», puisque Mouchon les indique à son entrée «Hooke».

Bien entendu, il existe une part de subjectivité dans ce travail, si méticuleux soit-il (et elle subsisterait d'ailleurs dans le cadre d'un travail collectif), mais l'historien, le philosophe, le commentateur actuels ont justement pour tâche d'utiliser les diverses subjectivités, de rester lucides à leur égard et de les dépasser. Mouchon s'est rendu compte des incohérences entre certains articles et, en parcourant la référence évoquée, on notera avec plaisir ce qu'il en a dit; nous n'en dirons pas plus.

La leçon à en tirer, à l'heure où, grâce au numérique, les textes et les planches de l'*Encyclopédie* n'ont jamais été aussi accessibles à qui les cherche, c'est justement de savoir naviguer astucieusement entre les recherches sur le texte intégral, les autres petits bijoux numériques et la table du pasteur. Les uns sans les autres peuvent manquer leur but.

UNE ÉDITION COLLABORATIVE

C'est de toutes ces constatations qu'est sorti le projet d'édition numérique ENCCRE. Il vise à donner d'une part une version fiable, bien collationnée des textes de l'*Encyclopédie* (en mode image et en mode texte), avec toutes les descriptions matérielles indispensables, ainsi que les variantes selon les éditions passées; d'autre part, un appareil critique qui permette au lecteur de faire son chemin, sans se heurter à une montagne infranchissable, où les crevasses et les avalanches l'engloutiraient à chaque pas. Sans étouffer le texte original dans des commentaires subjectifs, il s'agit de donner au lecteur des clés pour naviguer dans l'ouvrage, expliciter les allusions, comprendre les contenus et les contextes, éviter les anachronismes.

Examiner près de 20000 pages de texte, 74000 articles, 20 millions de mots, sans compter les images, sur tous les domaines imaginables, n'est pas à la portée d'un seul ni d'un groupe restreint. Un appel général a donc été lancé. Plus de cent collaborateurs, tous universitaires ou professionnels pointus et érudits, ont ainsi déjà rejoint le projet. En même temps, un protocole strict est nécessaire: pas question de laisser la machine s'emballer sans vérifications. La complexité décrite ici montre que le défi est délicat. Une réflexion est donc en cours sur les façons d'associer le nombre et la qualité, sans autoritarismes, sans élitisme au sens péjoratif du terme. Le contenu de l'ENCCRE est, de fait, destiné à être progressivement enrichi. Car ce projet a avant tout pour vocation de partager le fruit des connaissances d'hier, d'aujourd'hui et de demain sur l'*Encyclopédie*, et ce avec le plus grand nombre, avec l'espoir de contribuer à démocratiser l'une de ses forces particulièrement en danger aujourd'hui: l'esprit critique. ■

R

ENDEZ-VOUS

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

PAVER LE PLAN AVEC UN PENTAGONE CONVEXE

L'ordinateur est parfois bon géomètre. C'est en l'utilisant qu'un mathématicien français vient de mettre le point final à la solution du problème des polygones convexes permettant de recouvrir le plan.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au Centre
de recherche en
informatique, signal
et automatique de Lille
(Cristal)

Dans le numéro d'octobre 2013 de *Pour la Science*, cette rubrique présentait l'extraordinaire histoire des pavages du plan par des pentagones convexes identiques.

Le statut du problème était alors incertain: après plusieurs annonces fausses de sa résolution et des efforts considérables, on ne savait pas si les 14 formes possibles identifiées constituaient une liste complète, ou si d'autres formes seraient découvertes.

Depuis, deux événements remarquables se sont produits: la découverte inattendue d'une quinzième forme et la mise au point d'une démonstration que la classification avec les 15 formes trouvées est complète. Le problème des pavages par pentagones convexes est ainsi résolu et, en corollaire, nous connaissons toutes les formes possibles polygonales convexes qui pavent le plan.

Précisons les termes. Les polygones convexes sont les formes du plan délimitées par des segments de droites dont on peut parcourir la frontière en tournant toujours vers la droite ou toujours vers la gauche (la convexité peut s'exprimer autrement: un polygone est convexe si, pour deux points quelconques A et B du polygone, le segment AB est entièrement contenu dans le polygone).

Des résultats anciens, dont certains sont assez faciles (voir l'article d'octobre 2013, «Les pavages pentagonaux: une classification qui s'améliore»), établissent que n'importe quel triangle, ou n'importe quel quadrilatère

(convexe ou non) pave le plan. Pour ce qui est des hexagones convexes, on sait qu'il existe 3 formes possibles pavant le plan. On sait aussi qu'aucun polygone convexe à 7 côtés ou plus ne pave le plan.

Pour connaître tous les polygones convexes qui pavent le plan, seul le cas des pentagones restait à régler... et ce ne fut pas simple!

UNE HISTOIRE CHAOTIQUE

Nous ne reviendrons pas sur les amusantes péripéties des listes partielles de pentagones convexes dont des mathématiciens pressés et imprudents affirmèrent qu'elles étaient complètes, alors que quelque temps après on découvrait que c'était faux en exhibant des nouvelles formes inconnues, augmentant petit à petit la longueur de la liste à considérer.

Cette illusion répétée d'avoir traité le problème se produisit en 1918, 1968, 1975 et 1985. En 2013, on connaissait 14 formes, et nombre de spécialistes pensaient qu'il n'en existait pas d'autres. Ils avaient encore une fois tort: en 2015, à l'université de Washington, Casey Mann, Jennifer McCloud-Mann et David Von Derau découvrirent, en utilisant l'ordinateur, une quinzième forme de pentagone convexe pavant le plan (voir la page ci-contre).

Comme on était échaudé par les annonces répétées et fausses selon lesquelles on disposait de la liste complète, plus personne n'osait l'affirmer, mais cette fois c'était vrai: en 2017, Michaël Rao, chercheur du CNRS à l'École normale supérieure de Lyon, a prouvé qu'on ne trouverait jamais d'autres formes que les 15 connues.

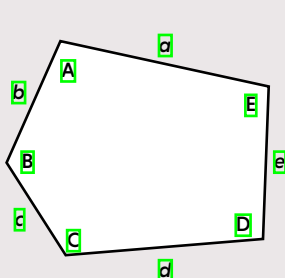


Jean-Paul Delahaye a récemment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

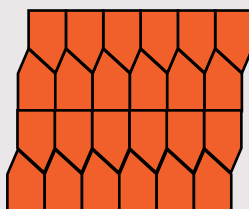
LES 15 FORMES DE PENTAGONES CONVEXES QUI PAVENT LE PLAN

1

Le mathématicien français Michaël Rao vient de démontrer que les pentagones convexes pouvant paver parfaitement le plan se rangent en 15 classes. Chaque classe est définie par des relations entre les angles (notés A, B, C, D, E) et entre les longueurs des côtés (notées a, b, c, d, e).

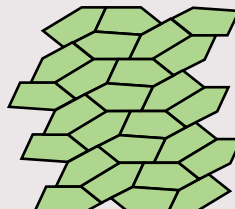


Type 1



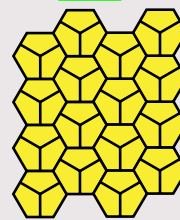
$$D + E = \pi$$

Type 2



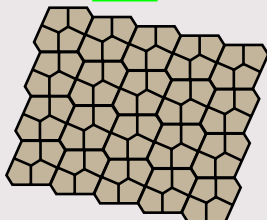
$$C + E = \pi \\ a = d$$

Type 3



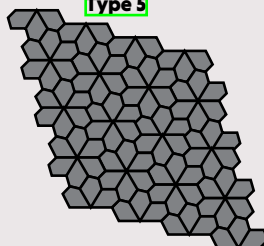
$$A = C = D = 2\pi/3 \\ a = b, d = c + e$$

Type 4



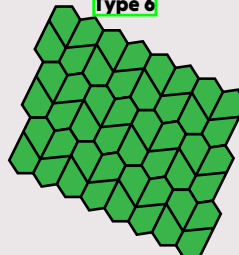
$$A = C = \pi/2 \\ a = b, c = d$$

Type 5



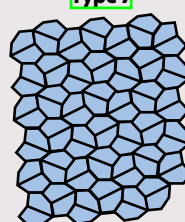
$$C = 2A = 2\pi/3 \\ a = b, c = d$$

Type 6



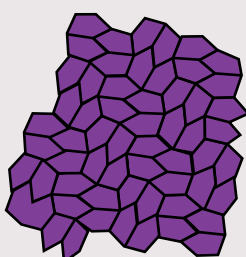
$$C + E = \pi, A = 2C \\ a = b = e, c = d$$

Type 7



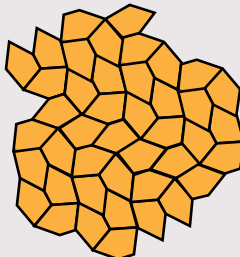
$$2B + C = 2\pi, \\ 2D + A = 2\pi \\ a = b = c = d$$

Type 8



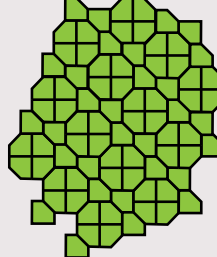
$$2A + B = 2\pi \\ 2D + C = 2\pi \\ a = b = c = d$$

Type 9



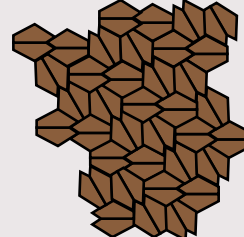
$$2E + B = 2\pi \\ 2D + C = 2\pi \\ a = b = c = d$$

Type 10



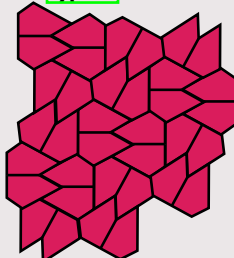
$$E = \pi/2, A + D = \pi \\ 2B - D = \pi, 2C + D = 2\pi \\ a = e = b + d$$

Type 11



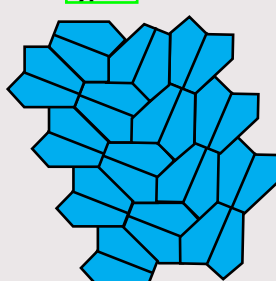
$$A = \pi/2, C + E = \pi \\ 2B + C = 2\pi \\ d = e = 2a + c$$

Type 12



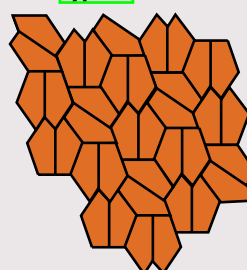
$$A = \pi/2, C + E = \pi \\ 2B + C = 2\pi \\ 2a = c + e = d$$

Type 13



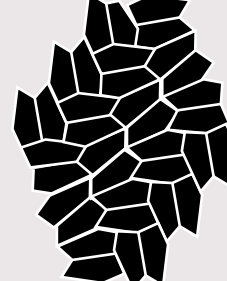
$$A = C = \pi/2, \\ 2B = 2E = 2\pi - D \\ c = d, 2c = e$$

Type 14



$$D = \pi/2, 2E + A = 2\pi \\ B + D + E = 2\pi, A + C = \pi \\ b = c = 2a = 2d$$

Type 15



$$A = \pi/3, B = 3\pi/4, C = 7\pi/12 \\ D = \pi/2, E = 5\pi/6 \\ a = 2b = 2d = 2e$$

✓ Sa démonstration utilise un ordinateur, mais la partie humaine préparatoire aux calculs était délicate et personne avant Michaël Rao n'avait su la mener correctement. La démonstration a consisté à ramener l'exploration des cas possibles, qui *a priori* sont en nombre infini, à un nombre fini de cas.

LA DÉMONSTRATION PROCÈDE EN QUATRE ÉTAPES.

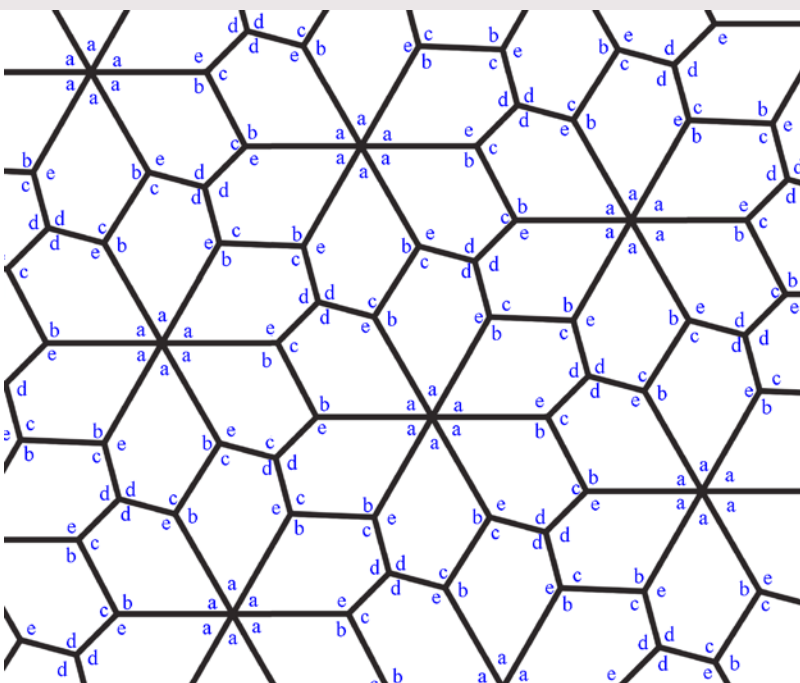
Étape 1. Michaël Rao prouve que « si une forme pentagonale convexe P pave le plan, alors elle peut le faire de telle façon que chaque type de sommet du pavage possède une densité positive dans le pavage ».

2

LES TYPES DE SOMMETS D'UN PAVAGE

Dans la démonstration de Michaël Rao, la classification des types de sommets présents dans un pavage joue un rôle important. Dans l'exemple dessiné ici, où les sommets du pentagone utilisé sont notés a, b, c, d, e , on observe qu'en un point du plan où plusieurs pentagones se rencontrent, il existe trois types différents de situations : (a, a, a, a, a) , (b, c, e) et (d, d, d) .

Cet ensemble de 3 types de sommets est l'un des 371 ensembles différents qu'une recherche exhaustive par programme a produits. Après une exploration de chacun de ces 371 ensembles, on n'obtient que 15 formes de pavages différents par des pentagones convexes.



Expliquons cet énoncé. On désigne les 5 sommets du pavé P considéré par les lettres a, b, c, d et e . En certains points M du pavage, se rencontrent plusieurs des sommets du pentagone convexe P, par exemple b, c et e , qui proviennent des différentes versions de P placées autour de M. Cette suite de lettres définit un type de sommet du pavage. Dans un pavage donné, il y a plusieurs types de sommets. Par exemple (voir l'encadré 2), il peut y avoir les trois types de sommets (b, c, e) , (d, d, d) et (a, a, a, a, a) . Cette représentation des types de sommets possibles permettra plus loin de ramener le nombre de cas à traiter, *a priori* infini, à un nombre fini de cas. On aurait pu imaginer qu'un type donné de sommets soit utilisé avec une densité décroissante et tendant vers zéro quand on s'éloigne du centre. Ce que dit le résultat de l'étape 1 du raisonnement de Michaël Rao est que cela ne se produit pas, au moins pour l'un des pavages du plan utilisant le pavé P : pour chaque type T de sommets à envisager, la proportion de sommets de type T dans un pavage utilisant N exemplaires de P sera supérieure à une constante.

Étape 2. Un ensemble de types de sommets pour un pavage donné du plan par des pentagones convexes, par exemple l'ensemble $\{(b, c, e), (d, d, d), (a, a, a, a, a)\}$, a une propriété algébrique particulière (notons-la Q) provenant de sa capacité à paver le plan avec une densité positive pour chaque type de sommets. Cette propriété Q est facile à tester par programme. Celui écrit par Michaël Rao a fait découvrir qu'il n'y a que 371 possibilités différentes pour ces ensembles de types de sommets.

Étape 3. Pour chacun des 371 cas repérés à l'étape 2, on tente d'une manière systématique de paver le plan. Michaël Rao utilise un second programme pour mener cette recherche. Le programme essaye de construire un pavage avec les conditions qu'on s'est fixées sur les angles, mais *a priori* sans conditions sur les côtés. Il explore les pavages possibles et doit faire des hypothèses sur les longueurs des côtés au cours de l'exploration. Si on aboutit à l'un des 15 cas connus, le programme ne va pas plus loin. En effet, on sait alors qu'on peut paver avec ce pentagone et que le motif sera périodique. Les pavages périodiques sont ceux où l'on peut extraire un ensemble fini de pavés et où, à l'aide de deux translations appliquées à ce sous-pavage, on obtient petit à petit le pavage entier.

Il est important de noter que dans le cas général, il existe des ensembles de formes pavant le plan mais qui ne le pavent que non périodiquement. Les ensembles connus de ce type comportent toujours au moins deux pavés différents. Les pavages de Penrose sont de ce type : ils pavent le plan, mais jamais périodiquement.

Étape 4. L'analyse des cas qui ont réussi et leurs regroupements (quand plusieurs cas

donnent des pavages équivalents) fournissent exactement les 15 formes de pavés pentagonaux convexes connus. Cela prouve que la classification avec les 15 formes est complète.

La méthode ne demande pas une puissance de calcul informatique considérable; elle aurait pu être menée depuis assez longtemps si quelqu'un l'avait imaginée avant Michaël Rao.

Dans cette recherche, on n'a pas supposé que le pavage était périodique. La méthode utilisée dans la démonstration et les calculs montrent donc qu'il n'y a pas de cas essentiellement non périodiques, autrement dit qu'il n'y a aucun pavé pentagonal convexe qui pourrait paver le plan uniquement de façon non périodique. Dit autrement encore: s'il existe un pavé qui pave le plan aperiodiquement et jamais de manière périodique (on dit «qui force la non-périodicité»), alors ce n'est pas un pentagone convexe.

L'une des grandes questions de la théorie mathématique des pavages est de savoir s'il existe un pavé qui, à lui seul, force la non-périodicité. Un tel pavé hypothétique qui forcerait la non-périodicité est dénommé *einstein*, non pas en l'honneur du célèbre physicien, mais parce que cela signifie «une pierre» en allemand (voir https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein_problem). La démonstration de Michaël Rao montre donc que s'il existe un pavé *einstein*, ce n'est pas un pentagone convexe.

DES QUESTIONS POSÉES PAR LA DÉMONSTRATION

La preuve a déjà été étudiée par plusieurs spécialistes de ce type de questions et une partie des calculs a été refaite par un programme différent écrit par Thomas Hales, dont nous allons reparler plus loin. Il a confirmé les 371 cas de l'étape 2. Le programme utilisé dans l'étape 3 a été simplifié et contrôlé, et il a toujours donné les mêmes résultats. Tout semble donc parfait. Cependant, plusieurs questions restent posées.

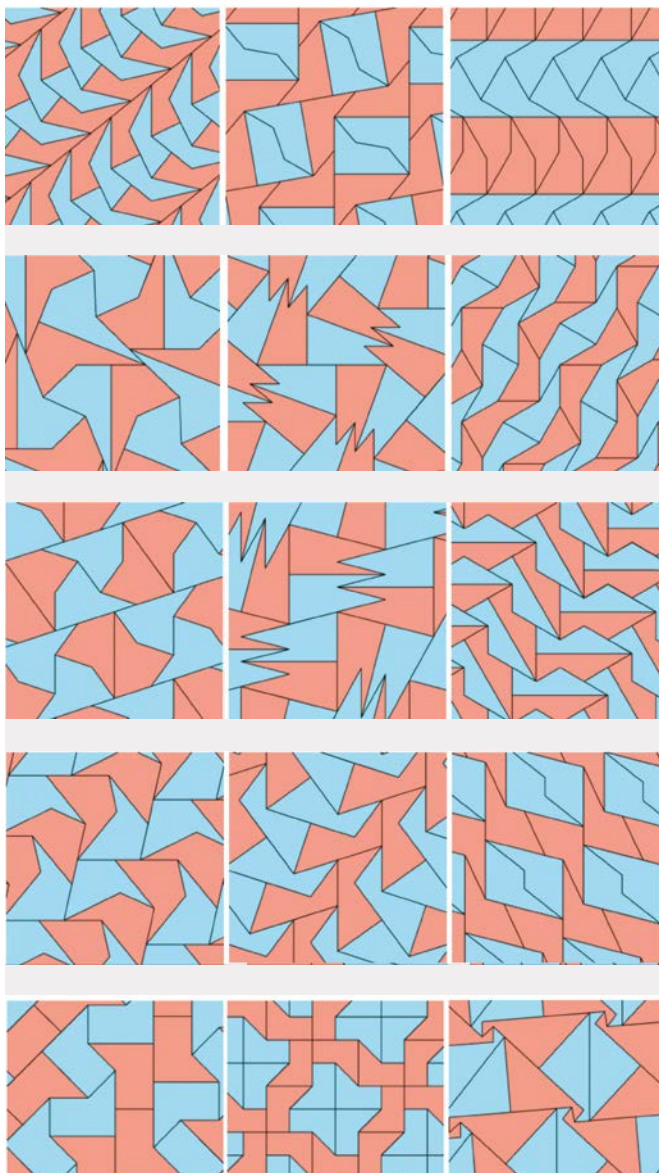
Pourra-t-on simplifier la preuve pour ne plus avoir à utiliser d'ordinateurs? Michaël Rao pense qu'il sera peut-être possible pour l'étape 2 de faire le travail sans ordinateur. Pour l'exploitation des 371 cas un à un, ce chercheur n'exclut pas l'idée qu'une armée de 100 ou 1 000 mathématiciens consciencieux puisse mener le calcul et vérifier ce qu'a trouvé la machine. Il juge cependant que ce serait futile et inefficace, puisque, pour ce type de travail, la précision et la fiabilité de la machine sont meilleures que celles des humains. Les calculs sur une machine unique ont duré 40 heures; même si les humains trouveraient sans doute des raccourcis en procédant à la main, il en faudrait beaucoup, et de très déterminés!

Pourrait-on traduire la preuve en une preuve formellement vérifiable? Aujourd'hui, face à une preuve longue et complexe, on tente

3

DES PENTAGONES NON CONVEXES QUI PAVENT LE PLAN

Les images suivantes sont des pavages du plan par des pentagones non convexes. La variété des images suggère que le problème de leur classification est sans doute aussi délicat ou plus que celui résolu par Michaël Rao. Ces images proviennent du site d'un amateur de récréations mathématiques, Jaap Scherphuis (<https://www.jaapsch.net/tilings/>). Il propose bien d'autres exemples.



▣ d'en obtenir une version parfaitement formalisée qu'un ou plusieurs ordinateurs contrôlent en utilisant éventuellement des programmes différents, ce qui procure une garantie presque parfaite de correction. Des logiciels spécialisés nommés assistants de preuve, dont COQ de l'Inria, aident à l'écriture de ces preuves formelles. La méthode des preuves formelles est utilisée pour certifier des circuits et des programmes importants, par exemple en aéronautique. Ici, la mise au point d'une telle preuve permettrait de valider non seulement la partie calculatoire de la démonstration de Michaël Rao, mais aussi sa partie «humaine». Les programmes utilisés par le mathématicien ont été écrits dans le langage C++ et ont une longueur d'environ 5000 lignes. Assurer leur totale exactitude ne sera pas une mince affaire.

Le résultat de Michaël Rao concerne les pentagones convexes. Il est remarquable qu'on ne connaisse pas aujourd'hui de classification analogue pour les pentagones non convexes qui pavent le plan (voir l'encadré 3 pour des exemples). Le problème, d'énoncé simple, semble d'une grande difficulté. Les idées et méthodes de la démonstration de Michaël Rao pourront-elles

faire avancer cette version généralisée de la classification des pentagones pavant le plan?

A cette question, Michaël Rao répond: «La plupart des méthodes que j'ai utilisées peuvent être adaptées aux polygones à n côtés (pour un n fixé), et pas forcément convexes.» Il ajoute cependant: «Je ne me prononcerai pas sur la question d'une classification complète pour les polygones (pas nécessairement convexes) à n côtés (pour un n fixé). Il se pourrait qu'il y ait des comportements bizarres, et qu'on ait un nombre infini de types (conditions sur les angles et les côtés), alors qu'on a un nombre fini de familles (conditions sur les angles uniquement).» Il précise aussi qu'au départ, il s'intéressait au fameux problème de l'*einstein* et que ce n'est que dans un second temps, quand la quinzième forme a été découverte en 2015, qu'il a compris que la preuve de la classification complète des pentagones convexes pavant le plan était à sa portée. Il va continuer à travailler sur ces questions de pavages... sans doute en espérant être celui qui trouve en premier un *einstein*, ou qui montre qu'il n'en existe pas.

AUTRES PROGRÈS RÉCENTS CONCERNANT LES PENTAGONES

Parfois, un pentagone ne peut pas paver le plan. C'est ce qu'on démontre facilement pour le pentagone régulier, qui a 5 côtés égaux et 5 angles égaux. Reste alors à savoir comment placer un tel pentagone de manière optimale dans le plan, c'est-à-dire avec une densité aussi élevée que possible. Remarquons que ce problème de densité optimale est le plus simple qui soit non trivial pour les polygones réguliers. On sait en effet répondre à la question de la densité maximale pour les triangles équilatéraux, pour les carrés et même pour les hexagones réguliers... puisqu'ils pavent parfaitement le plan!

La figure ci-contre montre une façon de disposer des pentagones réguliers sur un plan qui semble assez bonne. Sa densité est de:

$$(5 - \sqrt{5})/3 \approx 0,921311.$$

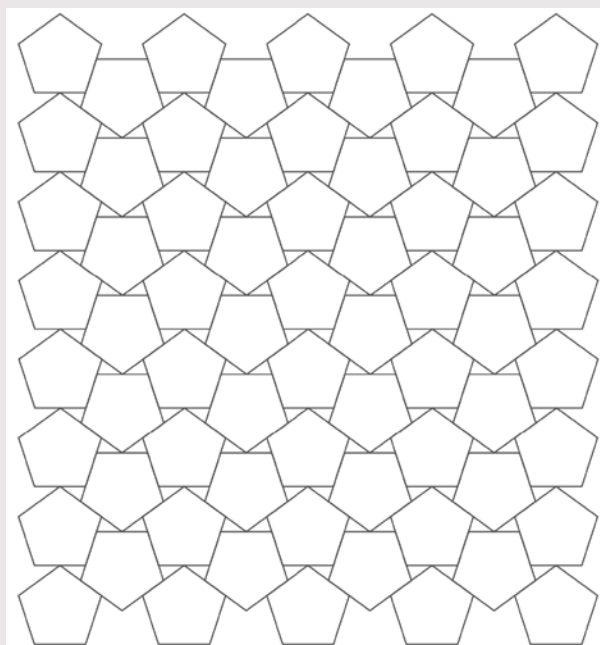
Autrement dit, la partie du plan non recouverte est inférieure à 8 % de la surface.

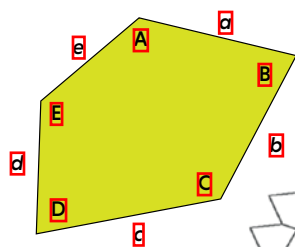
Est-ce la meilleure façon de disposer les pentagones? Ne peut-on pas les serrer les uns contre les autres encore mieux? L'affirmation que cette disposition est la plus dense possible constitue la «conjecture pentagonale de Henley». Elle est restée non résolue jusqu'en 2016. Elle n'est pas simple du tout, car les rangements possibles sont nombreux et délicats à comparer si l'on veut être certain de ne laisser échapper aucune éventualité. Les dispositions optimales pourraient être très complexes et, par exemple, ne pas être périodiques. Cela se produit en effet pour d'autres problèmes du même type: quand on cherche la disposition de densité optimale pour deux pavés de Penrose, la solution est un pavage non périodique.

4

LE PAVAGE OPTIMAL PAR UN PENTAGONE RÉGULIER

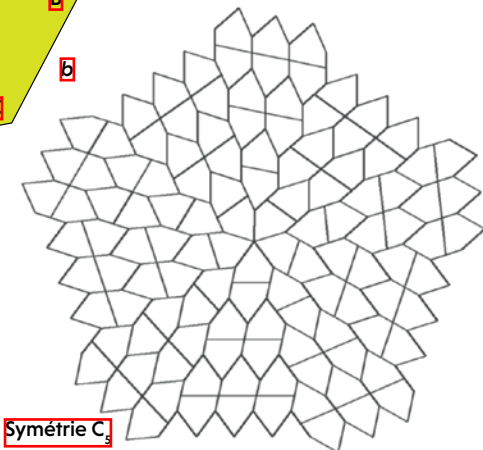
Disposer des pentagones réguliers identiques de façon que la surface non recouverte soit aussi réduite que possible est loin d'être simple. Que la disposition représentée ci-dessous soit la meilleure est vrai, mais il aura fallu attendre 2016 pour le démontrer. La preuve s'étale sur un article de 60 pages, mais elle a aussi nécessité l'utilisation de plusieurs programmes informatiques.



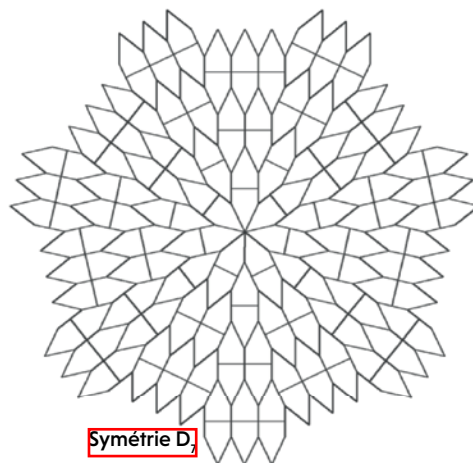


$$D + E = 180^\circ, \\ B = 72^\circ$$

$$C = 180^\circ - B/2 \\ D = 90^\circ$$



Symétrie C_k



Symétrie D_k

5

DES PENTAGONES POUR DES PAVAGES EN ÉTOILE

Assembler des copies d'un même pentagone pour obtenir un pavage étoilé complet du plan semble difficile. Pourtant, pour tout entier k supérieur ou égal à 3, il existe un pavé qui donnera un pavage étoilé à k branches.

Selon qu'on souhaite que le pavage ait des axes de symétrie ou

non, deux types de solutions sont possibles.

Nommons A, B, C, D, E

les angles internes du pentagone considéré et a, b, c, d, e les longueurs de ses côtés. Soit $k \geq 3$ un entier. Si les angles A, B, C, D et E sont inférieurs à 180° , que $b = c = a + d$ et $D + E = 180^\circ$, que B et

C divisent 360° et que $B = 360^\circ/k$, alors il est possible de paver le plan avec la symétrie C_k (invariance uniquement par des rotations).

Si, de plus, on a $C = 180^\circ - B/2$ et $D = 90^\circ$, alors on peut paver le plan avec la symétrie D_k (invariance par des rotations et des symétries axiales).

La conjecture de Henley vient d'être démontrée par Thomas Hales et Wöden Kusner. Thomas Hales, professeur à l'université de Pittsburgh, aux États-Unis, est connu pour avoir résolu la conjecture de Kepler qui indique la façon la plus dense d'empiler des sphères dans l'espace, et Wöden Kusner est actuellement à l'université de Vanderbilt. L'article qui prouve la conjecture de Henley comporte 60 pages, mais il se réfère, comme celui de Michaël Rao, à plusieurs programmes mis en œuvre pour aboutir au résultat. Qui aurait soupçonné il y a un siècle que la géométrie exigerait l'aide de machines?

PENTAGONES POUR PAVAGES EN ÉTOILE

Terminons notre promenade géométrique en évoquant un résultat inattendu et esthétique. La question que s'est posée Bernhard Klaassen, de l'institut Fraunhofer SCAI, en Allemagne, est la suivante: pour quelle valeur de l'entier $k \geq 3$ peut-on trouver des pavés pentagonaux qui pavent le plan de manière étoilée, c'est-à-dire en disposant les pavés autour d'un centre de telle façon que le pavage soit invariant par rotation de $2\pi/k$? Pour chaque k , il existe deux variantes du problème. Soit la rotation de $2\pi/k$, une ou plusieurs fois, est la seule façon de retrouver le pavage, auquel cas on

parle de symétrie C_k . Soit, en plus de la rotation, la symétrie par rapport à certaines droites passant par le centre laisse aussi le pavage invariant, auquel cas on parle de symétrie D_k (voir l'encadré ci-dessus).

Bernhard Klaassen a trouvé une famille de pentagones qui autorisent un pavage avec symétries C_k ou D_k pour tout $k \geq 3$. Voici sa solution. Notons A, B, C, D et E les angles internes du pentagone considéré et a, b, c, d, e les longueurs des côtés du pentagone. On impose les propriétés suivantes: tous les angles internes sont inférieurs à 180° ; $b = c = a + d$; $D + E = 180^\circ$ et C divise 360° ainsi que B.

Le théorème est alors le suivant:

Pour tout entier $k \geq 3$ et tout pentagone possédant les propriétés énoncées avec $B = 360^\circ/k$, il est possible de paver le plan avec la symétrie C_k . De plus, si $C = 180^\circ - B/2$ et $D = 90^\circ$, alors on peut paver le plan avec la symétrie D_k . On remarque qu'en prenant une solution et en accolant correctement les pentagones par deux, on obtient un pavage par des hexagones: la solution trouvée pour les pentagones donne donc du même coup une solution pour les hexagones.

N'est-il pas étonnant qu'il ait fallu attendre 2016 et 2017 pour résoudre ces questions assez simples concernant les polygones, et que pour deux des trois résultats mentionnés ici, l'ordinateur ait été nécessaire? ■

BIBLIOGRAPHIE

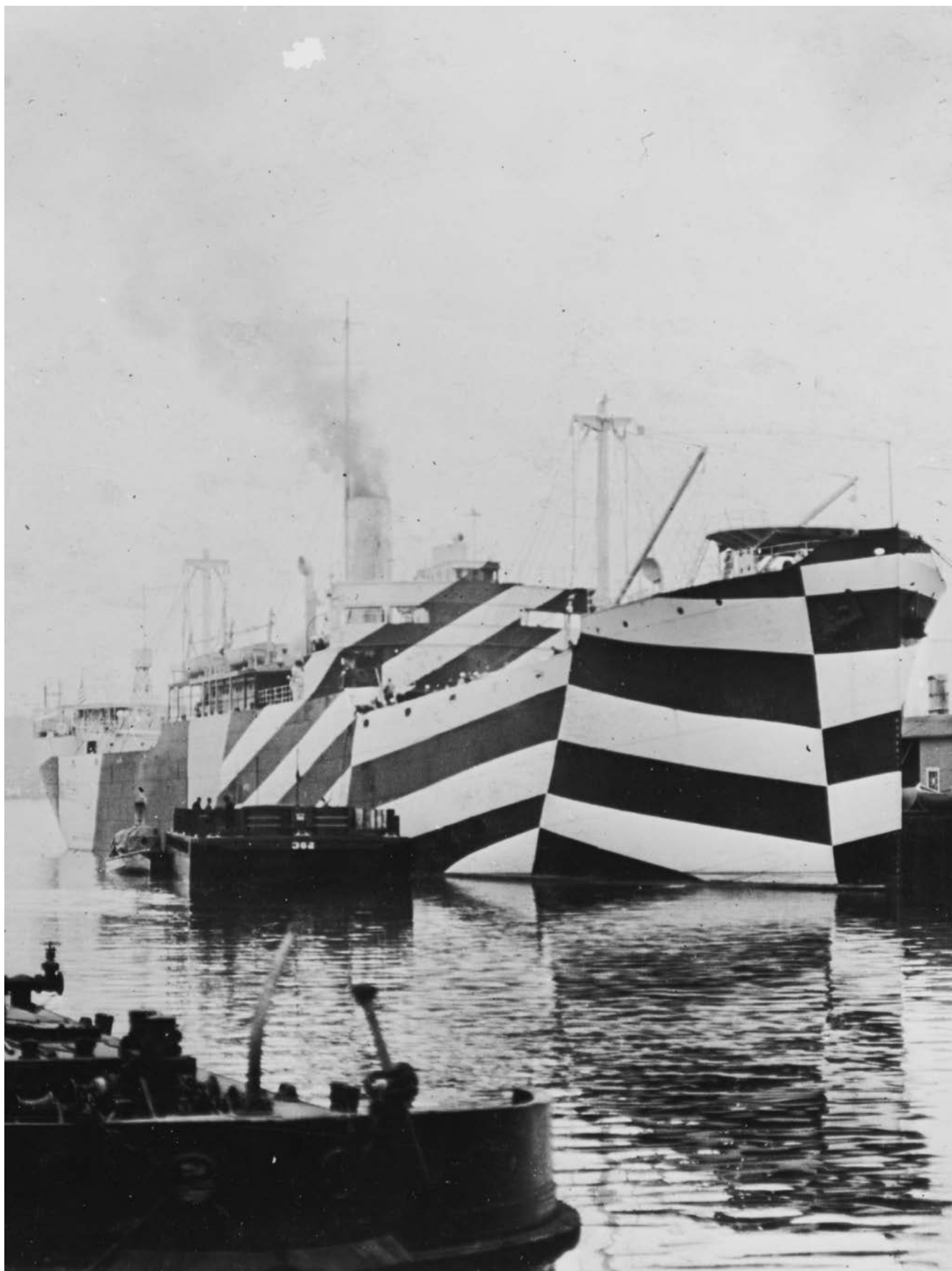
M. Rao, **Exhaustive search of convex pentagons which tile the plane**, <http://perso.ens-lyon.fr/michael.rao/publi/penta.pdf>, 2017.

N. Wolchover, **Pentagon tiling proof solves century-old math problem**, *Quanta*, 11 juillet 2017 (traduction française: <http://bit.ly/2xEmaBS>).

B. Klaassen, **Rotationally symmetric tilings with convex pentagons and hexagons**, *Elemente der Mathematik*, vol. 71, pp. 137-144, 2016 (<https://arxiv.org/pdf/1509.06297.pdf>).

T. Hales et W. Kusner, **Packings of regular pentagons in the plane**, <https://arxiv.org/pdf/1602.07220.pdf>, 2016.

C. Mann et al., **Convex pentagons that admit i-block transitive tilings**, <https://arxiv.org/pdf/1510.01186.pdf>, 2015.



L'USS West Mahomet
prêt à rendre fous les sous-marins allemands !

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

QUAND LES BATEAUX FONT LE ZÈBRE

Au cours de la Première Guerre mondiale, des centaines de navires ont échappé aux torpilles, en partie grâce aux motifs géométriques dont ils ont été peints.

rayures du zèbre avec des parures proches du costume d'Arlequin !

Le camouflage disruptif fut inauguré en août 1917 avec le navire marchand *HMS Alsatian*, puis étendu à l'ensemble de la flotte de guerre britannique. En une année, plus de 400 navires ont été repeints de la sorte. La conception des motifs fut confiée à quelques artistes de la Royal Academy of Art. L'un des plus prolifiques fut Edward Wadsworth, responsable du camouflage de près de 200 navires.

Cela a-t-il été efficace ? Difficile à dire. Selon une étude menée en 1918, parmi les vaisseaux pris pour cible par une torpille, 43 % des navires camouflés ont coulé, contre 54 % des non camouflés, mais la différence de taille des bateaux (seuls les plus gros ont bénéficié du camouflage disruptif) empêche de conclure formellement.

Une fois la guerre terminée, Edward Wadsworth mit à profit l'expérience acquise sur les chantiers navals pour se lancer dans une carrière artistique. On lui doit plusieurs gravures sur bois et quelques toiles. Certains ont vu dans le *razzle dazzle* un écho à plusieurs courants artistiques du début du xx^e siècle, notamment le cubisme (Picasso encore), le futurisme (qui voue un culte à la vitesse) et plus sûrement le vorticisme (plusieurs œuvres évoquent des tourbillons), créé par Ezra Pound.

À Brest, la centaine de documents d'époque proposés est complétée par des œuvres contemporaines des plasticiens Guillaume Duval et Jean-Baptiste Moal, du collectif XYZ, très inspirés par l'univers du *razzle dazzle*. Désormais, vous avez la recette pour vous fondre dans une foule : habillez-vous en Arlequin !

Musée national de la Marine, Château de Brest, jusqu'au 21 décembre 2018.
<http://bit.ly/RaDaz>



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

E

n 1914, Pablo Picasso aurait prodigué ce conseil : « S'ils veulent rendre une armée invisible à distance, ils n'ont qu'à habiller les hommes en arlequins. » Une plaisanterie, sans doute, car comment imaginer que le costume chamarré, fait de losanges multicolores, du personnage de la *commedia dell'arte* puisse être un modèle de discrétion ? Et pourtant... En matière de camouflage et de dissimulation, les techniques les plus contre-intuitives ont fait leurs preuves : ainsi les rayures rendent un zèbre très visible, mais difficilement discernable parmi le groupe.

Quant à l'astuce de Picasso, elle a bien été mise en œuvre, notamment pour des bateaux. C'est ce que rappelle une exposition au Musée national de la Marine, au château de Brest. Remontons le cours de l'histoire jusqu'en 1917. La guerre fait rage dans l'Atlantique Nord où les sous-marins allemands (les U-boote) s'en prennent aux navires marchands et civils des Alliés en représailles au blocus imposé à leur pays. Cette guerre, dite totale, précipita l'entrée en guerre des États-Unis, qui gardaient en mémoire le drame du *Lusitania* : en 1915, ce

paquebot fut coulé par les Allemands, entraînant la mort de 1120 civils dont plus de 120 Américains. Mais comment lutter contre ces sous-marins toujours plus perfectionnés et dangereux ? Par l'art !

Norman Wilkinson, peintre et lieutenant de marine britannique, a l'idée de camoufler les navires grâce à d'immenses formes géométriques aux couleurs contrastées recouvrant les coques et les parties les plus proéminentes (voir la photographie page ci-contre). On parle de *dazzle camouflage*, c'est-à-dire disruptif, ou de *razzle dazzle*.

Toutefois, le bateau ne devient pas vraiment invisible. L'idée est ici de créer avec les motifs une illusion d'optique qui empêche un observateur d'identifier le type de navire, ses dimensions, sa vitesse et son cap, et même de distinguer la proue de la poupe ou si le vaisseau se rapproche ou s'éloigne (on dessinait parfois de fausses vagues d'étrave). Comment dans ces conditions ajuster le tir d'une torpille ?

À cette époque, le radar n'était pas encore mis au point, et on utilisait des télémètres optiques pour évaluer la distance d'une cible. Dans ces dispositifs, fondés sur le principe de coïncidence, un jeu de miroirs montrait deux parties d'une image que l'on devait aligner pour déterminer la distance d'un objet, en l'occurrence celle d'un navire ennemi. Avec le camouflage disruptif, le chaos des lignes nuisait à la précision de la mesure et donc à la précision des réglages des pièces d'artillerie et des lance-torpilles. On retrouve ici le principe de fonctionnement des

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY
professeur de physique
à l'université
Pierre-et-Marie-Curie,
à Paris



EDOUARD KIERLIK
également professeur
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie

RETOURNEMENT TEMPOREL POUR TÉLÉPHONIE 5G

Le retournement temporel des ondes permet de focaliser des signaux dans l'espace et le temps. Une technique envisagée pour augmenter le débit de la téléphonie mobile et réduire la consommation d'énergie par le réseau.

En 2020, une technologie de cinquième génération (5G) est censée être déployée pour la téléphonie mobile et le wifi, afin de faire face à la multiplication par mille du trafic de données attendue en moins de dix ans. On vise des temps de latence de une milliseconde et des vitesses de téléchargement de 20 gigabits par seconde, le tout en consommant très peu d'énergie ! Comment répondre à ce défi ? L'une des solutions envisagées est une méthode conçue par des physiciens dans les années 1990 : le retournement temporel des ondes, ici électromagnétiques.

La téléphonie mobile procède par l'échange d'informations numérisées, sous forme d'ondes électromagnétiques, entre une station de base et un téléphone mobile. Les techniques actuelles souffrent de plusieurs limites. La première est que l'antenne de la station émet dans toutes les

directions de façon à peu près égale. Seule une très faible fraction de la puissance émise atteint le mobile et l'essentiel de l'énergie émise est donc gaspillé.

Deuxième limite : dans un environnement encombré tel qu'une ville ou, pour le wifi, l'intérieur d'un appartement, les nombreux obstacles présents absorbent, réfléchissent ou diffusent l'onde émise. D'où une atténuation supplémentaire de l'onde et, surtout, l'existence de nombreux chemins de propagation entre l'antenne et le mobile. Cela se traduit par des interférences entre ces diverses ondes, notamment au niveau du récepteur. Ainsi, lorsque le nombre de chemins est élevé, il suffit que la position du mobile change légèrement pour que le signal reçu varie du tout au tout, ce qui peut entraîner la coupure de la communication (voir les figures ci-contre).

La multiplicité des chemins se traduit aussi par un élargissement de la durée des impulsions reçues, en raison de l'arrivée

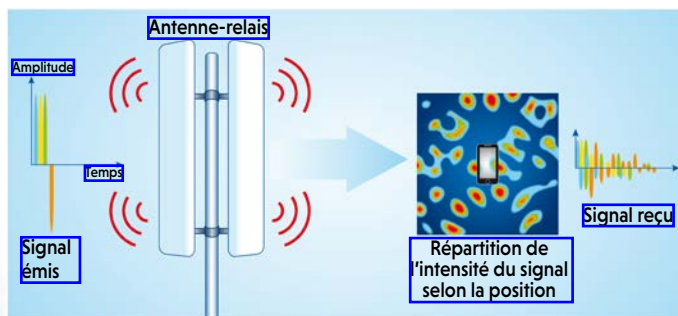
successive des échos correspondant aux divers chemins de propagation empruntés (avec 30 mètres de différence de longueur entre deux chemins, les signaux sont décalés de 0,1 microseconde). Il s'ensuit une limitation du débit de transmission.

Enfin, une troisième limite tient au fait que les ondes actuellement utilisées dans les communications ont des fréquences porteuses comprises entre 700 mégahertz (MHz) et 2,6 gigahertz (GHz), et des bandes passantes larges d'environ 10 MHz. Or Claude Shannon, l'un des pères de la théorie de l'information, nous a appris que le débit d'information maximal est proportionnel à la bande passante. Le spectre électromagnétique



BROUILLAGE SPATIAL ET TEMPOREL PAR LES OBSTACLES

Le schéma ci-dessous illustre le brouillage d'un signal constitué de 4 bits (1-1-1-0, distingués ici par leur couleur) émis par une antenne-relais et censé parvenir à un téléphone mobile distant de quelques dizaines ou centaines de mètres dans un environnement riche en obstacles. En raison des nombreux chemins suivis par l'onde émise et des décalages temporels induits dans la réception, le téléphone capte une succession d'échos où les bits se mélangent. C'est pourquoi les bits émis doivent être bien séparés dans le temps, ce qui limite le débit. En outre, les interférences de tous les échos produisent un signal dont l'intensité varie fortement selon l'endroit où il est mesuré.



Dans un environnement urbain, les obstacles à la propagation des ondes électromagnétiques sont nombreux. Un signal émis par une antenne-relais de téléphonie mobile peut être réfléchi, absorbé, diffusé... Il parvient à sa destination sous la forme de multiples signaux ayant suivi chacun un chemin différent. Ici, cinq de ces chemins ont été représentés.

étant très encombré dans le domaine de fréquences en question, les largeurs des bandes passantes ne peuvent être augmentées, ce qui là aussi limite le débit.

AUGMENTER LA FRÉQUENCE

Pour atteindre les spécifications de la 5G, il est donc crucial d'augmenter la bande passante. Cela implique d'adopter des fréquences plus élevées, moins encombrées: on parle ainsi de la bande $3,5 \pm 0,1$ GHz pour commencer, puis 26 GHz, voire plus ensuite. Cependant, cela risque de réduire la portée de l'antenne, car plus les ondes électromagnétiques sont de fréquence élevée, plus elles sont absorbées et diffusées par l'environnement. Et avec de petites

longueurs d'onde (à peine plus de 1 centimètre à 26 GHz), les variations du signal dans l'espace dues aux interférences ne peuvent être qu'exacerbées.

Une solution à cette difficulté est la technique MIMO (Multiple Input-Multiple Output), qui transforme l'inconvénient des interférences en avantage: plusieurs antennes émettent en direction du téléphone mobile en ajustant la forme du signal émis et les délais d'émission, de telle façon que les différents signaux arrivent en même temps sur le mobile et qu'ils interfèrent constructivement à son niveau.

Avec des longueurs d'onde plus petites, on peut diminuer la taille des antennes et ainsi concevoir des dispositifs

qui en intègrent un grand nombre. Ces antennes peuvent même communiquer simultanément avec plusieurs mobiles en superposant les signaux envoyés à chacun d'eux. Lorsque l'environnement est assez encombré, les parties du signal adressées à un mobile donné et provenant des différentes antennes interfèrent destructivement au niveau des autres mobiles.

Dans l'implémentation habituelle de la technique du MIMO «massif», on mesure

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



Les caractéristiques des liaisons individuelles entre chaque antenne d'émission et chaque antenne de réception, puis on détermine les signaux à émettre à l'aide d'algorithmes de calcul appropriés. Cela nécessite du temps de calcul si l'on augmente le nombre d'antennes et n'a de sens que pour des bandes passantes étroites.

REÉMETTRE LE SIGNAL REÇU, MAIS À L'ENVERS

Une autre solution consiste à exploiter une propriété particulière de la propagation des ondes: son invariance par renversement du temps. L'idée est la suivante. Imaginons une source localisée complètement entourée de capteurs. La source émet un signal, et chacun des capteurs enregistre le signal reçu; si les capteurs réémettent les signaux enregistrés en les retournant temporellement (on les renverse, comme lorsqu'on passe un film à l'envers), les ondes feront le chemin inverse et se focaliseront au niveau de la source.

Cette propriété semble nécessiter une surface entière de capteurs. Mais dans les années 1990, l'équipe de Mathias Fink, à l'ESPCI, à Paris, a établi que lorsque le milieu de propagation est assez complexe, un nombre limité d'antennes suffit, sans que la focalisation soit dégradée. Ces physiciens ont ainsi montré que le procédé peut s'appliquer à des ondes électromagnétiques de 2,4 GHz. Et en 2016, les ingénieurs de chez Orange ont fait la démonstration d'un prototype d'une antenne 5G à retournement temporel.

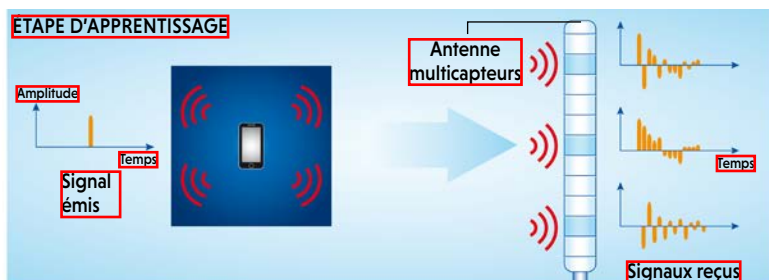
Comment fonctionne-t-elle? Dans une étape d'«apprentissage», le mobile émet une brève impulsion; celle-ci arrive au niveau de chaque capteur de l'antenne sous la forme d'une suite d'échos (différente pour chaque capteur), qui est enregistrée (voir l'encadré ci-contre). Cette étape est cruciale et nécessite une bande passante large, pour garantir un bon échantillonnage du signal et une bonne séparation des différents échos. On sait alors que si chaque capteur de l'antenne réémet son signal reçu en le retournant temporellement, on focalisera au niveau du mobile une brève impulsion, presque identique à l'impulsion initiale.

Pour transmettre des données numériques de la station au mobile, on convient d'émettre le signal enregistré retourné temporellement pour coder le bit 1, ou le même multiplié par -1 (son opposé) pour le bit 0. Inutile aussi d'attendre la fin de l'émission d'un enregistrement pour en commencer une autre: il suffit qu'elles soient décalées d'une durée supérieure à

ÉMISSION CIBLÉE GRÂCE AU RETOURNEMENT TEMPOREL

Le principe du retournement temporel des ondes peut être appliqué à la téléphonie afin que l'antenne-relais focalise son signal sur le téléphone destinataire et lui seul. La méthode nécessite une première étape d'«apprentissage» où le destinataire émet un signal bref (a). L'antenne est formée d'une série d'éléments indépendants, dont chacun enregistre le signal reçu. Celui-ci diffère selon la position du capteur, car les chemins suivis par les ondes jusqu'à lui ne sont pas tout à fait les mêmes. Pour émettre de façon ciblée un bit vers le téléphone destinataire, il suffit alors que chaque élément de l'antenne réémette le signal enregistré et retourné temporellement (b). Les ondes qui atteignent alors le téléphone donneront un signal focalisé temporellement, proche de l'original; ailleurs, le signal reçu sera d'intensité faible ou nulle.

a ÉTAPE D'APPRENTISSAGE



b FOCALISATION PAR RETOURNEMENT TEMPOREL



l'impulsion originelle pour être discriminées au niveau du mobile. Par ailleurs, on peut profiter de la focalisation spatiale pour émettre simultanément les signaux enregistrés de plusieurs mobiles ou objets connectés. Chacun recevra distinctement le signal qui lui est destiné, et uniquement celui-ci. On peut ainsi augmenter fortement le débit et réduire de beaucoup l'énergie consommée par le réseau, la focalisation spatiale assurant une plus grande efficacité énergétique.

Devant de telles promesses, le retournement temporel sera-t-il choisi pour la 5G? Pas sûr. Ses performances doivent beaucoup à la complexité de l'environnement de propagation et se heurtent à la nécessité de renouveler la phase d'apprentissage lorsque les chemins de propagation ont changé. C'est notamment le cas lorsque l'appareil connecté se déplace: ce n'est pas un problème pour un piéton, ça l'est davantage pour un véhicule en mouvement. Mais les ingénieurs n'ont pas dit leur dernier mot, puisque ceux d'Orange ont conçu un dispositif qui semble fonctionner pour le TGV... ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Chen et al., **Why time reversal for future 5G wireless?**, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33(2), pp. 17-26, mars 2016.

T. Dubois, **Application du retournement temporel aux systèmes multi-porteuses : propriétés et performances**, thèse de doctorat de l'INSA de Rennes, 25 mars 2013.

G. Lerosey et al., **Time reversal of wideband microwaves**, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, article 154101, 2006.

RETOUR SUR « DÉCOLLAGES À CHAUD »

Notre article «Décollages à chaud», paru dans le numéro d'octobre (*Pour la Science* n° 480), a suscité plusieurs courriers de lecteurs portant d'une part sur le pilotage des avions et d'autre part sur les effets physiques évoqués. Nous remercions ces lecteurs pour leurs commentaires et les précisions qu'ils nous ont fournies. Nous avons repris certains passages de leurs courriers dans la suite de ce texte afin de clarifier certains points.

Commençons par quelques précisions données par des professionnels sur la phase de décollage.

Lors de l'accélération sur la piste, le pilote ne fait pas décoller l'avion dès que la portance est suffisante, ce qui correspondrait à la vitesse de décrochage. «Au contraire, le pilote empêche l'avion de décoller, lui fait dépasser la vitesse de décrochage pour avoir de la sécurité et tire sur le manche quand est atteinte la "vitesse rotation", déterminée avant le décollage en fonction de la masse, de la température et de la pression.» L'avion commence à s'incliner pour prendre l'assiette de montée, continue à accélérer, puis, lorsque la vitesse décidée pour décoller est atteinte, il quitte le sol. Lors du décollage proprement dit, en tirant sur le manche, «le pilote agit plutôt sur la gouverne de profondeur située sur l'empennage arrière, et non sur les ailerons des ailes, destinés à contrôler le mouvement de roulis [inclinaison sur le côté].»

Un troisième point de pilotage concerne le contrôle de la vitesse de l'avion, en référence à l'encadré de la page 90. Levons l'ambiguïté du texte: lorsque l'avion est en vol, ce que contrôle effectivement le pilote, c'est la vitesse de l'avion par rapport à l'air. Comme l'indiquent les flèches représentant les vitesses dans la figure, la vitesse au sol de l'avion est alors la somme vectorielle de cette vitesse et de la vitesse du vent. Donc, pour une même vitesse par rapport à l'air, la vitesse par rapport au sol sera plus faible si le vent est de face, et plus importante si le vent est de dos, comme écrit dans le texte.

Venons-en à présent aux effets physiques discutés. Un lecteur nous signale que l'un des effets majeurs de l'augmentation de température (ou de la diminution de la densité) de l'air est la réduction de la poussée des moteurs. Nous avons

mentionné cet effet dans notre article, mais nous ne l'avions ni expliqué ni quantifié. L'origine de cet effet est le suivant: «Si l'on augmente le débit de carburant brûlé, la poussée augmente, la température devant la turbine et le régime de rotation augmentent. Lorsque la température devant la turbine ou le régime de rotation atteignent une valeur limite imposée par la résistance des matériaux, on ne peut plus augmenter le débit de carburant, ce qui limite la poussée à une valeur maximale. Or la température devant la turbine ou le régime de rotation augmentent si la densité de l'air alimentant le moteur diminue, puisque le débit massique d'air à chauffer et à brasser par le compresseur diminue. Ainsi, le débit de carburant maximal autorisé, donc la poussée, diminue si la densité diminue.»

Cela signifie que l'accélération de l'avion sera moindre et que le temps et la distance requis pour atteindre la vitesse nécessaire au décollage seront augmentés. Cet effet est dominant par rapport à

par exemple que pour un 737-100, un jour standard, pour les aéroports situés à plus de 6000 pieds d'altitude, le poids maximum au décollage est limité par la vitesse que peuvent supporter les pneus. Dans cette situation, lorsque la température est plus élevée, comme la portance diminue, cette vitesse est atteinte pour une masse plus faible et l'avion doit être moins chargé.

Ces courriers nous donnent l'occasion de rappeler notre démarche: présenter et expliquer ce que peuvent apporter le regard et les outils du physicien dans des situations diverses. Bien souvent, nous choisissons des sujets où nous pouvons expliquer qualitativement et quantitativement le phénomène abordé (par exemple les tubes hurleurs, *Pour la Science* n° 479). Mais nous ne nous interdisons pas d'aborder des sujets qui ne sont pas encore totalement compris (comme l'effet Mpemba, *Pour la Science* n° 342) ou des situations technologiques complexes, comme dans le cas présent. Après un travail bibliographique substantiel, nous



la diminution de la portance évoquée dans le texte qui, comme nous l'avons écrit, ne permet pas de retrouver les valeurs de longueurs de piste données par les constructeurs.

Ajoutons d'ailleurs que l'une des limites non évoquées pour la vitesse de décollage est la vitesse limite d'utilisation des pneus. Les abaques de vitesse donnés dans la brochure de Boeing sur les caractéristiques des différents modèles de 737 pour la conception des aéroports indique

tentons d'explicitier les phénomènes physiques qui interviennent, d'évaluer quantitativement leur effet et veillons à donner les limites de ces explications. C'est une démarche qui demeure généraliste et nous ne saurions, malgré nos efforts, atteindre la précision du vocabulaire et la richesse de l'analyse que peuvent offrir des années d'expériences dans le domaine concerné. ■

J.-M. COURTY ET É. KIERLIK

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

THE WALKING HEAD

Mignons et fascinants, les tardigrades restaient une énigme pour les zoologistes. L'étude de leur génome a révélé une facette inattendue de leur anatomie et pour le moins glaçante...

Antoni Van Leeuwenhoek, scrutateur inlassable de l'infiniment petit, en observa-t-il sous son microscope ? Il n'en parle pas, et c'est l'entomologiste allemand Johann Goeze qui, un siècle plus tard, en 1773, est le premier à décrire ces étranges animaux. Frappé par leur curieuse démarche sous le microscope, il les appelle « oursons d'eau ». Trois ans plus tard, le naturaliste italien Lazzaro Spallanzani les baptise du nom de « marcheurs lents », en latin *tardus gradus* – au pluriel *tardigrada*, les tardigrades. Il ne croyait pas si bien dire.

Ces petits animaux, qui mesurent 0,1 à 1,7 millimètre, semblent avoir conquis tous les milieux. On les trouve des glaces polaires à l'équateur, à des altitudes supérieures à 6000 mètres dans l'Himalaya ou inférieures à 4000 mètres dans les océans. Lentement, ils colonisent les mousses et

les lichens, les sables des déserts et les sédiments marins, s'installant dans le moindre interstice. Certains sont parasites et vivent sur les branchies de lamellibranches (des mollusques marins) ou les pattes de crustacés. Leur trompe munie de stylets perforateurs leur permet de se nourrir, par exemple, de cellules de mousses ou de lichens, mais aussi de nématodes... ou d'autres tardigrades.

Ces animaux doivent leur résistance exceptionnelle à leur aptitude à passer en « cryptobiose », un état physiologique où le métabolisme est totalement arrêté, l'organisme devenant indestructible. Cette propriété les autorise à survivre dans des conditions environnementales hors norme, *a priori* interdites à tout organisme vivant. Mais ce n'est pas tout. Leur anatomie, qui commence à être bien décryptée, se révèle tout aussi étrange...

Les oursons d'eau se déplacent lentement sur leurs quatre paires de pattes

Leur très petite taille autorise la déshydratation rapide de la cavité corporelle. Ils entrent alors dans un état latent indestructible, la cryptobiose.

Les tardigrades sont ovipares. En conditions défavorables, les œufs sont résistants, à paroi épaisse. En saison favorable, ils ont une paroi mince et se développent immédiatement.



Grâce à la cryptobiose et suivant les espèces, les tardigrades survivent à une dessiccation complète, au froid, au manque d'oxygène, à une teneur élevée en solutés. Ils résistent aussi à un milieu très acide, à des doses importantes de rayons ionisants (ultraviolets, X ou gamma) et même au vide intersidéral. Ces propriétés étonnantes – observées aussi chez d'autres animaux tels que des rotifères, des nématodes ou des arthropodes – découlent de caractéristiques génétiques particulières, telles que la synthèse de tréhalose, un sucre cryoprotecteur.

EN CHIFFRES

1 238

espèces de tardigrades sont connues dans le monde.

2 millions

d'individus par mètre carré, c'est la densité de tardigrades que l'on observe parfois sur des mousses.

- 273 °C

Les tardigrades supportent cette température pendant 20 heures, et - 200 °C pendant 20 mois. Des tardigrades ont ainsi survécu à 2000 ans d'emprisonnement dans des calottes glaciaires. La chaleur ne les perturbe pas plus : ils supportent une température de 150 °C pendant quelques instants...

Le système nerveux est constitué d'un « cerveau » (protocérébron) à deux lobes qui innervent les yeux, connecté à un anneau qui entoure le pharynx et relié à quatre ganglions, un pour chaque paire de pattes. Chez les autres panarthropodes, le cerveau est moins connecté au reste du système nerveux.

Le tube digestif est constitué d'une bouche munie de stylets perforateurs (qui seraient des griffes transformées), d'un pharynx fonctionnant comme une pompe, d'un œsophage, d'un estomac large, d'un rectum court et d'un anus.

L'animal n'a que des muscles longitudinaux lisses, d'où son déplacement lent.

Pas d'organe respiratoire. Les gaz s'échangent à travers la surface humide de l'animal et diffusent jusqu'aux tissus.

zoologistes pour leur trouver une place logique dans la classification animale. La segmentation les rapprocherait des annélides (l'ensemble des vers annelés) ou des arthropodes, mais l'absence de tout système interne circulatoire, respiratoire et excréteur pose question.

COUSIN DES ARTHROPODES ?

Les phylogénies moléculaires les plus récentes placent les tardigrades dans l'embranchement des panarthropodes, avec les onychophores et les euarthropodes (les arthropodes actuels). Les onychophores – « porteurs de griffes » – sont de longs animaux segmentés, chaque segment étant pourvu d'une paire d'appendices marcheurs. Ils vivent dans des aires fragmentées, toutes au sud du tropique du Cancer, provenant de la fracturation du continent de Gondwana. Les euarthropodes regroupent des taxons bien connus – crustacés, arachnides, mille-pattes, insectes. Ils présentent eux aussi de nombreux segments.

Le regroupement de ces trois taxons – tardigrades, onychophores et euarthropodes – au sein du superphylum des panarthropodes implique que l'organisation de chacun soit héritée d'un ancêtre hypothétique commun, dont on devrait pouvoir reconstruire la structure. De nombreuses questions se posent alors. Notamment, l'ancêtre avait-il de nombreux segments ou seulement quatre, comme les tardigrades ? Répondre à une telle question revient à trouver l'homologie entre les différentes parties du corps

munies de griffes, mues par de seuls muscles longitudinaux (ils n'ont pas de muscles transverses). Ils portent une cuticule complexe, constituée de chitine (le principal composant de l'enveloppe externe des insectes), de protéines et de mucopolysaccharides (des groupements de glucides), avec des mues périodiques. Chez certaines espèces de tardigrades, elle forme des plaques qui soulignent les différents segments de l'animal.

On distingue ainsi, chez tous les tardigrades, un plan d'organisation homogène : une tête suivie de quatre segments portant chacun une paire de pattes. Pourtant, cette anatomie présente des énigmes, ce qui explique la difficulté des



L'tardigrade *Hypsibius dujardini*
Taille : 0,5 mm

de ces animaux, c'est-à-dire la similitude qui correspond à l'héritage d'un ancêtre commun.

Au vu de la segmentation du corps et des mues de la cuticule, les zoologistes ont très vite rapproché les tardigrades des arthropodes. Logiquement, ils ont proposé que les têtes des animaux de ces deux taxons étaient homologues, avec pour conséquence l'homologie des quatre segments des tardigrades avec les premiers segments du corps des arthropodes. Pourtant, des difficultés ont immédiatement été notées, en particulier l'originalité du cerveau des tardigrades par rapport aux autres panarthropodes.

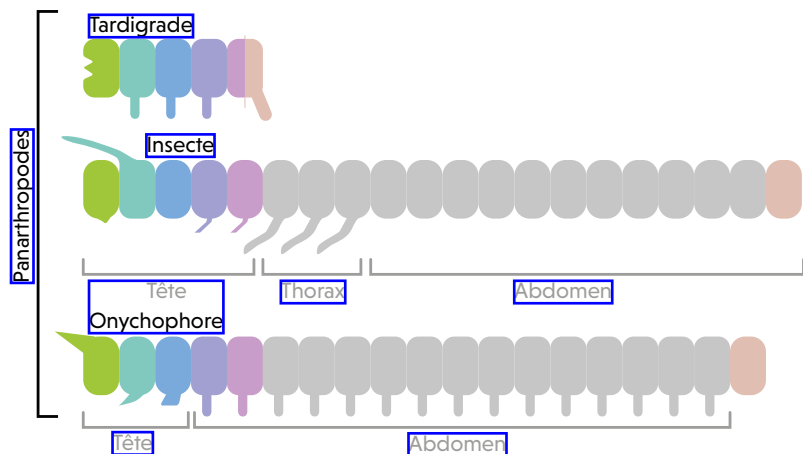
Si, à l'époque, il n'y avait pas d'autres outils à disposition que l'observation, il en est tout autrement aujourd'hui. Depuis une vingtaine d'années, on sait que l'organisation des animaux à symétrie bilatérale est contrôlée, suivant l'axe antéro-postérieur, par des gènes particuliers dits homéotiques: des gènes homologues qui organisent le développement d'organismes aussi variés que les vertébrés, les arthropodes, les annélides, les mollusques... Bref, une même boîte à outils moléculaires permet la structuration d'animaux très différents. Or leur ordre sur le chromosome est identique à celui de leurs lieux d'action suivant l'axe antéro-postérieur. Ainsi, en comparant les lieux d'expression de ces gènes chez les différents panarthropodes, il devrait être possible de déterminer si leurs têtes et segments sont bien homologues, en supposant que les lieux d'expression de ces gènes homologues sont homologues.

UNE TÊTE SUR PATTES

C'est le pari qu'ont fait Frank Smith et Bob Goldstein, de l'université de Caroline du Nord, aux États-Unis, en comparant le génome de *Hypsibius dujardini*, une espèce de tardigrade, et les transcriptomes (l'ensemble des gènes exprimés) de trois espèces (dont *H. dujardini*) avec ceux d'euarthropodes et d'onychophores. Les résultats sont étonnants. Autant euarthropodes et onychophores ont des panoplies géniques identiques, autant les tardigrades brillent par leur originalité: chez eux, il manque les gènes majeurs qui, chez les insectes, structurent le thorax et l'abdomen! Les segments du tardigrade seraient-ils homologues de la tête des insectes? Oui, ont montré les deux chercheurs (voir l'encadré ci-dessus). On comprend pourquoi Florian Maderspacher, éditeur à la revue *Current Biology* qui a publié ces travaux, a surnommé les tardigrades *walking heads*!

COMME DES TÊTES D'INSECTES

Les seuls gènes homéotiques dont disposent les tardigrades sont des gènes qui définissent la partie antérieure des autres panarthropodes (et celui qui code leur extrémité postérieure). Chez les insectes, cette partie antérieure représente la tête. Les tardigrades seraient-ils homologues de la tête des insectes? Pour l'affirmer, il restait une difficulté à résoudre: les gènes homéotiques ne s'expriment pas dans les deux premiers segments de la tête des insectes et ne peuvent donc servir de moyen de comparaison. Toutefois, un autre gène du développement – *otd* – s'exprime dans leur premier segment (en vert ci-dessous). Or son étude chez les tardigrades montre qu'il s'exprime dans toute leur tête. Ainsi, la tête du tardigrade est homologue non pas de la tête d'un insecte, mais de son premier segment! Et les quatre segments suivants sont homologues des quatre segments qui poursuivent la tête de l'insecte. Le tardigrade est donc homologue de la tête d'un insecte!



Par quel chemin évolutif en est-on arrivé là? La panoplie complète de gènes homéotiques se trouvant aussi chez les annélides et les vertébrés, cela signifie qu'elle est plus ancienne que l'ancêtre hypothétique commun aux panarthropodes. La version incomplète des tardigrades correspond donc à une perte secondaire, corrélée à la disparition d'une grande partie du corps de l'animal.

Chez les arthropodes, on connaît deux grands types de développement: celui à bandelette germinative longue et celui à bandelette germinative courte. Dans le premier cas, le très jeune embryon est constitué d'une bandelette qui va donner l'ensemble des segments de l'animal. Il en est ainsi, par exemple, chez la drosophile. Dans l'autre cas, la bandelette est courte, c'est-à-dire que seules les ébauches des premiers segments antérieurs sont présentes, les autres segments se constituant au fur et à mesure par croissance postérieure de l'embryon. On peut se représenter le tardigrade comme le résultat de l'embryogenèse d'une bandelette germinative courte qui n'a pas eu de croissance postérieure. L'évolution aurait favorisé une durée de développement courte, produisant des adultes de la taille de la jeune larve. Le mignon ourson d'eau n'a décidément rien à envier au *walking dead*... ■

BIBLIOGRAPHIE

F. W. Smith et B. Goldstein, **Segmentation in tardigrade and diversification of segmental patterns in Panarthropoda**, *Arthropod Structure & Development*, vol. 46, pp. 328-340, 2017.

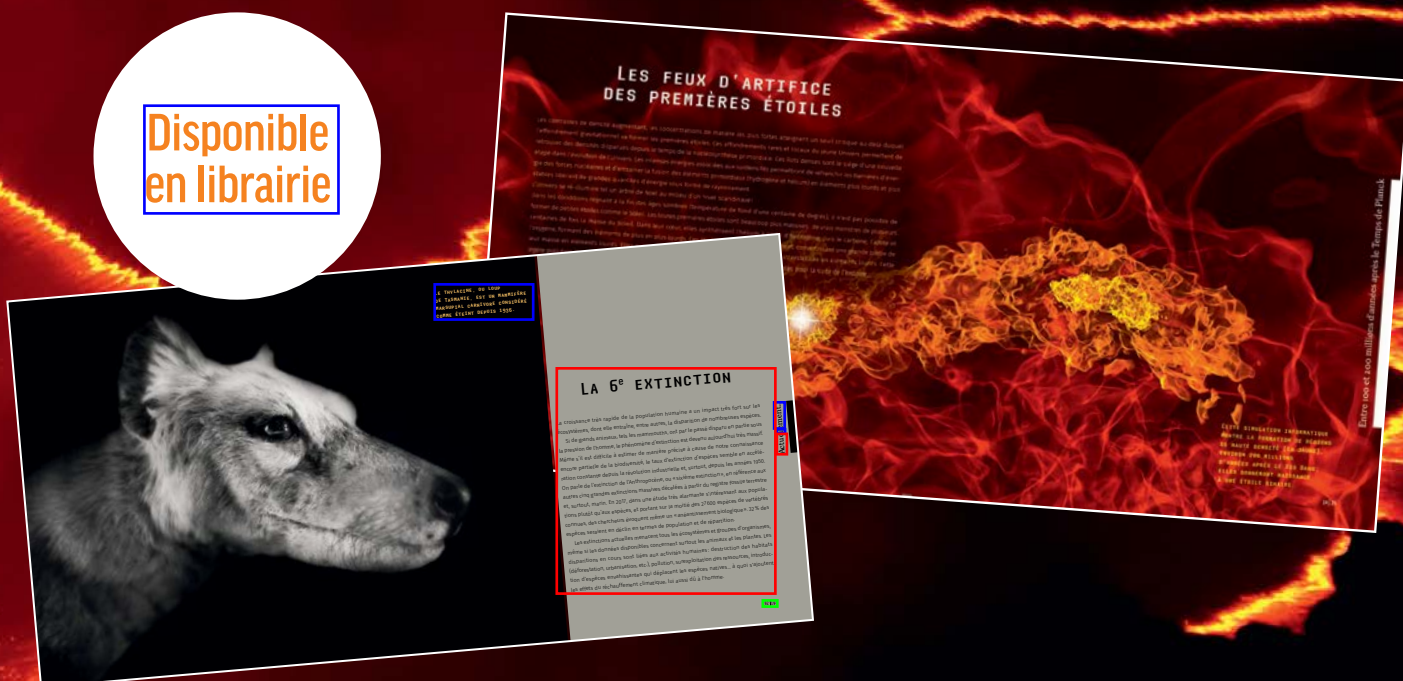
F. W. Smith et al., **The compact body plan of tardigrades evolved by loss of a large body region**, *Current Biology*, vol. 26, pp. 224-229, 2016.

F. W. Smith et E. L. Jockusch, **The metameric pattern of *Hypsibius dujardini* (Eutardigrada) and its relationship to that of other panarthropods**, *Frontiers in Zoology*, 11: 66, 2014.



Un voyage unique dans l'histoire de l'Univers, de la Terre et du vivant

Disponible
en librairie



Belin:
ÉDITEUR

Suivez-nous et abonnez-vous à notre newsletter sur www.belin-editeur.com

[/EditionsBelin](https://www.facebook.com/EditionsBelin) • [@editions_belin](https://twitter.com/editions_belin)

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

DES SQUELETTES CROUSTILLANTS

Les matières grasses empêchent les feuilletages de s'amollir, et permettent ainsi d'inventer de nouveaux mets croustillants.

La minceur des feuillets fait le croustillant des pâtes feuilletées: au lieu d'avoir le craquement unique d'une épaisse couche de pâte, on a en bouche une succession de petites ruptures, chacune associée à un son particulier, cette succession engendrant le son spécifique des croustillants.

Toutefois, on souhaite souvent associer à la pâte feuilletée une préparation qui a du goût et une consistance plus souple; hélas, l'eau qu'elle contient détrempe les feuillets, ce qui tue le croustillant. Comment protéger la pâte feuilletée? En imperméabilisant par de la matière grasse... Cela conduit à imaginer un système culinaire nouveau, que j'ai nommé «odier».

Analysons la question de la protection de la pâte feuilletée. La cuisson de la pâte la met dans un état dit vitreux, où les molécules forment un solide amorphe (non cristallisé): au refroidissement de la pâte, les chaînes de ces polymères que sont les amyloses et les amylopectines de l'amidon ne peuvent plus bouger suffisamment pour s'ordonner en cristaux et sont figées dans des positions désordonnées. La pâte cuite, dans son état vitreux, est cassante comme le verre, qui a donné son nom à cet état de la matière.

À l'air libre, les pâtes feuilletées s'amollissent, parce que l'humidité de l'air est absorbée et que l'eau joue alors un rôle de plastifiant, séparant les chaînes de polymères et leur permettant de bouger. Comment l'éviter? Si l'eau est une menace pour les feuillets croustillants, il suffit de protéger ces derniers par une couche qui fasse barrière. Or les cuisiniers savent que badigeonner des viandes avec de l'huile prévient l'évaporation de l'eau. Il est

d'ailleurs facile de vérifier que, dans un tube, de l'eau recouverte d'une couche d'huile, même mince, ne s'évapore pas (mon test a duré un an). En application de cette idée simple, chacun peut faire cuire un feuilletage en forme de tarte, puis badigeonner l'intérieur avec du beurre de cacao (chocolat blanc) fondu. Avec deux ou trois couches successives, histoire de bien recouvrir tout le feuilletage, on parvient sans difficulté à faire séjourner de l'eau dans le fond de tarte. Nous y avons même mis un poisson rouge!

Or l'éventail des matières grasses alimentaires ne se limite pas à l'huile ou au beurre de cacao. Pourquoi ne pas utiliser du beurre? Ou du chocolat? Ou de la graisse de foie gras, pour des plats salés?

Allons plus loin. Qu'avons-nous fait? Mis un peu de «chair autour des os». On peut faire plus. Par exemple, si nous immergeons un petit bloc de pâte feuilletée dans un parallélépipède de chocolat fondu, que nous laissons ensuite prendre par refroidissement, nous obtenons un squelette croustillant au centre du carré, ajoutant du croustillant dans le croquant.

Et en immergeant dans du beurre? À condition que ce beurre ait été clarifié, c'est-à-dire qu'on l'ait débarrassé de son eau, par chauffage lent, puis décantation de la matière grasse, on obtient à nouveau une armature, un échafaudage croustillant au

Immergés dans de la matière grasse, ces feuilletés ne perdront pas leur croustillant!



centre d'un solide mou (si la température n'est ni trop basse ni trop haute, bien sûr).

Dans de la graisse de foie gras? Dans de la matière grasse de fromage? Dans un glaçon d'huile d'olive? Dans du beurre noisette? Les voilà, ces systèmes que je propose de nommer des odiers, en l'honneur du chimiste français Auguste Odier, quiisola la chitine de l'exosquelette d'arthropodes en 1823... ce qui doit nous faire penser que le squelette croustillant peut tout aussi bien être à l'intérieur qu'à l'extérieur! ■



LA RECETTE

- 1 Avec 200 grammes de farine et un peu d'eau, faire de la pâte que l'on étale en un disque d'environ 1 centimètre d'épaisseur.
- 2 Y déposer 100 à 200 grammes de beurre malaxé, en un disque plus petit.
- 3 Replier la pâte sur le beurre en l'enfermant comme une lettre dans une enveloppe.
- 4 Au rouleau, étendre trois fois plus long que large, et replier en quatre. Répéter l'opération d'étalement et de repliement.
- 5 Cuire au four à 170 °C pendant 50 minutes, afin d'obtenir un feuilletage très sec, donc très croustillant.
- 6 Préparer un beurre noisette en chauffant du beurre dans une casserole, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles (de vapeur d'eau).
- 7 Tremper le feuilletage dans le beurre noisette et faire prendre le système en refroidissant.

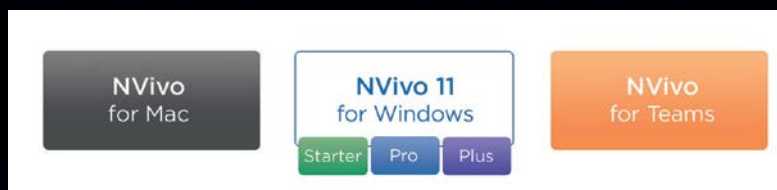


Le logiciel #1 de l'analyse qualitative de données

Le plus performant des logiciels d'analyse qualitative

La suite NVivo vous fournit les outils nécessaires pour parvenir à des interprétations probantes de vos données.

Ce logiciel vous aide à explorer, à analyser et à extraire l'information avec facilité dans les documents, les fichiers PDF, les vidéos, les réseaux sociaux, les photos et les fichiers audio.



www.ritme.com

Distributeur officiel en France, Suisse, Belgique et Luxembourg
RITME - 72 rue des Archives, 75003 Paris, France - +33 (0) 1 42 46 00 42

© 2017 RITME - NVivo est une marque déposée de QSR International. Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.



A PICORER



Retrouvez
tous nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.80

15

C'est le nombre de formes de pentagones convexes qui pavent le plan, pas une de plus ! Le mathématicien français Michaël Rao a prouvé qu'on n'en trouverait jamais d'autres.

P.40

RAYONS

Les passagers d'une mission aller-retour vers Mars recevraient une dose de rayons cosmiques de 0,48 milligray par jour pendant un an. Au total, c'est près de 6 000 fois la dose absorbée au cours d'un vol de New York à Los Angeles (quelques heures), qui est de 0,03 milligray...

P.36

« *Un retour d'échantillons martiens est envisagé, mais ne sera pas possible avant 2030* »

FRANCES WESTALL
membre de la mission ExoMars 2020

P.7

75 %

La biomasse d'insectes volants a diminué de 75 % durant ces 27 dernières années en Allemagne... et donc probablement aussi en Europe occidentale.

P.26

EXAPTATION

En biologie, certains traits simples peuvent évoluer et aboutir à des structures remplissant une autre fonction. Par exemple, les plumes ont d'abord servi de thermorégulateurs avant de favoriser l'adaptation au vol. Les paléontologues Stephen Jay Gould et Elisabeth Vrba ont nommé ce phénomène exaptation en 1982.

P.92

CRYPTOBIOSE

La très petite taille des tardigrades, des animaux de 0,1 à 1,7 millimètre, autorise leur déshydratation rapide. Ils entrent alors dans un état latent indestructible, la cryptobiose, qui leur permet de résister à des conditions extrêmes habituellement létales pour les organismes vivants, comme une température proche du zéro absolu.

P.56

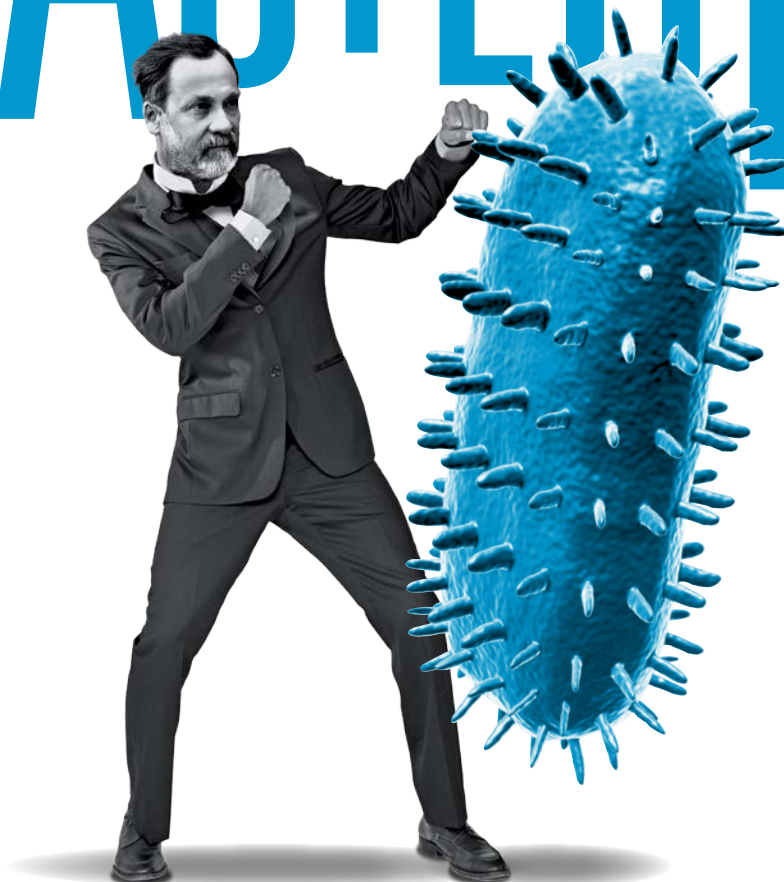
FRUGAL

Un trou noir supermassif au centre d'une galaxie telle que la Voie lactée avale en moyenne une étoile tous les 100 000 ans. Un repas frugal, mais remarquable : l'événement produit pendant quelques mois un intense sursaut lumineux.

DU 12 DÉCEMBRE 2017 AU 19 AOÛT 2018

EXPO

PASTEUR



Palais

DÉCOUVERTE

L'EXPERIMENTATEUR

Ⓜ FRANKLIN ROOSEVELT Ⓜ CHAMPS-ÉLYSÉES CLEMENCEAU
PALAIS-DECOUVERTE.FR / #PASTEUR



AVEC LA COLLABORATION DE
Institut Pasteur

AVEC LE SOUTIEN DE
SANOFI PASTEUR

arte

20
ANNUÉ

l'express

SCIENCE

l'éléphant

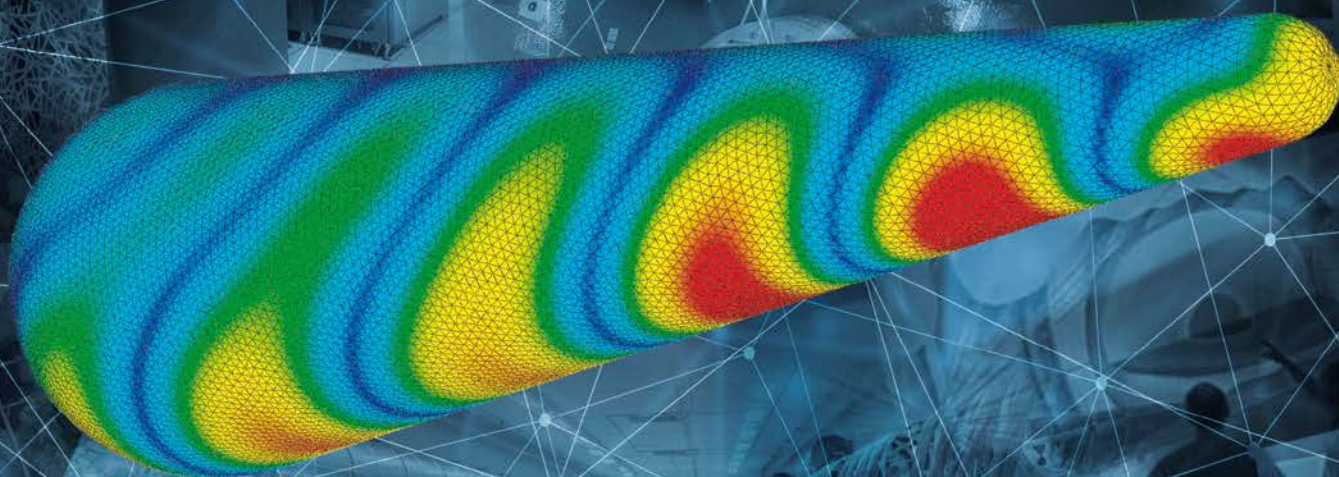
Usbek & Rica

Histoires
VRAIES

Wondercity

HUFFPOST

60 ans au service de la dissuasion nucléaire française



Alternances Stages Thèses Post-docs CDI

Rejoignez-nous et partagez nos valeurs

ENGAGEMENT : s'investir au service de la dissuasion nucléaire française et agir pour la défense et la sécurité

AMBITION : relever des défis scientifiques et techniques avec des moyens technologiques d'exception

INTÉGRITÉ : faire de l'honnêteté morale et scientifique le fondement de notre action

ACCOMPLISSEMENT : construire son avenir et s'affirmer dans un environnement varié et respectueux

ESPRIT D'ÉQUIPE : associer les forces et les compétences de chacun pour atteindre l'objectif

Site : www-dam.cea.fr

Offres : www.cea.fr/emploi

Contact : drh-suivi.recrutements@cea.fr