CLIMAT « On peut encore freiner les événements extrêmes »

Entretien avec **Valérie Masson-Delmotte**



Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

Écologie
POURQUOI LA FORÊT TROPICALE EST SI RICHE

Neurosciences
L'ÉTONNANTE MER INTÉRIEURE DU CERVEAU

Informatique
LE MONDE NUMÉRIQUE PASSE À L'ÉCHELLE ZETTA

10/21

L'INTERNET QUANTIQUE

Plus sûr
Plus puissant
Plus économe

POUR LA SCIENCE

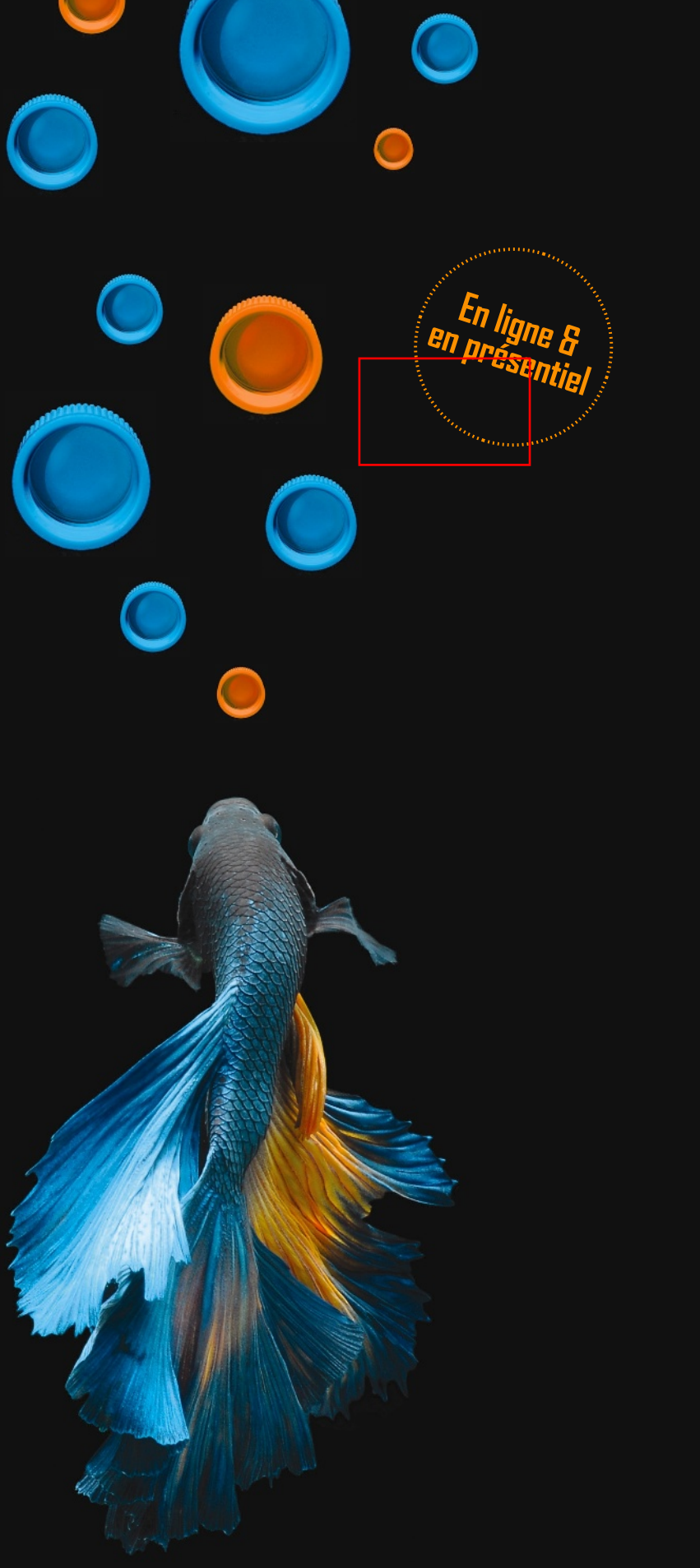
Édition française de Scientific American – **Octobre 2021 - n° 528**

DOM : 7,90 € – BEL./LUX. : 7,90 € – CH : 12,70 CHF – CAN : 12,50 $CA – TOM : 1040 XPF

L 13256 - 528 H - F: 6,90 € - RD

PARISCIENCE

17E ÉDITION | FESTIVAL INTERNATIONAL DU FILM SCIENTIFIQUE



En ligne & en présentiel

SCOLAIRE
04/10 → 21/10 2021

GRAND PUBLIC
29/10 → 01/11 2021

Muséum national d'Histoire naturelle
Jardin des plantes / Paris 5e

Infos sur www.pariscience.fr

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
Stagiaire: Valentin Rakovsky

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

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager et partenariats: Aëla Keryhuel
aela.keryhuel@pourlascience.fr

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Stéphane Blanc, Maud Bruguière, Silvana Condemi, Xavier Müller, Didier Sornette, Martin Tiano

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
www.boutique.groupepourlascience.fr
Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h
Adresse postale:
Service abonnement
Groupe Pour la Science
56 rue du Rocher
75008 Paris

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; Alicia Abadie
Tél. 04 88 15 12 47
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmut
President: Stephen Pincock
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_{tot} 0,007 kg/tonne

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
10-31-1282
pefc-france.org

ÉDITO



Maurice Mashaal
Rédacteur en chef

RÉSEAU CHERCHE NON-LOCAL POUR ÉCHANGES DISCRETS

Le mot «quantique» est à la mode. Tellement à la mode que des charlatans de la médecine ou de la psychologie se l'approprient pour vendre des ouvrages ou des théories fumeuses. L'internet quantique n'appartient pas à la même catégorie: ce concept encore futuriste fait l'objet de travaux tout à fait sérieux et de pointe. Mais de quoi s'agit-il? Internet est un réseau dont les nœuds sont connectés par des fibres optiques, qui véhiculent l'information sous la forme d'impulsions lumineuses. Ces paquets de lumière sont constitués de plusieurs milliers de photons. Or, comme nous l'explique le physicien genevois Nicolas Gisin (*voir pages 22 à 27*), si l'on parvenait à réduire ce nombre à un seul photon par impulsion, il serait possible d'utiliser les propriétés quantiques de ces particules de lumière au profit de la sécurité des communications, qui deviendrait infaillible. C'est l'avantage le plus saillant. Il y en a d'autres.

Reste que manipuler les propriétés quantiques de photons à l'échelle d'un réseau aussi vaste et complexe qu'internet n'est pas une mince affaire. Les difficultés, immenses, sont non seulement techniques mais aussi théoriques. L'une d'elles, et non la moindre, porte sur la non-localité, phénomène quantique déroutant par lequel des particules distantes peuvent, en un certain sens, s'influencer instantanément. Des décennies de réflexions et d'expériences ont fini par cerner la non-localité pour des particules émises par une source unique, mais cela reste largement à faire dans le cas de plusieurs sources indépendantes qu'implique un réseau (*voir pages 28 à 38*).

Alors, l'internet quantique n'est peut-être pas pour bientôt, mais l'idée stimule beaucoup physiciens et ingénieurs. Espérons en tout cas que l'internet du futur sera de qualité et libre, à l'abri tant des censeurs que des désinformateurs. Mais c'est là une autre histoire, sur laquelle la physique et la technique ont peu de prise. ■

SOMMAIRE

N° 528 / *Octobre 2021*

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Des cristaux de Wigner observés en laboratoire
- Une guêpe parasite en toute impunité
- Comment l'éléphant fait de sa trompe un outil polyvalent
- Quand l'eau devient métallique
- Sur les traces d'exolunes en formation
- Trois Néandertaliens et un Dénisovien ont révélé leurs groupes sanguins
- Des forêts en oscillation
- Le diabète, une maladie du cerveau ?
- Rapport du Giec : Entretien avec Valérie Masson-Delmotte

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
DISPUTES ENVIRONNEMENTALES
Bataille sur le statut des données génétiques
Catherine Aubertin

P. 20
LES SCIENCES À LA LOUPE
La rhétorique de l'excellence
Yves Gingras

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À III (APRÈS LA P. 70)

Accident nucléaire
Le refroidissement du combustible mis à l'épreuve
parrainé par
IRSN

Pour la Science.fr
LETTRE D'INFORMATION

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

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

Inscrivez-vous www.pourlascience.fr

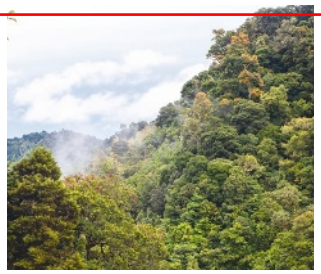


En couverture :
© Quardia/shutterstock.com

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

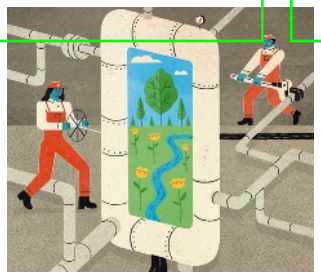
Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, broché en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.

GRANDS FORMATS



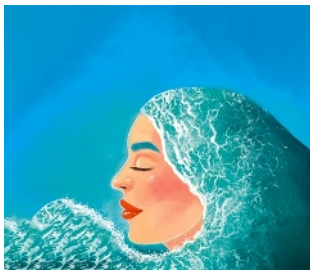
P. 40
ÉCOLOGIE
COMMENT LES PARASITES SCULPTENT LES PAYSAGES VÉGÉTAUX
Marc-André Selosse

Pourquoi les forêts tropicales sont-elles généralement bien plus riches en espèces d'arbres que les forêts tempérées ? La réponse est liée aux microorganismes du sol et à l'« effet Janzen-Connell ».



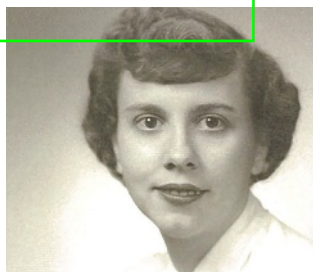
P. 50
ÉNERGIE
QUE FAIRE DES USINES À GAZ ?
Michael Webber

La combustion du gaz naturel émet du CO_2. Dans la perspective d'un avenir décarboné, faudra-t-il démanteler les infrastructures gazières existantes ? Dans un premier temps, il serait plus judicieux de les reconvertir pour y transporter des gaz ayant un meilleur bilan écologique.



P. 60
NEUROSCIENCES
VINGT MILLE LIEUES SOUS UN CRÂNE
A. Chagnot, G. Rauchs et D. Vivien

Dix ans de découvertes précisent notre compréhension des « mers » et « rivières » empruntées par le liquide céphalorachidien, qui baigne notre cerveau et notre moelle épinière. Et l'on s'aperçoit que ce fluide joue un rôle crucial tout au long de notre vie.



P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES
MARY TSINGOU, DANS L'OMBRE DE LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE NUMÉRIQUE
Thierry Dauxois

Embauchée dans les années 1950 à Los Alamos pour effectuer des calculs à la main, la mathématicienne, aujourd'hui tombée dans l'oubli, était pourtant une pionnière en programmation.

À LA UNE



PHYSIQUE QUANTIQUE

P. 22

« L'INTERNET QUANTIQUE EST POUR LE PHYSICIEN UN DÉFI FASCINANT »

Entretien avec Nicolas Gisin

Comment sécuriser les communications numériques ? Un internet du futur mettant à profit les lois de la physique quantique offrirait une solution infaillible. À condition de surmonter de nombreuses difficultés techniques et théoriques… Les explications de Nicolas Gisin, qui nous décrit aussi les progrès les plus récents.

P. 28

LA NON-LOCALITÉ QUANTIQUE À L'ÈRE DES RÉSEAUX

Marc-Olivier Renou, Nicolas Gisin et Nicolas Brunner

Les lois de la physique quantique semblent incompatibles avec le principe de localité, selon lequel deux objets distants ne peuvent pas s'influencer instantanément. Assez bien comprise pour des photons émis par une source unique, cette non-localité reste à cerner dans le cas d'un internet quantique, réseau où de nombreuses sources indépendantes de photons seront à l'œuvre.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

LE MONDE NUMÉRIQUE PASSE AU ZETTA

Jean-Paul Delahaye

Les capacités de calcul et de stockage de l'information continuent de croître. Globalement, où en est-on aujourd'hui ? Les estimations font apparaître l'ordre de grandeur de 10^{21} octets, c'est-à-dire le zettaoctet.

P. 86

ART & SCIENCE

La perspective, une invention flamande ?

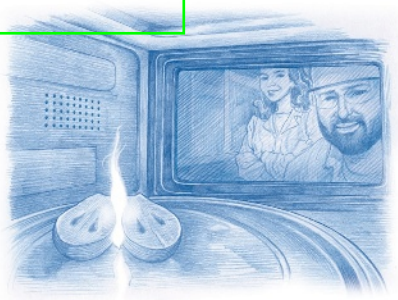
Loïc Mangin

P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Raisin flambé aux microondes

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Sur les traces des premiers ostéocytes

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des sablés bien goûteux

Hervé This

P. 98

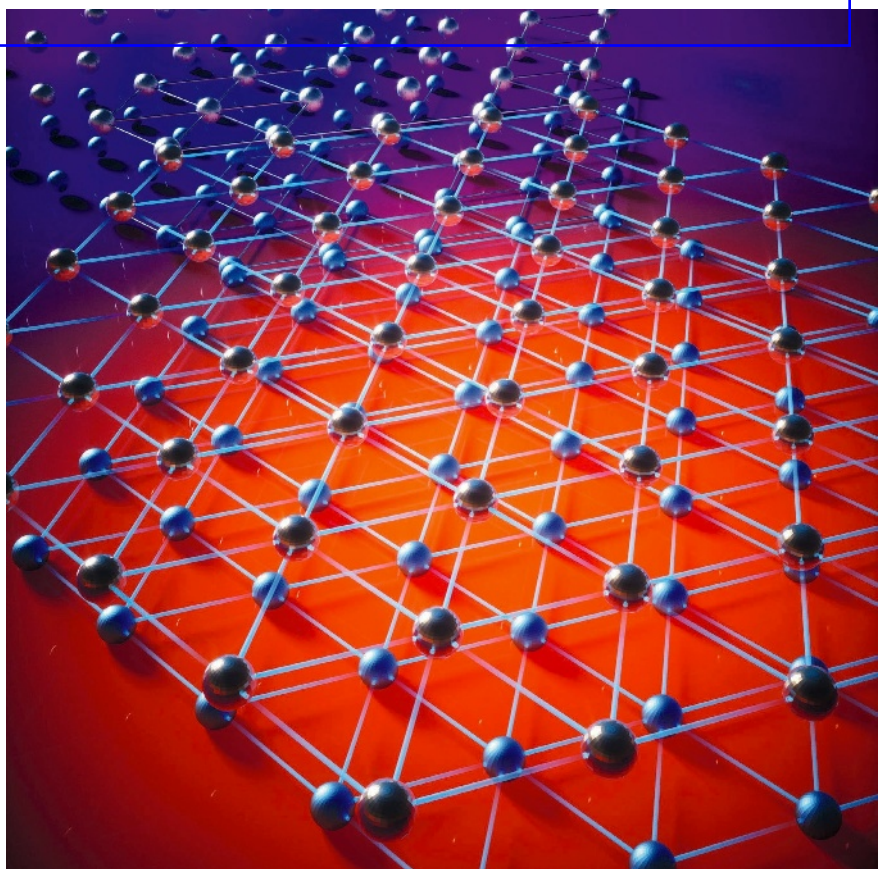
À PICORER

ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.16 *Livres du mois*
P.18 *Disputes environnementales*
P.20 *Les sciences à la loupe*

PHYSIQUE

DES CRISTAUX DE WIGNER OBSERVÉS EN LABORATOIRE



Grâce aux progrès dans la synthèse de matériaux d'épaisseur monoatomique, des chercheurs ont formé des cristaux de Wigner, état de la matière où les électrons libres sont figés selon un motif régulier de maille triangulaire *(ici, deux cristaux de Wigner sont représentés l'un au-dessus de l'autre).*

Constitués d'électrons immobiles et répartis de façon régulière, des cristaux de Wigner ont été produits dans des matériaux d'épaisseur monoatomique.

Dans un matériau conducteur, les électrons libres se comportent comme un fluide et circulent à des vitesses de l'ordre de quelques milliers de kilomètres par seconde. Mais dans certaines conditions, les électrons se figent dans une configuration régulière qui rappelle celle d'un cristal. À cause de cet immobilisme, il n'est plus possible d'établir un courant dans le matériau: celui-ci se comporte comme un isolant. En 1934, le physicien hongrois Eugene Wigner a prédit l'existence de ce type de cristal qui porte aujourd'hui son nom. L'équipe de Hongkun Park, à l'université Harvard, et celle d'Ataç Imamoğlu, à l'École polytechnique fédérale de Zurich, viennent d'observer de façon très nette ce phénomène et la transition de phase associée du cristal qui «fond».

Dans un matériau, ce cristal d'électrons se forme dans des conditions très particulières. «Le cristal de Wigner serait l'état naturel d'un ensemble d'électrons tels qu'on les rencontrerait dans les métaux s'il n'y avait pas de phénomènes quantiques», explique Mark Oliver Goerbig, du Laboratoire de physique des solides à Orsay. «En effet, les électrons se repoussent en raison de leurs interactions coulombiennes (ou électrostatiques) tout en étant restreints au volume occupé par le métal. La formation d'un cristal minimiserait cette répulsion. Or les fluctuations thermiques et quantiques empêchent cette mise en ordre.» Il faut donc refroidir le matériau à quelques degrés au-dessus du zéro absolu pour limiter l'agitation thermique. Mais même au zéro absolu, les électrons bougent encore trop en raison de fluctuations quantiques. Afin de réduire l'importance relative de ces dernières, il faut diminuer la densité électronique. Dans ces conditions, la répulsion coulombienne entre les électrons domine et, dans un système bidimensionnel, les particules se disposent à la même distance les unes des autres selon un réseau triangulaire.

Depuis les travaux de Wigner, plusieurs expériences ont mis en évidence ce

© Elia Ward Studio/Hongkun Park et You Zhou

cristal en utilisant un fort champ magnétique pour réduire les fluctuations quantiques. Or, ces dernières années, quelques équipes ont obtenu des indices de formation d'un cristal de Wigner sans l'assistance d'un champ magnétique. Mais une démonstration décisive manquait.

Les progrès dans la synthèse de matériaux constitués d'une unique couche atomique ont ouvert la voie à des systèmes prometteurs. Les équipes de Harvard et Zurich ont utilisé du diséléniure de molybdène ($MoSe_2$), qui a un double avantage: la masse effective des électrons y est importante (ils circulent plus lentement, ce qui réduit l'agitation quantique) et les interactions de ces particules sont plus intenses (la répulsion coulombienne y est moins perturbée – écrantée – que dans d'autres matériaux). Il est alors possible de réunir les conditions pour obtenir un cristal de Wigner sans l'aide d'un champ magnétique et avec une densité d'électrons assez élevée.

L'équipe d'Ataç Imamoğlu a utilisé une seule couche monoatomique de $MoSe_2$. En appliquant une tension électrique sur la couche, les chercheurs ont réglé finement la densité électronique et formé un cristal de Wigner, les électrons se disposant selon un réseau triangulaire. L'équipe de Hongkun Park, elle, a utilisé deux couches monoatomiques de $MoSe_2$ superposées et séparées par un matériau isolant, chacune pouvant contenir un cristal de Wigner. À cause des forces coulombiennes agissant entre les couches, les structures cristallines ne se formaient que pour certains rapports entiers des densités électroniques dans les deux couches.

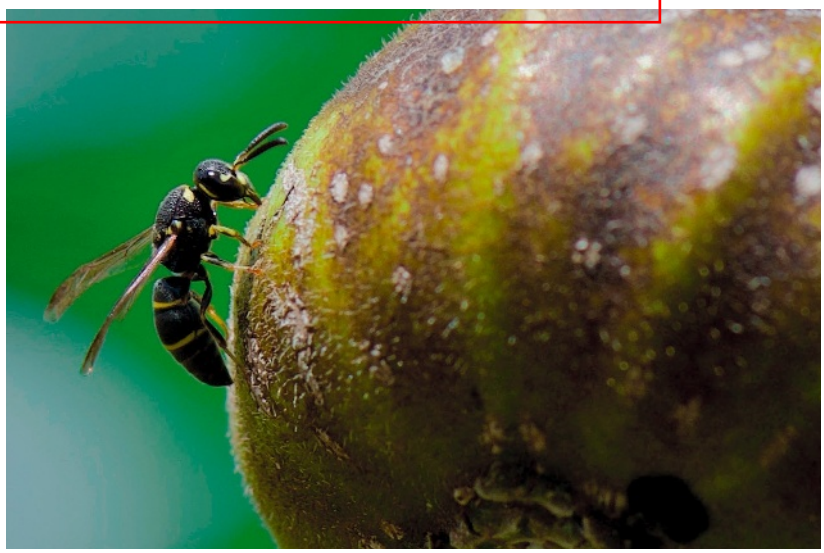
Grâce à ce dispositif performant, les physiciens ont étudié les transitions de phase du cristal de Wigner. Une première transition peut être obtenue en augmentant la température. Le cristal fond, à l'image d'un glaçon quand la température dépasse 0 °C. L'agitation thermique reprend le dessus et les électrons redeviennent un fluide. Mais une autre transition, dite «quantique», est obtenue à température constante: en augmentant la densité électronique, l'agitation quantique s'accroît et déstabilise la structure, et les électrons retrouvent leur fluidité. ■

Sean Bailly

You Zhou *et al.*, *Nature*, vol. 595, pp. 48-52, 2021;
T. Smoleński *et al.*, *ibid.*, pp. 53- 57

© Shutterstock/Somboon Kamtaeja.com

UNE GUÊPE PARASITE EN TOUTE IMPUNITÉ



Les ficus, genre d'arbres auquel appartient le figuier, et les guêpes entretiennent d'étroites relations: les premiers offrent aux secondes un lieu pour pondre et, en échange, les guêpes pollinisent l'arbre... dans la plupart des cas.

L'association étroite entre les ficus du Yunnan chinois et certaines guêpes est un jeu à somme positive, où chacun tire des bénéfices de la coopération et a intérêt à la perpétuer. Les insectes pollinisent les ficus et s'invitent en échange à l'intérieur des inflorescences pour y pondre leurs œufs et favoriser le développement de leurs larves. La plupart des ficus réagissent aux espèces qui se défausseraient de leur rôle pollinisateur: un mécanisme encore mal connu conduit la plante à laisser choir au sol les fruits qui contiennent leurs œufs. Les guêpes les moins pollinisatrices sont ainsi désavantagées dans leur reproduction. Mais Ting Zhang, du jardin botanique tropical de Xishuangbanna, en Chine, et ses collègues ont trouvé une curieuse exception.

Les fruits du ficus ginseng servent de lieu de ponte à deux guêpes: *Eupristina verticillata* et une espèce très proche non encore nommée (*Eupristina sp.*). *Eupristina verticillata* porte sur ses pattes des cils accrochant facilement le pollen et permettant sa dispersion. Sa congénère *Eupristina sp.* a perdu ces cils au fil de l'évolution et ne pollinise presque jamais les ficus. Mais les chercheurs n'ont remarqué aucune forme de sanction contre ces passagères clandestines. Au contraire: les œufs d'*Eupristina sp.* donnent naissance à 25% de larves en plus que ceux d'*Eupristina verticillata* et plus souvent à des femelles, un sérieux avantage pour la perpétuation de l'espèce.

La bonne élève n'a donc pas encore obtenu d'avantage évolutif, ni été remplacée par le parasite. Ce manège pourrait donc perdurer jusqu'à ce que la plante soit en mesure de différencier les deux espèces pour l'heure bien semblables, et que le parasite soit enfin sanctionné. ■

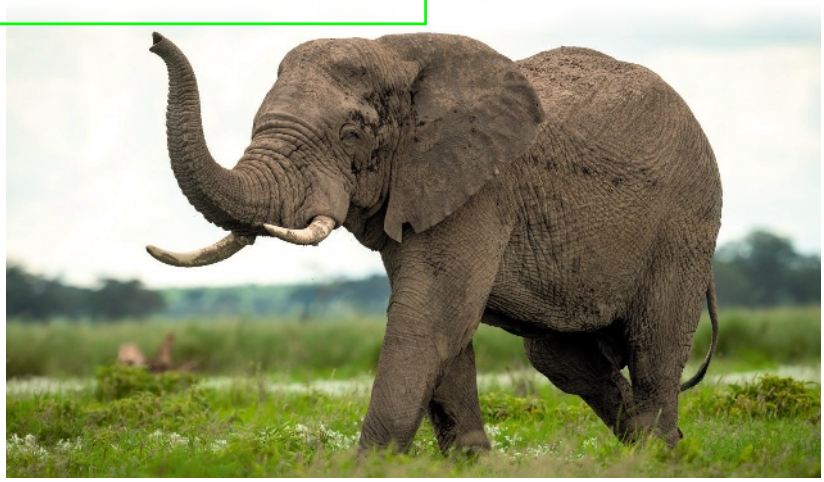
Valentin Rakovsky

T. Zhang *et al.*, *PNAS*, vol. 118(32), article e2021148118, 2021

BIOMÉCANIQUE

COMMENT L'ÉLÉPHANT FAIT DE SA TROMPE UN OUTIL POLYVALENT

Pour exploiter toutes les possibilités de sa trompe, le pachyderme en simplifie l'usage en le réduisant à un enchaînement de mouvements élémentaires.



Alors que sa trompe est continuellement flexible, l'éléphant peut la courber de façon à former des segments rigides, comme reliés par des articulations.

Décortiquer des cacahuètes, soulever des charges atteignant 270 kilogrammes, sentir, tâter, porter de l'eau à sa bouche, communiquer par signes, émettre des sons, s'asperger, se battre..., c'est autant d'actions que l'éléphant est capable de réaliser avec sa seule trompe. Cet organe polyvalent de plus d'une centaine de kilogrammes, né de la fusion entre le nez et la lèvre supérieure, est dépourvu d'os, ce qui semble lui offrir un nombre de degrés de liberté illimité. Michel Milinkovitch, de l'université de Genève, et ses collègues ont étudié la dynamique de la trompe de l'éléphant en action et ont identifié une série de mouvements de base dans l'utilisation qu'en fait le pachyderme.

Autour de ses deux canaux nasaux, la trompe de l'éléphant se compose surtout de muscles. Grâce à des méthodes modernes d'imagerie, l'équipe de Michel Milinkovitch a distingué six groupes musculaires. Ces derniers sont orientés dans la trompe de diverses façons: longitudinale, transversale et oblique, ce qui offre à l'éléphant un champ d'action très vaste. L'animal peut non seulement courber sa trompe dans la direction qu'il souhaite, mais il peut aussi la tordre, l'allonger ou la rétracter.

Encore faut-il savoir se servir de tant de muscles! Pour tester les pachydermes, les chercheurs leur ont proposé d'attraper et de déplacer plusieurs objets de diverses formes, tailles et masses. Grâce à la pose de marqueurs réfléchissants sur la trompe, les chercheurs ont modélisé son action en trois dimensions, à l'instar du système de capture du mouvement utilisé au cinéma. Les éléphants ont démontré toute une palette de techniques de préhension en enroulant leur trompe autour des objets les plus volumineux, en saisissant les plus petits simplement avec les petits appendices situés à l'extrémité de l'organe, ou même en s'en servant comme d'une ventouse sur la surface de l'objet si celui-ci était trop plat. Les chercheurs ont identifié dix-sept mouvements de base qui composent l'ensemble de ces techniques. Face à une tâche nouvelle, les éléphants expérimentent plusieurs de ces briques élémentaires à la suite en se référant à des situations précédentes, jusqu'à trouver la plus efficace.

35 %

LES CHERCHEURS ONT MESURÉ QU'EN L'ÉTIRANT AU MAXIMUM, UN ÉLÉPHANT POUVAIT ALLONGER

Malgré le nombre de degrés de liberté dont jouit une trompe, le pachyderme se rapporte donc à des gestes bien plus simples. De façon surprenante, l'animal peut aussi déformer sa trompe pour construire des segments rigides connectés par des articulations virtuelles, donnant l'impression de l'existence d'un coude et d'un poignet, alors que leur trompe ne comporte aucun os et est continuellement flexible et déformable. On observe également cette simplification du mouvement en petits segments sur les bras des pieuvres.

D'après Michel Milinkovitch et ses collègues, les propriétés de la trompe de l'éléphant et sa polyvalence seraient une source d'inspiration très riche pour la robotique. L'organe de l'animal est par exemple capable de se manipuler lui-même, pour se gratter ou se nettoyer, une compétence qui servirait à bien des bras mécaniques. ■ **V. R.**

P. Dagenais *et al.*, *Current Biology*, vol. 31, pp. 1-11, 2021

© Shutterstock.com/Sharon Haeger

PHYSIOLOGIE

CE QUE DÉPENSE L'ORGANISME

De combien de calories votre corps a-t-il besoin ? Herman Pontzer, de l'université Duke, aux États-Unis, et ses collègues ont récolté les données de 6 400 personnes pour retracer les besoins énergétiques de l'organisme au cours de la vie. Ils ont identifié quatre phases. Les dix-huit premiers mois, la dépense du nouveau-né, rapportée à son poids, atteint 150 % de celle d'un adulte. Après un pic d'activité entre 5 et 10 ans, elle baisse pour atteindre un plateau entre 20 et 60 ans, où elle reste stable au point de n'être même pas affectée par une grossesse ! Au-delà, elle décline jusqu'à ne valoir à 90 ans que 74 % de sa valeur à l'âge adulte. Une fois consolidés, ces modèles affineraient considérablement le suivi nutritionnel des patients au cours d'un traitement médical, à tout âge. ■ **V. R.**

H. Pontzer *et al.*, *Science*, vol. 373, pp. 808-812, 2021

PALÉONTOLOGIE

PÉRÉGRINATIONS D'UN MAMMOUTH

Les premiers humains arrivés sur le continent américain y ont côtoyé le mammouth laineux, disparu vers la fin de la dernière période glaciaire. Clément Bataille, de l'université d'Ottawa, au Canada, et ses collègues ont retracé avec précision l'itinéraire parcouru par un de ces pachydermes au cours de sa vie, grâce à l'analyse des isotopes contenus dans ses défenses. L'animal étudié est né dans le bassin du fleuve Yukon et a grandi au sein d'un troupeau qui migrait régulièrement le long de la chaîne de montagnes Brooks. Il s'est probablement émancipé vers sa seizième année, enchaînant alors des déplacements sur de très grandes distances. Les deux dernières années avant sa mort, le mammouth s'est enfin cantonné à une région côtière au nord-est de l'Alaska, où ses restes ont été retrouvés. En vingt-huit ans de vie nomade, le pachyderme aura parcouru l'équivalent de presque deux fois le tour de la Terre. ■ **V. R.**

M. Wooller *et al.*, *Science*, vol. 373, pp. 806-808, 2021

CHIMIE

QUAND L'EAU DEVIENT MÉTALLIQUE



La goutte alcaline est recouverte d'une mince pellicule d'eau. Cette dernière, dopée par les électrons cédés par les éléments alcalins, devient conductrice et prend une couleur métallisée.

© Phil Mason/IOCB Prague

L'eau pure est un très mauvais conducteur électrique. Dans la vie quotidienne, c'est grâce à la présence fréquente d'ions dans ce liquide qu'un courant peut y circuler. La plupart des matériaux isolants peuvent devenir conducteurs sous une haute pression. Mais pour transformer de l'eau pure en métal, il faudrait une pression de 15 millions de bars (1 bar est environ égal à la pression de l'atmosphère terrestre) ! Philip Mason, de l'Académie des sciences tchèque, à Prague, et ses collègues ont trouvé une autre solution pour réaliser cette transformation.

L'idée consiste à enrichir l'eau en électrons en mettant le liquide en contact avec des métaux alcalins, tels que le sodium ou le potassium, dont les atomes cèdent facilement un électron. Cependant, ces éléments réagissent violemment avec l'eau en libérant rapidement du dihydrogène, qui peut s'enflammer ou détoner en présence d'oxygène. Les chimistes ont donc cherché des conditions dans lesquelles les électrons diffuseraient dans l'eau plus vite qu'ils ne réagiraient. Pour ce faire, ils ont introduit des gouttes d'un alliage liquide de sodium-potassium dans une enceinte sous vide contenant un peu de vapeur d'eau. Alors que les molécules d'eau s'adsorbent à la surface de la goutte, les électrons libres de l'alliage migrent rapidement dans la pellicule d'eau. Ainsi dopée, cette couche devient conductrice et prend une couleur dorée pendant quelques secondes. Grâce à des analyses spectroscopiques complémentaires (par spectrométrie de photoélectrons induits par rayons X), Philip Mason et ses collègues ont confirmé que l'eau était bien devenue métallique pendant cette phase. Au bout de cinq secondes, la pellicule d'eau change de couleur et devient blanche, avec la formation d'hydroxydes alcalins. ■ **S. B.**

P. E. Mason *et al.*, *Nature*, vol. 595, pp. 673-676, 2021

EN IMAGES

SUR LES TRACES D'EXOLUNES EN FORMATION

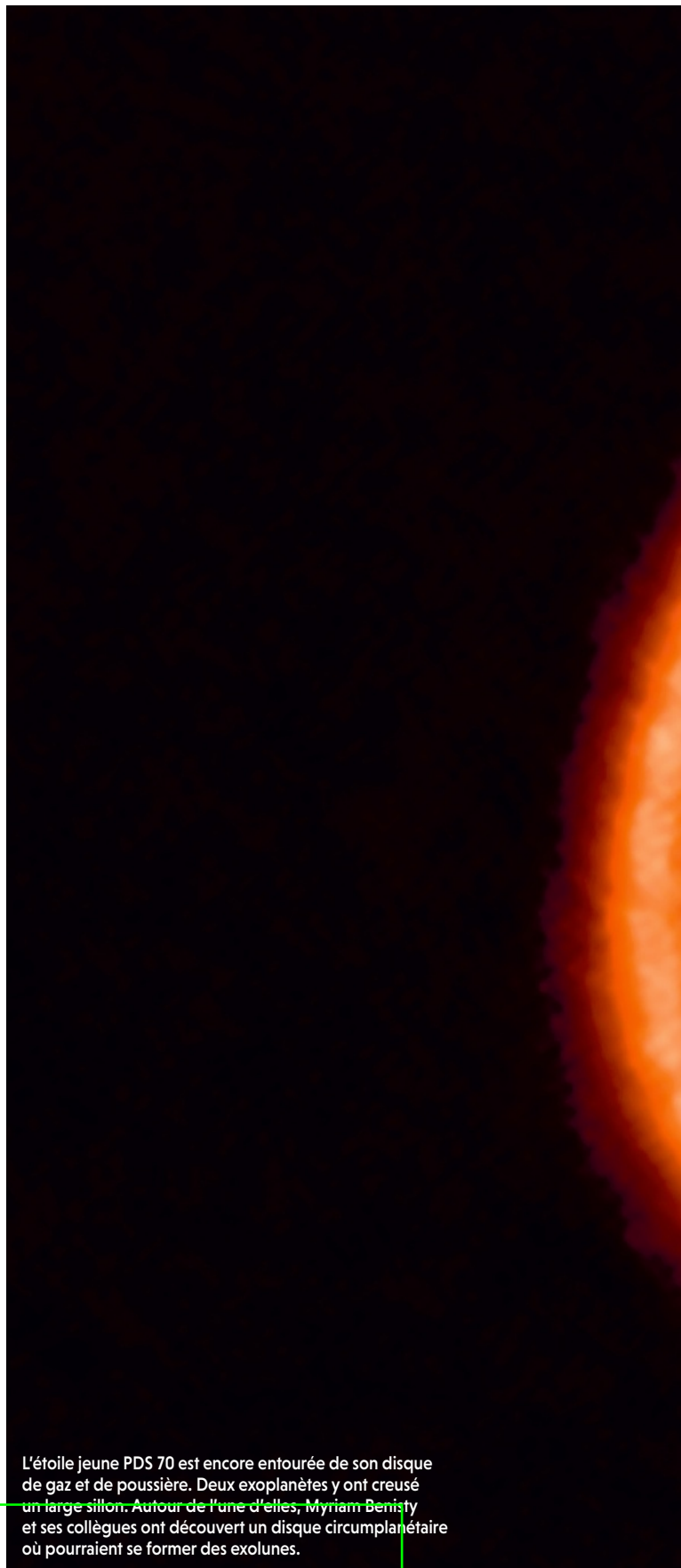
Ce cliché réalisé grâce au réseau de radiotélescopes *Alma*, au Chili, montre, à près de 370 années-lumière de nous, l'étoile PDS 70 (*au centre de l'image, dans la tache un peu nébuleuse*). Il s'agit d'un astre très jeune qui est encore entouré d'une grande partie (*en forme d'anneau*) de son disque circumstellaire de gaz et de poussière. Myriam Benisty, de l'université du Chili et de l'université Grenoble-Alpes, et ses collègues se sont intéressés à ce qui se passe dans ce disque où sont en train de se former deux exoplanètes… et peut-être des exolunes !

Dans les jeunes systèmes, l'étoile est entourée d'un disque de gaz et de poussière où des planètes en formation creusent un sillon en amassant les débris sur leur trajectoire. En général, ces jeunes planètes ne sont pas visibles. Or en 2018 et en 2019, grâce à des observations du *VLT* (*Very Large Telescope*), des équipes d'astronomes ont identifié deux exoplanètes dans le sillon large du système PDS 70 : PDS 70b (non visible sur cette image) et PDS 70c, au centre de la zone brillante située près du bord du sillon (*et dans le médaillon*).

Grâce à des mesures à haute résolution d'*Alma*, Myriam Benisty et ses collègues ont confirmé que cette dernière planète est entourée d'un disque de gaz et de poussière. De tels disques circumplanétaires contribuent à la croissance de leur planète en régulant la quantité de matière qui y est accrétée ; ils sont aussi le berceau de la formation de lunes. À partir de leurs observations et de modèles, les chercheurs ont estimé que le diamètre du disque entourant PDS 70c est de l'ordre de la distance Soleil-Terre et que sa masse est au moins trois fois celle de la Lune ! ■

S. B.

M. Benisty *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 916, article L2, 2021



L'étoile jeune PDS 70 est encore entourée de son disque de gaz et de poussière. Deux exoplanètes y ont creusé un large sillon. Autour de l'une d'elles, Myriam Benisty et ses collègues ont découvert un disque circumplanétaire où pourraient se former des exolunes.



Gros plan sur l'exoplanète PDS 70c et son disque circumplanétaire de gaz et de poussière.

© Alma (ESO/NAOJ/NRAO)/M. Benisty *et al.*

PALÉOANTHROPOLOGIE

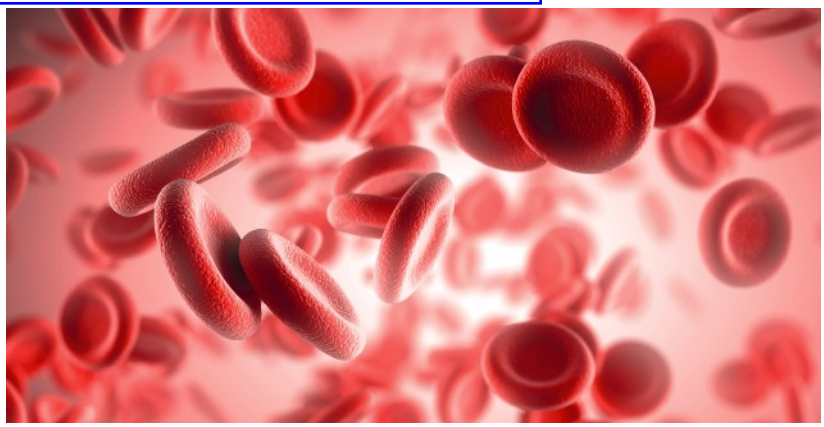
TROIS NÉANDERTALIENS ET UN DÉNISOVIEN ONT RÉVÉLÉ LEURS GROUPES SANGUINS

L'analyse des génomes extraits d'individus fossilisés a permis de déterminer leurs caractéristiques sanguines.

Avec plusieurs collègues, Jacques Chiaroni, hématologue au laboratoire Ades, à l'université d'Aix-Marseille, a déterminé les gènes liés aux groupes sanguins de quatre humains anciens, trois Néandertaliens et un Dénisovien. Les groupes sanguins humains sont définis d'après des jeux d'antigènes présents à la surface des cellules sanguines. La Société internationale de transfusion sanguine en a identifié 43, mais, dans la pratique, seulement sept «polymorphismes sanguins» de base, des systèmes de groupes sanguins étiquetés ABO, Rh, Kell, Duffy, Kidd, MNS et Diego, comptent pour les transfusions.

L'équipe de Jacques Chiaroni a déduit des positions et de la nature des gènes qui codent les antigènes sanguins les phénotypes – les caractères sanguins apparents – des quatre individus anciens. Plusieurs résultats importants se dégagent. S'agissant du polymorphisme ABO, les chercheurs ont établi que les individus fossiles avaient les phénotypes les plus courants présents dans les populations humaines modernes: A1, B et O. Les variantes trouvées pour les systèmes Kell, Duffy, Kidd et MNS vont dans le même sens: on les rencontre dans l'humanité actuelle. Par ailleurs, le fait que les chances de trouver des formules sanguines proches de celles des individus fossiles étudiés soient bien plus grandes au sein de la population subsaharienne qu'au sein de celle d'Eurasie confirme une fois de plus l'origine africaine du genre *Homo*.

Les chercheurs constatent la faible diversité des gènes sanguins des Néandertaliens, conséquence de la petitesse de leur population. L'analyse du système Rh (rhésus) et de ses particularités chez les trois Néandertaliens suggère une possible incompatibilité entre le fœtus et sa mère, lorsqu'une mère néandertalienne porte l'enfant d'un *Homo sapiens* ou d'un Dénisovien. Dans ce cas, les globules rouges du bébé sont attaqués par les anticorps développés par la mère, ce qui entraîne chez le fœtus une anémie pouvant être létale. Ce problème hémolytique a peut-être limité les succès reproductifs des clans néandertaliens en cas de métissage.



Les groupes sanguins sont définis par certaines protéines présentes à la surface des globules rouges *(représentés ici dans une vue d'artiste)*. Les gènes codant ces protéines ont pu être étudiés chez quatre fossiles humains n'appartenant pas à notre espèce *sapiens*.

À CE JOUR, LES PALÉOGÉNÉTICIENS ONT ÉTUDIÉ LES GÉNOMES ENTIERS D'UNE QUINZAINE D'INDIVIDUS NÉANDERTALIENS OU DÉNISOVIENS AYANT VÉCU IL Y A 100 000 À 40 000 ANS EN EUROPE ET EN EURASIE.

L'analyse des gènes contrôlant la capacité à sécréter les antigènes du système ABO dans la salive et les voies digestives a mis en évidence l'existence d'un allèle *se* dit «non sécréteur»; c'est un trait qui distingue les humains au sein des primates et les protège contre les norovirus à l'origine de la gastroentérite virale. Sa découverte suggère que cet allèle existait chez l'ancêtre commun des *H. sapiens*, des Néandertaliens et des Dénisoviens, à savoir *H. heidelbergensis*. Aujourd'hui, les non-sécréteurs représentent 20% de la population, ce qui montre qu'une sélection naturelle a multiplié les allèles *se* chez *H. sapiens*.

Détail notable, les chercheurs ont aussi mis en évidence chez les Néandertaliens un allèle inédit noté *RHD* qui, jusqu'à présent, n'avait été trouvé que chez un Papou et chez un Aborigène australien. Cet allèle illustre donc que les ancêtres de ces deux individus extrême-orientaux, des membres de la première vague *sapiens* sortie d'Afrique, se sont croisés avec les Néandertaliens au Proche-Orient. ■

François Savatier

S. Condemi *et al.*, *Plos One*, vol. 16(7), article e0254175, 2021

© Sashkin/Shutterstock.com

EN BREF

Le babillage des bébés chauves-souris

En 2004, Mirjam Knörnschild, du Muséum d'histoire naturelle de Berlin, suggérait que, pour s'entraîner à communiquer, les petits de la chauve-souris *Saccopteryx bilineata* babillent comme les bébés humains et certains oiseaux chanteurs. Avec ses collègues, la chercheuse a confirmé cette idée en analysant 216 extraits sonores de bébés chauves-souris sauvages au Costa Rica et au Panamá. L'équipe a ainsi retrouvé huit caractéristiques du babillage humain, dont la répétition des syllabes et une rythmique spécifique.

Science, 20 août 2021

Record de décimales pour π

L'équipe de Thomas Keller, de l'université des sciences appliquées des Grisons, en Suisse, vient de calculer 62 800 milliards de décimales en un peu plus de 108 jours. Un record ! Quel intérêt quand quelques dizaines de décimales suffisent largement pour effectuer des calculs de précision en physique ? Ce « défi » permet de mettre à l'épreuve des algorithmes de calcul pour des applications utiles : simulations en mécanique des fluides, analyse génomique, etc.

La fusion inertielle progresse

Le 8 août 2021, le NIF, centre de recherche américain de fusion par confinement inertiel, a battu un record. En focalisant 192 lasers sur une petite capsule de deutérium et de tritium (deux isotopes de l'hydrogène), les chercheurs ont obtenu des conditions de température et de pression que l'on ne rencontre que dans des bombes nucléaires et dans les étoiles. Les noyaux atomiques ont fusionné en produisant de l'hélium et beaucoup d'énergie : 1,35 mégajoule, soit presque 70 % de l'énergie utilisée pour déclencher le processus.

bit.ly/PLS528_NIF

© Shutterstock.com/Jair Ferreira Belafacce (en haut) ; © Vincent Prévot (en bas)

CLIMATOLOGIE

DES FORÊTS EN OSCILLATION

Une forêt préservée de toute activité humaine ne s'étendrait ou ne se densifierait pas indéfiniment. Dans un modèle de simulation des feux de forêts, Diego Rybski, de l'institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique, en Allemagne, et ses collègues suggèrent que la densité des forêts oscillerait en permanence autour d'une valeur constante, au gré des incendies et des reforestations. Du moins tant qu'aucune activité humaine ne fait bégayer ce métronome naturel.

Un modèle comme celui-ci représente la forêt comme un damier dont chaque case, ou cellule, symbolise une petite surface boisée ou vide. Au fil de la simulation, une cellule se boise avec une certaine probabilité, ou s'enflamme, touchée par la foudre, avec une autre probabilité. Les cases en flammes diffusent ensuite l'incendie dans les cellules boisées voisines.

Les chercheurs ont exploré différents jeux de valeurs pour les paramètres du modèle et ont étudié les variations temporelles de la densité des forêts dans le temps. À long terme, ce système dynamique oscille indéfiniment et régulièrement, surtout dans les forêts se reboisant facilement. À l'inverse, moins une case vide a de chances de se boiser, plus le système est chaotique.



Les feux de forêts d'origine naturelle et les épisodes de reforestation maintiendraient la densité des forêts aux alentours d'un niveau constant… si l'on exclut les perturbations d'origine humaine.

Quant à transposer ce modèle à une vraie forêt, Diego Rybski et ses collègues avertissent qu'il ne tient pas compte de facteurs naturels complexes comme la topographie ou la météo. Et, surtout, l'activité humaine est fréquemment responsable de départs de feux de forêts. Il faut donc l'incorporer à ces modèles pour augmenter leur réalisme, et comparer le comportement des forêts avec les sages oscillations observées dans les simulations. ■ **V. R.**

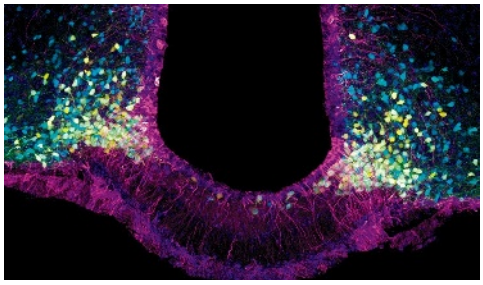
D. Rybski *et al.*, *Physical Review E*, vol. 104, article L012201, 2021

NEUROSCIENCES

LE DIABÈTE, UNE MALADIE DU CERVEAU ?

Le diabète de type 2 est-il une maladie du pancréas ou du cerveau ? Il se définit certes comme une augmentation durable de la concentration de sucre dans le sang, due à l'incapacité du pancréas à sécréter l'insuline, l'hormone qui régule cette concentration. Cependant, alors que sédentarité et alimentation constituent ses principaux facteurs de risque, les chercheurs suspectent depuis des années qu'un dysfonctionnement du mécanisme de la satiété serait impliqué dans le déclenchement de la maladie.

La sensation de satiété repose sur une hormone, la leptine, secrétée par le tissu adipeux et qui régule l'appétit dans le cerveau. Chez les personnes en surpoids ou obèses – à risque de développer un diabète de type 2 –, la leptine, abondante, ne remplit plus sa mission, car son transport dans le cerveau est altéré, mais le mécanisme en jeu restait mal compris. Vincent Prévot, du laboratoire Lille neuroscience et cognition, et ses collègues viennent de mettre en évidence la porte d'entrée de la leptine dans le cerveau : une population de cellules de l'hypothalamus munies d'un récepteur noté LepR. Privées de ce récepteur, les souris développent un diabète de type 2. ■



Les tanycytes *(en violet)* forment la porte d'entrée de la leptine dans le cerveau *(en jaune et en bleu, des neurones cibles de la leptine, qui, respectivement, stimulent et suppriment l'appétit).*

Noëlle Guillon

M. Duquenne *et al.*, *Nature Metabolism*, vol. 3, pp. 1071-1090, 2021

CLIMATOLOGIE

CLIMAT : « ON PEUT ENCORE FREINER L'INTENSIFICATION DES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES »

Début août, le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a publié le premier volet de son sixième rapport. L'éclairage de Valérie Masson-Delmotte, coprésidente du Groupe de travail I du Giec, auteur de ce volet.



Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE
paleoclimatologue, directrice de recherche au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, au CEA, à Saclay

En quoi consiste cette nouvelle contribution du Giec ?

C'est une analyse de l'état des connaissances sur le climat, sur la base de plus de 14 000 publications scientifiques, la plupart récentes. C'est aussi le travail de 234 chercheurs de 66 pays différents, relu en trois étapes par des milliers de chercheurs et experts des gouvernements. La grande différence par rapport aux précédents volets est que l'on est désormais capable de combiner de multiples faisceaux d'information – les informations issues des climats passés, les observations, la compréhension des processus, la modélisation –, ce qui réduit considérablement les incertitudes sur les projections. Autre nouveauté : environ un tiers du rapport est consacré à l'évolution du climat à l'échelle régionale, y compris les événements extrêmes et les informations climatiques pertinentes pour l'évaluation d'impacts et de risques.

Quels résultats mis au jour dans ce rapport vous paraissent les plus importants ?

Nous avons cinq messages principaux. Le premier, c'est que les changements en cours touchent toutes les régions, sont rapides et s'intensifient, qu'il s'agisse des moyennes ou des extrêmes. Le rythme de montée du niveau des mers, par exemple, s'est accéléré ces dernières décennies. De tels changements constituent une rupture sans précédent depuis des milliers d'années en termes d'ampleur, de vitesse, de perturbations. Notamment, l'amplitude et la vitesse du réchauffement actuel sont sorties de la gamme des 2 000 dernières années. Le rythme de montée du niveau des mers, qui a accéléré au cours des dernières décennies, est exceptionnel sur plus de 3 000 ans. Et la dernière fois que la teneur en CO_2 dans l'atmosphère était aussi élevée qu'actuellement, c'était il y a plus de 2 millions d'années.

Deuxième message : c'est indiscutable, les activités humaines sont à l'origine du changement climatique. L'élévation de la température globale à la surface de la Terre observée depuis la fin du XIXe siècle atteint 1,1 °C pour la dernière décennie. Notre meilleure estimation de cette hausse est celle où l'intégralité de cette élévation est due aux conséquences des activités humaines, et ce en prenant en compte l'effet de la variabilité spontanée du climat et des facteurs naturels – activités du Soleil, des volcans. Et en prenant aussi en compte le fait qu'une partie de l'effet réchauffant des gaz à effet de serre (GES) est masquée par l'effet refroidissant des particules de pollution, évalué plus précisément. Nous avons de fait une compréhension de plus en plus fine du rôle de chacun de ces facteurs, y compris sur les moussons.

L'influence humaine est aussi la cause principale du recul généralisé des glaciers depuis les années 1990, de la montée du niveau des mers depuis les années 1970, du réchauffement, de l'acidification de l'océan, et contribue à la baisse d'oxygène dans l'océan…

Quel est le troisième message ?

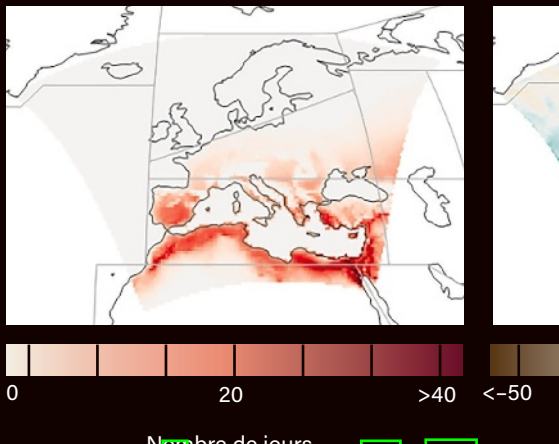
L'influence humaine sur le climat renforce également la fréquence et l'intensité de nombreux

56 %

AU COURS DES SIX DERNIÈRES DÉCENNIES, LES TERRES ET LES OCÉANS ONT ABSORBÉ CHAQUE ANNÉE ENVIRON 56 % DES ÉMISSIONS DE CO_2 DUES AUX ACTIVITÉS HUMAINES

TROIS PROJECTIONS
pour 2041-2060
par rapport à 1995-2014

Le nombre de jours entre juin et août avec un maximum de température sur la journée supérieur à 35 °C *(à gauche)*, la variation de la quantité de pluie tombée le jour le plus humide de la période décembre-février *(au centre)* et un indicateur de sécheresse fondé sur la comparaison des précipitations cumulées sur six mois avec la distribution des précipitations sur une longue durée (index SPI-6, *à droite, tendance à la sécheresse dans les valeurs négatives*).



événements climatiques extrêmes, en particulier les vagues de chaleur, les fortes pluies et les sécheresses. L'intensité des pluies torrentielles augmente d'environ 7 % par degré de réchauffement. Le renforcement de l'évapotranspiration dû à une atmosphère plus chaude accentue la sévérité des sécheresses, en particulier autour de la Méditerranée, mais aussi en Europe de l'Ouest.

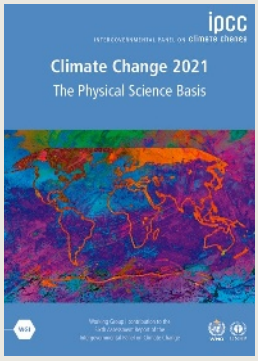
La poursuite du réchauffement climatique va intensifier le cycle de l'eau, et renforcer les saisons et événements secs et humides : en moyenne, les précipitations continentales vont augmenter, mais avec une répartition de plus en plus contrastée et une tendance à la baisse dans les régions subtropicales et méditerranéennes pendant les saisons sèches, conduisant à un assèchement graduel des sols et une aridification. Les enjeux pour la gestion de l'eau seront considérables.

De nombreux aspects du climat, les tendances et extrêmes au-dessus des continents, le cycle de l'eau, la glace de mer arctique, l'enneigement, le dégel des sols gelés dépendent directement du niveau de réchauffement planétaire. Mais, et c'est notre quatrième point clé, l'influence humaine affecte aussi les composantes lentes du système climatique, les calottes du Groenland et de l'Antarctique, l'océan profond, dont les changements vont se poursuivre à l'échelle de siècles et millénaires.

Cela signifie-t-il qu'il est trop tard pour agir ?

Du fait des échelles de temps de réponse de l'océan et des calottes de glace, la montée des mers est inéluctable et il est certain qu'elle va se poursuivre dans les prochains siècles voire millénaires. La bonne nouvelle est que nous pouvons limiter le rythme et l'ampleur de cette montée, en fonction des émissions de GES à venir.

En fait, le niveau de réchauffement planétaire à venir dépend des émissions futures – il n'y a quasiment pas de réchauffement supplémentaire à venir du fait des émissions passées. Dans tous les scénarios examinés, qui touchent une palette très large de trajectoires d'émissions à venir, le niveau de réchauffement atteint 1,5 °C (en moyenne sur vingt ans) au cours des vingt prochaines années, mais peut rester proche de ce niveau en cas de *très fortes* baisses d'émissions, et en dessous de 2 °C si celles-ci ne baissent *que fortement*. Si les émissions stagnent au niveau actuel sur plusieurs décennies avant de diminuer, le réchauffement dépasserait 2 °C en 2050, et 3 °C au cours du prochain siècle. Il est donc encore temps d'agir : on peut limiter l'ampleur des changements inéluctables et arrêter les autres changements – stabiliser le niveau de réchauffement, freiner l'intensification des événements extrêmes – en réduisant rapidement les émissions mondiales de gaz à effet de serre.



BIBLIOGRAPHIE

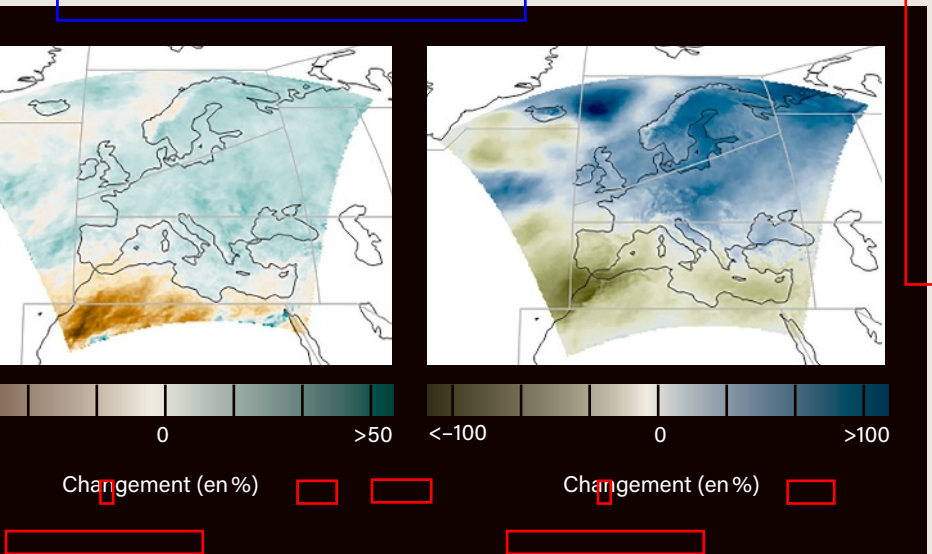
V. Masson-Delmotte *et al.* (éd.), **IPCC, 2021 : Climate change 2021 : The physical science basis. Contribution of Working Group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,** Cambridge University Press, sous presse, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Et le dernier message clé du rapport ?

Ce rapport confirme le rôle dominant des émissions de CO_2 avec une relation quasi linéaire entre le cumul de ses émissions passées, présentes et futures et le niveau de réchauffement. Réduire jusqu'à atteindre zéro émissions nettes mondiales de CO_2 est central pour parvenir à stopper le réchauffement. Réduire les autres rejets de GES, notamment de méthane, le gaz qui pèse le plus sur le réchauffement actuel après le CO_2, est aussi essentiel. Sur la dernière décennie, sa concentration atmosphérique a fortement augmenté, du fait d'émissions issues des énergies fossiles et d'activités agricoles (élevage). Réduire les émissions de méthane, qui a une durée de vie d'une dizaine d'années, permettrait aussi d'améliorer la qualité de l'air, car le méthane contribue à la formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère.

Quelles sont les priorités en matière d'action selon vous ?

Agir sur le CO_2 le plus vite possible est indispensable, mais il est aussi très important pour la santé publique de réduire la pollution atmosphérique en intégrant les stratégies climat et qualité de l'air. Il y a également des enjeux croisés de climat, biodiversité et santé qui demandent de mieux coordonner les politiques agricoles et environnementales. Par ailleurs, il est primordial de se préparer aux multiples facettes du changement climatique qui vont affecter chaque région de manière croissante avec la poursuite du réchauffement. Nous avons développé de nouvelles ressources, comme un atlas interactif, pour rendre accessibles à tous ces informations climatiques régionales, pour qu'elles puissent être utilisées pour agir.



© IPCC AR6 WGI Interactive Atlas, 2021. https://interactive-atlas.ipcc.ch/ ; à gauche : CORDEX Europe – Bias Adjusted TX35 Change days – Medium Term (2041-2060) RCP 8.5 (rel. to 1995-2014) – June to August (38 models); au centre : CORDEX Europe – Maximum 1-day precipitation (RX1day) Change % – Medium Term (2041-2060) RCP 8.5 (rel. to 1995-2014) – December to February (48 models); à droite : CORDEX Europe – Standardized Precip Index (SPI-6) Change % – Medium Term (2041-2060) RCP 8.5 (rel. to 1995-2014) – December to February



GÉOSCIENCES

LES DIABLES DES VOLCANS
André Demaison
Glénat, 2021
392 pages, 19,95 euros

Pour les 30 ans de la disparition de Katia et Maurice Krafft, cette réédition augmentée de deux chapitres d'un excellent livre de 2011 est bienvenue. L'auteur, qui a été le compagnon du célèbre couple d'explorateurs pendant vingt ans, raconte leur vie d'aventures.

Bien illustré et facile à lire, l'ouvrage est aussi très didactique. Il comporte 18 chapitres courts, véritables récits d'aventures sur les volcans du monde : le Stromboli, l'Etna, l'Askja, le Kawah Ijen, le Nyiragongo, le Piton de la Fournaise, l'Ol Doinyo Lengaï, l'Augustine, le Krakatau, le St Helens...

Avec les époux Krafft, une école de la volcanologie empirique a perdu ses meneurs : celle qui contribue tant à protéger les populations en gérant au plus près les risques. Ils allaient sur tous les volcans en éruption pour appréhender leur évolution et ainsi mieux apprécier les risques véritables.

Il suffit, pour se convaincre de l'intérêt de cette approche empirique, de considérer le désordre créé par le dernier débordement du lac de lave du Nyiragongo, qui a encore fait des victimes alors qu'il s'agit d'un des volcans les plus surveillés au monde... Par contraste, après avoir été effrayés en 1985 par le drame d'Armero, en Colombie, où une coulée de boue avait tué 22 000 personnes, les Krafft réalisèrent un film de sensibilisation au risque volcanique (*Understanding Volcanic Hazards*), qui aida à convaincre les autorités philippines d'évacuer les populations vivant sur les flancs du Pinatubo en 1991, ce qui a sauvé des milliers de vies.

On les surnommait «les Diables des volcans», tant ils avaient d'expérience de la lecture d'une éruption. Depuis le 3 juin 1991, jour où une nuée ardente les emporta sur l'Unzen, au Japon, personne ne les a vraiment remplacés dans leur rôle.

MICHEL DETAY
Géologue et volcanologue indépendant



PALÉOGÉNÉTIQUE

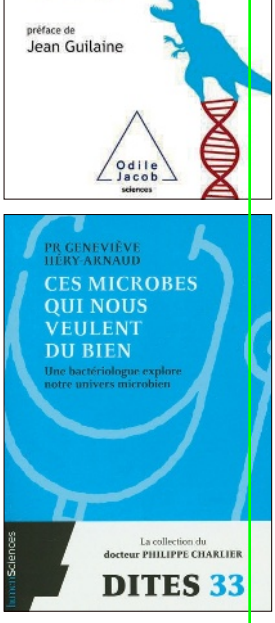
L'ADN FOSSILE, UNE MACHINE À REMONTER LE TEMPS
Ludovic Orlando
Odile Jacob, 2021
256 pages, 22,90 euros

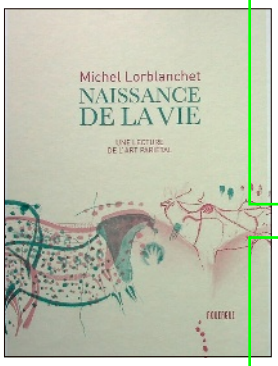
Cet ouvrage est l'un des premiers, si ce n'est le premier, publiés en français sur l'ADN fossile. Il s'agit d'une synthèse très complète, attendue depuis longtemps par tous ceux qui s'intéressent à la paléontologie humaine, à l'archéologie et à la nouvelle discipline qui a révolutionné ces deux mondes : la paléogénétique. Ainsi, l'auteur montre clairement l'évolution de ce nouveau pan de la recherche, qui est passée en vingt ans du stade d'un bricolage par quelques chercheurs visionnaires à celui de grands laboratoires d'échelle industrielle équipés de matériel de haute technologie.

Pour nous faire découvrir ce nouveau monde, Ludovic Orlando, qui dirige le Centre d'anthropobiologie et de génomique de Toulouse, met en avant de grandes découvertes et ce qu'elles ont apporté à l'archéologie et à la paléontologie humaine. On aborde ainsi la découverte de l'ADN néandertalien, suivie de celle d'un nouveau groupe humain : les Dénisoviens, qui constituent la première forme humaine définie uniquement par l'ADN. On suit ensuite le chemin des grandes épidémies ainsi que les débuts de la domestication des animaux et des végétaux. L'auteur montre aussi comment la paléogénomique bouscule nos *a priori* sur le passé et à quel point cela perturbe certains de nos concitoyens, qui peuvent même en devenir violents.

Le livre est écrit très simplement sans s'encombrer de termes techniques ; ses chapitres sont courts et se lisent facilement. Il est enrichi d'une bibliographie permettant de retrouver les références indispensables, rangées par chapitre, permettant d'aller plus loin. J'en recommande vivement la lecture.

JEAN-LUC VOISIN
Chercheur associé à l'UMR Ades, Aix-Marseille Université





BIOLOGIE

CES MICROBES QUI NOUS VEULENT DU BIEN

Geneviève Héry-Arnaud

Humensciences, 2021
232 pages, 17 euros

Nous avions l'habitude de voir les microbes comme des ennemis, à l'origine de beaucoup de nos maladies. Or nos microbiotes (les ensembles de microorganismes vivant dans nos organes, dont les outils de la génétique moléculaire révèlent l'incroyable diversité) nous aideraient à digérer, à respirer, et même à lutter contre les agents pathogènes. L'autrice, qui dirige une équipe de recherche à l'Inserm, inventorie les microbiotes buccodentaire, intestinal et génital et insiste sur le changement de perspective qu'impose la reconnaissance de leur rôle dans le fonctionnement quotidien de l'organisme. Ainsi, l'acquisition du microbiote de la mère (lors du cheminement dans la filière vaginale à la naissance) serait décisive pour l'acquisition de l'immunité du nouveau-né.

Finalement, santé et maladie dépendraient de l'équilibre entre tous les acteurs microbiens de l'organisme: coup de chapeau à la vision écologique contemporaine. Coup de chapeau aussi à la médecine ancienne, qui tenait qu'alimentation et mode de vie sont fondamentaux pour vivre bien et longtemps. L'intervention du microbiote nous obligerait donc à tout repenser en médecine: la prévention comme la thérapeutique, en particulier l'emploi des antibiotiques, le vieillissement comme la cancérogenèse.

Mais comment concrètement passer des recherches en cours à des recommandations au commun des mortels, bref inscrire dans l'histoire de la santé les conséquences des derniers travaux de la biologie contemporaine? L'inventaire par l'autrice des questions associées aux microbiotes suscite un vif intérêt; mais il ne nous convainc pas encore que la révolution de la médecine est pour demain. Peut-être pour après-demain, quand on en saura davantage.

ANNE-MARIE MOULIN
Laboratoire Sphere, CNRS-Université de Paris

PRÉHISTOIRE

NAISSANCE DE LA VIE

Michel Lorblanchet

Le Rouergue, 2020
224 pages, 25 euros

L'auteur est l'un des meilleurs spécialistes mondiaux de l'art paléolithique d'Europe occidentale et d'Australie. Fin connaisseur des grottes ornées de son Quercy natal, auquel il a consacré une monumentale monographie, il livre ici une enquête visant à dégager une signification générale de cet art et des pratiques, voire des croyances, qui ont pu lui être associées.

Au-delà des figures et des associations thématiques, il s'attache à relever des traits qui, à ses yeux, sont porteurs de sens: menus détails rarement relevés tels que ponctuations isolées, traces de doigts «caressant la pierre», enchevêtrements de «macaroni» digitaux, figures tracées à l'aveugle dans des recoins cachés... Ces analyses d'une grande minutie deviennent fascinantes lorsqu'elles sont mises en rapport avec de possibles pratiques rituelles dont la grotte ornée a pu être le lieu. Michel Lorblanchet repère ainsi sur les parois de certaines grottes toute une symbolique des gestes exécutés sur des reliefs ressemblant à des seins, ou des creux ressemblant à des vulves, et toute une thématique de la naissance à travers des troupes de figures animales qui se multiplient depuis le fond de la grotte jusqu'à son entrée. D'où il dégage l'idée que la grotte elle-même est, pour ceux qui ont laissé leurs traces sur ses parois, un ventre fertile, un lieu mythique d'où émerge la vie.

On ne peut qu'admirer, chez celui qui fut l'élève d'André Leroi-Gourhan et qui inspira l'anthropologue social Alain Testart, la rigueur, la subtilité des analyses et l'ampleur de vue qui, à partir d'observations infimes, illumine notre connaissance de l'art paléolithique et ouvre sur une meilleure compréhension de ses mystères. Des photos en couleurs et des dessins de l'auteur illustrent ce beau livre, qui est aussi un livre important.

CLAUDINE COHEN
EHESS, Paris





LES EXOPLANÈTES ET LA VIE DANS L'UNIVERS

Stéphane Mazevet
Odile Jacob, 2021
304 pages, 23,90 euros

Si la vie existe ailleurs sous une forme proche de la nôtre, alors elle s'est peut-être épanouie sur certaines planètes. Lesquelles ? L'auteur dirige l'initiative « Origines et conditions d'apparition de la vie ». Il passe ici en revue la progression de la pensée sur la possibilité d'une origine extraterrestre de la vie, depuis la cosmologie grecque jusqu'au cycle carbonates-silicates sur Terre, en passant par les notions de zone habitable autour d'une étoile et de stabilité d'un système planétaire.

POURQUOI LE NORD EST-IL EN HAUT ?

Mick Ashworth
Autrement, 2021
224 pages, 24,90 euros

Plus de cent cartes illustrent ce livre d'histoire des conventions géographiques entre le Moyen Âge et aujourd'hui. Membre de la Société géographique royale (britannique), un cartographe nous y livre mille explications sur les conventions cartographiques, qu'elles soient anciennes comme le quadrillage, variables et délicates comme les choix de toponymes, dimensionnelles comme les couleurs pour figurer le relief, etc. La lecture de ce bel ouvrage s'achève par une prise de conscience du pouvoir que nous donnent les cartes numériques interactives.

LA PLAGE

Arnaud Guérin
Glénat, 2021
144 pages, 19,95 euros

Quelle est la ressource naturelle la plus surexploitée après l'eau ? Le sable des plages ! Très au fait de tout ce qui fait et défait les plages, l'auteur nous régale de sa science pour présenter la géologie et la biodiversité fragile, mais si riche, de ce milieu entre terre et eau. Illustré par de belles photographies, le texte explique avec limpidité les principales dynamiques à l'origine des plages et invite à observer les plantes, oiseaux, mammifères et autres organismes marins qui peuplent ces milieux particuliers.



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

BATAILLE SUR LE STATUT DES DONNÉES GÉNÉTIQUES

L'accès aux banques de gènes doit-il rester libre ? C'est l'un des principaux points de désaccord entre les pays du Sud et ceux du Nord en matière de biodiversité.



Les travaux relatifs à la biodiversité s'appuient notamment sur la génomique et les banques publiques de gènes, qui stockent sous forme numérique les résultats des séquençages de l'ADN des divers organismes étudiés.

La Convention sur la diversité biologique (CDB), traité signé en 1992, est gérée par la Conférence des parties, organe réunissant à ce jour 196 pays. La prochaine réunion de cet organe, la COP15, qui devait se tenir en octobre 2021, vient à nouveau d'être reportée en raison de la crise sanitaire. L'une des questions âprement débattues dans le cadre des discussions préparatoires (*voir aussi ma chronique du mois précédent*) est le statut des séquences génétiques. De quoi s'agit-il ?

La génomique est une science récente qui étudie les gènes d'un organisme en déterminant les chaînes de nucléotides de l'ADN grâce à des techniques de « séquençage ». De moins en moins coûteuses et de plus en plus rapides, ces techniques engendrent des masses considérables de données numériques. La recherche sur le vivant s'effectue ainsi en bonne partie à l'aide d'ordinateurs reliés aux banques internationales de gènes (stockés sous forme numérique) et à des centres de calcul. L'information et les connaissances contenues dans une séquence d'ADN peuvent ainsi être extraites, transformées et échangées *via* ces banques indépendamment du matériel génétique, physique, auquel elles se rapportent.

> **Les pays du Sud jugent que l'accès libre aux données génétiques est de la biopiraterie**

Or la CDB, écrite en 1992, a été pensée pour des spécimens collectés *in situ* ou *ex situ* (dans les collections des muséums par exemple), mais pas pour une biodiversité dématérialisée sous forme de séquences numérisées, dite *in silico*. Elle est censée garantir le « partage juste et équitable des avantages tirés de l'exploitation des ressources génétiques », condition pour que les pays du Sud s'engagent dans des actions de conservation et de gestion durable de la biodiversité. À cette fin, le protocole de Nagoya a été adossé en 2014 à la CDB et les États sont désormais souverains pour réguler l'accès à leurs ressources et organiser le partage des avantages, *via* le dispositif APA (pour « accès et partage des avantages »).

L'accès libre aux séquences génétiques est alors dénoncé comme un acte de biopiraterie, car échappant à l'APA. La question est d'autant plus sensible que les retours de l'APA sont jusqu'à présent dérisoires. C'est pourquoi les pays du Sud demandent que les accès aux banques de gènes soient soumis à l'APA.

Les pays du Nord s'opposent à cette demande. Pour eux, les séquences numérisées sont des résultats de recherche mis à la disposition de tous dans des banques de gènes qu'ils ont créées et entretiennent, ce qui constitue en soi un partage des avantages. Les encadrer donnerait un coup de frein à la recherche. Ils rappellent que les vaccins contre le Covid-19 et la surveillance des variants ont pu se faire grâce au séquençage rapide du virus. Les procédures de l'APA se révèlent trop fastidieuses, car elles reposent sur des négociations bilatérales exigeant la traçabilité de l'origine et de l'utilisation de chaque ressource. Comment le centre d'échange de l'APA, qui, au bout de dix ans, enregistre 2 700 dossiers, pourrait-il traiter des transactions sur des milliards de séquences ?

Les débats restent ouverts jusqu'à la COP15. Pour faire accepter aux pays du Sud le cadre mondial pour la biodiversité soutenu par les pays du Nord, il faudra bien fléchir les règles de l'APA, imaginer un fonds multilatéral abondé par les utilisateurs lors du dépôt, de l'accès ou de la valorisation économique des séquences, et dans tous les cas mettre chaque pays en capacité de créer, traiter et utiliser ses données.

L'application de l'APA aux données génétiques renvoie à bien d'autres enjeux d'ordre géopolitique et civilisationnel. Car la réduction des inégalités à l'échelle mondiale est l'une des graves questions que pose l'entrée de la diversité du vivant dans la révolution numérique. ■

© Shutterstock.com/angellodeco

cité sciences et industrie

conférences

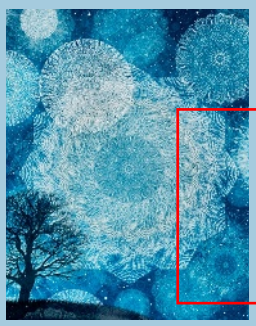


les récits

cycles thématiques,
tables rondes, projections

septembre 2021 — janvier 2022

accès gratuit d'infos sur cite-sciences.fr



l'Univers plein les yeux

les mardis 28 septembre, 5, 12, 19 octobre à 19h

cycle de conférences

Du dessin à l'image en 3D, en passant par l'astrophotographie et le retraitement d'images spatiales, art et science s'unissent pour raconter le ciel et inviter au voyage.

28 septembre

Voir l'Espace
Elsa de Smet, historienne de l'art, Centre Alexandre-Koyré

5 octobre

Rendez-vous cosmiques entre science et art
Olivier Sauzereau, astrophotographe et historien des sciences

12 octobre

Visions sublimées de l'aventure spatiale
Olivier de Goursac, spécialiste du retraitement d'images spatiales, vice-président de la commission planétologie de la Société astronomique de France, de l'aéro-club de France et de The Planetary Society

19 octobre

L'expansion de l'Univers : une histoire en 3D
Etienne Burtin, physicien au CEA.

> À l'auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie.

Accès au musée sur présentation d'un passe sanitaire valide incluant un QRcode.

AVEC LE SOUTIEN DE Pour la Science



cancer : comment préserver la fertilité ?

jeudi 21 octobre à 19h

projection-débat

À l'occasion d'Octobre Rose

Projection du film *Serendipity*
de **Prune Nourry**, 74 min, 2019

Atteinte d'un cancer du sein à 31 ans, l'artiste Prune Nourry partage son combat contre la maladie et transforme cette épreuve personnelle en épopée artistique pleine d'espoir.

Dialogue avec Michaël Grynberg, gynécologue obstétricien, chef du service de médecine de la reproduction et préservation de la fertilité à l'hôpital Antoine-Béclère, Clamart.

Comment remédier à l'impact des traitements du cancer du sein sur la fertilité des femmes ? Une nouvelle technique de Fiv, mise au point dans le service du professeur Grynberg, est porteuse d'espoir.

> À l'auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie.

Accès au musée sur présentation d'un passe sanitaire valide incluant un QRcode.

AVEC LE SOUTIEN DE Pour la Science



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

LA RHÉTORIQUE DE L'EXCELLENCE

Les gestionnaires de la recherche insistent lourdement sur l'« excellence » des chercheurs et des projets qu'ils veulent soutenir. Une notion problématique.



Il y a quelques années, je participais à un colloque international sur les politiques de recherche dans différents pays (France, Canada, Italie et quelques autres). Dans l'audience se trouvaient de nombreuses personnes travaillant pour des agences de recherche. Après les exposés, l'une de ces personnes a posé la question qui tue: « Mais comment définir et mesurer l'excellence »? Ma réponse a été lapidaire: « L'excellence est une figure rhétorique et une tautologie: sont "excellents" ceux que votre organisation a choisi d'appuyer financièrement! »

Ainsi, l'ERC, ou European Research Council (car l'Europe parle anglais...), se vante de ne retenir que 10 à 13% des projets soumis, que cet organisme déclare donc « excellents ». De son côté, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) retient plutôt environ 70% des projets des chercheurs canadiens; il déclare aussi ne retenir que d'excellents dossiers, grâce à une évaluation bien sûr « rigoureuse ». En sciences humaines et sociales, le taux de réussite au Canada est plutôt d'environ 50%, faute de fonds suffisants pour que le soutien dans ce domaine atteigne le niveau de celui des sciences de la nature. Pour le prouver au gouvernement, on a même créé une classe de projets dits « approuvés mais non subventionnés ». Cela montre que les projets qui obtiennent des fonds sont excellents, mais qu'il y en a d'autres qui en mériteraient aussi.

> **Financer des équipes déjà bien dotées n'est pas efficace**

Mais peut-on mesurer cette « excellence » de façon plus objective? L'exemple du programme-cadre « Horizon 2020 » de l'Union européenne est éclairant. Avec un budget de 74 milliards d'euros, il a soutenu 31 000 projets et plus de 150 000 chercheurs, rappelle la journaliste Alison Abbott dans un article paru fin 2020 dans *Nature*. On y apprend aussi qu'une « évaluation indépendante » a conclu que 80% environ de ces projets avaient produit des percées (*breakthroughs*) ou des « avancées majeures ».

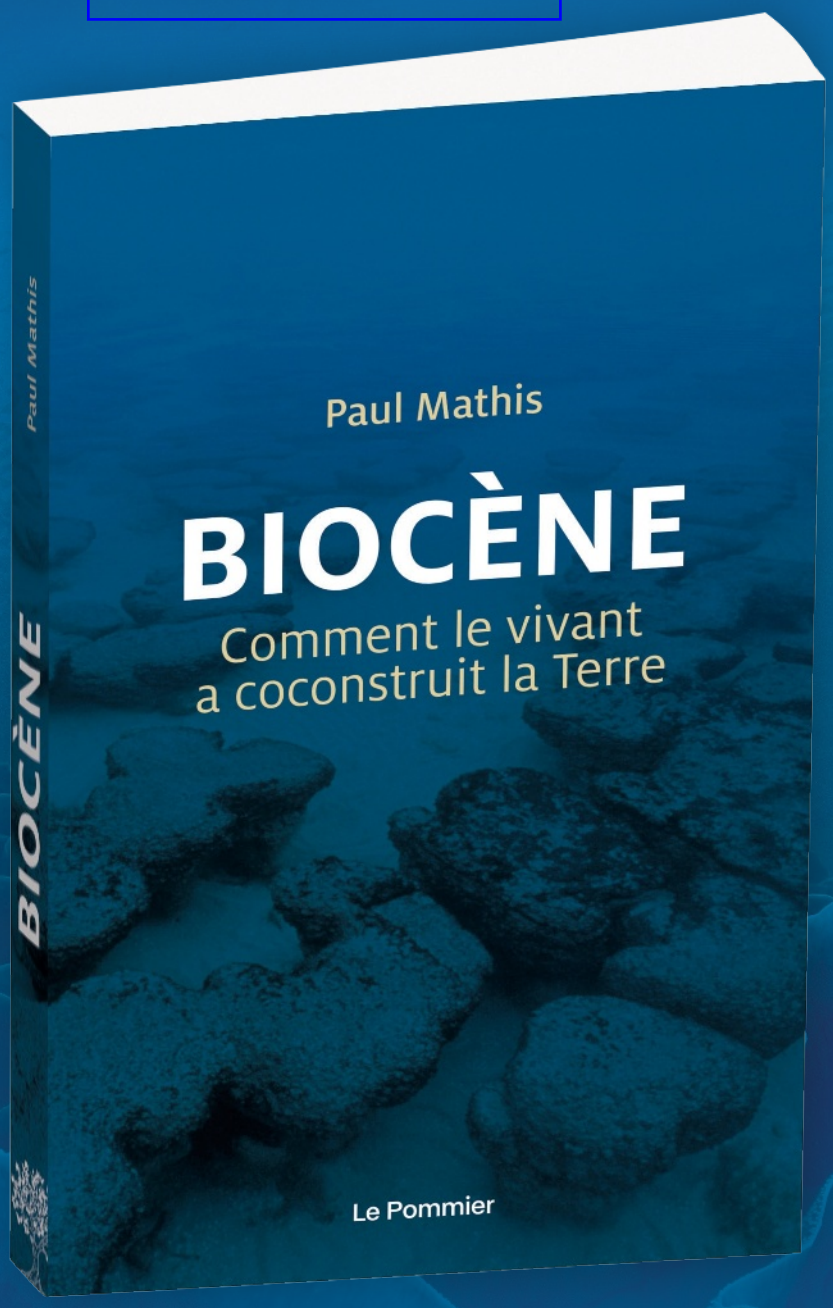
Sachant que les véritables percées en science sont plutôt rares, de tels résultats font sourciller. Or, quand on se penche sur l'« évaluation » en question, on s'aperçoit qu'elle consiste en des jugements subjectifs de la part de chercheurs ayant été appelés à classer les projets. Dans un contexte d'évaluation de programmes aussi importants, on peut penser que les « évaluateurs », heureux d'avoir des programmes bien dotés, hésiteront avant de conclure que la majorité des projets retenus n'ont en réalité apporté que des ajouts mineurs à leur science...

De plus, sachant que les chercheurs « excellents » sont déjà fortement soutenus financièrement, on peut douter qu'ajouter encore des millions à une même équipe puisse vraiment produire des résultats spectaculaires. Les études bibliométriques et économétriques suggèrent plutôt qu'il existe une loi des rendements décroissants: donner des millions à des chercheurs déjà dotés produit moins de diversité et de probabilité de découvertes originales que d'offrir ne serait-ce que la moitié de ces montants à des chercheurs moins bien dotés.

Enfin, la rhétorique tautologique de « l'excellence » semble aujourd'hui confrontée à une autre rhétorique très puissante, celle de « l'inclusion ». La notion d'excellence ayant comme corollaire l'exclusion des chercheurs ou projets non excellents, les experts en communication des organismes subventionnaires croient pouvoir éviter la collision frontale entre ces concepts en proposant – ce n'est pas une blague – une nouvelle notion: « l'excellence inclusive »! On passe alors de la tautologie à l'oxymore... ■

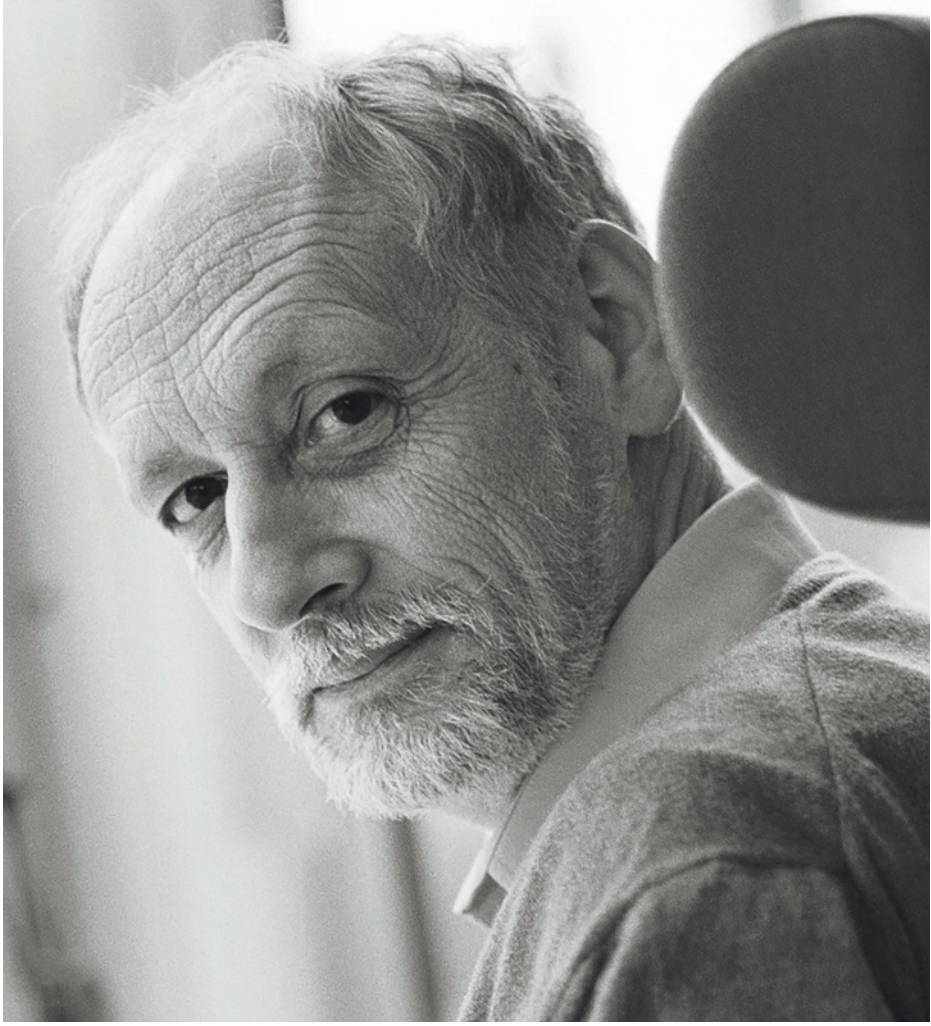
« Un passionnant défrichage de voies nouvelles pour aborder et approfondir quelques enjeux majeurs de notre temps. »

Le Monde des Livres



Éditions
Le Pommier

NICOLAS GISIN
est physicien spécialiste de mécanique quantique et professeur émérite au département de physique appliquée de l'université de Genève. Il est également professeur à l'institut de technologie de Schaffhausen, institut international fondé en 2019 et dont le siège est en Suisse. Nicolas Gisin est par ailleurs cofondateur de la société ID Quantique, créée en 2001 et pionnière dans le développement et la commercialisation des systèmes de cryptographie quantique.



L'internet quantique est pour le physicien un défi fascinant

Comment sécuriser les communications numériques ? Un internet du futur mettant à profit les lois de la physique quantique offrirait une solution infaillible. À condition de surmonter de nombreuses difficultés techniques et théoriques... Les explications du spécialiste Nicolas Gisin, qui nous décrit aussi les progrès les plus récents.

© C. Parodi

En quoi consiste l'internet quantique ?

Le réseau internet actuel est un succès technique incroyable qui a connu une croissance explosive ces dernières décennies. On estime qu'en janvier 2021, près de 60% de la population mondiale, soit 4,6 milliards d'individus, y ont accès. Internet fait partie de notre vie. Nous l'utilisons tous les jours pour échanger divers types de données, des textes, des images, des vidéos. Il est difficile d'imaginer comment le monde fonctionnerait sans ce réseau.

D'un point de vue technique, l'internet classique est un réseau décentralisé bâti sur des nœuds répartis à travers le globe et reliés par des fibres optiques. Les unités d'information, les bits, sont transmises sous la forme d'impulsions lumineuses, chacune contenant de l'ordre du million de photons. Selon qu'on reçoit un signal ou non, le bit prend la valeur «1» ou «0».

Ce réseau fonctionne très bien. Mais, d'un point de vue conceptuel, on peut se poser la question suivante: jusqu'où peut-on réduire l'intensité lumineuse? La limite ultime est de n'avoir qu'un seul photon par impulsion. À une telle échelle, les règles de la physique classique ne s'appliquent plus et on entre dans le monde fascinant de la physique quantique. Notamment, le photon peut être dans un état dit «de superposition des états "0" et "1"», c'est-à-dire qu'il peut être, dans un sens mathématiquement précis, dans ces deux états à la fois. Ce phénomène quantique confère une grande richesse au système: le bit classique est remplacé par le bit quantique, ou qubit, qui porte alors une «information quantique». L'idée de l'internet quantique est d'utiliser le réseau actuel de fibres optiques pour échanger des qubits.

Notons que l'on retrouve la même idée de réduction avec l'ordinateur. Pour remplacer les paquets d'électrons qui circulent dans les transistors, de nombreux laboratoires et entreprises travaillent sur le concept d'un ordinateur quantique qui manipulerait des qubits. De telles machines seraient très intéressantes, car on a montré qu'elles pourraient réaliser certains calculs exponentiellement plus vite que les ordinateurs classiques.

Et quels sont les avantages de l'internet quantique ?

Le premier concerne les volumes de données que l'on pourra faire circuler sur le réseau. Les besoins ont décuplé ces dernières années. En réduisant l'information à des photons uniques, on voit tout de suite qu'il sera possible d'augmenter les débits.

Cette idée de photon unique conduit à un deuxième argument en faveur de l'internet quantique. Mais il faut le prendre avec précaution et le considérer comme un idéal à atteindre. À terme, l'internet quantique pourrait être moins énergivore que le réseau actuel.

> En manipulant des photons uniques soumis aux lois de la physique quantique, on obtient automatiquement la sécurité de l'information

Le principe est tout simple: on dépense moins d'énergie à émettre un photon unique qu'un paquet de ces particules de lumière. L'argument s'applique aussi à l'ordinateur quantique, qui pourrait, en principe, un jour réaliser des calculs en consommant moins d'énergie qu'un ordinateur classique.

On est encore loin de cet idéal. Les qubits sont des objets fragiles. S'ils interagissent avec leur environnement, ils perdent leur état de superposition et tous les avantages associés. C'est le phénomène de «décohérence». Cette situation est surtout critique dans les ordinateurs quantiques. La solution pour maintenir l'état quantique du qubit le plus longtemps possible consiste à refroidir l'ordinateur à des températures d'une fraction de degré au-dessus du zéro absolu. Or les dispositifs cryogéniques dépensent beaucoup d'énergie. Mais les progrès dans le domaine de l'ordinateur quantique laissent espérer qu'il sera possible d'en concevoir qui fonctionnent à température ambiante. L'internet quantique est un peu moins sensible à ces problèmes de décohérence, mais certains éléments envisagés pour ce réseau de demain demandent aussi d'être refroidis et ils consomment pour l'instant encore beaucoup d'énergie.

La sécurité est censée être un atout majeur de l'internet quantique. Pourquoi ?

Le fait de manipuler des photons uniques soumis aux lois de la physique quantique procure un avantage qui n'est pas évident *a priori*: on obtient automatiquement la sécurité de l'information. C'est pour moi l'argument principal, il est indiscutable, nous sommes déjà capables de l'exploiter et il n'y a pas d'autre solution aussi efficace.

Tous les dispositifs numériques omniprésents dans notre quotidien (l'ordinateur, les téléphones portables et l'internet classique) ont ouvert de nombreuses portes à des espions, gouvernementaux ou non, capables d'intercepter ou de dérober des données sensibles. La solution actuelle pour protéger ces informations consiste à les rendre illisibles grâce à des algorithmes de chiffrement. Sans la clé de chiffrement, l'espion ne peut pas lire les messages.

Les algorithmes de chiffrement reposent sur des problèmes mathématiques qui sont *a priori* difficiles à résoudre en un temps raisonnable. Par exemple, le chiffrement RSA développé en 1977 par les cryptologues américains Ronald Rivest et Leonard Adleman et l'Israélien Adi Shamir est utilisé pour sécuriser les échanges dans le commerce électronique. Cet algorithme exploite la décomposition en facteurs premiers d'un nombre très grand (actuellement d'au moins 1024 bits, soit des nombres décimaux à 309 chiffres) pour définir la clé de chiffrement. Or, bien que ce nombre très grand ne soit pas secret (d'où la terminologie de clé publique),

l'espion ne peut pas facilement retrouver ses facteurs premiers car il n'y a à ce jour aucun algorithme classique qui permette de les déterminer rapidement. Cependant, avec l'ordinateur quantique, la donne pourrait changer.

Pour quelle raison ?

En 1994, le mathématicien américain Peter Shor a conçu un algorithme « quantique » qui exploite pleinement les états de superposition des qubits pour décomposer très vite des nombres très grands. Pour l'instant, les prototypes opérationnels d'ordinateurs quantiques manipulent au mieux quelques poignées de qubits. D'ici à quelques années, ces machines seront assez puissantes pour implémenter l'algorithme de Shor, ce qui mettra en danger les méthodes de chiffrement de type RSA. Il existe d'autres types de méthodes de chiffrement, dits « post-quantiques », qui sont construits sur des problèmes dont on ne connaît pas d'algorithme classique ou quantique pour les casser. Mais le risque d'en trouver existera toujours.

Une solution consiste alors à exploiter les propriétés quantiques pour construire des protocoles de chiffrement qui seraient impossibles à attaquer. La cryptographie quantique permet déjà d'établir des communications sécurisées. C'est la partie la plus avancée de l'internet quantique.

En quoi consiste cette cryptographie quantique ?

Imaginons que deux personnes, nommées habituellement Alice et Bob, veuillent établir une communication sécurisée. Elles doivent d'abord se partager une clé de chiffrement qui servira d'un côté à brouiller le message et de l'autre à le rendre lisible. L'idée est ici d'avoir une distribution quantique de cette clé, ou QKD (pour *quantum key distribution*). L'intérêt est qu'en physique quantique, quand un observateur effectue une mesure sur un système, il modifie ce dernier. Ainsi, quand Alice envoie la clé à Bob selon un protocole bien précis (*voir l'encadré page 25*), les deux correspondants peuvent savoir si un espion a lu la clé. Dans ce cas, ils jettent cette clé à la poubelle (qui ne contient aucune information de toute façon) et s'en envoient une nouvelle jusqu'à avoir la garantie que la clé n'a pas été interceptée.

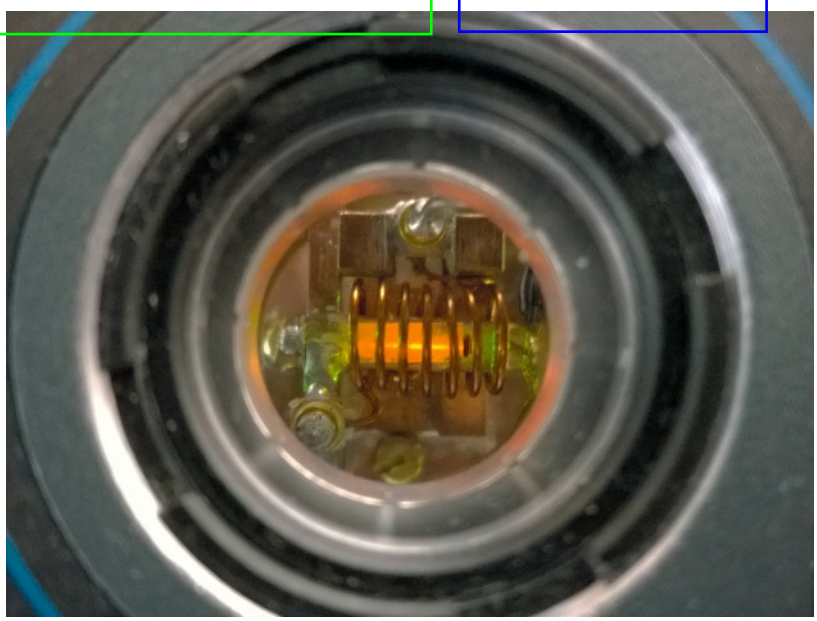
La cryptographie ne garantit pas la solidité de la communication. Si un espion capte systématiquement la clé, il sera impossible d'envoyer un message. En revanche, la QKD garantit la confidentialité : une fois la clé partagée, les messages seront chiffrés de façon robuste et l'espion n'aura aucun moyen de voler l'information transmise. Le premier protocole d'échange quantique de clé a été proposé en 1984 par l'Américain Charles Bennett et le Canadien Gilles Brassard.

Existe-t-il déjà des applications commerciales de la distribution quantique de clés ?

Plusieurs entreprises dans le monde proposent de tels systèmes de communications quantiques. C'est un marché en pleine expansion. Par exemple, il y a tout juste vingt ans, j'ai fondé la société ID Quantique avec des collègues de l'université de Genève. À l'époque, nous étions pionniers dans le domaine, mais surtout vus comme des physiciens illuminés ; on ne nous prenait pas trop au sérieux. Nous vendions essentiellement des détecteurs de photons uniques et des générateurs quantiques de nombres aléatoires.

Ces derniers jouent aussi un rôle important dans la sécurisation des données. Ils sont essentiels pour la cryptographie, car ils permettent de produire des clés de chiffrement de façon parfaitement aléatoire. La plupart des générateurs actuels s'appuient sur des algorithmes déterministes qui ne peuvent produire que des nombres pseudoaléatoires ; autrement dit, si l'on connaît bien l'algorithme et le système, il est possible de prévoir les nombres produits. D'autres approches s'appuient sur des phénomènes physiques chaotiques pour en extraire de l'aléa, mais il faut bien s'assurer qu'ils ne sont pas prévisibles et souvent ces méthodes nécessitent un traitement logiciel qui, lui, peut altérer cet aléa.

Encore une fois, la physique quantique démontre son efficacité. L'idée est simple. On envoie un photon sur un miroir semi-réfléchissant, qui peut le réfléchir ou le laisser traverser. Le photon sera détecté, de façon totalement imprévisible, d'un côté du miroir ou de l'autre. Selon le cas, il code un bit « 0 » ou « 1 ». Au début, de tels générateurs quantiques de nombres aléatoires tenaient dans de petits boîtiers. Maintenant, grâce aux techniques de miniaturisation, ils



Une mémoire quantique conçue par l'équipe de Nicolas Gisin, à l'université de Genève. Le cristal contient des atomes d'ytterbium, élément de la famille des terres rares. Ceux-ci sont maintenus dans leur état d'énergie fondamentale en étant refroidis à quelques kelvins. Le système peut absorber un photon et en émettre un peu plus tard un autre présentant les mêmes propriétés quantiques d'intrication.

© Université de Genève

tiennent dans des puces de 2 millimètres. Le constructeur de téléphones mobiles Samsung en intègre déjà dans ses appareils commercialisés en Corée du Sud. Des logiciels, notamment bancaires, les utilisent pour chiffrer les communications. Dans trois à cinq ans, cela devrait se généraliser à tous les téléphones.

La sécurité des données et l'espionnage ont toujours existé, mais c'est devenu une préoccupation importante et un enjeu géopolitique majeur ces dernières décennies. Toutes les grandes puissances et les grandes firmes ont un programme de cryptographie quantique. La Corée du Sud a déjà un réseau national qui connecte les grandes villes, l'Europe a aussi un projet à l'étude. Le marché de la communication quantique est en train de décoller. À titre d'exemple, chez ID Quantique, les systèmes de distribution quantique de clés représentent aujourd'hui son activité principale. Les clients sont essentiellement des établissements financiers ou des gouvernements, qui relient par exemple les ministères entre eux.

Peut-on alors déjà parler d'internet quantique ?

Non, la communication quantique avec la QKD n'est qu'une première étape. L'internet quantique, c'est deux choses : pouvoir transmettre de l'information sur des distances arbitrairement grandes et pouvoir connecter des ordinateurs quantiques.

L'obstacle majeur à la mise en place de l'internet quantique est la perte de signal dans les fibres optiques. Dans leur utilisation classique, les impulsions lumineuses perdent 99 % de leurs photons au bout de 100 kilomètres, ce qui laisse tout de même un millier de photons. Pour porter l'information plus loin, on utilise des amplificateurs optiques qui redonnent de l'intensité au signal. Pour une communication classique, cette solution est très efficace. Mais pour un système quantique, un tel processus revient à réaliser une mesure des qubits, donc à faire disparaître leur état de superposition. Or pour construire l'internet quantique, il faut pouvoir transmettre des qubits sur des distances à l'échelle d'un continent, voire du globe !

Quelles sont les solutions ?

L'approche la plus simple consiste à utiliser des « nœuds de confiance ». Supposons qu'Alice veuille envoyer des qubits à Bob, qui habite à plus de 100 kilomètres de chez elle. Elle envoie ses photons à un intermédiaire, Charlie, situé à mi-distance, qui déchiffre le message d'Alice, puis l'envoie avec un nouveau chiffrement à Bob. C'est très simple à mettre en place. La Chine a fait une démonstration impressionnante de cette idée. Elle a construit un réseau long de 2 000 kilomètres reliant Pékin à Shanghai et utilisant 32 nœuds de confiance. Avec cette solution, le risque pour la sécurité de l'information est évident : chaque nœud intermédiaire est un maillon faible qui peut être compromis et exploité par un espion. Pour garantir la protection des données sur toute la ligne (et aussi connecter de façon optimale des ordinateurs quantiques), il faut utiliser une autre technique : les répéteurs quantiques.

Comment un répéteur quantique fonctionne-t-il ?

Le premier ingrédient dont nous avons besoin est l'intrication quantique. En physique quantique, il est possible d'avoir deux objets dont les propriétés sont fortement corrélées de sorte que, mathématiquement, on ne peut pas les décrire séparément. La conséquence est que lorsque cette paire d'objets se retrouve dans une superposition d'états, si l'on effectue une mesure sur l'un des deux, cela influe instantanément sur les propriétés de l'autre, même si les deux objets sont à très grande distance l'un de l'autre, typiquement à des centaines de kilomètres dans le cas pratique de l'internet quantique. Ces corrélations ne peuvent pas s'expliquer par la physique classique, elles sont purement quantiques.

Si Alice et Bob ne sont pas trop éloignés, ils peuvent réaliser la QKD avec une source de

LA DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLÉ DE CHIFFREMENT

La cryptographie quantique repose sur un échange sécurisé de clé de chiffrement entre deux interlocuteurs, nommés traditionnellement Alice et Bob. Dans la version la plus simple, Alice envoie à Bob une suite de photons polarisés (horizontalement, verticalement ou selon les deux premières diagonales, qui codent respectivement un bit 0, 1, 0 et 1). Bob fait passer chaque photon qu'il reçoit à travers un des deux polariseurs à sa disposition, qu'il choisit de façon aléatoire. Le premier filtre laisse passer les polarisations horizontale et verticale, le second les deux polarisations diagonales. Bob communique alors publiquement (c'est-à-dire qu'un espion peut écouter cet échange) à Alice la séquence de polariseurs qu'il a utilisée. Alice lui répond, publiquement aussi, quels photons mesurés il doit garder (ceux dont un des deux axes du polariseur utilisé était aligné sur la polarisation du photon, une information que seule Alice détient). Avec ces photons, Alice et Bob créent une suite de bits qui sera leur clé commune. Comme les polariseurs de Bob laissent passer deux types de photons polarisés codant respectivement un bit 0 ou 1, un espion qui connaît la liste des polariseurs de Bob ne peut pas, pour autant, reconstituer la clé.

Le point important est que l'espion qui intercepterait les photons de la clé sur leur trajet altérerait leur polarisation et donc les mesures de Bob. Or si Alice et Bob comparent un petit échantillon aléatoire du signal et qu'ils notent trop d'erreurs, ils en déduisent qu'un ennemi a interféré. Ils s'envoient alors une nouvelle clé.

paires de photons intriqués (tels que leurs polarisations sont toujours orthogonales). Cette source peut être placée n'importe où sur le trajet : à mi-distance, chez Alice, etc. Quand Alice mesure la polarisation du photon qu'elle reçoit, elle connaît la polarisation du photon qui arrive chez Bob. Ils peuvent alors créer une clé de chiffrement comme avant : Bob fait ses mesures avec deux polariseurs et Alice lui dit quels photons conserver pour constituer la clé.

Mais comment faire si Alice et Bob se trouvent à plusieurs centaines de kilomètres l'un de l'autre ?

À elle seule, la source de photons intriqués ne résout pas le problème de la perte de signal dans la fibre. La solution est la téléportation quantique, un protocole de communication qui s'appuie sur l'intrication quantique.

Supposons qu'Alice et Bob soient en mesure d'envoyer des photons à un intermédiaire, Charlie, qui sera le « répéteur quantique ». Alice et Bob sont chacun équipés d'une source de paires de photons intriqués, respectivement (A1, A2) et (B1, B2). Les photons A1 et B1 sont envoyés à Charlie, qui réalise une mesure simultanée particulière (dite « mesure de Bell ») sur ces deux photons, lesquels se retrouvent alors intriqués. Mais les lois de la physique quantique impliquent que les deux autres photons A2 et B2, restés chez Alice et Bob, forment à leur tour une paire intriquée. Résultat : Alice et Bob partagent une paire de photons dont ils pourront mesurer les polarisations afin d'établir une clé de chiffrement.

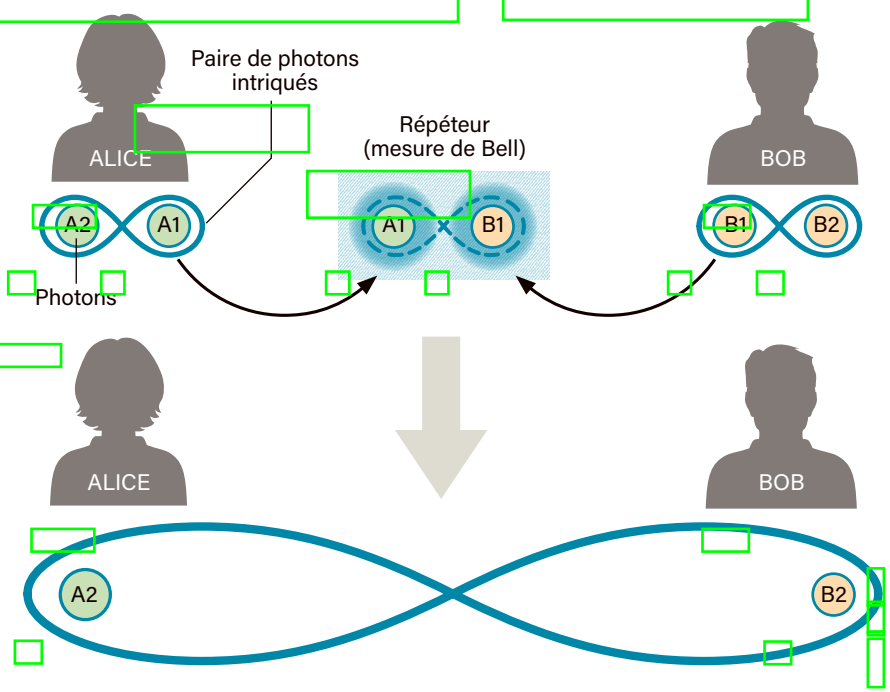
La force du système est que le principe peut se généraliser, en plaçant autant de répéteurs que nécessaire pour couvrir la distance qui sépare Alice et Bob. Il faut aussi souligner que les répéteurs quantiques ne sont pas des nœuds de confiance, car ils n'ont pas accès à l'information partagée entre Alice et Bob. Un espion ne peut pas intercepter la clé en infiltrant un répéteur.

En 1997, les équipes de Francesco de Martini, à l'université de Rome, et d'Anton Zeilinger, à l'université d'Innsbruck, ont réalisé les premières expériences de téléportation quantique en laboratoire. En 2007, mon équipe a mis en œuvre ce phénomène sur une grande distance : nous avons injecté les photons dans le réseau de fibres optiques de Swisscom et la mesure de Bell a été réalisée bien après l'émission des photons qui se trouvaient ainsi à plusieurs centaines de mètres quand la téléportation a opéré.

La technique des répéteurs quantiques est-elle donc accessible ?

Dans les expériences de laboratoire, les photons que Charlie reçoit sont synchronisés pour arriver en même temps afin de réaliser la mesure de Bell. Or, dans des conditions réelles, ce n'est pas le cas. Il faut donc pouvoir stocker le premier photon arrivé en attendant le second. Et cela est extraordinairement difficile. Comment le faire sans détruire le qubit ? À l'université de Genève, notre groupe a commencé à développer en 2008 des mémoires quantiques reposant sur des cristaux dopés avec des terres rares. Le cristal est refroidi à quelques kelvins pour que tous les atomes soient dans l'état fondamental. La différence d'énergie avec le premier état excité correspond à l'énergie du photon incident, qui peut alors être absorbé. Mais comme la probabilité d'absorption par le premier atome rencontré n'est pas de 100 %, il peut être absorbé par le deuxième atome, le troisième, etc. Le système est en fait dans une superposition d'états du premier atome excité, du deuxième, du troisième, etc. Les atomes sont par ailleurs préparés pour définir une sorte d'horloge qui indique quand le système se désexcite et libère un nouveau photon. Ce dernier doit avoir toutes les propriétés quantiques (de superposition et d'intrication) du photon incident et doit être réémis dans la bonne direction, sinon il est perdu. Plusieurs équipes de recherche ont ainsi des prototypes de mémoires quantiques qui fonctionnent. Le défi est cependant de combiner une efficacité élevée (on parvient à restituer environ 10 % des photons incidents) et des temps de stockage qui peuvent être assez longs, de l'ordre du dixième de seconde.

Les mémoires quantiques de mon laboratoire utilisent des cristaux qui font à peine un centimètre de longueur. Mais elles restent de vraies « usines à gaz », car il faut les refroidir avec un système de cryogénie. Si nous sommes encore loin d'une possible commercialisation de ces dispositifs, les progrès de ces dernières années sont encourageants.



Pour implémenter l'internet quantique sur de grandes distances en passant par les fibres optiques, la solution est d'utiliser la téléportation d'intrication quantique. Pour réaliser ce protocole, Alice et Bob ont chacun une paire de photons intriqués, (A1, A2) et (B1, B2). Les photons A1 et B1 sont envoyés à un répéteur, où une mesure dite de Bell intrique les deux photons. D'après les règles de la mécanique quantique, la paire (A2, B2) devient à son tour intriquée. Avec ces photons aux propriétés corrélées, Alice et Bob peuvent alors mettre en place une distribution quantique de clé.

© Pour la Science

Pour le physicien, les mémoires quantiques sont vraiment fascinantes. Il est étonnant de pouvoir manipuler l'état quantique de photons uniques avec une telle précision. Par ailleurs, par l'échange de photons, il est possible d'intriquer des mémoires quantiques, des objets macroscopiques qui, à terme, seront à une centaine de kilomètres l'un de l'autre !

Pour les communications à longue distance, qu'en est-il de l'approche consistant à utiliser des satellites ?

Dans ce domaine, la Chine a une longueur d'avance. Elle n'hésite pas à prendre des risques, à investir et à mettre à disposition de ses chercheurs des moyens extraordinaires. Elle a ainsi rattrapé et dépassé les pays occidentaux. L'Europe commence seulement à réagir à cette concurrence. Il faut aussi souligner une différence cruciale de stratégie. L'État chinois est le premier client de ces développements, il soutient activement leur développement. En Europe, on demande au secteur privé d'être porteur. Mais les investissements sont encore lourds et les entreprises restent un peu frileuses. Historiquement, il faut rappeler que le succès phénoménal de l'internet classique n'a été possible que grâce à l'investissement des États et des entreprises nationales. Depuis, tous les grands opérateurs téléphoniques ont été privatisés...

Pour revenir à la Chine, en 2016, ce pays a mis en orbite le satellite *Micius*, dans le cadre de la mission scientifique *Quess*, sous la direction de Jian-Wei Pan, de l'Académie chinoise des sciences. En 2017, le satellite a servi de nœud de confiance dans une communication chiffrée entre Vienne, où Jian-Wei Pan a fait son doctorat, et Pékin.

Le satellite peut-il réaliser une distribution quantique de clé ?

Oui. En 2020, *Micius* a envoyé des paires de photons intriqués à deux stations en Chine, à Nanshan et Delingha, distantes de 1120 kilomètres l'une de l'autre. Les chercheurs chinois ont ainsi battu le record de distance pour une distribution quantique de clé sans nœud de confiance.

On peut aussi imaginer d'utiliser le satellite comme un répéteur quantique, mais il y a une contrainte importante : le satellite doit voir en même temps les deux stations au sol. Or un satellite comme *Micius* se situe en orbite basse, à moins de 600 kilomètres d'altitude ; son horizon est donc limité. Pour une communication entre les États-Unis et l'Europe par exemple, il faudrait une mémoire quantique capable de retenir un photon pendant plusieurs dizaines de minutes, voire une heure !

En outre, pour l'instant, cette technique est loin d'être parfaite. Les photons sont absorbés en grand nombre par l'atmosphère. Même dans l'expérience de 2020, alors que le satellite produisait 6 millions de paires intriquées par seconde, le flux d'information n'était que de 0,12 bit par seconde. L'équipe de Jian-Wei Pan travaille au développement de sources plus intenses pour compenser ce débit très faible. D'autres pays sont aussi dans la course pour développer des satellites de communication quantique. Et des entreprises privées envisagent aussi des constellations de satellites opérant comme des nœuds de confiance.

Que manque-t-il encore pour construire l'internet quantique ?

Il ne faut pas négliger l'aspect logiciel. Il faudra mettre en place des protocoles capables de gérer les flux de données, de les envoyer au bon endroit, transmettre les informations des couches physiques aux applications, etc.

Le succès de l'internet classique vient en partie de l'uniformisation des protocoles. Aujourd'hui, chaque laboratoire et chaque entreprise a développé ses propres méthodes de communication quantique. L'Union internationale des télécommunications, sous l'égide des Nations unies, la Commission européenne (avec un consortium d'entreprises et d'instituts de recherche) et d'autres commencent à travailler sur le cas des communications et de l'internet quantique pour que tout le monde parle le même langage.

En dehors de la sécurité des communications, que peut-on attendre d'autre de l'internet quantique ?

L'internet quantique est un défi technique incroyable. Il est aussi, pour le physicien, un problème fascinant qui soulève des questions conceptuelles nouvelles (*voir l'article pages 28 à 38*). Il suscite également des attentes importantes concernant les ordinateurs quantiques. En téléportant l'information d'un ordinateur quantique à l'autre, l'internet quantique nous permettra d'exploiter pleinement l'association de ces machines pour décupler leur puissance.

Parmi les promesses des ordinateurs quantiques, si l'on parvient à manipuler assez de qubits, il sera possible de simuler des molécules complexes afin de développer de nouveaux médicaments ou des matériaux innovants. L'un des grands défis de l'humanité est la production d'énergie. Pour l'instant, nous n'arrivons pas à exploiter la lumière du soleil avec autant d'efficacité que la nature. Peut-être qu'avec les ordinateurs quantiques reliés par l'internet quantique, il sera possible de percer les secrets de la photosynthèse et d'améliorer les rendements des panneaux solaires. On en est encore loin, mais cet exemple montre que les enjeux sont énormes.

Propos recueillis par Sean Bailly

à lire



THEMA
L'ordinateur quantique. Promesses et réalité

Quel est le principe des ordinateurs quantiques ? Quelles performances en attend-on ? Quels sont leurs enjeux ? Comment va-t-on les réaliser ? Le point dans ce n° 18 de la collection « Thema »

En vente sur notre site uniquement :
boutique.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

J. Yin *et al.*, **Entanglement-based secure quantum cryptography over 1,120 kilometres,** *Nature*, vol. 582, pp. 501-505, 2020.

S. Wehner *et al.*, **Quantum internet : a vision for the road ahead,** *Science*, vol. 362, article eaam9288, 2018.

M. Afzelius, N. Gisin et H. de Riedmatten, **Quantum memory for photons,** *Physics Today*, vol. 68, pp. 42-47, décembre 2015.

N. Gisin, **L'impensable hasard,** Odile Jacob, 2012.

H. J. Kimble, **The quantum internet,** *Nature*, vol. 453, pp. 1023-1030, 2008.

L'ESSENTIEL

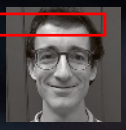
> Selon le principe de localité, toute information ou influence se propage continûment à une vitesse inférieure ou égale à celle de la lumière. La physique quantique s'est révélée incompatible avec ce principe.

> Dans l'expérience GHZ consistant à mesurer l'état de photons issus d'une source unique, on a montré que les corrélations entre les résultats obtenus ne peuvent s'expliquer en préservant le principe de localité.

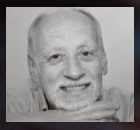
> Un futur internet quantique mettra en œuvre de nombreuses sources indépendantes de photons, ce qui amène à étudier la non-localité dans un réseau formé de plusieurs sources.

> Les physiciens étudient les scénarios les plus simples avec deux ou trois sources, des systèmes déjà complexes à analyser.

LES AUTEURS



MARC-OLIVIER RENOU
postdoctorant à l'institut des sciences photoniques de Barcelone



NICOLAS GISIN
professeur à l'université de Genève et à l'institut de technologie de Schaffhausen, à Genève



NICOLAS BRUNNER
professeur à l'université de Genève

La non-localité quantique à l'ère des réseaux

Les lois de la physique quantique semblent incompatibles avec le principe de localité, selon lequel deux objets distants ne peuvent pas s'influencer instantanément. Assez bien comprise pour des photons émis par une source unique, cette non-localité reste à cerner dans le cas d'un internet quantique, réseau où de nombreuses sources indépendantes de photons seront à l'œuvre.

Aujourd'hui, une partie sensible de nos vies circule sur internet : nos données bancaires ou médicales, nos courriers électroniques, nos messages sur les réseaux sociaux, nos photos, etc. Pour garantir une transmission sécurisée de ces informations sans qu'elles soient volées, lues ou altérées, des techniques de chiffrement ont été développées. Elles s'appuient sur des problèmes mathématiques qui, sans la clé de déchiffrement, ne sont pas résolus en un temps raisonnable par des ordinateurs classiques. Par exemple, certains algorithmes reposent sur le fait que la décomposition en facteurs premiers de très grands nombres entiers est un tel problème.

Cependant, le développement d'ordinateurs quantiques à l'horizon de quelques années pourrait rendre obsolètes ces techniques de chiffrement. Des algorithmes, qualifiés de quantiques, exploiteraient toute la puissance de la physique quantique afin de résoudre rapidement des problèmes inaccessibles à leurs concurrents classiques. C'est le cas de l'algorithme proposé en 1994 par le mathématicien américain Peter Shor, qui est en théorie capable de factoriser très vite de très grands nombres entiers. Ainsi, quand les ordinateurs quantiques auront été mis au point, les transmissions de coordonnées bancaires lors d'achats en ligne ne seront plus à l'abri d'une attaque. Quelles seront alors les solutions ? Les phénomènes quantiques, à l'origine des capacités de déchiffrement de



La non-localité est au cœur de la mécanique quantique. Elle devient très difficile à étudier dans un réseau muni de plusieurs sources de photons indépendantes. L'analyser dans ce cadre permet cependant d'avoir une compréhension encore plus fondamentale de ce phénomène contre-intuitif.

© Shutterstock.com/Quardia

cette future génération d'ordinateurs, pourraient aussi être la clé pour construire un «internet quantique» hautement sécurisé.

Le concept d'internet quantique recouvre de nombreux dispositifs et idées, dont le développement est un défi à la fois technologique et théorique (*voir l'entretien avec Nicolas Gisin, pages 22 à 27*). En particulier, la propriété importante qui nous intéresse ici et qui se manifeste dans les systèmes quantiques, des plus simples manipulant juste des paires de photons (les particules élémentaires de lumière) aux plus complexes tels que l'internet quantique, est celle de la non-localité. Et si la physique quantique a la réputation d'être contre-intuitive, c'est surtout en raison de son caractère non local.

UN PRINCIPE ÉVIDENT?

Pour comprendre cette non-localité, rappelons ce qu'est le principe de localité. D'après celui-ci, toute information ou influence se propage continûment, de proche en proche, à une vitesse finie inférieure ou égale à celle de la lumière, en vertu des lois de la théorie de la relativité restreinte. Le principe de localité semble *a priori* évident pour notre intuition, forgée à partir de notre expérience du monde classique et macroscopique. Pourtant, il n'en est rien à l'échelle microscopique.

Pour être plus précis, le principe de localité ne s'accorde pas avec la physique quantique si l'on admet une hypothèse, celle de l'indépendance du choix de la mesure. Selon cette hypothèse, il est possible de choisir la façon de mesurer un système indépendamment du système lui-même, et il n'existe pas une cause qui soit à la fois à l'origine du choix de cette façon de mesurer et à l'origine de l'état du système (*voir l'encadré page ci-contre*).

En passant du monde macroscopique à l'univers microscopique et quantique, certains des principes fondamentaux de la physique classique ne s'appliquent plus et doivent être abandonnés. Imaginons un détective armé de son intuition «classique». Il serait bien en peine de percer à jour certaines énigmes du monde microscopique. Il serait confronté à des situations où, par exemple, raisonner simultanément sur la position et la vitesse d'un suspect au moment du crime n'a pas de sens, où l'auteur du crime pourrait être à deux endroits en même temps et où la victime pourrait être à la fois morte et vivante!

Depuis la naissance de la mécanique quantique il y a presque un siècle, les physiciens ont démontré expérimentalement la solidité de cette théorie. Bien que les lois quantiques heurtent l'intuition, ils ont appris à se forger une «intuition quantique» qui leur permet d'en être familiers et de mieux les comprendre. La non-localité quantique a ainsi une histoire riche, ponctuée de débats, de percées théoriques et d'expériences de pointe. Les physiciens ont mis à l'épreuve leurs idées à ce sujet dans des expériences faisant appel à des sources émettant deux ou trois photons. Or les résultats de ces tests ne pouvaient s'expliquer qu'en remettant en cause le principe de localité (ou alors, celui de l'indépendance du choix de la mesure).

Si l'on peut dire aujourd'hui que la non-localité dans les expériences impliquant une source unique de photons est bien comprise, l'internet quantique bouleverse cette notion. En effet, concevoir un réseau pour l'internet quantique n'est possible qu'en introduisant de multiples sources indépendantes de photons. Le fait de passer d'une source unique à deux sources, trois, etc., change complètement l'analyse du système et la façon dont la non-localité se manifeste.

Depuis une dizaine d'années, alors que l'intérêt pour l'internet quantique grandit, les physiciens théoriciens se sont aussi penchés sur ces systèmes à plusieurs sources de photons. Ils commencent seulement à entrevoir la façon de repenser la notion de non-localité. La formulation de cette dernière ne serait pas unique, mais dépendrait du contexte où elle se manifeste. À terme, une compréhension plus fine des subtilités de la non-localité en réseau débouchera certainement sur de nouvelles applications, voire contribuera à améliorer l'internet de demain.

L'internet quantique bouleverse la notion de non-localité

Pour saisir les enjeux de la non-localité quantique, il est nécessaire de comprendre comment les physiciens sont parvenus à appréhender progressivement cette notion au cours des cent dernières années.

Très tôt dans l'exploration des fondements de la mécanique quantique, les physiciens ont rencontré des difficultés à penser et à formuler cette situation paradoxale. Comment deux principes qui semblaient évidents pour les scientifiques du début du XX^{e} siècle (la localité et l'indépendance du choix de la mesure) pouvaient-ils être incompatibles avec la physique quantique? Dans les années 1930, Albert Einstein et deux collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen, ont lancé le débat dans un article resté célèbre, qui s'étonnait d'une «mystérieuse action à distance» incluse dans le

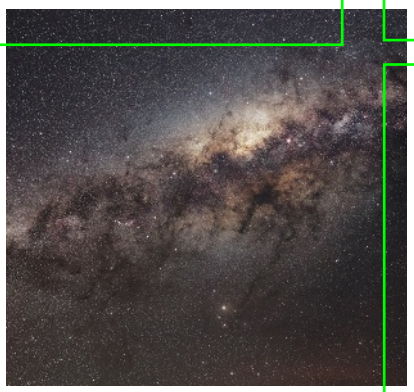
CHOIX DE MESURE INDÉPENDANTS ET SUPERDÉTERMINISME

Dans les expériences de physique quantique de type tests de Bell, comme l'expérience GHZ, les chercheurs obtiennent des corrélations entre les résultats de mesures choisies et effectuées en plusieurs points de l'espace, corrélations inexplicables si l'on admet le principe de localité et celui de l'indépendance du choix des mesures.

Les choix de mesures reposent sur une composante aléatoire, comme un tirage à pile ou face. On pourrait rétorquer qu'après tout, un résultat de lancer de pièce n'est pas aléatoire : il dépend de la façon de lancer, des mouvements d'air autour de la pièce, etc. Une façon d'expliquer les corrélations en conservant le principe de localité serait alors de révoquer le principe de l'indépendance du choix de la mesure. Mais cela n'est pas si simple. Même si les tirages à pile ou face réalisés pour choisir les mesures sont déterminés par certaines causes, il faudrait, pour expliquer l'expérience GHZ, que ces causes conspirent de façon « intelligente » pour reproduire le résultat prévu par la physique quantique. Dans l'expérience GHZ transposée aux chats et décrite par les auteurs, il faudrait qu'une cause commune détermine à la fois les chats qui entrent dans les détecteurs de l'expérience et les résultats des tirages à pile ou face, de telle façon que les résultats des mesures effectuées soient exactement conformes aux prédictions de la théorie. On parle alors d'explication « superdéterministe ». Pour expliquer les expériences de Bell, ce « déterminisme intelligent » doit être finement réglé à travers tout l'Univers pour ne pas être mis en défaut.

Concrètement, les expériences de Bell actuelles utilisent des générateurs de nombres aléatoires en tirant leur aléa de sources aussi variées que des fluctuations dans la lumière émise par des lasers, le rayonnement émis par des quasars il y a des milliards d'années, les bits issus de la numérisation de vieux films hollywoodiens, les décimales de π...

Dans le cadre superdéterministe, pour expliquer ces expériences, il faudrait ainsi prétendre qu'il existe un lien entre elles et le réalisateur Martin Scorsese ou la lumière des quasars ! Cette vision « conspirationniste » de la physique amène très rapidement à affirmer que « tout est écrit à l'avance ». Or une telle affirmation n'est pas réfutable, donc sort du cadre de la science, et l'on peut se demander quel sens donner aux lois physiques si tout est déjà écrit. La plupart des physiciens refusent cette piste ; ils admettent, de façon implicite, le principe de l'indépendance du choix de la mesure, ou plus exactement d'une expérience non superdéterministe.



En 2017, dans leur expérience de Bell, au lieu de tirer à pile ou face avec des pièces, l'équipe d'Anton Zeilinger, de l'université de Vienne, a utilisé la lumière de deux étoiles distantes de plus de 500 années-lumière : les chercheurs effectuaient un type de mesure ou un autre selon que la fréquence des photons issus des astres était supérieure ou inférieure à une valeur donnée. Selon le superdéterminisme, certaines causes auraient réglé finement les émissions lumineuses des deux étoiles il y a plus de 500 ans pour que les résultats de l'expérience de physique soient compatibles avec les prédictions de la physique quantique. En utilisant des quasars, on pourrait repousser cette logique à plusieurs milliards d'années...

formalisme de la mécanique quantique. Les trois chercheurs ont démontré que, selon ce formalisme, un événement survenant à un endroit peut avoir une influence instantanée sur la description mathématique d'un autre système physique, à distance, ce qui semble être en contradiction avec le principe de localité (qui n'était pas encore conceptualisé dans sa formulation moderne).

Pour Einstein et ses collègues, cette conclusion était le signe que la théorie quantique était incomplète, et qu'il devait exister une théorie alternative conduisant aux mêmes prédictions, mais en évitant ce paradoxe apparent. Cependant, pour le physicien danois Niels Bohr, l'un des principaux fondateurs de la mécanique quantique, il fallait accepter cette étrangeté dans le formalisme de la théorie quantique, qui ne débouchait sur aucune contradiction en pratique.

Pendant plusieurs décennies, aucun argument théorique ni aucune expérience n'ont permis de résoudre cette controverse, mise de côté par la plupart des physiciens puisqu'elle n'affectait pas leurs travaux au quotidien. En 1964, le Nord-Irlandais John Bell a fait progresser la situation de façon cruciale. Alors qu'il cherchait une théorie qui réconcilierait les prédictions de la physique quantique et ce que nous nommons maintenant la localité, il a démontré un résultat exactement opposé, qui a mené à l'un des théorèmes de physique fondamentale les plus importants, révolutionnant notre vision du monde. Reformulé dans la décennie suivante, ce théorème prouve qu'aucune théorie conduisant aux mêmes prédictions que la physique quantique ne peut être compatible à la fois avec le principe de localité et avec celui de l'indépendance du choix de la mesure. Ce théorème a ouvert la voie à des tests concrets, dits « expériences de Bell », qui mettent en défaut la conjonction de ces deux principes.

En réalité, il existe de nombreuses expériences de Bell. Celle discutée à l'origine par Bell est une expérience de pensée, sans indications sur la façon de la réaliser en pratique, avec les moyens techniques de l'époque. Elle est aujourd'hui connue sous le nom d'expérience CHSH, du nom des physiciens américains John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony et Richard Holt qui en proposèrent la première procédure expérimentale. Elle met en jeu deux expérimentateurs effectuant des mesures en deux lieux distincts. Elle a l'avantage d'être relativement simple à réaliser.

© ESO/F. Char

LES CHATS QUANTIQUES DE L'EXPÉRIENCE GHZ

Dans l'expérience GHZ, une source envoie simultanément trois photons intriqués à trois scientifiques, Aïda, Béatrice et Camélia. Celles-ci réalisent simultanément une mesure unique de polarisation dans une certaine direction, parmi deux possibles. On choisit ici de renommer les photons « chats » et la polarisation « couleur », soit sur le pelage *(P)*, soit sur les yeux *(Y)*, qui peuvent être soit verts *(v)*, soit roses *(r)*. Chaque expérimentatrice décide quoi mesurer par un tirage à pile ou face, sans communiquer son choix aux autres. La mécanique quantique prédit deux situations pour les résultats. Lorsque toutes les scientifiques mesurent *P*, elles trouvent un nombre impair (1 ou 3) de résultats *v*, et donc un nombre pair (0 ou 2) de résultats *r*. Lorsque l'une mesure *P* et les deux autres mesurent *Y*, elles trouvent un nombre pair (0 ou 2) de résultats *v*, et donc un nombre impair (1 ou 3) de résultats *r*. Les observations confirment ces prédictions.

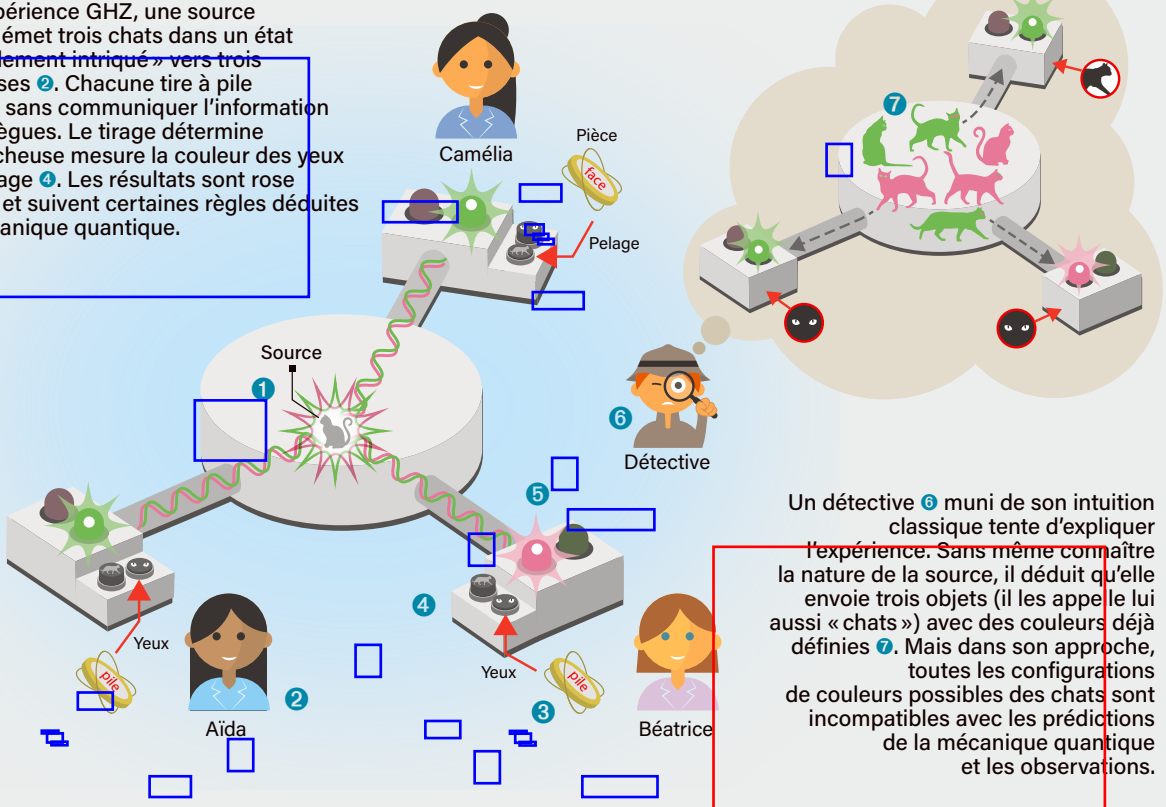
En s'appuyant sur son intuition classique et macroscopique, notamment sur le principe de localité, un détective peut-il expliquer les résultats des mesures ? Son raisonnement l'amène à penser que la source au centre de l'expérience contient des chats verts ou roses, avec des yeux verts ou roses, c'est-à-dire avec des couleurs bien déterminées. À chaque fois, trois de ces chats parviennent aux appareils de mesure des trois scientifiques. Il peut ainsi énumérer les 64 possibles configurations de trois chats soumises aux trois scientifiques. Considérons par exemple l'une de ces 64 configurations, représentée sur l'illustration, celle où Aïda reçoit un chat rose aux yeux verts, et Béatrice et Camélia des chats verts aux yeux roses. Suivant le résultat des tirages de pile ou face, plusieurs mesures sont possibles. Si, comme dans l'illustration, Aïda et Béatrice mesurent les yeux et Camélia mesure le pelage, elles obtiennent un nombre pair de résultats *v* (plus exactement, deux), ce qui est compatible avec les observations du détective et les prédictions quantiques. C'est toujours le cas tant que deux des chercheuses mesurent les yeux et la troisième mesure le pelage. Cependant, si les trois mesurent le pelage, elles obtiennent un nombre pair (deux) de résultats verts, ce qui est contraire aux prédictions quantiques et qui n'est jamais observé par le détective !

> **La cause des corrélations est nécessairement non locale**

En prenant un par un les 64 cas possibles, comme nous venons de le faire avec un cas particulier, notre détective (ou un lecteur motivé) montre aisément, de la même façon, qu'aucune de ces possibilités n'est compatible avec les résultats indiqués par la physique quantique. Pour chaque combinaison possible, il existe toujours un choix de mesures incompatible avec les résultats prédits par la mécanique quantique et observés par le détective. Les résultats de l'expérience ne peuvent donc s'expliquer par aucune des combinaisons possibles.

La conclusion qui s'impose est que la cause des corrélations entre les mesures ne peut être de nature classique, et est nécessairement non locale. Pour tirer cette conclusion, il faut cependant admettre l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure. Cette hypothèse interdit l'existence d'un cause commune déterminant à la fois la couleur des chats et les résultats des tirages à pile ou face, cause qui pourrait éviter que les trois scientifiques ne mesurent les situations problématiques, comme quand elles mesurent toutes le pelage dans le cas des chats pris en exemple.

Dans l'expérience GHZ, une source unique ❶ émet trois chats dans un état « maximalement intriqué » vers trois chercheuses ❷. Chacune tire à pile ou face ❸ sans communiquer l'information à ses collègues. Le tirage détermine si la chercheuse mesure la couleur des yeux ou du pelage ❹. Les résultats sont rose ou vert ❺ et suivent certaines règles déduites de la mécanique quantique.



Un détective ❻ muni de son intuition classique tente d'expliquer l'expérience. Sans même connaître la nature de la source, il déduit qu'elle envoie trois objets (il les appelle lui aussi « chats ») avec des couleurs déjà définies ❼. Mais dans son approche, toutes les configurations de couleurs possibles des chats sont incompatibles avec les prédictions de la mécanique quantique et les observations.

© Bruno Bourgeois

L'idée consiste à analyser les corrélations entre les résultats des mesures des deux expérimentateurs. Si ces corrélations sont assez fortes, supérieures à une certaine valeur seuil (leur force est donnée par une «inégalité de Bell»), alors il est impossible de les expliquer classiquement en conservant à la fois la localité et l'indépendance du choix de la mesure. Dans le cadre de CHSH, le raisonnement est complexe et ne permet pas d'exposer simplement la nécessité de la non-localité.

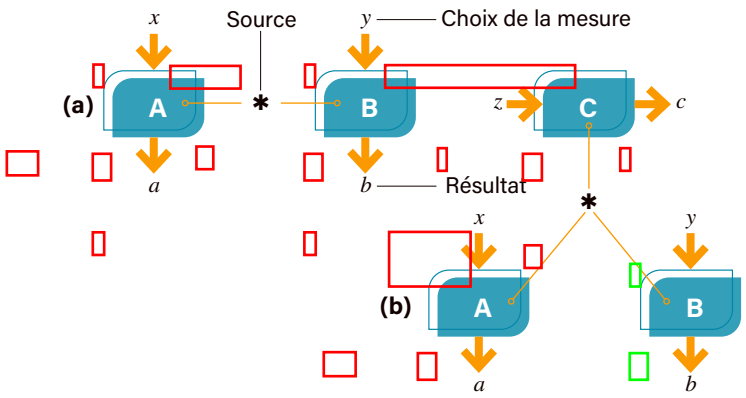
Une autre expérience de Bell, notée GHZ d'après les physiciens qui l'ont conçue (Daniel Greenberger, Michael Horne et Anton Zeilinger), est très intéressante, car le raisonnement associé exhibe clairement la mise en défaut de l'intuition classique. Il est bien entendu nécessaire de maîtriser le formalisme quantique pour calculer les prédictions des résultats dans le cadre de l'expérience GHZ. Cependant, si l'on admet ces prédictions, il est alors assez aisé de voir qu'elles sont incompatibles avec les principes de localité et de choix de mesure indépendant.

DES CHATS QUANTIQUES

Dans ses réalisations concrètes, l'expérience GHZ fait le plus souvent intervenir des photons dont on mesure la polarisation. Cependant, comme nous n'avons pas conscience de croiser des photons au coin de chaque rue et comme nous pouvons *a priori* utiliser tout objet obéissant aux lois quantiques, prenons le parti (arbitraire) d'appeler ces objets «chats» et de remplacer l'état de polarisation par une couleur, tout en gardant les mêmes lois quantiques. Dans cette reformulation imagée de l'expérience, il sera possible de mesurer la couleur du pelage (P) ou des yeux (Y) des chats, pour trouver un résultat vert (v) ou rose (r).

Plus précisément, reformulée en termes de chats et de couleurs, l'expérience fonctionne de la façon suivante. Une source crée trois chats quantiques dans un état physique bien précis. Ceux-ci sont ensuite envoyés vers trois appareils de mesure situés dans trois pièces distinctes et éloignées les unes des autres. Trois scientifiques (appelons-les Aïda, Béatrice et Camélia) contrôlent ces appareils. Elles effectuent simultanément une mesure de la couleur soit du pelage, soit des yeux, sachant que les lois du monde quantique indiquent qu'il est impossible de mesurer ces deux attributs en même temps. Chacune choisit sa mesure de manière indépendante sans en informer ses collègues. Concrètement, chaque expérimentatrice tire à pile ou face pour décider si elle mesure la couleur des yeux ou du pelage (*voir l'encadré page ci-contre*).

Pour cette expérience GHZ, la mécanique quantique prédit les résultats suivants. Lorsque toutes les scientifiques mesurent P, elles trouvent un nombre impair (1 ou 3) de résultats v et donc pair (0 ou 2) de résultats r. Lorsque l'une mesure P et les deux autres Y, elles trouvent un nombre pair (0 ou 2) de résultats v et donc impair (1 ou 3) de résultats r. La mécanique quantique prédit également ce qui se passe lorsque toutes mesurent Y, ou lorsque l'une mesure Y et les deux autres P, mais ces deux situations ne sont pas intéressantes du point de vue de l'étude de la non-localité quantique (dans une expérience GHZ réelle, les propriétés Y et P considérées ne sont pas interchangeables). Lorsque l'expérience GHZ est réalisée un grand nombre de fois, les chercheuses retrouvent exactement les prédictions de la mécanique quantique et vérifient à chaque fois les propriétés énoncées ci-dessus.



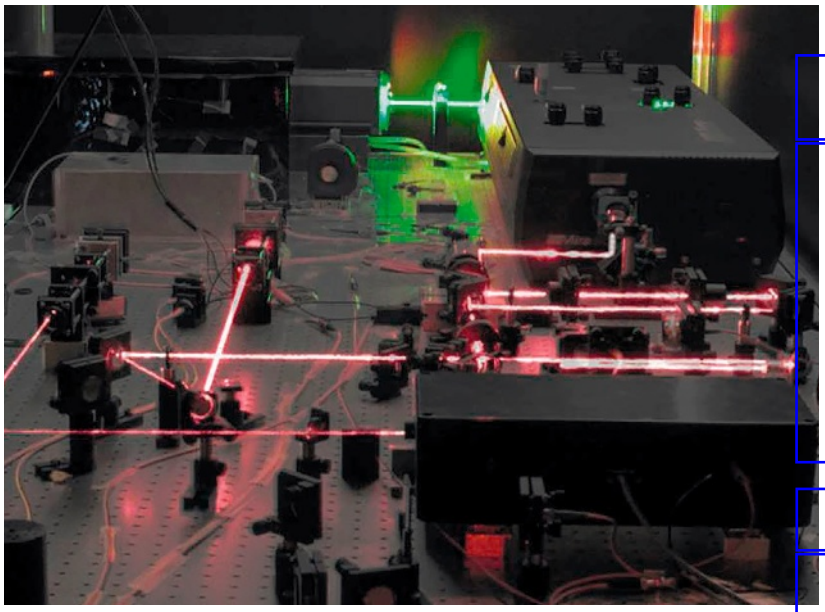
Dans les expériences de Bell, on utilise une source unique de photons intriqués. S'il y a deux observateurs, il s'agit d'une expérience de type CHSH *(a)*, s'il y en a trois, c'est une expérience de type GHZ *(b)*. Ces expériences ont historiquement permis de montrer que la mécanique quantique est non locale en calculant les corrélations entre les résultats des mesures.

Imaginons maintenant qu'un détective assiste à l'expérience. Conformément à ses capacités de déduction issues de son expérience du monde macroscopique, il cherche une «explication classique» aux résultats en se fondant notamment sur les principes de localité et de l'indépendance du choix de la mesure (concrètement, il peut partir du principe que les tirages à pile ou face ne sont soumis à aucune influence, *voir l'encadré page 31*).

Le détective ne sait en rien comment l'expérience fonctionne. Il n'a accès qu'aux tirages successifs des scientifiques et aux résultats de leurs mesures: cela lui permet de constater que les deux cas de figure prévus par la théorie et énoncés plus haut sont vérifiés. Il peut donc remarquer que les résultats des trois scientifiques sont corrélés.

Or il n'existe que deux façons d'expliquer des événements corrélés: soit les résultats produits par les appareils sont reliés par une même cause, soit un ou plusieurs appareils de mesure communiquent vers un ou plusieurs autres dispositifs distants (par exemple, l'appareil d'Aïda envoie à l'expérience de Béatrice l'information du choix d'Aïda). Cependant, les mesures étant réalisées de façon parfaitement simultanée, à des endroits différents, la seconde explication est incompatible avec le

© Pour la Science



Les expériences de Bell sont réalisées avec des lasers et différents systèmes optiques. Pour s'assurer que l'expérience ne présente pas de faille de communication et prouver que la physique quantique est non locale, les détecteurs sont parfois installés dans des bâtiments éloignés et reliés par des fibres optiques.

principe de localité : l'information n'a pas le temps d'être échangée entre les appareils de mesure. Les résultats doivent donc avoir une cause commune.

Ainsi, le détective peut faire une première déduction. Sans le supposer *a priori*, il déduit qu'il existe une source unique émettant des objets vers les trois appareils de mesure. Le détective n'a aucune idée de la nature de ces objets, mais il sait que ces objets transportent avec eux certaines propriétés (*P* et *Y*, chacune de valeur *v* ou *r*), puisque celles-ci sont mesurées par les trois chercheuses. Et il peut nommer de façon arbitraire ces objets « chats », les propriétés « pelage » et « yeux » avec des valeurs « vert » et « rose ».

Dans sa tentative d'explication classique, le détective liste toutes les configurations possibles de trois chats, sachant qu'il existe quatre types de félins (vert aux yeux verts, vert aux yeux roses, rose aux yeux verts et rose aux yeux roses). Il comptabilise $4^3 = 64$ configurations en tout. En prenant chaque cas, et en considérant les tirages possibles, le détective met en évidence que, quelle que soit la configuration des chats mesurés par les chercheuses, il existe toujours une configuration de mesure qui est en contradiction avec les observations, c'est-à-dire en contradiction avec les propriétés de parité indiquées plus haut. Par exemple, si l'on suppose qu'Aïda reçoit un chat rose aux yeux verts, et que Béatrice et Camélia reçoivent des chats verts aux yeux roses, et si les résultats des tirages à pile ou face indiquent à toutes de mesurer le pelage, elles obtiendraient deux résultats *v*, en contradiction avec les observations (le nombre de résultats *v* est 1 ou 3).

De façon générale, quelle que soit la couleur des chats mesurés par les trois chercheuses, une contradiction de ce type est toujours présente (*voir l'encadré page 32*). Ainsi, la tentative d'explication du détective ne tient pas et l'oblige à remettre en question la possibilité de l'indépendance du choix de la mesure ou la localité. Et la négation de l'un ou l'autre de ces principes remet en cause profondément les intuitions classiques du détective.

UN TRIO DE CHATS MAXIMALEMENT INTRIQUÉ

Rien n'indique, *a priori*, lequel de ces principes est à écarter. L'interprétation historique de la mécanique quantique, dite « de Copenhague », rejette le principe de localité. Et ce choix est partagé par la grande majorité des spécialistes. Il remet en cause notre vision initiale de trois chats empruntant chacun leur tunnel, pour ne les voir plus que comme une seule entité indissociable et non locale. En termes techniques, l'état du trio de chats est un état intriqué, et plus précisément un « état maximalement intriqué à trois qubits » (un qubit, ou bit quantique, étant l'unité d'information quantique).

Dans les années 1960, cette expérience GHZ à trois chats (ou trois photons) était techniquement hors d'atteinte. Et elle reste toujours difficile à réaliser. En effet, pour produire des photons intriqués, les chercheurs font appel à des cristaux excités par des lasers. Il y a alors une certaine probabilité d'émettre une paire de photons intriqués. Mais il n'existe pas de source à trois photons intriqués bien maîtrisée techniquement. C'est pourquoi les physiciens expérimentateurs lui préfèrent l'expérience CHSH, qui permet d'arriver aux mêmes conclusions, mais cette fois-ci avec seulement deux scientifiques, Aïda et Béatrice, partageant deux « chats quantiques ».

L'expérience CHSH a été réalisée à plusieurs reprises depuis la proposition de Bell en 1964, avec la première expérience de Stuart Freedman et John Clauser (en 1972), puis celle de l'équipe d'Alain Aspect (en 1981), celle de Genève (en 1998, menée par l'un de nous, Nicolas Gisin)… Ces premières expériences présentaient des limitations techniques qui ne permettaient pas d'exclure la présence de failles : les dispositifs de mesure, trop proches, pouvaient échanger de l'information, la perte de photons trop importante dans le circuit pouvait créer un biais dans l'échantillon mesuré, etc. Les conclusions sur la non-localité étaient établies avec la réserve des failles potentielles.

© Université de Genève

Enfin, après 2015, toute une série d'expériences ont emporté l'assentiment de la communauté scientifique. Des techniques plus performantes ont apporté des solutions à toutes ces failles et la probabilité que les résultats observés soient compatibles avec les deux principes classiques est extrêmement faible. Elle a été estimée à moins de 1 sur 10^{28} pour l'une des expériences ! L'impossibilité de concilier la mécanique quantique avec le principe de localité (ou avec l'indépendance du choix de la mesure) ne fait aujourd'hui plus aucun doute.

DES APPLICATIONS QUANTIQUES

Les physiciens n'ont pas attendu ces dernières réalisations expérimentales pour explorer les possibilités offertes par la non-localité quantique. Loin de se limiter à la seule compréhension théorique du phénomène, ils ont mis à profit celui-ci dans diverses applications.

Il est par exemple possible d'utiliser la non-localité quantique pour obtenir des générateurs de nombres fondamentalement aléatoires. Avec des systèmes classiques, on ne peut que simuler un comportement aléatoire, et les nombres produits ne sont que « pseudoaléatoires ». Or un générateur de nombres aléatoires est une ressource cruciale en informatique, pour les algorithmes d'optimisation, pour la sécurité informatique ainsi que pour les jeux de hasard. En matière de sécurité, il est aussi possible d'utiliser la non-localité quantique pour certifier le bon fonctionnement de dispositifs quantiques, c'est-à-dire pour garantir l'absence d'une faille exploitable par un attaquant. Et cette certification peut être réalisée même dans le cas où les dispositifs ont été fabriqués ou manipulés par une personne à qui l'on ne peut accorder une totale confiance.

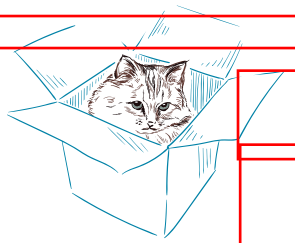
La non-localité quantique est aussi à l'origine de protocoles cryptographiques dans lesquels un message échangé est sécurisé contre « toute attaque » (chose impossible dans le monde classique). Cette volonté de sécuriser les communications prend la forme d'un internet quantique où le réseau serait fondé sur l'échange de photons intriqués. Par rapport aux expériences de Bell qui utilisent une unique source de photons, comme dans GHZ, un tel réseau est un immense défi technique. Il n'est pas possible de concevoir une source émettant des photons intriqués pour un grand nombre d'utilisateurs. En outre, par essence, internet est un réseau décentralisé. L'idée est donc d'utiliser plusieurs sources indépendantes de photons intriqués, chacune reliant deux nœuds du réseau.

D'un point de vue de l'analyse théorique, ces systèmes quantiques à plusieurs sources indépendantes sont radicalement différents de GHZ ou CHSH. La question qui se pose est alors de savoir ce que devient la non-localité dans cette situation. Pour l'étudier, les chercheurs ont commencé par examiner les réseaux les plus simples possible.

Intéressons-nous d'abord au cas du réseau « simple » en triangle. Dans l'expérience quantique concrète, on a toujours trois chercheuses, mais la source est remplacée par trois sources indépendantes placées sur chaque côté du triangle (*voir la figure page 36*). Chaque physicienne mesure cette fois ce qui lui est envoyé par deux sources distinctes afin d'obtenir son résultat. Ainsi, Aïda reçoit deux chats quantiques, et procède à une certaine mesure faisant intervenir les deux félins (par exemple, elle peut examiner la parité des mesures de couleurs, c'est-à-dire le fait d'avoir deux couleurs identiques ou deux différentes) pour obtenir son résultat. Béatrice et Camélia font de même.

Imaginons de nouveau que le détective soit face à une telle expérience et qu'il tente de l'expliquer au moyen de son intuition classique. Le détective voit toujours des corrélations et ne connaît pas le fonctionnement interne de l'expérience. Comme pour l'expérience GHZ, il fait une première déduction

LE CHAT DE SCHRÖDINGER, LA BARRIÈRE DES MOTS



Une difficulté en physique quantique est de traduire des phénomènes observés avec des mots. Le chat de Schrödinger et ceux de l'expérience GHZ en sont un bon exemple. Lorsqu'un individu (un détective) essaye d'interpréter cette dernière expérience selon sa vision classique, il va y plaquer son intuition macroscopique et son vocabulaire. Ainsi, dans son raisonnement, quand un chat emprunte un des tunnels de l'expérience, le pelage, à ce moment, est vert *ou* rose (il s'agit ici d'un « ou » exclusif). On parle de principe de réalisme : la couleur du pelage étant une propriété mesurable, valant soit vert soit rose, tout pelage a, à tout moment, une couleur bien définie, verte *ou* rose.

En physique quantique, ce type de raisonnement n'est plus valide. La couleur du pelage d'un chat quantique est mesurable, mais se demander quelle est cette couleur lorsque celui-ci passe dans le tunnel n'a pas de sens : la couleur n'a pas de réalité tant qu'elle n'est pas mesurée. Concrètement, il n'est plus possible de raisonner comme le fait le détective, en considérant successivement toutes les couleurs possibles. Il faut donc inventer un nouveau mot pour caractériser la propriété « couleur du pelage » avant qu'elle ne soit mesurée. Le mot « *ou* » étant déjà utilisé, les physiciens emploient le mot « *et* ». Celui-ci a l'avantage de n'avoir encore aucun sens dans ce contexte. On écrit donc que le pelage du chat empruntant le tunnel est vert *et* rose. C'est le même mot « *et* » que l'on retrouve dans le célèbre exemple du chat de Schrödinger dans sa boîte : ce chat est « mort *et* vivant », car il peut être retrouvé mort ou vivant en ouvrant la boîte, mais il n'est pas, avant l'ouverture, mort avec une certaine probabilité *ou* vivant avec la probabilité complémentaire. Ainsi, ce mot *et* n'a de sens que parce qu'il s'oppose au mot *ou*. On utilise aussi les termes d'« intrication » et de « superposition », en écrivant que la couleur est intriquée dans une superposition des états rose et vert.

Le chat de Schrödinger, mort *et* vivant dans sa boîte, est une image de ce qui peut être lu dans le formalisme de la physique quantique (lequel donne une caractérisation plus précise et quantitative de ce que signifie le « *et* »). L'expérience de Bell va plus loin. Elle montre qu'un raisonnement classique à partir du seul mot « *ou* » est incohérent avec les observations. Elle prouve que le mot « *et* » est obligatoire pour expliquer l'expérience.

© Shutterstock.com/Natata

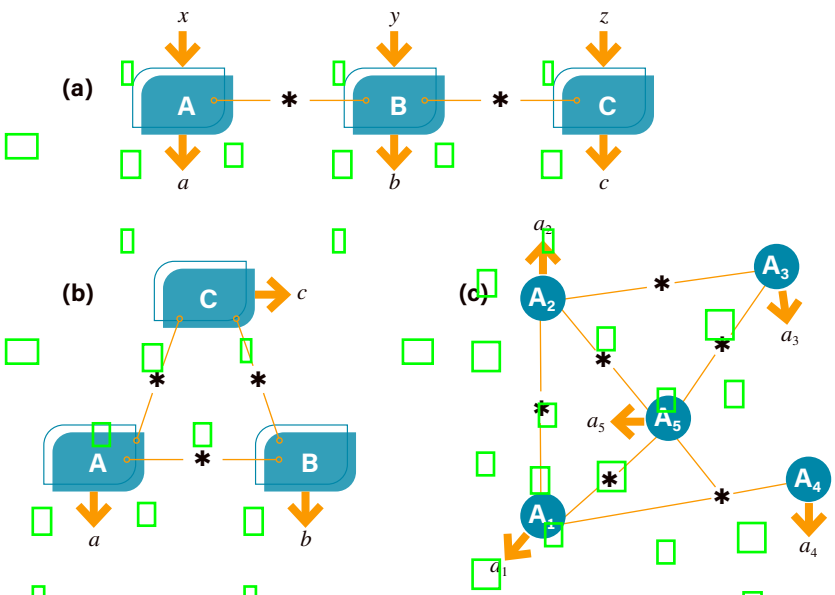
identique: les corrélations doivent s'expliquer par une cause – ou une source – unique. Notons que le détective n'a aucune raison de limiter le nombre de chats émis par cette source: ici, pour coller aux observations, il imaginera une source unique qui émet une «paire de chats» vers chacune des scientifiques. Ainsi, la topologie de l'expérience imaginée par le détective devient différente de la topologie réelle de l'expérience.

Pour éviter cette différence, nous choisissons en quelque sorte d'aider le détective en lui indiquant la topologie de l'expérience et le fait que les corrélations proviennent d'un réseau constitué de trois sources indépendantes disposées en triangle. Il doit alors chercher un raisonnement compatible avec la localité, l'indépendance du choix de la mesure et la topologie expérimentale pour expliquer les résultats des chercheuses. Cette topologie du réseau triangulaire impose de nouvelles contraintes qui réduisent drastiquement le nombre d'explications possibles pour le détective. Ainsi, connaissant la topologie en triangle, il y a davantage de raisons d'arriver à une contradiction.

LE DÉFI DES RÉSEAUX

Pour le détective, le problème devient pourtant beaucoup plus difficile à analyser. La raison est mathématique: avec une source unique, les trois scientifiques peuvent se coordonner. Par exemple, imaginons qu'elles ont à leur disposition une première expérience fondée sur une première source de chats, mesurés d'une certaine façon, et une seconde expérience utilisant une seconde source de chiens, mesurés d'une autre manière. Il leur est possible de créer une troisième expérience à partir de ces deux premières, où une nouvelle source construite à partir des deux précédentes envoie tantôt les chats de la première source, tantôt les chiens de la seconde et un signal indiquant aux scientifiques s'il faut cette fois-ci mesurer des chats ou des chiens. Cette possibilité de coordination implique que la structure de l'espace des explications possibles est «convexe». Cette propriété permet une exploration assez simple de toutes les stratégies possibles, et ainsi de démontrer que l'expérience observée par le détective est nécessairement non locale.

Dans le cas de trois sources indépendantes, ce type de coordination est totalement impossible: dans un réseau en triangle, à partir d'une première expérience avec des chats, et d'une seconde avec des chiens, il est impossible d'en créer une nouvelle où les chats et les chiens alternent (il arrivera toujours un moment où une source enverra des chats, et une autre des chiens, simultanément). Ainsi, le problème n'est plus convexe: malgré un plus faible nombre de stratégies possible, les explorer toutes devient très difficile. C'est toute la difficulté pour les spécialistes de la non-localité en réseau: pour une topologie donnée, quelle expérience (ou stratégie) est non locale, et comment le démontrer?



La topologie des systèmes en réseau comportant plusieurs sources de photons indépendantes devient très riche. Dans l'expérience de bilocalité *(a)*, on utilise deux sources de photons entre trois observateurs. L'observateur B réalise une mesure simultanée sur les deux photons qu'il reçoit. Dans le réseau en triangle avec trois sources *(b)*, chacun des trois observateurs reçoit deux photons. Ces réseaux sont déjà complexes à étudier, mais l'internet quantique contiendra bien plus de sources indépendantes (*c*, un réseau avec seulement six sources)!

Depuis une dizaine d'années, les physiciens imaginent des exemples concrets d'expériences afin de mieux comprendre cette nouvelle forme de non-localité en réseau. En 2010, Cyril Branciard, maintenant à l'institut Néel, à Grenoble, et ses collègues (dont l'un de nous, Nicolas Gisin) ont envisagé un nouveau type d'expériences quantiques, dites de «bilocalité», qui utilisent deux sources indépendantes (*voir la figure ci-dessus*). L'équipe a imaginé une expérience en partant de cette topologie et a montré que les résultats attendus des mesures étaient inexplicables pour le détective. Cette expérience est un premier pas vers un réseau à plusieurs sources. Cependant, on constate que les corrélations restent ici analogues à celles des expériences de type Bell. Autre limite: dans un réseau purement quantique, on voudrait que les mesures soient intriquées. Il s'agit d'une sorte de parallèle avec le chat dans un état «mort et vivant» (*voir l'encadré page 38*), mais appliqué aux appareils de mesure, où l'on pourra dire qu'un photon est «mesuré venant de la gauche et de la droite».

La recherche d'autres exemples a mené les physiciens à se tourner vers le réseau en triangle. En 2012, Tobias Fritz, alors à l'institut des sciences photoniques de Barcelone, a fait une première découverte importante. En s'inspirant de l'expérience de Bell standard CHSH, qui fait intervenir deux scientifiques uniquement, il est parvenu à construire un premier exemple de non-localité quantique dans le réseau en triangle. En pratique, dans l'expérience CHSH, Aïda et Béatrice sont équipées de générateurs de nombres aléatoires (remplaçant les pièces pour tirer à pile ou face). L'idée

© Pour la Science

est tout simplement d'envoyer les données de ces générateurs à une nouvelle scientifique, Camélia : les trois chercheuses sont connectées par trois sources (la source « CHSH » entre Aïda et Béatrice, et les deux générateurs de nombres aléatoires) dans un réseau en triangle. On demande à chacune des scientifiques d'annoncer les nombres aléatoires qu'elles reçoivent (en plus du résultat de l'expérience CHSH pour Aïda et Béatrice). En utilisant les caractéristiques spécifiques de ce type d'expérience, Tobias Fritz a montré qu'un détective qui connaît la topologie expérimentale pourra relier ce qu'il observe à une expérience CHSH standard, contrôlée par les inégalités de Bell, et ne trouvera donc aucune explication aux résultats satisfaisant au principe de localité. De façon inattendue, cet exemple de non-localité dans un réseau triangle ne fait pas appel à l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure, ce qui montre que cette hypothèse n'est plus nécessaire pour la non-localité en réseau. Elle est remplacée par l'hypothèse d'indépendance des sources.

Avec plusieurs collègues (Elisa Bäumer, Sadra Boreiri et Salman Beigi), nous avons étudié le réseau en triangle en simplifiant au maximum le problème. Nous avons considéré trois sources émettant des états intriqués identiques vers trois observateurs réalisant le même type de mesure. Comme nous l'avons mentionné, le choix de l'expérience et de la stratégie des mesures est crucial : dans tous les cas connus jusqu'alors (à l'exception de l'exemple précédent), soit les corrélations que l'on obtient étaient locales, soit la non-localité n'avait pas pu être démontrée. Avec un choix judicieux de mesures, nous avons proposé le premier exemple d'une expérience quantique non locale dans le réseau en triangle, pour lequel notre preuve de non-localité repose sur un argument indépendant des expériences de Bell standard (avec une unique source).

Notre exemple d'expérience est intéressant, car il fait intervenir tous les éléments attendus pour un réseau quantique : états intriqués et mesures intriquées (*voir l'encadré page 38*). Ces caractéristiques, ainsi que notre preuve, indiquent que notre expérience pourrait bien être fondamentalement différente de toutes les expériences de Bell standard, comme l'expérience CHSH ou GHZ. Cette affirmation est confortée par de nombreux arguments, mais il reste à le démontrer formellement.



ÉTAT INTRIQUÉ ET MESURES INTRIQUÉES

De même qu'il existe en physique quantique des « états intriqués » qui ne correspondent à rien de connu autour de nous (un chat « mort *et* vivant »), il existe aussi des façons de mesurer des objets, dites « mesures intriquées », qui ne correspondent, elles non plus, à aucune mesure envisageable dans notre monde classique.

L'image du chat de Schrödinger, « mort *et* vivant », illustre le fait que toute propriété quantique mesurable peut être intriquée en deux états (ou plus). Ainsi, comme un chat classique pouvant être retrouvé dans l'état mort ou dans l'état vivant, un chat quantique pourra se trouver (avant qu'on l'observe !) dans l'état mort *et* vivant. Cette logique est reproductible : le pelage du chat peut être rose *et* vert, le chat peut arriver de la gauche *et* arriver de la droite. En réalité, le formalisme de la physique quantique donne une caractérisation quantitative de cette « intrication » : pour être totalement précis sur l'état du chat de Schrödinger, il faudrait par exemple dire qu'il est « maximalement intriqué de façon positive entre les états mort *et* vivant ». Il pourrait tout aussi bien être « maximalement intriqué de façon négative entre les états mort *et* vivant ». La différence entre ces deux états, l'un « positif » et l'autre « négatif », indique ce qui se passe quand les chats, ou les photons, interfèrent entre eux. Elle est purement quantique et donc difficile à saisir : ces états sont aussi différents l'un de l'autre que le sont les états « mort » et « vivant », et sont aisément distinguables à l'aide de mesures.

Imaginons maintenant qu'une physicienne, nommée Aïda, reçoit un unique chat, qui peut emprunter deux chemins pour arriver jusqu'à elle : le chemin gauche ou le chemin droit. Aïda reçoit le chat et se demande d'où celui-ci arrive. Dans notre monde classique, Aïda ne peut guère faire plus que de déterminer le chemin emprunté par le chat : elle mesurera si le chat vient de la gauche ou s'il vient de la droite. Mais en physique quantique, Aïda peut réaliser un nouveau type de mesure, qui n'a pas d'équivalent classique : par exemple, elle peut mesurer si le chat vient d'une façon « maximalement intriquée de façon positive entre le chemin gauche *et* le chemin droit », ou s'il vient d'une façon « maximalement intriquée de façon négative entre le chemin gauche *et* le chemin droit ».

À la suite d'une telle mesure, Aïda ne sait pas si le chat a emprunté le chemin gauche ou le chemin droit. Cependant, elle acquiert la même quantité d'information sur le « trajet » effectué par le chat pour arriver jusqu'à elle : cette information réside dans le mot « positif » ou « négatif ». Il nous faut inventer un mot pour parler de ce type nouveau de mesure.
Le phénomène étant lié à l'intrication, nous disons que le chat (unique) « vient de la gauche *et* vient de la droite » (de façon positive ou négative, suivant le résultat de la mesure). Ce nouveau type de mesure, propre à la physique quantique, est nommé « mesure intriquée ».

Avec un réseau en triangle, nous sommes encore bien loin d'un réseau internet, mais cet exemple a déjà de nombreux attraits. Il concerne un réseau bouclant sur lui-même, une configuration très difficile à traiter mathématiquement. Et tout comme l'expérience de Tobias Fritz, il s'affranchit de l'hypothèse de l'indépendance du choix de la mesure, ce qui permet en principe d'envisager ce système comme un générateur de nombres aléatoires sans choix de mesure initial. Cette caractéristique, qui reste à démontrer, se ferait au prix d'une hypothèse forte, celle de l'indépendance des trois sources disposées en triangle. Enfin, de la même façon que la non-localité de Bell a permis le développement d'applications diverses, il semble raisonnable de penser que la non-localité en réseau, que celui-ci soit triangulaire ou plus complexe, conduira à des utilisations spécifiques.

Depuis les premiers développements de la mécanique quantique, cette théorie n'a pas fini de nous surprendre. Les travaux et les réflexions autour de la non-localité et de la nouvelle non-localité en réseau illustrent son caractère contre-intuitif. Mais ils ne sont pas les seuls et il existe d'autres principes « évidents » qui semblent incompatibles avec cette théorie. Par exemple, en 2018, Daniela Frauchiger et Renato Renner, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, ont montré qu'en mécanique quantique, des raisonnements très simples du type : « Je sais que A implique B » et « je sais que mon ami a démontré A », donc « je sais que B est vraie », ne sont plus du tout valides de façon évidente.

Ces résultats si perturbants semblent être de nature à rendre fou tout détective. Est-ce vraiment raisonnable, ou même possible, de mener une enquête au sein du monde quantique, où les intuitions sont bouleversées ? Et serons-nous toujours dans l'incapacité de nous forger une intuition quantique ? Un début de réponse se cache peut-être dans l'image du détective et de ses enfants amateurs de jeux vidéo. Reprenons notre même détective, fatigué des affaires du monde quantique, chargé cette fois-ci d'une enquête dans le jeu vidéo Mario. De nouveau, dans ce monde, un meurtre peut lui sembler inexplicable, proche de l'absurde. Les règles régissant les meurtres (un saut sur l'adversaire) y sont totalement différentes des siennes. Pourtant, elles sont familières à ses enfants ! Notre vocabulaire et l'intuition de ce qui est possible ou impossible, logique ou absurde nous viennent de ce que nous vivons et voyons. C'est en vivant sur Terre que le détective se forge son intuition. C'est en jouant à Mario que ses enfants maîtrisent les règles de ce jeu. De même, c'est par les expériences de pensée et les expériences réelles que les scientifiques se construisent une intuition du monde de la physique quantique et inventent leurs propres mots pour décrire ce nouveau « monde réel », qui donnera peut-être naissance un jour à l'internet quantique. ■

BIBLIOGRAPHIE

M.-O. Renou *et al.*, **Genuine quantum nonlocality in the triangle network**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, article 140401, 2019.

R. Hanson et K. Shalm, **Des tests sans faille de l'intrication quantique**, *Pour la Science*, n° 504, pp. 52-61, octobre 2019.

T. Fritz, **Beyond Bell's theorem II : Scenarios with arbitrary causal structure**, *Comm. Math. Phys.*, vol. 341, pp. 391-434, 2016.

C. Branciard *et al.*, **Characterizing the nonlocal correlations created via entanglement swapping**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, article 170401, 2010.

PAS DE BAIGNOIRE EN OR MASSIF MAIS JE FAIS PARTIE DU 1%

ELISABETH LAVILLE
est fondatrice d'Utopies,
membre du collectif
1% for the Planet.
Chaque année,
Utopies reverse
1% de son chiffre d'affaires
lié à ses offres
climat/biodiversité
à la protection de
l'environnement.



Rejoignez le mouvement sur onepercentfortheplanet.fr

1% FOR THE PLANET®

CONCEPTION / PRODUCTION : .yz

Comment les parasites sculptent les paysages végétaux

Marc-André Selosse

Pourquoi les forêts tropicales sont-elles généralement bien plus riches en espèces d'arbres que les forêts tempérées ? La réponse est liée aux microorganismes du sol et à l'« effet Janzen-Connell » proposé il y a cinquante ans par deux écologues américains.





Les forêts tropicales *(ici dans la région de Puntarenas, au Costa Rica)* présentent généralement une grande diversité d'arbres : jusqu'à plusieurs centaines d'espèces par hectare. Une diversité qui peut s'expliquer par l'effet Janzen-Connell.

L'ESSENTIEL

> Les microorganismes du sol qui parasitent des plantes favorisent les forêts très diverses, comme les forêts tropicales, en y empêchant chaque espèce de proliférer.

> Des champignons mycorhiziens favorisent au contraire les forêts peu diverses, telles que les forêts tempérées, en aidant certaines espèces végétales à s'imposer.

> L'action des microorganismes du sol explique aussi les successions végétales, ces étapes successives de colonisation d'un sol nu qui aboutissent à une forêt.

L'AUTEUR



MARC-ANDRÉ SELOSSE
professeur au Muséum national d'histoire naturelle (Paris), ainsi qu'aux universités de Gdansk, en Pologne, et de Kunming, en Chine

Dans les régions tempérées, les forêts sont pauvres en espèces d'arbres. Même dans les réserves où le forestier n'intervient pas, telles que la Réserve intégrale de la forêt de Fontainebleau ou celle de Białowieża, entre Pologne et Biélorussie, quelques espèces seulement dominent. Rien à voir avec l'hyperdiversité des forêts tropicales où aucune espèce n'a le dessus: il y en a plusieurs centaines par hectare (*voir la photo pages 40-41*), jusqu'à 650 à Bornéo par exemple. En comparaison, tout le territoire européen, lui, abrite moins de 500 espèces d'arbres, en incluant les espèces introduites!

Cette différence a longtemps interrogé les écologues: il semble aujourd'hui que ces contrastes ne soient pas dus aux différences climatiques, mais orchestrés par les microorganismes du sol, qui jouent une partition différente dans chaque cas. Ce mécanisme, longtemps sous-estimé, explique aussi d'autres aspects de la végétation qui nous entoure.

A priori, un écologue s'attend à ce que sur un même hectare de forêt, la compétition ne laisse prospérer que quelques espèces: la situation des forêts tempérées semble donc plutôt intuitive. En effet, chaque espèce possède sa propre niche écologique, c'est-à-dire la gamme de conditions (éclairement, fertilité, acidité du sol, etc.) où elle se développe. Quand deux espèces ont des niches qui se recouvrent en partie, l'une ou l'autre prend le dessus là où les deux peuvent vivre. Quand deux espèces ont exactement la même niche, l'une ou l'autre est exclue par compétition. C'est le principe de «l'exclusion de niche»: il y a toujours un meilleur compétiteur et la seule façon d'échapper à cette fatalité est d'avoir une niche au moins en partie différente des autres espèces. Un hectare de forêt ne comprend que quelques niches écologiques, par exemple à cause de variations locales de la composition du sol. La compétition laisse donc de la place à un petit nombre d'espèces, comme c'est le cas en forêt tempérée.

Mais alors, peut-on vraiment croire qu'un hectare de forêt tropicale contienne des centaines de niches écologiques différentes? La situation régnant sous les tropiques interroge. En 1970 et 1971, deux écologues américains, Daniel Janzen et Joseph Connell, proposèrent indépendamment l'un de l'autre une réponse à cette interrogation. Ils partaient tous deux d'un même paradoxe. D'un côté, la quantité de graines déposées autour d'une plante mère tropicale décroît avec la distance. D'un autre côté, bizarrement, la quantité de jeunes plantes de même espèce augmente avec cette distance. La survie de celles-ci est donc d'autant meilleure qu'on s'éloigne de la plante mère (*voir l'encadré page 43*).

PARASITES ET COMPÉTITION

Ces deux chercheurs se sont rendu compte que la plante adulte attire autour d'elle des pathogènes du sol, à savoir des bactéries, des champignons ou des insectes. Bien installée, elle survit à leur accumulation tandis que, plus fragiles, les jeunes plantules succombent, d'autant plus qu'elles sont proches de la plante mère et de son cortège de pathogènes.

Cela a une conséquence majeure pour les espèces partageant la même niche écologique. À cause des pathogènes, l'installation d'une espèce bride sa propre prolifération. Une autre espèce vivant dans la même niche, mais avec des pathogènes différents, peut donc s'y installer pourvu que les ressources restent suffisantes. La compétition exige en effet une densité suffisante d'individus pour qu'il y ait concurrence; tant que les ressources restent suffisantes, plusieurs espèces ayant une niche écologique similaire peuvent donc coexister. C'est pourquoi, en forêt tropicale, il y a plus d'espèces que de niches.

Ainsi, l'effet Janzen-Connell, comme on l'appelle, découle de deux faits. D'une part, la compétition n'agit qu'au-delà d'une certaine densité; d'autre part, chaque espèce a ses parasites spécifiques.

Daniel Janzen et Joseph Connell étaient cependant des écologues de terrain, et non des modélisateurs ou des théoriciens. C'est sans doute pourquoi leurs idées ont tardé à percer. Elles n'ont commencé à s'imposer dans les théories écologiques que dans les années 1990 à 2000.

Page protégée © Edda Dupree / EyeEm/GettyImages.com

Nombre d'écologues se sont mis à étudier l'effet Janzen-Connell, d'abord en se concentrant sur une seule espèce pour simplifier.

Ainsi, en 2000, Alissa Packer et Keith Clay, de l'université de l'Indiana, ont démontré rigoureusement cet effet sur le cerisier noir, *Prunus serotina*. La survie des plantules de ce cerisier américain à 16 mois est de 20% à moins de 5 mètres d'un adulte, mais de 90% à 30 mètres. Résultat: la distance moyenne entre deux cerisiers noirs adultes est de 30 à 50 mètres.

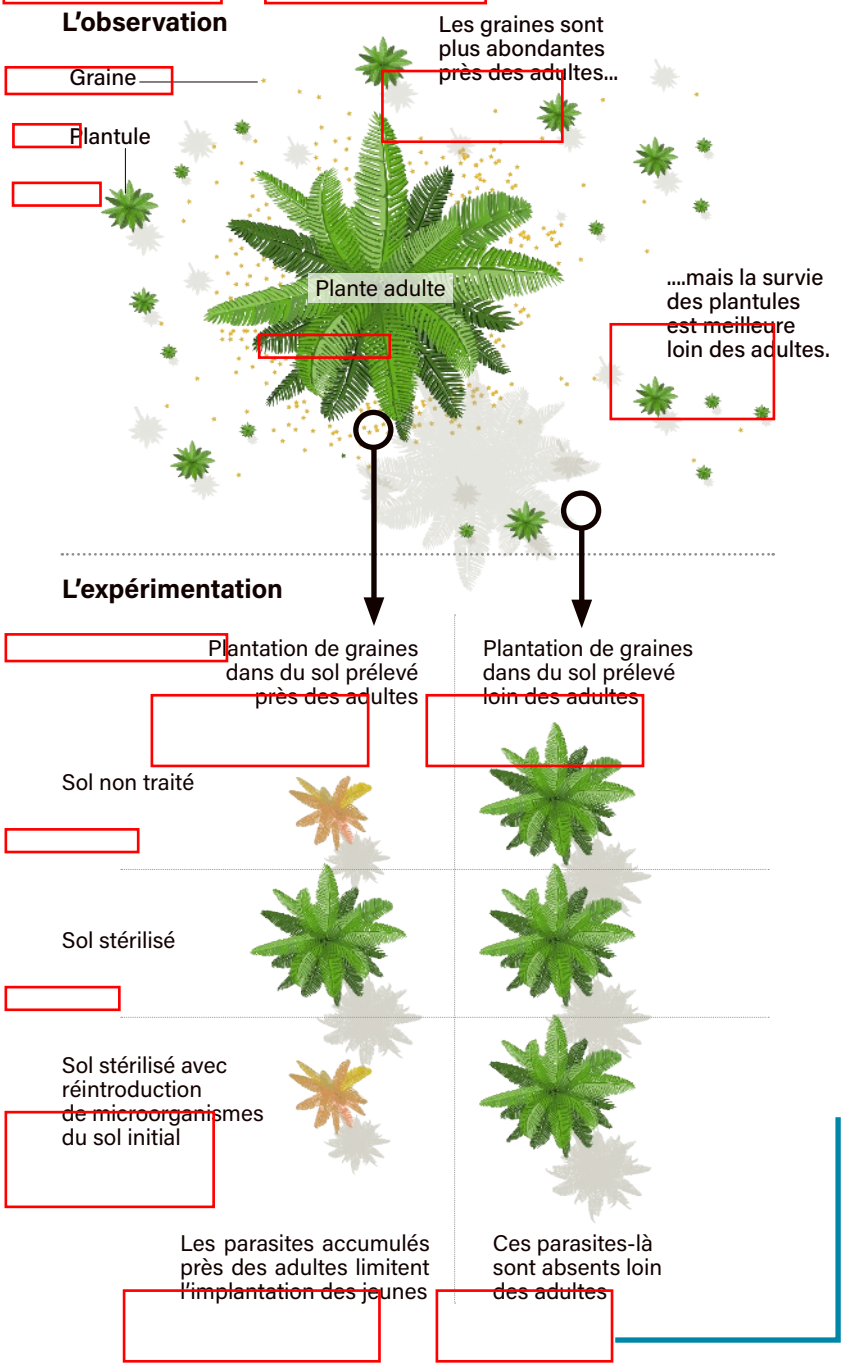
Les chercheurs ont évalué le rôle des parasites en faisant germer des plantules en pot, dans des sols prélevés sous les adultes ou à distance de ceux-ci. Ils ont alors constaté que les plantules survivaient mieux dans le sol prélevé à distance. Toutefois, s'ils stérilisaient le sol local et le sol distant, la survie était aussi bonne dans les deux cas: débarrassés de vie microbienne, les deux sols avaient une fertilité identique. Enfin, s'ils réintroduisaient dans les sols stérilisés des parasites prélevés sous les *Prunus* adultes, en particulier des champignons oomycètes du genre *Pythium*, la survie chutait alors de 65%.

D'autres chercheurs ont ensuite élargi l'étude de l'effet Janzen-Connell à la densité de plantules. En 2010, des équipes des universités d'Oxford et de Sheffield ont analysé l'influence de cette densité sur un arbre d'Amérique tropicale de la famille de l'hévéa, *Pleradenophora longicuspis*. En pépinière comme sur le terrain, au Belize, le nombre de plantules survivantes au bout de cinq semaines augmentait avec la densité de graines, jusqu'à 1000 graines par mètre carré (c'est élevé, mais rappelons-nous qu'il s'agit de très jeunes plantules) puis décroissait au-delà. Était-ce l'effet de la compétition, ou d'une meilleure transmission des pathogènes? En appliquant des fongicides, les chercheurs ont observé une plus grande survie quelle que soit la densité de graines; de plus, le nombre de plantules augmentait avec la densité de graines jusqu'à... 3000 graines par mètre carré. C'est à cette densité que démarre donc la compétition entre plantules, alors que l'influence des champignons pathogènes s'exerce dès 1500 graines par mètre carré environ, bien en deçà du seuil requis pour la compétition (*voir la figure page 45*). Deux phénomènes se combinent ainsi autour des adultes: le recrutement de pathogènes par ces derniers, et la densité des plantules qui améliore la transmission des pathogènes. Tous deux inhibent le développement de l'espèce dans son voisinage et l'empêchent d'y entrer en compétition avec une autre.

Cela a-t-il bien un effet au niveau des communautés, où plusieurs espèces sont présentes simultanément? En 2010, deux équipes américaines ont étudié cet aspect de la question. Scott Magnan, de l'université du Wisconsin, et ses collaborateurs se sont intéressés aux arbres de deux forêts tropicales du Panama. Ils ont d'abord évalué l'intensité de l'inhibition par les sols

L'EFFET JANZEN-CONNELL

L'effet Janzen-Connell est dû aux bactéries, champignons, nématodes et autres microorganismes du sol qui parasitent les végétaux. Ces derniers finissent par proliférer dans l'environnement d'un arbre (plus généralement d'une plante) et par attaquer les jeunes plants de la même espèce. Moins aptes à se défendre que les adultes, ces plantules se développent moins bien ou meurent. Elles parviennent toutefois à s'installer à distance des adultes, où les parasites – peu mobiles – sont absents ou plus rares. Si l'on stérilise le sol, cet effet de la distance disparaît. Les parasites contenus dans le sol étant souvent propres à une espèce végétale, leur effet est de libérer de l'espace aux espèces végétales concurrentes, qui peuvent s'installer.



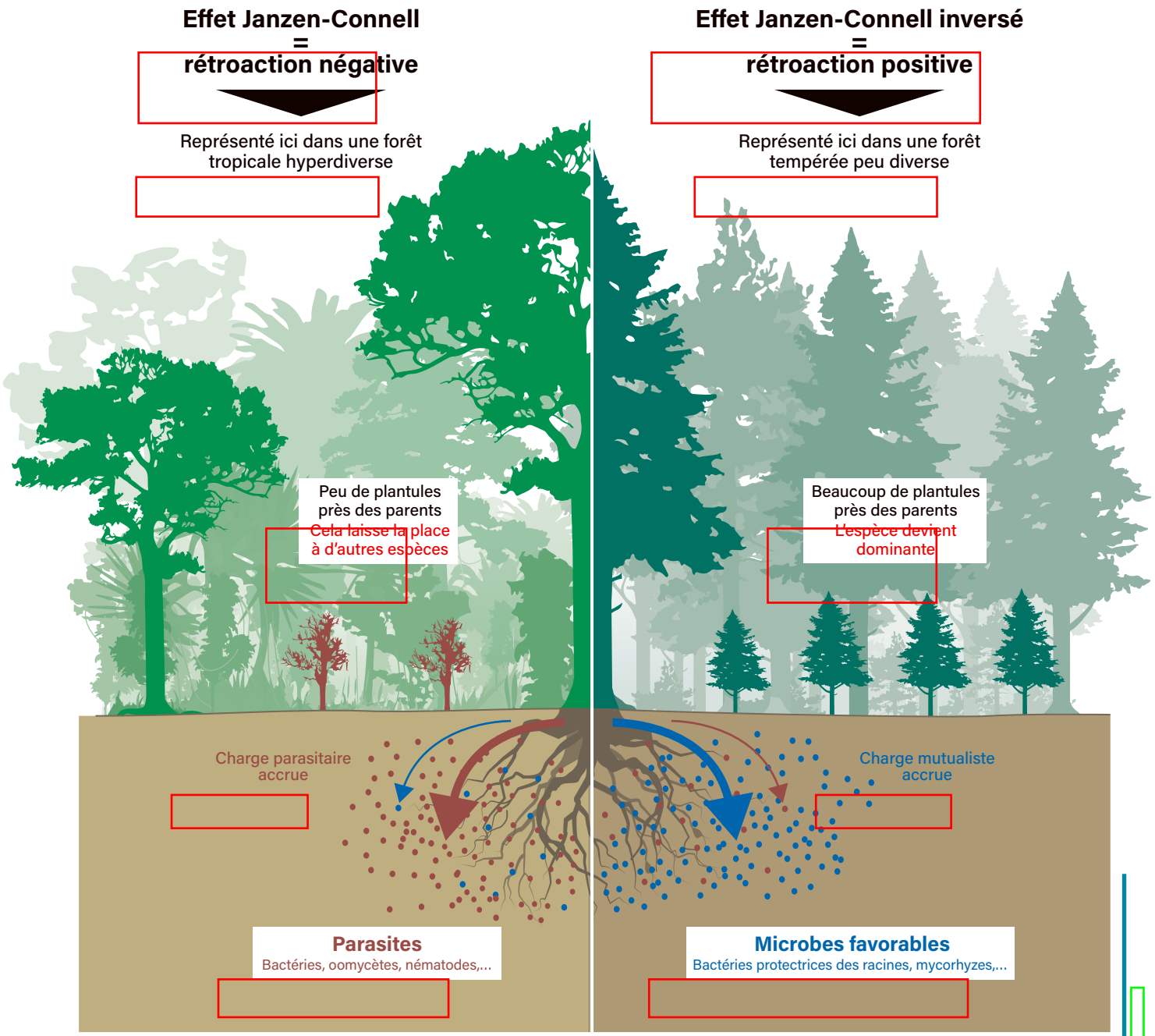
© Stephane GEUS/shutterstock.com ; Pour la Science

UNE RÉTROACTION NÉGATIVE OU POSITIVE

Au cours de son développement, une plante entraîne la prolifération des microorganismes du sol qui interagissent avec ses racines. Certains lui sont défavorables, par exemple certaines bactéries ou des nématodes. D'autres lui sont favorables, par exemple les champignons mycorhiziens qui nourrissent la plante par ses racines, ou encore certaines bactéries qui vivent près des racines et les protègent contre les parasites. Selon l'espèce de la plante et le sol où elle se développe, l'un de ces deux groupes d'organismes est davantage stimulé que l'autre.

Si la plante attire surtout des parasites, le sol rétroagit de façon négative : c'est l'effet Janzen-Connell. Dans ce cas, les plantules de la même espèce poussent mal, ce qui laisse du champ libre à des espèces végétales concurrentes, dont les parasites sont différents. Les communautés végétales où domine le recrutement de parasites du sol, comme la plupart des forêts tropicales, sont très diversifiées en espèces, avec une faible population de chacune de celles-ci.

Si la plante attire surtout des microorganismes qui lui sont favorables, le sol rétroagit de façon positive : c'est l'effet Janzen-Connell inversé. Dans ce cas, les plantules de la même espèce trouvent des alliés souterrains et survivent mieux. Les communautés végétales où domine le recrutement de microorganismes favorables, comme les forêts tempérées, sont peu diversifiées en espèces. Les espèces ainsi avantagées ont des effectifs importants et sont parfois envahissantes.



collectés sous des adultes de même espèce en comparant la croissance des plantules sur ce sol avant et après stérilisation. Puis ils ont mis en rapport cette inhibition avec l'abondance spontanée de l'espèce dans la nature, où elle coexiste avec d'autres espèces. Ils ont constaté dans les deux forêts que plus une espèce s'auto-inhibe, plus elle est rare en forêt. Dans une communauté végétale, l'effet Janzen-Connell module donc l'abondance de telle ou telle plante.

De son côté, l'équipe de Liza Comita, de l'université du Minnesota, a suivi au cours du temps la survie de plus 30 000 plantules appartenant à 180 espèces d'arbres dans une autre forêt du Panama. Au cours de cette étude colossale, les écologues ont aussi pris soin de décrire le voisinage de chaque plantule. Ils ont constaté que la coexistence avec des adultes ou des plantules n'a pas d'effet sur la survie quand ceux-ci appartiennent à d'autres espèces, mais que cette coexistence diminue très fréquemment la survie lorsqu'ils appartiennent à la même espèce. De plus, là encore, l'effet inhibiteur est d'autant plus intense que l'espèce est rare à l'état adulte.

Ainsi, l'effet Janzen-Connell joue un rôle crucial dans l'hyperdiversité des forêts tropicales, parce qu'à l'échelle de la communauté végétale, il réduit considérablement les effets de l'exclusion par compétition – la fameuse exclusion de niche – entre espèces occupant la même niche écologique.

Bien sûr, il existe d'autres raisons à la rareté d'une espèce, comme le fait de ne vivre que dans une niche écologique rare, telle qu'un sol très acide, très salé, etc. Mais la distribution spatiale des espèces et leur capacité à en laisser d'autres s'installer s'expliquent souvent par l'effet Janzen-Connell. Jana Petermann, de l'université de Zurich, a montré en 2008 que l'effet Janzen-Connell contribue aussi à la diversité des herbes des prairies de nos régions tempérées. L'accumulation de pathogènes dans le sol y explique d'ailleurs une pratique empirique des agriculteurs pour améliorer les rendements, la rotation des cultures. En effet, cette pratique prive de leur plante nourricière, pendant une ou deux années, les parasites spécifiques accumulés dans le sol l'année précédente, ce qui les tue.

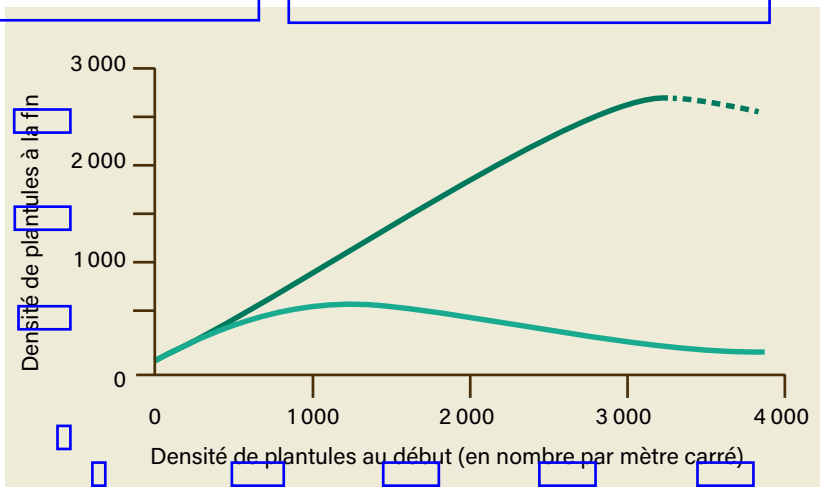
UN EFFET INVERSE DANS LES FORÊTS PAUVRES EN ESPÈCES

Comme nous l'avons vu, l'effet Janzen-Connell favorise la diversité végétale, mais il s'est révélé que, sous une forme différente, il appauvrit en espèces certaines forêts. C'est d'abord le cas de quelques forêts tropicales exceptionnelles et en apparence paradoxales. En Asie continentale du Sud-Est, ces forêts sont composées d'un petit nombre d'espèces de la famille du hêtre (les Fagacées) et de celle des Diptérocarpacées (proches parents de nos cistes). Ailleurs, sous les tropiques, il existe ici ou là des portions de forêts dites « monodominantes », car une seule espèce d'arbres y domine. En Afrique par exemple, il s'agit de forêts où *Gilbertiodendron dewevrei*, dont le bois est connu sous le nom de « limbali », représente jusqu'à 90 % des arbres. En Amérique du Sud, comme en Guyane, l'espèce *Dicymbe corymbosa* représente par endroits plus de 80 % des individus. Ces forêts évoquent celles des régions tempérées, pauvres en espèces d'arbres.

Comment expliquer l'existence de telles forêts ? Par une particularité racinaire que partagent les arbres de toutes ces forêts. Comme la plupart des plantes, ils associent leurs racines à des champignons qui les aident à se nourrir dans le sol et à se défendre des pathogènes, en échange de sucres issus de la photosynthèse. Cette association à bénéfice mutuel est appelée mycorhize, ce qui signifie littéralement champignon-racine, à cause de la structure mixte formée par les deux partenaires dans le sol. La mycorhize est, justement, le sujet de recherche de mes équipes.

Dans les forêts tropicales et dans nos prairies, où l'effet Janzen-Connell favorise la diversité, ces mycorhizes impliquent des champignons appartenant au groupe des glomeromycètes. Ceux-ci forment des mycorhizes avec les trois quarts des plantes, par exemple le cerisier noir sur lequel Alissa Packer et Keith Clay ont démontré l'effet Janzen-Connell. Les arbres des forêts tempérées et tropicales monodominantes s'associent en revanche avec des champignons d'autres espèces, qui forment une

La survie des plantules de l'arbre tropical *Pleradenophora longicuspis* dépend de leur densité. Si l'on exclut les champignons pathogènes du sol, la compétition entre plantules élimine des individus à partir d'une densité très élevée (plus de 3 000 graines par mètre carré). Mais en présence de ces champignons, les plantules disparaissent à partir d'une densité deux fois inférieure. En effet, à partir de cette densité, en l'absence de compétition, les champignons se propagent efficacement entre les plantules.



© Pour la Science, d'après Baghi et al., 2010

association de morphologie un peu différente sur la racine, nommée «ectomycorhize». Dans nos régions tempérées, les truffes, bolets, girolles et autres amanites, qui vivent en forêt, sont des champignons ectomycorhiziens.

Or plusieurs travaux ont montré que les champignons ectomycorhiziens favorisent fortement l'installation des plantules. Ainsi, avec Amadou Bâ, de l'université des Antilles, nous avons étudié entre 2010 et 2020 les champignons ectomycorhiziens qui, en forêt monodominante, s'associent aux arbres adultes et aux plantules. Nous en avons déduit, tout comme d'autres équipes travaillant sur des forêts similaires, que les champignons nourris par les arbres adultes et déjà établis dans le sol favorisent la survie des plantules voisines. Dans cette situation, les microorganismes du sol renforcent l'installation des espèces déjà présentes, en un «effet Janzen-Connell inversé» (*voir l'encadré page 44*).

En 2017, John Klironomos, de l'université de Colombie-Britannique, a montré que l'effet Janzen-Connell joue différemment selon le type de mycorhize. Les plantes associées aux gloméromycètes recrutent plus de pathogènes que de microorganismes favorables (dont font partie les gloméromycètes) sous les adultes: ces plantes sont donc généralement sujettes à l'effet Janzen-Connell. Les espèces formant des ectomycorhizes bénéficient, elles, d'un effet contraire: sous les adultes, les plantules recrutent plus de microorganismes favorables (ceux qu'on appelle des «mutualistes», notamment les champignons ectomycorhiziens) que de pathogènes. Le principe de l'exclusion de niche joue alors à fond: avec l'aide de leurs champignons ectomycorhiziens, les plantes adultes favorisent la prolifération des plantules de la même espèce, excluent leurs compétiteurs et conduisent en conséquence à des communautés végétales peu diversifiées.

On distingue donc deux effets du sol, selon les espèces: la rétroaction négative, ou effet Janzen-Connell, chez celles qui attirent plus d'ennemis que d'alliés là où elles s'installent, et la rétroaction positive, ou effet Janzen-Connell inversé, chez les espèces qui attirent plus d'alliés que d'ennemis. Cela dessine des forêts contrastées, fruits d'interactions différentes entre plantes et microbes du sol: les forêts tropicales sont souvent d'une grande diversité grâce à la rétroaction négative, tandis que celles des régions tempérées sont moins diversifiées à cause de la rétroaction positive.

UNE EXPLICATION AUX ESPÈCES ENVAHISSANTES

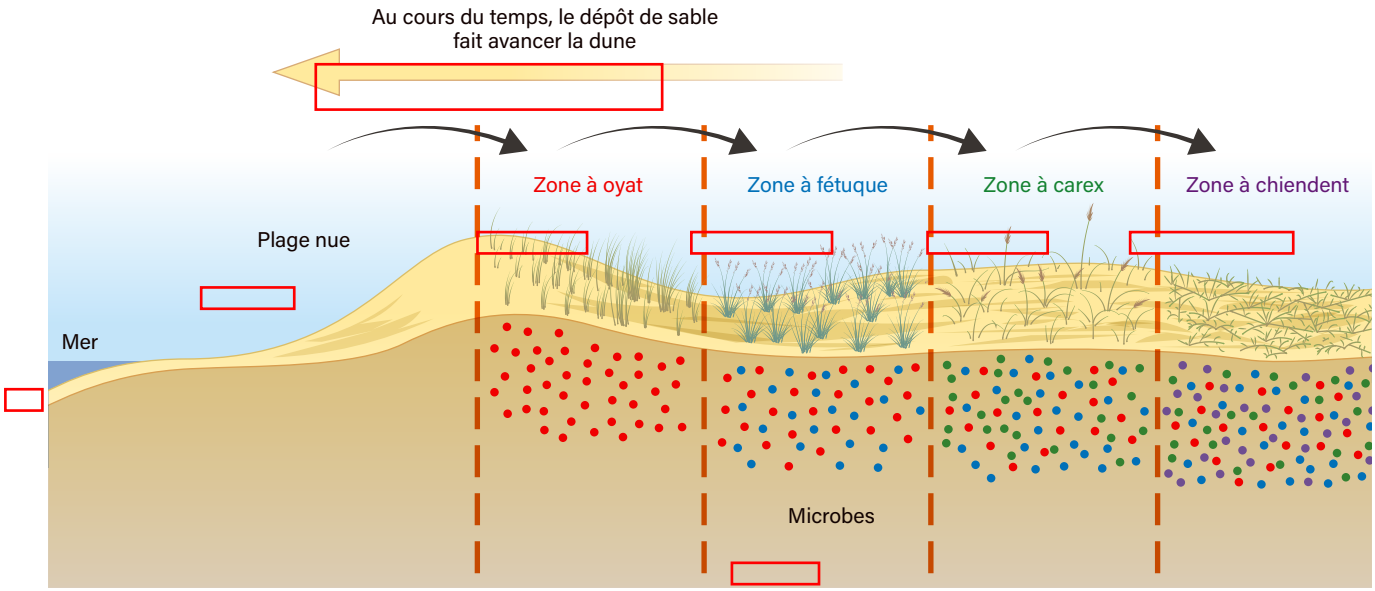
La rétroaction positive contribue aussi à la réussite des espèces envahissantes. Ces plantes, souvent introduites, se propagent activement et gagnent sur les plantes indigènes, comme en France la renouée du Japon (*Fallopia japonica*), le cerisier noir ou le robinier faux-acacia d'Amérique (*Robinia pseudoacacia*). Elles se développent et se multiplient bien mieux que dans leur zone d'origine. Pourquoi? La rétroaction du sol en fournit une explication. Dans la zone d'origine, elles sont soumises à un effet Janzen-Connell, mais les organismes du sol présents dans la zone d'introduction font que cet effet s'estompe, voire s'inverse.

Le cerisier noir, qui est freiné par un effet Janzen-Connell dans son Amérique d'origine, est ainsi devenu envahissant en Europe. Dans ce continent, la présence d'adultes dans le voisinage favorise ses plantules, en une rétroaction positive. Les *Pythium*, ces champignons oomycètes pathogènes des racines, sont un à cinq fois moins virulents sur le cerisier noir dans les sols européens que ceux isolés sur les racines américaines. De même, le robinier faux-acacia est soumis à l'effet Janzen-Connell en Amérique du Nord, d'où il est originaire, mais à une rétroaction positive en Europe où il est devenu envahissant. Les plantes introduites envahissantes sont donc celles qui, confrontées au sol de nouveaux écosystèmes, y trouvent par



Cette vue aérienne prise près de la Tremblade, en Charente-Maritime, illustre la colonisation des dunes par les végétaux. Côté océan, la dune grandit par apport de sable, de sorte que les parties intérieures sont les plus anciennes. On peut donc observer les étapes successives de la colonisation du sable par les végétaux *(de gauche à droite)*. Cette succession végétale comprend d'abord des herbes éparses (dont les oyats), puis des herbes plus denses, puis des buissons et enfin une forêt de pins.

© Google Earth ; data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO Maxar Technologies



chance plus de microorganismes favorables que de pathogènes.

Toutefois, cet effet est instable à long terme car, avec la multiplication de l'espèce végétale envahissante, ses pathogènes sont sélectionnés et prolifèrent eux aussi. La Nouvelle-Zélande, dont une grande partie de la flore a été implantée par les colons à des époques successives, est un triste laboratoire d'étude des espèces envahissantes. Vers 2010, l'équipe de Jeffrey Diez, de l'université de l'Oregon, a remarqué, sur des plantes envahissantes associées à des gloméromycètes, que plus l'introduction de l'espèce est ancienne, plus la rétroaction du sol devient négative. Ainsi, progressivement rattrapées par l'évolution des pathogènes locaux, les plantes envahissantes perdent lentement leur caractère envahissant.

UN MOTEUR DE LA DYNAMIQUE VÉGÉTALE

La rétroaction du sol est aussi un acteur de la dynamique végétale, ce processus qui s'opère lorsque le paysage végétal a été perturbé ou après l'apparition de surfaces rocheuses nues. Une forêt se développe en plusieurs décennies par une série d'étapes : couvert de plantes herbacées, buissons de plus en plus hauts, enfin premiers arbres… jusqu'à ce que la forêt domine. Les écologues nomment « succession écologique » ce mécanisme qui fait, par étapes, apparaître puis disparaître des espèces successives.

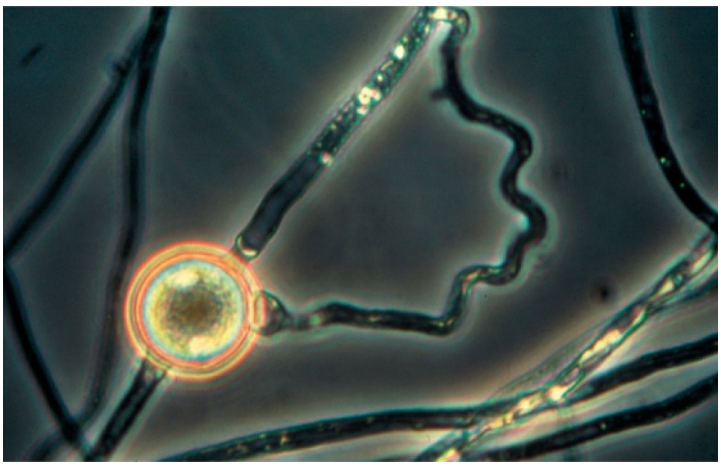
Le phénomène de succession écologique est à la fois évident et déconcertant. Il est évident, parce que chaque espèce modifie le milieu d'une façon qui le rend convenable pour une espèce plus exigeante – par exemple en protégeant les plantules du soleil, en enrichissant le sol en matière organique ou en retenant un sol plus épais par ses racines. Cette « facilitation », comme l'appellent les écologues, aide l'espèce $N+1$ à remplacer l'espèce N. La succession est néanmoins déconcertante : il est étonnant que l'espèce $N+1$ parvienne à remplacer l'espèce N qui, établie antérieurement, est bien mieux installée… Comment $N+1$ parvient-elle à affronter la compétition de N, et pourquoi N finit-elle par disparaître ?

Au cours de la colonisation végétale d'une dune, une succession d'espèces enrichissent le sol chacune à leur tour, ce qui aide les suivantes à s'implanter. Chaque plante attire ses propres pathogènes *(les points de même couleur que son titre)*. En atténuant progressivement sa vigueur, ils entraînent son remplacement par l'espèce suivante de la succession. Comme ces pathogènes subsistent dans le sol sous la forme d'œufs par exemple, ils empêchent la réimplantation de l'espèce qu'ils parasitent.

L'équipe de Wim van der Putten, de l'Académie des sciences des Pays-Bas, a éclairé cette question dans des travaux menés depuis 1993 sur le littoral de la mer du Nord. Les apports continus de sables marins y constituent une dune qui, à mesure de son avancée vers la mer, est colonisée par des espèces qui se remplacent les unes les autres (*voir les illustrations page 46 et ci-dessus*). Le sable, d'abord nu, est bientôt dominé par l'oyat (*Ammophila arenaria*), ensuite par une fétuque (*Festuca rubra*), puis par un carex (*Carex arenaria*), etc., avant l'arrivée d'une végétation buissonnante. Au fil du processus, le sol s'enrichit : si l'on cultive ces espèces sur des sables stérilisés issus des différentes zones, la croissance est toujours d'autant meilleure que le sable a été colonisé par des végétaux depuis plus longtemps. C'est une facilitation par accroissement de fertilité.

Mais si l'on entreprend ces cultures sans stériliser les sables, on observe aussi l'effet des organismes du sol, qui change tout. Wim van der Putten et ses collègues se sont aperçus que chaque espèce pousse bien sur les sols qui précèdent sa présence, mais moins bien dans ceux qui font suite au stade où elle a dominé (*voir la figure ci-dessus*). Pour l'oyat par exemple, la rétroaction dans le sable de plage est faiblement négative, mais elle est plus négative dans du sable récemment colonisé, et beaucoup plus encore dans les sables des stades suivants de la succession. Chaque espèce attire donc des

© Bruno Bourgeois





À gauche, un *Pythium*, qui est un exemple de microorganisme pathogène du sol. Ce champignon appartient au groupe des Oomycètes. L'image de droite montre un *Cenoccum (de couleur sombre), qui* est un exemple de « mutualiste », c'est-à-dire de microorganisme favorable à des plantes. Les mutualistes peuvent être des bactéries ou des champignons, notamment des champignons formant avec les racines des structures nommées « ectomycorhizes », ce qui est le cas de ce *Cenocccum*.

parasites dont la présence devient irréversible, mais qui, étant spécifiques, ne nuisent pas aux autres espèces. Dans les dunes, ce sont en particulier les nématodes, des vers microscopiques parasites des racines, qui expliquent la rétroaction négative. Ils pondent des œufs dans le sol, qui survivent longtemps et expliquent la persistance de la rétroaction négative même quand la plante a disparu.

En somme, l'espèce N favorise l'espèce $N+1$, tandis que la compétitivité de N décroît avec le temps en raison d'une rétroaction négative, ce qui entraîne progressivement son remplacement par $N+1$. On admet aujourd'hui que la dynamique de succession de la végétation, irréversible à cause des œufs des nématodes, reflète donc des processus souterrains.

Les stratégies végétales résultent ainsi d'interactions avec la vie du sol. Les plantes qui subissent une rétroaction négative ne peuvent persister sur un site qu'elles ont colonisé : leur descendance se développera donc plus loin. C'est pour cette raison que les espèces forestières à rétroaction négative se disséminent au loin en forêt, où elles tendent à être très espacées et rares. De même, les espèces des successions végétales passent dans un autre site qui offre une fenêtre de colonisation favorable et où elles seront transitoirement abondantes. Toutes ces plantes-là ont des graines facilement dispersées, par le vent ou les animaux : elles sont nomades.

À l'opposé, les plantes à rétroaction positive du sol persistent sur leur site et tendent à former des peuplements denses ; leurs graines sont souvent grosses et peu dispersées : elles sont grégaires, comme les arbres des forêts tempérées ou tropicales monodominantes. Derrière le paysage végétal et sa dynamique se profilent donc le sol et sa biodiversité, trop souvent sous-estimés en écologie terrestre.

Mis en évidence il y a cinquante ans, l'effet Janzen-Connell a acquis ses lettres de noblesse en écologie végétale. Il commence à être envisagé pour d'autres groupes d'organismes qui forment des communautés très riches en espèces, comme les bactéries des sols ou encore les organismes unicellulaires du plancton océanique, dont les espèces se chiffrent en milliers par gramme de milieu… Pour éviter l'exclusion par compétition, il faudrait qu'il y ait autant de niches écologiques différentes, ce qui paraît peu vraisemblable.

LE « PARADOXE DU PLANCTON »

C'est pourquoi, en rapport avec l'océan, on parle par exemple de « paradoxe du plancton » : cette expression, proposée en 1961 par l'écologue américain George Hutchinson, renvoie au paradoxe d'un nombre d'espèces peu explicable par le nombre de niches écologiques. Mais les espèces d'organismes unicellulaires du plancton ont leurs parasites aussi : elles sont soumises aux attaques de virus, de champignons marins ou sont la proie de plus gros animaux unicellulaires, ce qui les empêche de proliférer. Elles tolèrent donc les espèces colonisant leur propre niche, faute de l'occuper complètement elles-mêmes. En 2013, Kristen Marhaver, de l'université de Californie à Merced, et ses collègues ont montré que ce mécanisme joue aussi dans les écosystèmes coralliens, bien connus comme des points chauds de biodiversité.

Ces applications multiples de l'effet Janzen-Connell remettent au cœur de l'écologie les interactions des espèces végétales et du sol. Toutefois, on ignore encore ce qui fait qu'une espèce, dans un milieu donné, subit une rétroaction positive ou négative : est-ce le hasard, ou le résultat de coévolutions complexes ? La recherche se poursuit donc. En attendant, il faut cesser de voir les mutualistes et les parasites uniquement comme des facteurs influençant les organismes ou les populations d'une espèce : ils sculptent aussi les communautés réunissant plusieurs espèces, leur diversité et leur fonctionnement. Leurs impacts expliquent tout simplement… la structure des paysages vivants que nous voyons ! ■

BIBLIOGRAPHIE

M.-A. Selosse, **L'Origine du monde. Une histoire naturelle du sol à l'attention de ceux qui le piétinent**, Actes Sud, 2021.

M. P. Thakur *et al.*, **Plant-soil feedbacks and temporal dynamics of plant diversity-productivity relationships**, *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 36(7), pp. 651-661, 2021.

J. A. Bennett *et al.*, **Plant-soil feedbacks and mycorrhizal type influence temperate forest population dynamics**, *Science*, vol. 355, pp. 181-184, 2017.

J. D. Bever *et al.*, **Maintenance of plant species diversity by pathogens**, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 46, pp. 305-325, 2015.

© M.-A. Selosse

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !



N° 527 (Sept. 21)
réf. PL527



N° 526 (Août 21)
réf. PL526



N° 525 (Juillet 21)
réf. PL525



N° 524 (Juin 21)
réf. PL524



N° 523 (Mai 21)
réf. PL523



N° 522 (Avril 21)
réf. PL522



N° 521 (Mars 21)
réf. PL521



N° 520 (Fév 21)
réf. PL520



N° 519 (Jan 21)
réf. PL519



N° 518 (Déc. 20)
réf. PL518



N° 517 (Nov. 20)
réf. PL517



N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – serviceclients@groupepourlascience.fr

☑ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,40 €**

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

1e réf. 0 1 x 9,40 € = 9,40 €
2e réf. ..... x 9,40 € = ... €
3e réf. ..... x 9,40 € = ... €
4e réf. ..... x 9,40 € = ... €
5e réf. ..... x 9,40 € = ... €
6e réf. ..... x 9,40 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ..... Ville : .....
Téléphone .....
Courriel : .....
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr

Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France Métropolitaine uniquement.

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

L'ESSENTIEL

> Le gaz naturel est l'une des principales sources d'énergie, mais sa combustion dégage du dioxyde de carbone.

> Cette énergie d'origine fossile est donc incompatible avec l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

> En conservant les infrastructures gazières existantes, on pourrait exploiter des gaz dont le bilan en carbone est plus favorable, tels que le biométhane ou l'hydrogène.

> On profiterait ainsi d'infrastructures dans lesquelles des sommes considérables ont déjà été investies.

L'AUTEUR



MICHAEL WEBBER
professeur en géopolitique de l'énergie à l'université du Texas à Austin (États-Unis), ainsi que directeur scientifique et technologique de la société Engie, à Paris

Que faire des usines à gaz?

La combustion du gaz naturel, importante source d'énergie, émet du dioxyde de carbone et contribue ainsi au réchauffement climatique. Dans la perspective d'un avenir décarboné, faudra-t-il démanteler les infrastructures gazières existantes ? Dans un premier temps, il serait plus judicieux de les reconvertir pour y transporter des gaz ayant un meilleur bilan écologique.

Au milieu des années 2010, il était courant de dire que le gaz naturel serait un carburant de transition vers un futur décarboné, dans lequel le soleil, le vent et d'autres sources renouvelables combleraient nos besoins en énergie et nous débarrasseraient des émissions de dioxyde de carbone qui réchauffent le climat. Mais si le gaz naturel est vraiment une étape obligée vers ce futur, comment éviter que nous prenions de mauvaises habitudes ? Comment s'assurer qu'une fois l'industrie convertie à cette ressource, elle n'en devienne pas dépendante ?

La consommation de gaz naturel a augmenté d'un tiers aux États-Unis ces quinze dernières années. Le gaz fournit 32% de l'énergie totale consommée et représente maintenant la première source d'électricité de ce pays, largement devant les centrales électriques à charbon. Le gaz naturel, constitué principalement de méthane (CH_4), brûle de façon plus propre que le charbon, et il fournit un soutien immédiat aux centrales solaires et aux parcs éoliens dont la production est intermittente. Deux atouts en faveur de son utilisation, sauf que brûler du gaz naturel dégage du dioxyde de carbone (CO_2). En outre, le méthane présent dans les puits peut s'échapper dans l'atmosphère et amplifier le réchauffement global. En somme, lorsque la dernière centrale à charbon fermera, les centrales au gaz naturel deviendront à leur tour les sources d'électricité les plus sales.

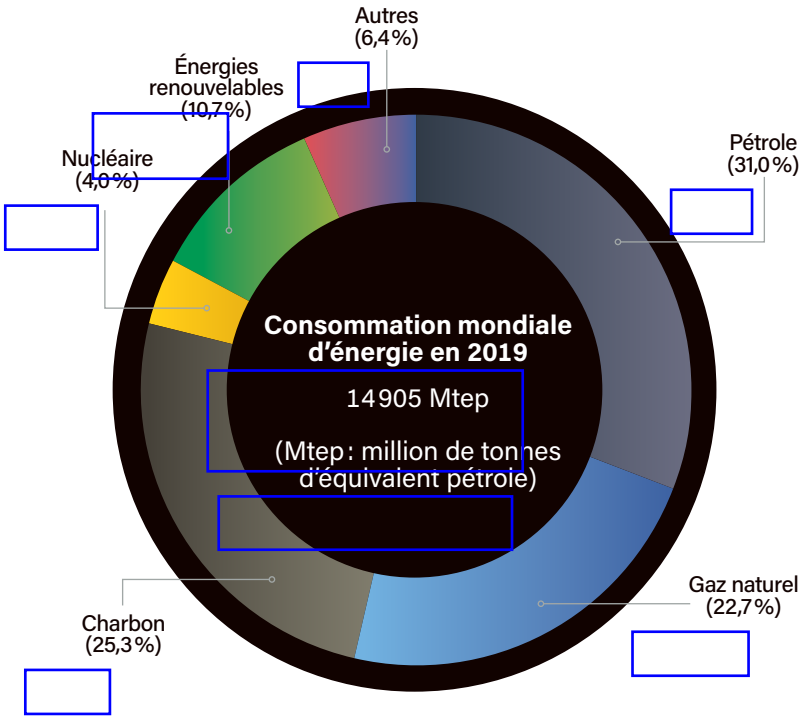
Pour réduire les émissions de CO_2, nous devons décarboner les systèmes énergétiques aussi rapidement que possible. Construire davantage de parcs éoliens et solaires est relativement peu coûteux et rapide, mais l'exploitation des meilleurs sites (les plaines balayées par le vent et les déserts brûlés par le soleil) nécessite un réseau de distribution très étendu pour acheminer l'électricité vers les grandes villes et les complexes industriels. Or les câbles

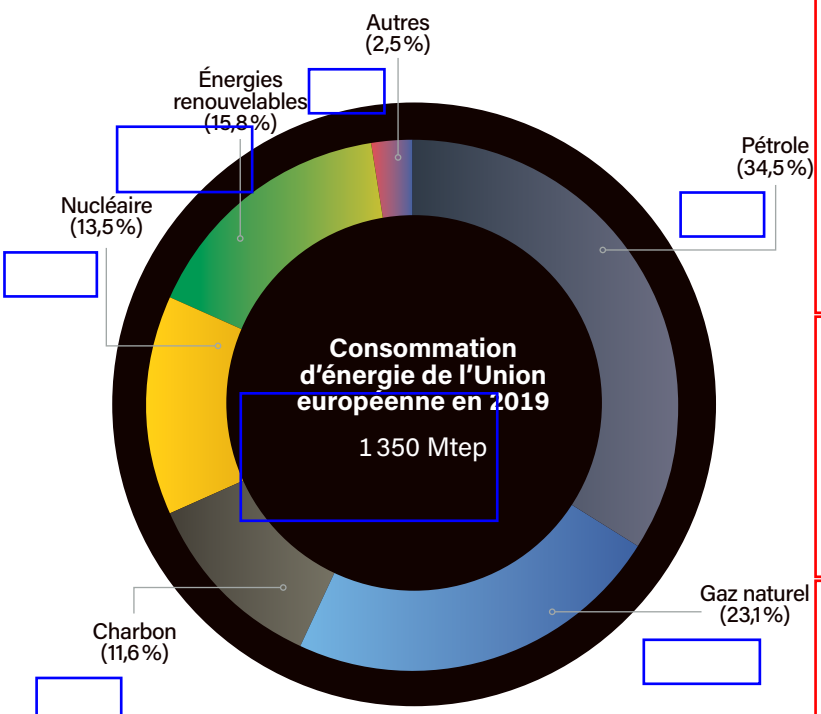


© David Plunkert

UNE IMPORTANTE SOURCE D'ÉNERGIE

Le gaz naturel représente environ un quart de l'énergie consommée dans le monde ou en Europe. Aux États-Unis, la part du gaz naturel est plus importante encore et dépasse 30 % *(voir l'encadré page ci-contre)*.





et les poteaux de ces réseaux s'exposent aux risques de tempêtes, d'inondations et d'incendies, risques qui augmentent avec le changement climatique. Par ailleurs, les projets d'expansion de ces parcs se heurtent régulièrement à l'opposition des habitants des communes avoisinantes.

L'infrastructure du gaz naturel, presque entièrement souterraine, est beaucoup moins sujette aux interruptions. Les États-Unis comptent environ 4,5 millions de kilomètres de gazoducs. Si l'on ajoute les compresseurs, les réservoirs et les cavités de stockage, le réseau de distribution représente plusieurs milliers de milliards de dollars. Les centrales elles-mêmes majorent ce chiffre de plusieurs milliards de dollars. Les quelque 70 millions de foyers desservis par le gaz naturel détiennent des appareils de chauffage, des chauffe-eau et des tables de cuisson d'une valeur d'au moins 100 milliards de dollars supplémentaires. Pour le monde entier, multipliez tous ces investissements irrécupérables par cinq. En outre, plus que toute autre source d'énergie, le gaz est lié à d'autres secteurs – les transports, le bâtiment (pour le chauffage et la cuisson) et l'industrie (pour la chaleur et comme matière première pour la chimie) –, ce qui le rend plus difficile à substituer.

Le remplacement de cette infrastructure avant la fin de sa durée de vie naturelle entraînerait également des pertes financières pour les opérateurs gaziers, qui s'y opposeront. La technologie de substitution pourrait coûter cher aux contribuables, aux clients et aux propriétaires fonciers, qui s'élèveront contre aussi. Par ailleurs, la conversion à l'énergie électrique sera compliquée pour les gros consommateurs de carburant liquide que sont les camions, les navires, les avions, et les usines utilisant une chaleur intense comme les fonderies, les distilleries et les raffineries, qui produisent en masse métaux, ciment, verre, carburants et produits chimiques. La densité énergétique des carburants liquides est difficile à égaler.

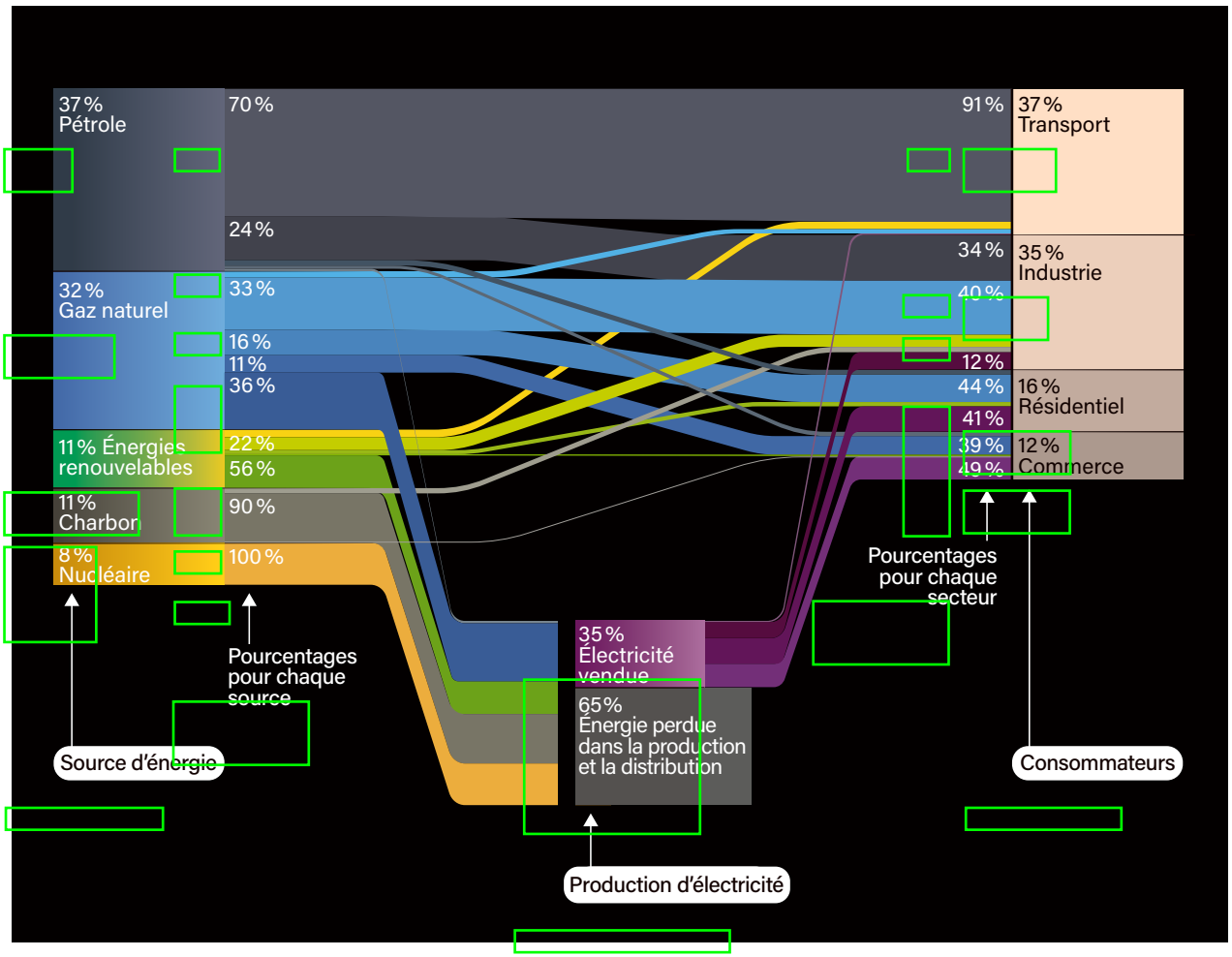
Si nous éliminons les émissions de CO_2 à toutes les étapes de l'utilisation du gaz naturel, peut-être pourrions-nous envisager cette source d'énergie comme une partie de la solution au lieu d'une étape de transition. La technologie existe pour extraire le carbone ou pour transformer le gaz de telle façon que les quantités de carbone émises et captées s'équilibrent ou presque.

La première étape d'un plan global de décarbonation de l'infrastructure énergétique consisterait à améliorer l'efficacité énergétique et promouvoir les économies afin de réduire la consommation. La deuxième serait d'électrifier, à partir de sources d'énergie renouvelables, autant de voitures, de chauffages d'appoint, de chauffe-eau et de cuisinières que possible. Il

© Pour la Science, d'après données de Our World in Data pour le monde (https://ourworldindata.org) et Eurostat (https://ec.europa.eu/eurostat/fr/) pour l'Europe

L'ÉNERGIE CONSOMMÉE AUX ÉTATS-UNIS EN 2019, PAR SOURCE ET PAR SECTEUR

Le gaz naturel compte pour 32 % de la consommation d'énergie des États-Unis, en deuxième position après le pétrole, et pour 31 % de la production d'électricité, plus que n'importe quelle autre source. Il alimente les secteurs manufacturier, commercial et résidentiel, où il sert de matière première, fournit de la chaleur aux industries et aux particuliers, pour le confort ou la cuisson, produit de l'électricité… La combustion du gaz naturel émet du dioxyde de carbone, et les puits de gaz et les pipelines laissent parfois s'échapper du méthane, qui est un puissant gaz à effet de serre. Pour limiter le réchauffement climatique, il est donc essentiel de décarboner l'ensemble du réseau gazier et de stopper les fuites



faudrait également réduire les fuites de gaz dans le réseau de distribution, ainsi que remplacer le maximum de gaz naturel par des alternatives à bas carbone telles que le biogaz, l'hydrogène et le méthane de synthèse, à moins d'extraire le carbone émis lors de la combustion grâce au procédé de pyrolyse.

Les partisans des énergies propres craignent, à juste titre, que tout investissement dans les infrastructures gazières ne retarde la transition énergétique. Chaque centrale, pipeline ou unité de stockage a une durée de vie annoncée s'étalant de 25 à 85 ans, donc chaque nouvel équipement deviendrait un piège à émissions supplémentaires ou de l'argent gaspillé en cas d'arrêt anticipé. Mais nous pouvons résoudre ce problème grâce à une alternative au gaz naturel: des gaz à faible teneur en carbone pouvant circuler dans les pipelines, les réservoirs et les centrales électriques existants, ce qui permettrait ainsi de profiter de cette infrastructure dans laquelle des sommes colossales ont déjà été investies.

DU BIOMÉTHANE À LA PLACE DU MÉTHANE

Le substitut au gaz naturel le plus avancé est le biométhane, c'est-à-dire du méthane d'origine biologique. Comment est-il fabriqué? À l'intérieur de grands réservoirs appelés méthaniseurs, des bactéries digèrent, par digestion anaérobie (qui ne requiert pas

© Datalands et Jen Christiansen, d'après données de U.S. Energy Information Administration

d'oxygène), des matières organiques telles que déchets agricoles, fumier, eaux usées, détritus alimentaires… Ces « digesteurs », à la technologie déjà mûre, transforment les déchets des élevages industriels (notamment le lisier traité dans des bassins), véritables plaies environnementales, en produits valorisables capables de générer des revenus pour les municipalités et les agriculteurs.

Le biométhane alimente en partie la ville d'Austin, au Texas. La société Waste Management, qui exploite l'une des décharges de l'agglomération, collecte du biométhane dans 128 puits sur son site et le brûle pour approvisionner en électricité 4 000 à 6 000 foyers. En outre, l'une des stations d'épuration de la ville dispose de huit biodigesteurs, d'une capacité de 7,5 millions de litres chacun ; les bactéries convertissent les eaux usées en biogaz qui alimente sur place des générateurs électriques. Le procédé crée un déchet solide appelé « digestat », qui ressemble, par son odeur et sa texture, à un compost compact. Une entreprise le vend en sacs comme engrais dans les magasins de la région.

Aux États-Unis, environ un quart des plus de 2 000 décharges valorisent aujourd'hui leur gaz ou recyclent en partie leurs déchets dans des digesteurs. Cela ne représente toutefois que moins de 1 % de la consommation totale de gaz naturel du pays. Le biogaz peut servir de substitut direct au gaz naturel, mais les quantités produites, à l'échelle mondiale, sont faibles. Si une ferme, une décharge ou une station d'épuration ne peut pas utiliser le gaz pour produire de l'électricité ou si elle n'est pas située à proximité du réseau gazier, le biométhane devra peut-être être liquéfié et transporté par camion ailleurs, d'où un bilan de carbone moins intéressant. Néanmoins, le biométhane est une technologie prête sur le plan commercial, qui peut commencer à décarboner une partie de l'industrie gazière.

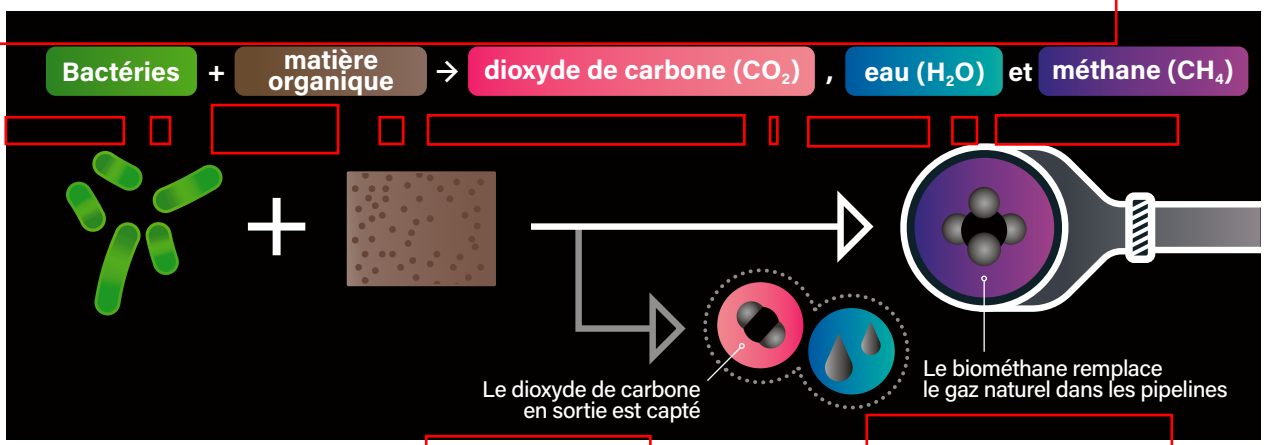
À Austin, au Texas, le biométhane fournit l'électricité à plusieurs milliers de foyers

DE L'HYDROGÈNE DANS LES TUYAUX

Le gaz naturel peut aussi être remplacé par de l'hydrogène. Les turbines des centrales peuvent brûler de l'hydrogène afin de produire de l'électricité pour le réseau, et même les moteurs à combustion des véhicules utilitaires lourds savent s'en satisfaire. Dans les piles à combustible, l'hydrogène génère de l'électricité pour les voitures, les maisons ou les bureaux. Et l'hydrogène est déjà l'un des ingrédients de nombreux produits chimiques. Sa combustion, comme sa transformation dans les piles à

STRATÉGIE 1 : REMPLACER LE GAZ NATUREL PAR DU BIOMÉTHANE

Pour réduire les émissions de CO_2 dues à la consommation de gaz naturel (du méthane, pour l'essentiel), on pourrait remplacer le gaz transporté dans les pipelines par du biométhane, méthane produit par des bactéries qui décomposent la matière organique (déchets agricoles, fumier, eaux usées, détritus alimentaires). La décomposition produit aussi de la vapeur d'eau et un peu de CO_2. Ce dernier est capté et dirigé vers l'industrie ou un réservoir sous-terrain.



© Dalaland et Jen Christiansen

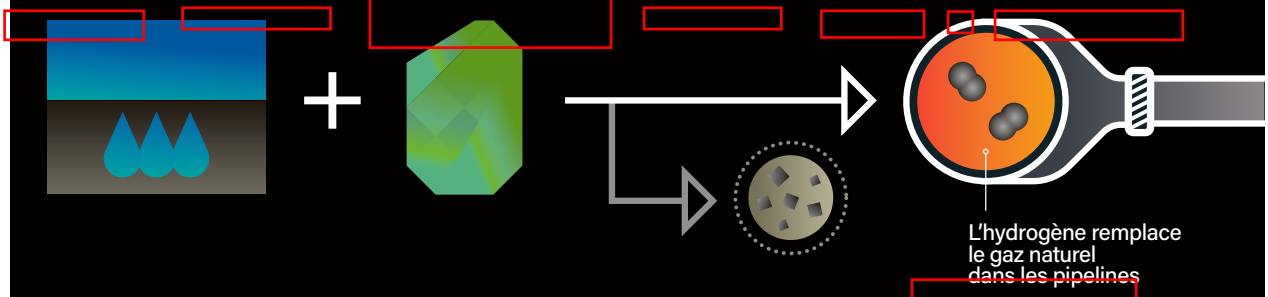
STRATÉGIE 2 : REMPLACER LE GAZ NATUREL PAR DE L'HYDROGÈNE

Le gaz naturel dans les pipelines pourrait être partiellement ou intégralement remplacé par de l'hydrogène. Cette ressource peut servir de carburant pour les centrales électriques et les véhicules utilitaires lourds, alimenter les piles à combustible des voitures, des maisons et des bâtiments, ou être utilisée comme matière première. La combustion de l'hydrogène n'émet pas de carbone. Des pipelines faits d'un alliage spécial seraient nécessaires pour transporter un gaz composé de moins de 20 % d'hydrogène. Voici plusieurs sources possibles d'hydrogène.

RÉSERVOIRS NATURELS

Quand de l'eau souterraine ou injectée par des pompes entre en contact avec une roche contenant du fer, des silicates et de l'hydrogène sont produits.

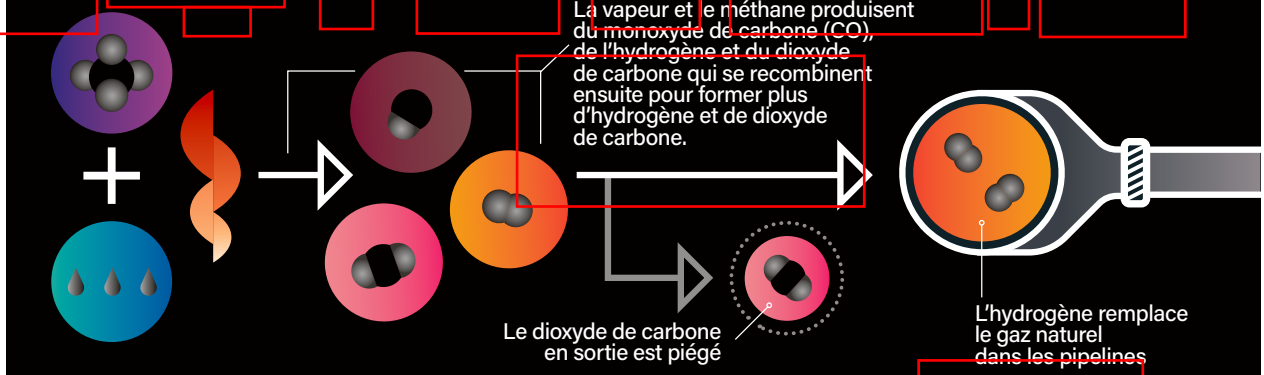
L'eau (H_2O) réagit avec des roches renfermant du fer ce qui produit silicates et hydrogène (H_2)



REFORMAGE À LA VAPEUR DU MÉTHANE, AVEC PIÉGEAGE DU CARBONE

L'ajout de chaleur et d'eau au méthane provenant d'un puits produit de l'hydrogène et du CO2, que l'on capterait. L'industrie utilise déjà largement ce procédé pour fabriquer de l'hydrogène destiné aux raffineries et aux fonderies. Une énergie propre serait nécessaire pour produire la chaleur.

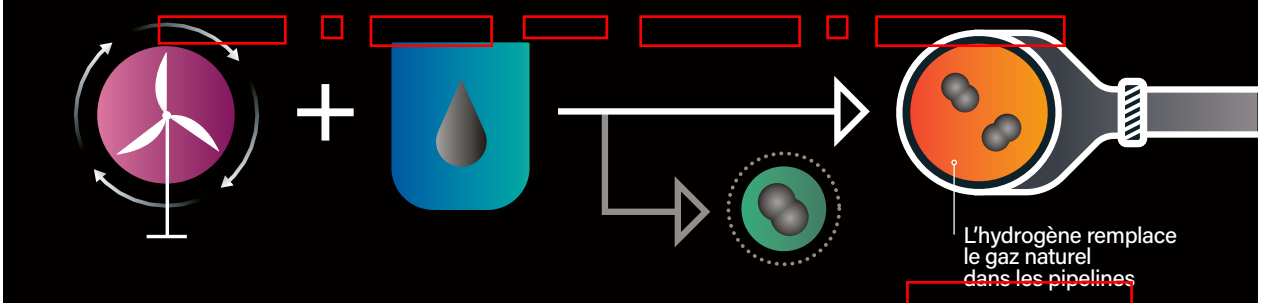
En chauffant du méthane (CH_4) avec de la vapeur d'eau (H_2O) on produit du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'hydrogène (H_2)



ÉLECTROLYSE

De l'électricité provenant d'une source renouvelable décompose les molécules d'eau et produit ainsi de l'hydrogène. La réaction requiert davantage d'énergie que le reformage du méthane à la vapeur, mais le seul sous-produit est de l'oxygène, qui est relâché dans l'air.

Électricité et eau (H_2O) donnent oxygène (O_2) et hydrogène (H_2)



© Datalands et Jen Christiansen

Mélangé au méthane, l'hydrogène pourrait être stocké et transporté plus facilement

combustible, n'émet pas de CO_2. Dernier avantage : en cas de fuite, l'hydrogène a un effet de serre bien moindre que le méthane.

Où trouve-t-on de l'hydrogène dans la nature ? Ce gaz s'échappe naturellement du sol dans de nombreux bassins situés dans des cratons – d'anciens morceaux de plaques terrestres situés au cœur des continents. Les scientifiques connaissent ces suintements depuis plus d'un siècle. Les compagnies pétrolières et gazières ont toutefois considéré l'hydrogène comme une nuisance lorsqu'elles en trouvaient à proximité des réservoirs souterrains, car il peut prendre feu et endommager les canalisations métalliques. Mais aujourd'hui, les ingénieurs et les chercheurs forent à titre expérimental des puits à hydrogène et lancent des programmes pluriannuels pour prospecter le sous-sol. En termes de production, les espoirs ressemblent à ceux manifestés au tout début de la fracturation des schistes : une ressource énorme est là, si les ingénieurs parviennent à trouver comment l'exploiter à moindre coût et en toute sécurité.

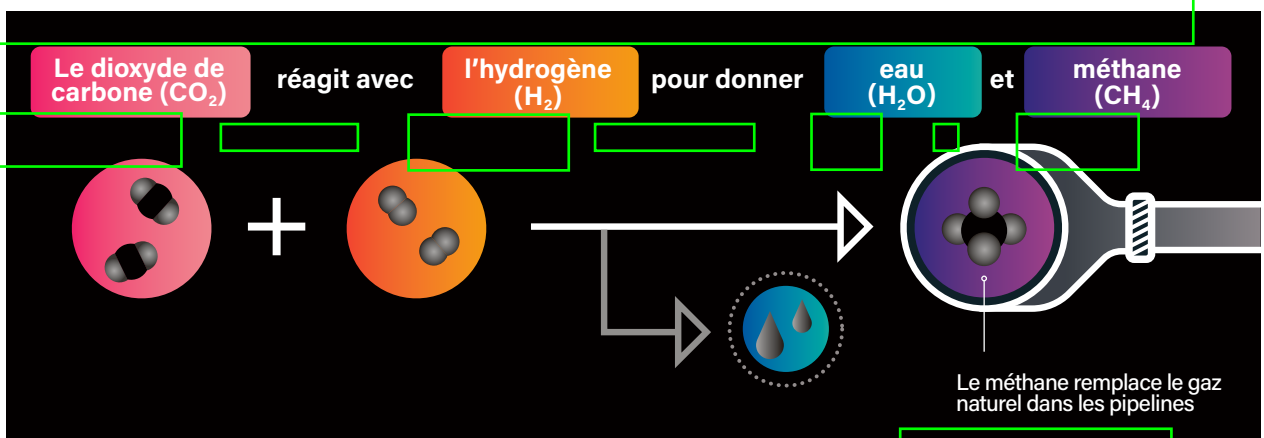
Il est aussi possible de synthétiser l'hydrogène. À l'heure actuelle, la plus grande part de l'hydrogène destiné à l'industrie est produite par reformage à la vapeur du méthane, c'est-à-dire en ajoutant de la chaleur et de l'eau chaude au méthane pour créer de l'hydrogène et du CO_2. L'électrolyse, qui utilise l'électricité pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène, peut également fabriquer de l'hydrogène gazeux. Ces deux procédés nécessitent toutefois d'importantes quantités d'énergie.

Le transport et le stockage de l'hydrogène gazeux constituent également un défi. En raison de la faible densité de l'hydrogène, son acheminement par pipeline réclame beaucoup d'énergie, par rapport à des gaz plus denses comme le méthane ou des liquides comme le pétrole. L'opération est si peu efficace qu'après plusieurs centaines de kilomètres, le coût de transport de l'hydrogène dépasse largement la valeur de l'énergie qu'il véhicule. De plus, l'hydrogène peut fragiliser les pipelines en acier, sauf si l'on y incorpore des alliages coûteux ou si l'on modifie les conditions d'exploitation.

Une façon de résoudre ces problèmes est, dans les pipelines, de mélanger de l'hydrogène au méthane. Cette astuce permet de décarboner une partie du système en troquant une partie du gaz naturel par de l'hydrogène. Des expériences menées au Royaume-Uni et en France montrent que l'on peut transporter efficacement dans un gazoduc un mélange de 80 % de méthane et de 20 % d'hydrogène. Dans le cadre

STRATÉGIE 3 : TRANSPORT D'HYDROGÈNE SOUS D'AUTRES FORMES CHIMIQUES

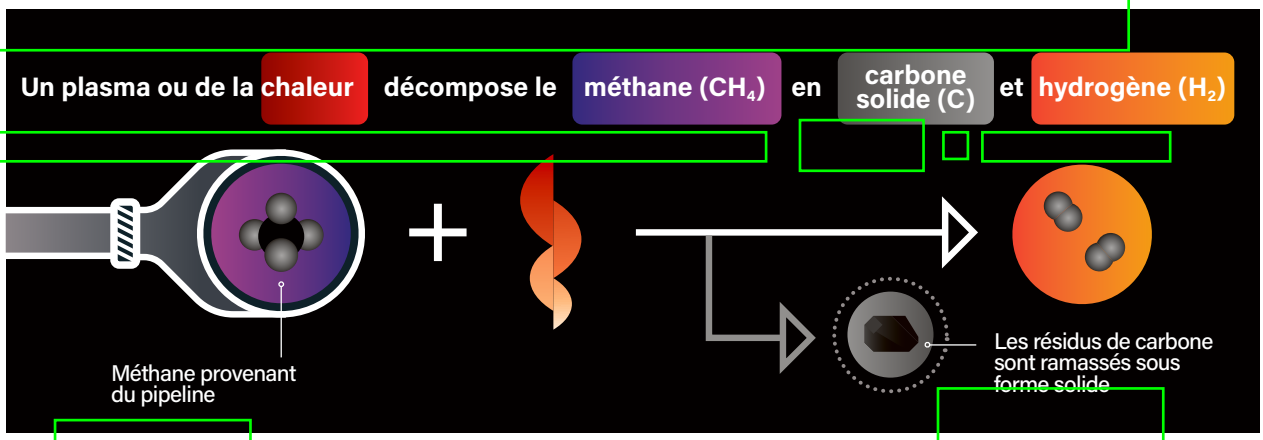
Les porteurs d'hydrogène sont des gaz ou des liquides qui contiennent des atomes d'hydrogène, comme l'acide formique (CH_2O_2), le méthanol (CH_3OH) ou le méthane (CH_4). Au lieu d'extraire le gaz naturel et de le brûler, ce qui produit du CO_2, des machines alimentées en électricité d'origine renouvelable captent le CO_2 de l'air ou de cheminées, puis le combinent avec de l'hydrogène pour former le porteur, qui est ensuite convoyé par des pipelines existants. Sa combustion relâche du CO_2, mais comme le carburant a été synthétisé à partir de CO_2 atmosphérique, les émissions nettes sont faibles.



© Dalaland et Jen Christiansen

STRATÉGIE 4 : EXTRAIRE LE CARBONE CHEZ LE CONSOMMATEUR

Le carbone pourrait être extrait du gaz naturel chez l'usager, en bout de réseau, plutôt que chez le fournisseur. Grâce au procédé de pyrolyse (un plasma – gaz chargé électriquement – ou la chaleur décompose les molécules de méthane), un appareil transforme le méthane en hydrogène gazeux pour le chauffage, les cuisinières et les machines industrielles, tandis que les résidus de carbone sont collectés. Ces déchets, évacués par l'usager lui-même ou par des professionnels, peuvent ensuite être vendus comme matière première pour des produits tels que des batteries ou des engrais.



d'une étude menée de mi-2018 à mars 2020, la ville de Dunkerque a utilisé un tel mélange pour alimenter 100 foyers et la chaudière d'un hôpital, sans ajouter le moindre équipement le long du gazoduc ou dans les bâtiments.

Les raccords des tuyaux d'alimentation en gaz des fours et des cuisinières, ainsi que les embouts de brûleurs, devront peut-être être modifiés ou remplacés pour les mélanges contenant plus de 20% d'hydrogène car, à l'instar de l'hydrogène pur, le mélange méthane-hydrogène brûle à des températures et des vitesses différentes. Il faut également tenir compte du fait qu'en raison de la faible densité énergétique de l'hydrogène, un mélange à 20% en volume fournit 14% d'énergie en moins que le gaz naturel.

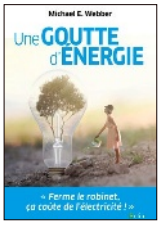
L'HYDROGÈNE DÉGUISÉ EN AMMONIAC

Une façon de contourner certains problèmes de coût et de sécurité consiste à intégrer l'hydrogène sous une autre forme chimique que nous savons manipuler, comme l'ammoniac (NH_3), dont la molécule comporte un atome d'azote et trois d'hydrogène. Les composés qui contiennent des atomes d'hydrogène sont appelés « porteurs d'hydrogène ». Sur le lieu d'extraction ou de production, l'hydrogène est intégré à son porteur, puis convoyé *via* pipeline. À destination, on peut l'utiliser sous cette forme ou le reconvertir en hydrogène.

Les porteurs classiques tels que l'ammoniac, l'acide formique et le méthanol sont liquides dans les conditions ambiantes, ce qui rend leur transport plus facile que l'hydrogène gazeux. Bien que l'ammoniac soit caustique (c'est-à-dire qu'il attaque les tissus organiques), on le transporte déjà dans le monde entier en tant qu'ingrédient d'engrais, et il brûle sans émettre de CO_2. Le méthane pourrait être l'option la plus efficace, car il transporte quatre atomes d'hydrogène par atome de carbone et est déjà compatible avec les tuyaux, compresseurs, réservoirs, turbines et appareils existants.

Les projets de démonstration se multiplient rapidement. Le constructeur industriel finlandais Wärtsilä est en train de concevoir un nouveau navire pour 2023, baptisé *Viking Energy*, qui fonctionnera à l'ammoniac avec des piles à combustible et s'épargnera les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants dont est responsable le secteur maritime. La compagnie Air France et l'aéroport de Paris-Charles-de-Gaulle s'intéressent de près à l'hydrogène comme moyen de décarboner l'aviation. Cependant, comme les porteurs d'hydrogène n'en sont encore qu'aux premiers stades de la recherche, il est difficile de prédire s'ils auront le succès escompté.

Des centrales électriques qui brûlent de l'hydrogène sont également à l'étude. À Delta, dans l'Utah, la centrale électrique Intermountain Power Plant, l'une des plus grandes centrales au charbon des États-Unis, alimente en électricité Los Angeles, située à des centaines de kilomètres. Pour répondre aux exigences à long terme de la ville en matière d'énergie renouvelable et à bas carbone, l'exploitant de la centrale remplacera en 2025 les chaudières à charbon par des turbines fonctionnant à l'hydrogène. Celles-ci commenceront par utiliser un mélange de 30% d'hydrogène et de gaz naturel, avant de passer à 100% d'hydrogène. L'hydrogène sera



À LIRE

L'auteur vient de publier : *Une goutte d'énergie* (Belin, 2021).

Dans ce livre, Michael Webber souligne l'interdépendance entre l'eau et l'énergie, et traite des solutions possibles pour bien gérer ces ressources naturelles.

© Datalands et Jen Christiansen

Nous disposons d'une infrastructure gazière massive, et il faut lui trouver une utilité

produit sur place par électrolyse, avec de l'électricité d'origine éolienne et solaire, et sera stocké dans plus de 100 cavités souterraines existantes, comparables en taille à l'Empire State Building, qui avaient été creusées lors de l'exploitation du sel.

PRODUIRE L'HYDROGÈNE À PARTIR DU MÉTHANE CHEZ L'USAGER ?

Autre possibilité : au lieu de décarboner le gaz naturel avant qu'il n'entre dans le pipeline, on pourrait retirer le carbone au bout du tuyau, au niveau du consommateur. Le méthane, par exemple, peut être décomposé chez l'usager en hydrogène et en carbone solide, qui ressemble à une fine poussière noire. Le procédé – la pyrolyse du méthane – est efficace et élimine les émissions de CO_2. Chaque kilogramme d'hydrogène produit selon cette technique engendre trois kilogrammes de carbone solide au lieu des neuf kilogrammes de CO_2 qui seraient émis si le méthane était brûlé.

On évacuerait une fois par mois environ le tas de poussière de carbone qui s'accumule à l'intérieur d'un collecteur dans une chaudière ou une cuisinière. Nous payons déjà des sociétés et les municipalités pour transporter et nettoyer nos déchets solides et liquides ; nous paierions également pour nettoyer les déchets provenant de notre consommation de gaz. Les résidus de carbone ont une valeur réelle, néanmoins, car on peut les vendre comme matière première pour la fabrication du graphite, du caoutchouc, de revêtements, de batteries et de produits chimiques, ainsi que comme fertilisant pour l'agriculture.

Bien que les ingénieurs étudient la pyrolyse du méthane depuis des décennies, la technique n'a été mise en œuvre que dans le cadre de petits projets de démonstration. Il sera nécessaire de modifier certains équipements en bout de canalisation pour séparer le carbone, mais aucun pipeline coûteux ne devra être construit, ce qui simplifie grandement les choses. La pyrolyse du gaz naturel usuel peut amener l'ensemble du réseau gazier à un taux d'émissions de carbone quasi nul. Avec l'ajout de méthane provenant de biodigesteurs ou produit à partir du CO_2 présent dans l'atmosphère à l'aide d'électricité d'origine renouvelable, le bilan des émissions en carbone pourrait même devenir négatif.

Imaginer l'un ou l'autre de ces avenirs décarbonés peut faire peur et laisser penser que de grands complexes industriels ou des millions de petits équipements individuels chez les consommateurs seront nécessaires. Mais il en va de même pour d'autres propositions visant à réduire les émissions de CO_2. L'électrification de chaque chauffage, cuisinière et véhicule nécessiterait un remplacement généralisé de technologie. Les projets visant à extraire directement le CO_2 de l'air réclameraient des millions de grosses machines pour capter ce gaz et le séquestrer, ce dont s'occuperaient des entreprises qui devront mobiliser de grandes surfaces et beaucoup d'électricité.

Le gaz décarboné nous permettrait de tirer parti des infrastructures et appareils existants, ce qui nous épargnerait d'énormes dépenses supplémentaires et nous laisserait davantage de temps pour créer un système énergétique sans émissions de carbone. Nous aurons, bien sûr, à réparer les fuites des infrastructures. Il est possible de réduire ces pertes en adoptant plusieurs mesures : remplacer des équipements pneumatiques par des dispositifs électriques sur les sites de forage, améliorer l'automatisation de l'inspection des conduites et des réservoirs grâce à des capteurs installés sur des drones et des robots, et rédiger des règlements qui ne ferment plus les yeux sur les fuites, ainsi que sur le largage et la combustion volontaires des surplus gaziers. Cet effort créerait des emplois pour les travailleurs des industries pétrolière et gazière et nettoierait l'infrastructure énergétique, ce qui, en retour, réduirait la pollution dans les agglomérations proches des installations énergétiques.

La maîtrise du changement climatique appelle à mettre en œuvre de nombreuses et diverses solutions. Déclarer quels acteurs ne peuvent y contribuer, comme les compagnies de gaz naturel, ne fait qu'augmenter la résistance au progrès. Le gaz décarboné étant susceptible de compléter l'électricité renouvelable et de représenter un chemin plus rapide, moins cher et plus efficace, pour les secteurs difficiles à électrifier, nous ne devrions pas écarter le gaz comme solution. Nous disposons d'une infrastructure gazière massive, et nous devons lui trouver une utilité. La démanteler serait un chemin lent, coûteux et incroyablement difficile, alors que cette infrastructure pourrait au contraire constituer un atout pour bâtir un avenir à bas carbone. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Gürsan et V. de Gooyert., **The systemic impact of a transition fuel : Does natural gas help or hinder the energy transition ?,** *Renewable and Sustainable Energy Reviews,*, vol. 138, article 110552, 2021.

J. Mertens *et al.*, **Why the carbon-neutral energy transition will imply the use of lots of carbon,** *Journal of Carbon Research*, vol. 6, article 39, 2020.

Pour la Science HORS-SÉRIE

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !



N° 112 (août 21)
réf. DO112



N° 111 (mai 21)
réf. DO111



N° 110 (fév. 21)
réf. DO110



N° 109 (nov. 20)
réf. DO109



N° 108 (sept. 20)
réf. DO108



N° 107 (mai 20)
réf. DO107



N° 106 (févr. 20)
réf. DO106



N° 105 (nov. 19)
réf. DO105



N° 104 (juil. 19)
réf. DO104



N° 103 (avr. 19)
réf. DO103



N° 102 (fév. 19)
réf. DO102



N° 101 (nov. 18)
réf. DO101

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR **BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR**

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

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

1e réf. 0 1 x 10,40 € = 1 0 4 0 €
2e réf. ..... x 10,40 € = ... €
3e réf. ..... x 10,40 € = ... €
4e réf. ..... x 10,40 € = ... €
5e réf. ..... x 10,40 € = ... €
6e réf. ..... x 10,40 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme
Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal ..... Ville : .....
Téléphone .....
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

Pour retrouver tous nos numéros et effectuer un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr

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

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Vingt mille lieues sous un crâne

Audrey Chagnot, Denis Vivien, Géraldine Rauchs

Dix ans de découvertes précisent notre compréhension des « mers » et « rivières » empruntées par le liquide céphalorachidien, qui baigne notre cerveau et notre moelle épinière. Et l'on s'aperçoit que ce fluide joue un rôle crucial tout au long de notre vie.





© Shutterstock.com/uboffke

Notre cerveau n'est pas collé à notre crâne. Il flotte dans un fluide. Environ 150 millilitres d'un liquide qu'on appelle le «liquide céphalorachidien» – ou LCR. On trouve ce LCR dans les grottes intérieures du cerveau, des cavités appelées «ventricules» (*voir la figure page 63*), mais aussi dans un autre espace, dit «sous-arachnoïdien». En effet, le cerveau est enveloppé de trois membranes, les méninges: la plus externe est la dure-mère, la médiane est l'arachnoïde, ainsi appelée parce qu'elle fait penser à une toile d'araignée, et la plus interne est la pie-mère. Entre l'arachnoïde et la pie-mère se situe un fin espace rempli de liquide céphalorachidien. Il maintient le système nerveux comme en «apesanteur», le soutient et l'empêche de s'effondrer sur lui-même sous l'effet de son propre poids.

UN LIQUIDE À LA FOIS NOURRICIER ET NETTOYANT

La fonction du LCR, toutefois, ne se limite pas à un rôle d'amortisseur. Il intervient aussi dans la transmission des neuromédiateurs (les molécules de communication entre cellules cérébrales) et le transport de substances nourricières, ainsi que dans le drainage et l'élimination des déchets cérébraux. Malgré tous ces échanges de substances, le LCR est toujours d'une propreté absolue, car il est renouvelé jusqu'à quatre fois par jour. Il joue ainsi un rôle vital pour tout l'organisme, en apportant aux cellules nerveuses tout ce dont elles ont besoin pour fonctionner et en évacuant les déchets produits.

D'où vient ce liquide? Par quels mécanismes subtils sont assurés sa circulation, ses mouvements internes et son élimination? Et comment est-il éliminé? Tout cela reste encore en grande partie méconnu. Mais, depuis une dizaine d'années, la communauté scientifique s'intéresse de très près à ces questions; et cet intérêt a été décuplé par la récente découverte du rôle déterminant que jouent de petits circuits d'écoulement autour des vaisseaux sanguins cérébraux, les espaces périvasculaires, ainsi qu'un réseau de vaisseaux lymphatiques dans les méninges, dans les processus de nettoyage des déchets produits quotidiennement par notre cerveau. Pour aborder ces questions, le mieux est de partir pour un voyage au fil de l'eau, ou plutôt du liquide céphalorachidien, jusqu'à la source des réponses...

Les premières mentions du LCR nous viennent du savant égyptien Imhotep il y a plus de 5000 ans. Les médecins grecs et romains, notamment Galien, décrivent alors l'architecture du système ventriculaire, mais croient que celui-ci est rempli d'une «vapeur» nommée «spiritus animalis». Cette théorie subsiste

L'ESSENTIEL

> Tout notre système nerveux baigne dans une mer intérieure composée de liquide céphalorachidien (ou LCR).

> Son rôle dans le fonctionnement des neurones et l'élimination des déchets cérébraux, et donc dans les fonctions cognitives, est vital.

> Les mécanismes de sa production, de sa circulation et de son évacuation du corps sont de mieux en mieux compris par les scientifiques.

LES AUTEURS



AUDREY CHAGNOT doctorante à l'institut Blood and Brain, à l'université de Caen-Normandie (BB@C) et à l'Inserm-PhInd



GÉRALDINE RAUCHS chargée de recherche dans les mêmes institutions



DENIS VIVIEN professeur de biologie cellulaire dans les mêmes institutions et praticien hospitalier au CHU Caen Normandie

pendant tout le Moyen Âge, faute de dissections permettant d'observer l'intérieur du crâne, et n'est remise en cause qu'à la Renaissance par de grands anatomistes italiens, comme Nicolò Massa et Domenico Cotugno. En 1842, c'est le Français François Magendie qui propose le terme de «liquide céphalorachidien» puis, en 1925, l'Américain Walter Cushing synthétise les connaissances de son époque sur les flux du LCR sous le nom de «troisième circulation» – après la première, celle du sang, et la deuxième, celle de la lymphe. Depuis, les connaissances sur ce système n'ont cessé de s'affiner. Et aujourd'hui, le liquide céphalorachidien, véritable mer intérieure du cerveau, apparaît comme un nouveau territoire à explorer.

D'où vient le LCR? Dans les ventricules cérébraux latéraux baignent d'étranges structures dont la forme rappelle celle d'algues flottantes (*voir l'encadré page 64*). Ce sont les plexus choroïdes, au nombre de quatre chez les humains comme chez la plupart des mammifères, qui extraient, à partir des vaisseaux sanguins les parcourant sur toute leur longueur, une partie de l'eau et des solutés qui forment le LCR.

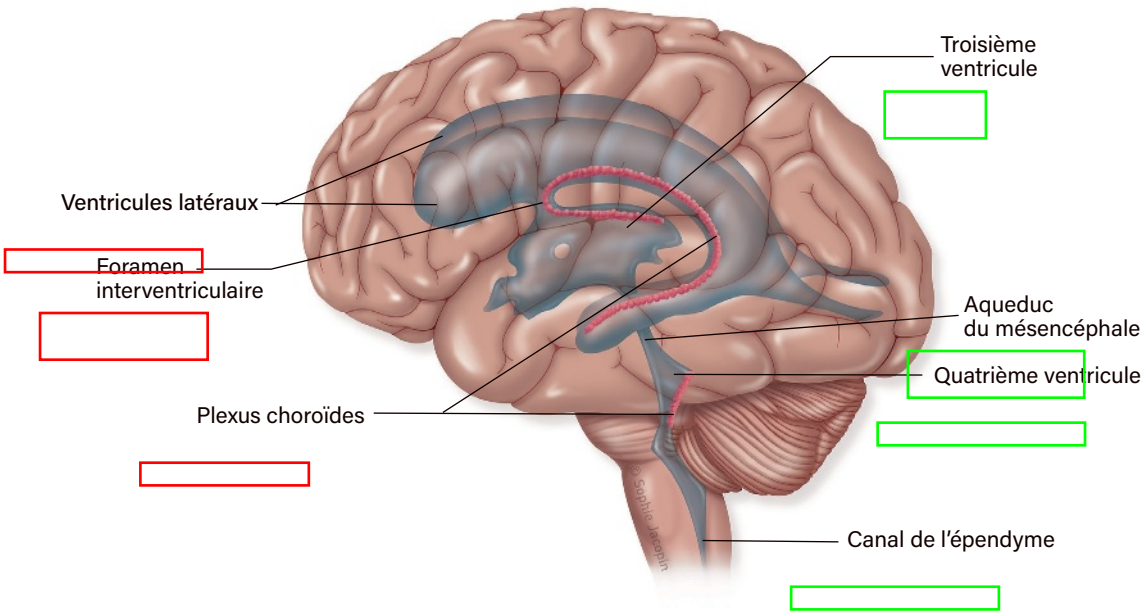
Ces organes hautement spécialisés produisent chaque jour environ un demi-litre de liquide céphalorachidien, dont la composition est proche de celle de l'eau de mer, enrichie de quelques nutriments. C'est l'architecture particulière des capillaires sanguins des plexus choroïdes, dont la paroi très perméable, dite «fenêtrée», facilite amplement les transferts depuis le sang, qui assure ce rythme de production soutenu. Une rareté dans le cerveau! En effet, la majorité des vaisseaux sanguins cérébraux sont renforcés par la barrière hématoencéphalique, qui évite toute intrusion de substances toxiques ou agents pathogènes, virus ou bactéries. Ici, sur la crête des plexus choroïdes, ce sont des macrophages, cellules spécialisées du système immunitaire qui patrouillent sans discontinuer et veillent à la sécurité de l'ensemble.

Cependant, la seule production du LCR ne suffit pas à le mouvoir le long du système ventriculaire. Sans l'intervention des cellules ciliées, alignées sur toute la surface interne des ventricules (encore appelée «épendyme»), le LCR stagnerait et s'accumulerait. Or les cellules ciliées brassent, telles de minuscules galériennes, le liquide céphalorachidien par leur rythme synchronisé et le guident dans sa progression dans le système ventriculaire, tout en l'enrichissant d'éléments supplémentaires. La contribution des cellules de l'épendyme n'a été reconnue qu'à la fin du XX^{e} siècle, et on estime même, aujourd'hui, qu'un cinquième du LCR serait produit par ce tissu.

MAELSTRÖMS VENTRICULAIRES

Depuis les deux ventricules latéraux, le LCR court ensuite vers le troisième ventricule en position centrale, puis vers le quatrième le long d'un «canal», l'aqueduc de Sylvius. C'est dans cette étroite rivière que le LCR atteint sa vitesse de pointe: une dizaine de centimètres par seconde.

Le LCR bat au rythme de notre cœur. La respiration, ainsi que la posture (debout ou allongée), affectent aussi les marées de ce liquide vital



Chez les humains comme chez la plupart des mammifères, le système ventriculaire se compose de quatre ventricules cérébraux – deux latéraux, le troisième et le quatrième – connectés les uns aux autres et débouchant dans l'espace sous-arachnoïdien. C'est dans ces lacs intérieurs que se trouvent les plexus choroïdes, responsables de la formation du LCR.

Les études d'imagerie cérébrale (*voir la figure page 67*) ayant permis de mesurer ces vitesses ont également révélé un autre phénomène: comme le ressac en bord de mer, le flux de LCR est en réalité un va-et-vient. Une observation qui semble de prime abord contradictoire avec sa production constante par les plexus choroïdes, mais dont l'explication est relativement simple. Le crâne étant un espace clos, toute variation de volume d'un compartiment se fait aux dépens des autres. Lorsque le cœur bat, il introduit à chaque systole (contraction) un nouveau volume de sang dans les vaisseaux cérébraux. Cette augmentation de volume est largement compensée par la sortie de sang *via* le système veineux, mais ces variations ont un impact sur les autres compartiments. Le LCR bat donc au rythme de notre cœur. La respiration, ainsi que la posture (debout ou allongée), affectent aussi les marées du liquide.

ZONES D'ÉCHANGES MARITIMES: LES ORGANES CIRCUMVENTRICULAIRES

De sorte qu'à une moindre échelle que dans l'aqueduc de Sylvius, l'ensemble du LCR est mis en mouvement par les rythmes cardiaques et respiratoires. Ces flux permettent le transport de solutés divers, nutriments, messagers ou déchets, secrétés par diverses parties du système nerveux.

En outre, éparpillées dans le système ventriculaire, se trouvent de petites zones ayant un lien bien particulier avec le LCR: les organes circumventriculaires. À l'instar des plexus choroïdes qui en font partie, les vaisseaux sanguins y sont plus perméables que partout ailleurs dans le cerveau. Cela assure des échanges renforcés entre sang et LCR, que ceux-ci servent à une sécrétion ou à la surveillance des composés du sang ou du LCR. Ainsi, il existe des zones dites «sensitives», comme l'organe subfornical, sensible à la salinité du sang, ou l'area postrema, qui peut déclencher le vomissement si des composés toxiques sont détectés dans le LCR...

De plus, des structures cérébrales sécrétrices d'hormones sont associées au LCR: la neurohypophyse, libérant l'hormone ocytocine impliquée dans l'attachement et le soin apporté à la progéniture, et la fameuse glande pinéale. Cette dernière, du fait de sa position centrale dans le cerveau, a jadis été présentée comme le siège de l'âme, notamment par Descartes. Même si cette théorie fait aujourd'hui sourire, la glande pinéale s'est révélée être, ironiquement, un vestige du «troisième œil» que possèdent encore certains lézards. Une structure qui, chez nos lointains ancêtres, était sensible à la lumière et régulait le cycle jour-nuit. Aujourd'hui, la glande pinéale a perdu cette sensibilité, mais garde son rôle régulateur en secrétant la mélatonine, l'hormone favorisant le sommeil. C'est donc la circulation du LCR dans tout le système nerveux qui favorise la dispersion de ces deux hormones, la mélatonine et l'ocytocine, essentielles à notre sommeil et à nos liens d'attachement.

RUINE ENGLOUTIE DE L'ÈRE EMBRYONNAIRE, LE CANAL DE L'ÉPENDYME

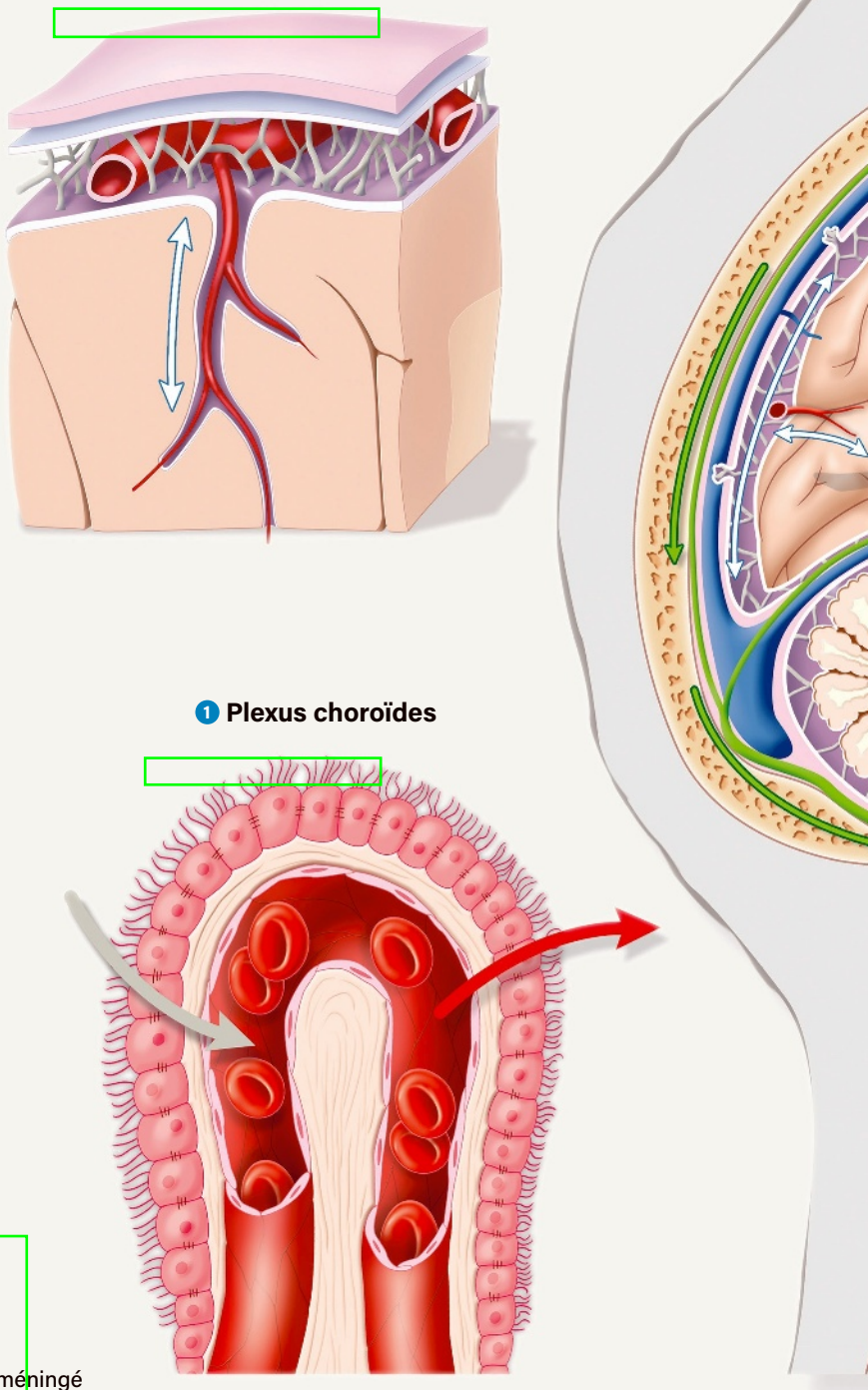
À la sortie du quatrième ventricule, le LCR se jette ensuite dans l'espace sous-arachnoïdien, une zone en périphérie du cerveau comprise entre les méninges. Il existe aussi une autre voie, plus ancienne et plus dérobée, qui court tout le long de la moelle épinière pour

© sophiejacopin.com

VOYAGE AU FIL DU LCR…

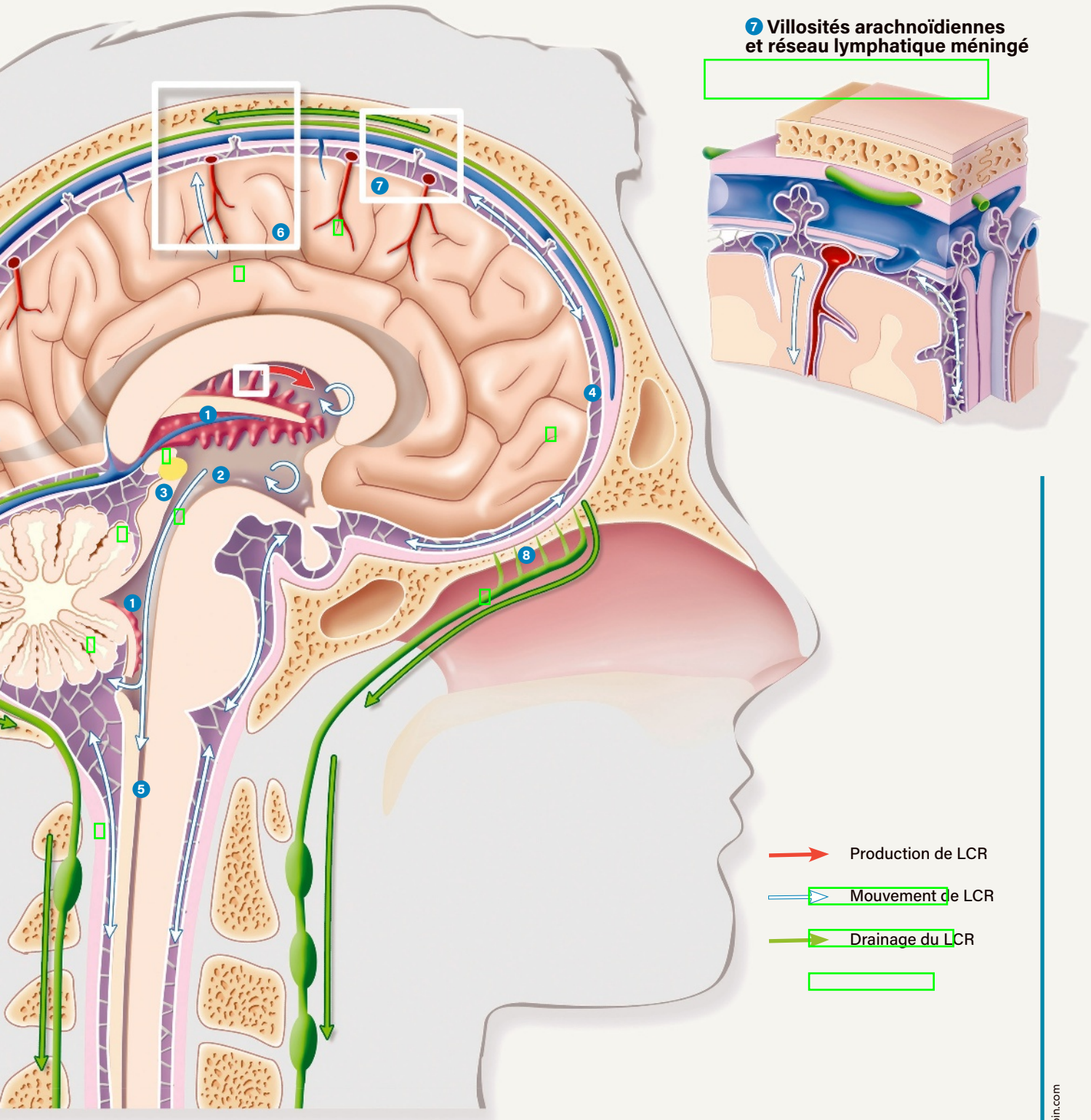
Le LCR prend sa source dans le système ventriculaire, où il est produit par les plexus choroïdes ❶ à partir du sang. S'écoulant le long des ventricules ❷, il y interagit avec diverses structures dont la glande pinéale ❸, écho archaïque de notre « troisième œil » impliqué dans la régulation du sommeil. Après un parcours tumultueux au rythme des battements du cœur et de la respiration, le LCR quitte les ventricules pour se jeter dans l'espace sous-arachnoïdien ❹, vaste océan baignant le pourtour de l'ensemble du système nerveux central. Le long de la moelle épinière court une voie annexe, le canal de l'épendyme ❺, relique du tube neural ayant joué un rôle majeur lors de l'embryogenèse. Au long de son trajet dans l'espace sous-arachnoïdien, le LCR peut se glisser dans les espaces périvasculaires ❻, de fines couches de liquide autour des vaisseaux sanguins assurant la communication avec les couches profondes du cerveau. Nichées dans les larges sinus qui surplombent le cerveau se trouvent de petites protrusions de l'espace sous-arachnoïdien, les villosités arachnoïdiennes ❼, par lesquelles l'excédent de LCR se jette dans le sang veineux pour y être évacué. Le réseau lymphatique méningé ❼, ainsi que les espaces périnerveux franchissant la lame criblée ❽, contribuent dans une moindre mesure à l'élimination du LCR vers la lymphe *(en vert)*.

❻ Espaces périvasculaires



❶ Plexus choroïdes

❶ Plexus choroïdes
❷ Système ventriculaire
❸ Glande pinéale
❹ Espace sous-arachnoïdien
❺ Canal de l'épendyme
❻ Espaces périvasculaires
❼ Villosités arachnoïdiennes et réseau lymphatique méningé
❽ Lame criblée



© sophiejacopin.com

COMMENT LE LCR NETTOIE LE CERVEAU

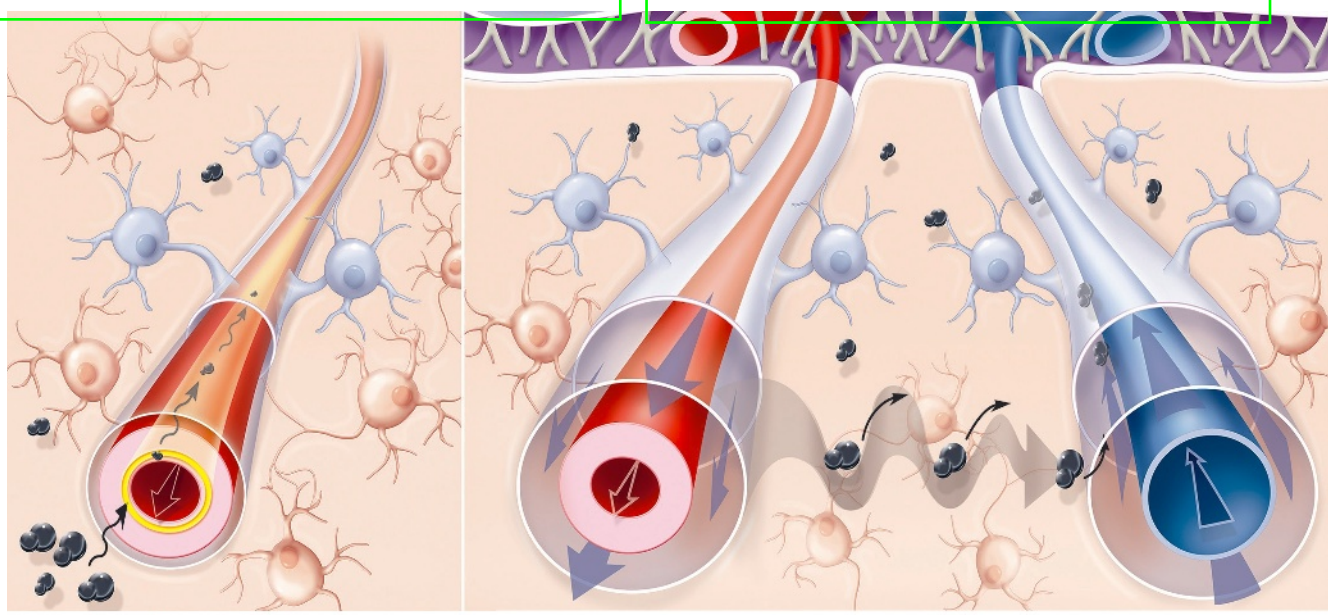
La plupart des déchets du cerveau sont rejetés dans le sang ou détruits par les cellules immunitaires qui le protègent. Mais certains chercheurs envisagent d'autres voies de nettoyage…

A. Le drainage intramural périartériel

Proposé par l'équipe de Roxana Carare en 2008, ce modèle suggère que certains déchets pourraient se lier chimiquement à la membrane basale de la paroi des artères, un réseau dense de liquide et de fibres intercalé entre les couches musculaires du vaisseau. Les contractions de l'artère ramèneraient les déchets vers les canaux lymphatiques à l'extérieur du cerveau, accompagnés d'une fraction de liquide.

B. Le système glymphatique

Proposée par l'équipe de Maiken Nedergaard en 2012, cette théorie suggère qu'un flux de liquide serait produit entre les espaces périartériel et périveineux, permettant ainsi un lavage en profondeur du cerveau. Si le rôle des espaces périvasculaires dans le drainage des déchets a été décrit depuis la fin du XX^{e} siècle, l'hypothèse d'un flux de liquide dans le tissu cérébral est de plus en plus contestée.



aboucher dans une sorte de cinquième et dernier ventricule: le canal de l'épendyme.

Cette route peu fréquentée est un vestige de ce qui a été, dans les tout premiers jours après la conception de l'embryon, le tube neural. De quoi s'agit-il? Trois semaines après la fécondation, l'embryon ressemble encore à une galette de la taille d'une tête d'épingle, parcourue par un renflement central: le tube neural. Il s'y trouve des cellules ciliées dont le battement joue un rôle crucial en transportant les facteurs de croissance destinés à guider le développement de l'organisme.

Puis, les parois du tube neural donnent progressivement naissance au système nerveux, le liquide situé au centre devenant le LCR. Chez l'adulte, le canal de l'épendyme est donc une ultime réminiscence de ce stade archaïque. À son extrémité caudale se trouve une connexion délabrée vers l'espace sous-arachnoïdien du rachis, mais la plus grande partie du LCR emprunte désormais les sorties du quatrième ventricule.

DANS LA MANGROVE SOUS-ARACHNOÏDIENNE

L'espace sous-arachnoïdien contient plus des trois quarts du LCR. Cet océan, qui baigne le système nerveux central, est délimité par l'arachnoïde, l'une des trois méninges avec la dure-mère, plus coriace et externe, et la pie-mère, une membrane délicate qui épouse les moindres contours du cerveau. De nombreux piliers membraneux traversent l'espace

© sophiejacopin.com

sous-arachnoïdien : des « trabécules élastiques » qui suspendent le système nerveux central dans son bain de LCR et permettent ainsi d'amortir les chocs et de maintenir le tissu mou et fragile du système nerveux en quasi-apesanteur.

C'est également dans cet espace que courent les vaisseaux sanguins avant de s'engouffrer dans le système nerveux central. Artères et veines, enrobées d'une fine couche membraneuse les séparant du LCR, forment une toile arborescente, plaquée contre le cerveau, d'où partent une multitude de vaisseaux pénétrants.

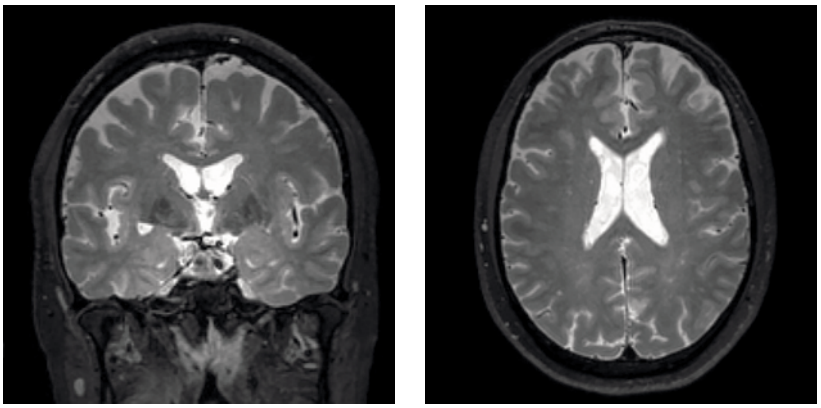
CHUTES DU BOUT DU MONDE

Entre les deux hémisphères s'allonge un énorme sinus veineux, vaste poche de sang dans laquelle se jettent les veines cérébrales qui ramènent le sang ayant irrigué les tissus cérébraux. L'espace sous-arachnoïdien s'étend également dans ce sinus en petites cavités nommées « villosités arachnoïdiennes ». Il s'agit d'un des sites majeurs de drainage et d'évacuation du LCR, qui permet d'en réguler la pression grâce à un système de valves anti-retour à l'échelle microscopique. Par les villosités arachnoïdiennes, l'excédent de LCR se jette dans le sang veineux pour y être évacué.

Les villosités arachnoïdiennes ne sont cependant pas la seule voie d'élimination du LCR. Le réseau lymphatique méningé remplit une fonction équivalente. Découvert en 1787 par l'Italien Paolo Mascagni, il est ensuite tombé dans l'oubli, avant d'être de nouveau observé simultanément par les équipes de Jonathan Kipnis et Kari Alitalo, en 2015. Passé inaperçu aux yeux des scientifiques pendant des siècles du fait de fortes variations interindividuelles, le réseau lymphatique méningé est, à l'instar du système lymphatique présent dans le reste de l'organisme, un ensemble de canaux spécialisés, destinés à ramener le liquide excédentaire des tissus vers le système veineux.

Le réseau méningé présente tous les aspects des vaisseaux lymphatiques « classiques » et s'étend au repos le long des gros vaisseaux. Cependant, en cas de traumatisme, choc ou accident vasculaire cérébral, il peut étendre sa superficie et ainsi contribuer à drainer le LCR, pour limiter l'augmentation de la pression intracrânienne.

D'autres voies moins importantes permettent d'évacuer directement une partie du LCR vers le système lymphatique. Par exemple, la lame criblée de l'ethmoïde, structure osseuse permettant le passage des nerfs olfactifs vers la cavité nasale, voit s'écouler une fraction du LCR vers la muqueuse olfactive, abondamment desservie par des vaisseaux lymphatiques. Peu développée chez les êtres humains, cette voie est cependant prépondérante chez les rongeurs dont la surface olfactive est plus importante. À noter que les tractus olfactifs parfois se résorbent, lors d'un rhume par exemple, ce qui perturbe le flux général de LCR.



L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une méthode pour observer l'intérieur du corps grâce à un puissant aimant et des ondes radio faisant vibrer le noyau des atomes. Le signal reçu provient surtout des molécules d'eau et change en fonction de leur état physicochimique. Grâce à ces propriétés, il est possible de distinguer le LCR *(en blanc)* du tissu cérébral. Le contraste de phase est un type d'IRM exploitant les propriétés d'encodage de la machine pour déceler des tissus ou fluides en mouvement par rapport au reste du corps et donner une approximation de leur vitesse et de leur sens de déplacement. Ainsi, cette technique est utilisée pour mesurer les flux de LCR, mais aussi les flux sanguins dans le cœur et les gros vaisseaux.

LES FLEUVES DU TISSU CÉRÉBRAL

C'est le Hongrois Michael Földi qui, en 1968, a découvert qu'un marqueur injecté dans le cerveau se retrouvait, quelques heures plus tard, dans les nœuds lymphatiques de la base du cou, ouvrant la voie à l'étude des liens entre cerveau et système lymphatique. Földi a également montré que le traceur quittait le cerveau en suivant le contour des vaisseaux sanguins. Pourtant, le traceur n'entrait jamais dans le sang ! Il s'agit donc d'une voie périvasculaire (située autour des vaisseaux), à laquelle l'Américaine Helen Cserr a ajouté les voies périnerveuses, le long des grands axes de fibres parcourant le cerveau. Ainsi, les solutés, sels minéraux, nutriments, neuromédiateurs, suivent ces voies de moindre résistance pour se déplacer.

De fait, il existe, autour des artères et veines pénétrant dans le cerveau, une couche de fluide communiquant avec l'espace sous-arachnoïdien : l'espace de Virchow-Robin. Ce compartiment se prolonge en profondeur par l'espace périvasculaire, avant de disparaître au niveau des capillaires. Il est formé grâce à des prolongements que certaines cellules chargées de l'entretien du système nerveux, les astrocytes, envoient au contact des vaisseaux. Ces « pieds astrocytaires » contribuent à la formation de la barrière hématoencéphalique et sont enrichis en aquaporine de type IV, une protéine canal perméable à l'eau qui facilite les échanges entre ces cellules et l'espace périvasculaire.

© Audrey Chagnot, Géraldine Rauchs et Denis Vivien

Dans cette fine couche de liquide, les macrophages périvasculaires, cousins de leurs homologues du sang, surveillent le passage. Véritables douaniers de la barrière hématoencéphalique, ils en régulent la perméabilité et préviennent les infiltrations de substances dangereuses, par exemple des virus.

SUR LA PISTE DES ARTÈRES : L'HYPOTHÈSE DU SYSTÈME GLYMPHATIQUE

C'est à ce niveau qu'interviendrait le système « glymphatique », qui joue le rôle du système lymphatique au niveau cérébral et dont l'activité repose sur les cellules gliales. Son existence a été proposée en 2012 par l'équipe de la Danoise Maiken Nedergaard. Selon cette hypothèse, un courant de liquide emprunterait les espaces périartériels, transiterait dans l'épaisseur du tissu cérébral et repartirait par les espaces périveineux en emportant avec lui les déchets cérébraux (*voir l'encadré page 66*). Le tout serait mû grâce aux pulsations des artères causées par les battements cardiaques. Une théorie élégante pour expliquer le nettoyage du cerveau, mais peu probable aux yeux de nombreux spécialistes…

En effet, le tissu cérébral forme une masse compacte, certes parcourue par l'espace entre les cellules (dit « interstitiel »), mais, en conditions normales, la pression générée par les artères ne suffit pas à pousser le liquide vers les veines. Un « problème technique » révélé par les observations d'autres chercheurs. En revanche, le rôle des espaces périartériels ne fait aucun doute. Plutôt qu'un courant circulant dans un sens spécifique, un brassage alternatif expliquerait les observations de l'équipe de Maiken Nedergaard.

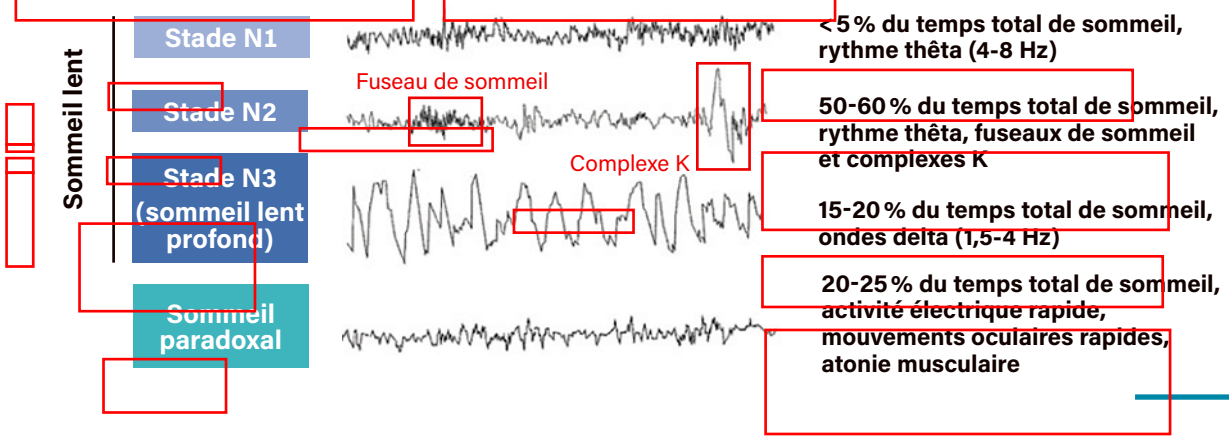
Un autre modèle, possiblement complémentaire, a été proposé par l'équipe de la Britannique Roxana Carare. Selon cette théorie, certaines substances seraient évacuées du cerveau dans la membrane des vaisseaux eux-mêmes. En effet, l'organisation en plusieurs couches des artères permet d'envisager que des molécules puissent se glisser dans les interstices et remonter jusqu'au système lymphatique…

DES MARÉES NOCTURNES QUI EMPORTENT LES DÉCHETS

De fait, la question de l'élimination des déchets du métabolisme cérébral par le LCR est pertinente pour un grand nombre de pathologies. Par exemple, c'est lui qui évacue le peptide bêta-amyloïde, un déchet produit par les neurones et dont l'accumulation augmente le risque de souffrir de la maladie d'Alzheimer. En effet, chez les patients, le peptide s'agrège sous forme de plaques qui ne peuvent plus être éliminées par ce système.

QUAND LE SOMMEIL RÉPARE L'ORGANISME

Le sommeil se compose de quatre stades qui diffèrent par leur activité électrique cérébrale, la présence ou non de mouvements oculaires et d'un tonus musculaire. On distingue ainsi le stade N1, correspondant à une phase de transition entre la veille calme et le sommeil confirmé. Ce stade représente moins de 5 % du temps total de sommeil (TTS). Vient ensuite le stade N2, caractérisé par la présence de fuseaux de sommeil et de complexes K, et qui occupe plus de la moitié de la nuit. Ces deux stades sont souvent regroupés sous le terme de « sommeil lent léger ». **Le sommeil lent profond, ou stade N3, est caractérisé par de grandes ondes amples appelées « ondes delta », très lentes et régulières. C'est lors de cette phase que les pulsations du liquide céphalorachidien augmentent et favoriseraient l'élimination des déchets nerveux et le nettoyage du cerveau. Enfin, le cycle de sommeil, d'une durée d'environ 90 minutes chez l'adulte, se termine par une phase de sommeil paradoxal qui doit son nom au fait que l'activité électrique du cerveau est comparable, voire supérieure dans certaines régions, à celle observée à l'éveil alors que le sujet dort profondément et que son tonus musculaire est aboli. Le dormeur présente également des mouvements oculaires rapides. C'est durant cette dernière phase de sommeil que surviennent la majorité des rêves.**



© Géraldine Rauchs

D'autres pathologies neurodégénératives, comme la chorée de Huntington ou la maladie de Parkinson, se traduisent aussi par des accumulations de déchets et seraient donc également concernées. En outre, de très nombreuses affections, comme les œdèmes cérébraux ou les hydrocéphalies, perturbent la bonne circulation du LCR et favoriseraient l'accumulation de produits toxiques.

Toutefois, il existe une condition dans laquelle ce nettoyage cérébral semble favorisé: le sommeil. Présent dans l'ensemble du règne animal, le sommeil a de nombreuses vertus liées notamment à la récupération physique de l'organisme et à la consolidation de la mémoire. Des études récentes montrent que le flux de LCR serait plus important lors du sommeil, tant par sa production au niveau des plexus choroïdes que par sa circulation dans les espaces périvasculaires. De plus, lors du sommeil lent profond (*voir l'encadré page ci-contre*), le cerveau présente des phases d'activité électrique très lente, très ample et régulière: on a montré que, lors de ces épisodes de sommeil lent profond, les pulsations parcourant le LCR voient leur amplitude multipliée par dix par rapport à l'éveil.

Ces données soulignent l'importance de la qualité du sommeil pour l'ensemble de l'organisme, qualité qui se dégrade très souvent au cours du vieillissement et dans de nombreuses maladies neurodégénératives. D'ici à dire qu'un sommeil de qualité protège contre ces pathologies, il n'y a qu'un pas… que certains chercheurs n'hésitent pas à franchir!

QUAND FRAPPE LE TSUNAMI : ŒDÈME CÉRÉBRAL ET HYDROCÉPHALIE

Malgré son haut degré d'organisation, de nombreux troubles peuvent atteindre le LCR. Certains, comme les méningites ou différentes maladies auto-immunes, sont la conséquence d'une invasion de ce fluide délicat par des bactéries ou des cellules immunitaires. D'autres affectent plus spécifiquement la régulation de l'eau dans le cerveau.

C'est le cas de l'œdème cérébral, qui correspond au gonflement du cerveau à cause d'une infiltration d'eau. Diverses maladies peuvent en être la cause, par exemple un accident vasculaire cérébral (AVC) ischémique. Dans ce trouble où la circulation sanguine est interrompue par un caillot, les cellules étouffent, faute d'oxygène. Ce qui se traduit, dans un premier temps, par la rupture de la barrière hématoencéphalique. L'eau provenant du sang emprunte aussitôt la brèche et inonde le tissu cérébral, créant un œdème dit «vasogénique». À plus long terme, les cellules agonisantes gonflent, et c'est l'œdème cytotoxique. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet de distinguer ces types d'œdèmes et aide au diagnostic de l'AVC.

Lors du sommeil profond, les pulsations parcourant le LCR voient leur amplitude multipliée par dix par rapport à l'éveil

L'hydrocéphalie, quant à elle, est provoquée par l'accumulation de LCR dans les ventricules. Certaines formes, dites «obstructives», sont dues à une occlusion du circuit ventriculaire. Dégager la voie permet habituellement de ramener la situation à la normale. D'autres formes, dites «communicantes», ne présentent pas d'obstruction apparente et peuvent être dues, par exemple, à un excès de production par les plexus choroïdes pour lequel il existe des traitements médicamenteux. En l'absence d'autre solution, la quantité de liquide accumulée est parfois telle que la pose d'une valve est nécessaire pour évacuer la pression.

En effet, pour l'œdème comme pour l'hydrocéphalie, la pression est le maître mot! Elle ne doit surtout pas écraser le tissu très fragile du cerveau. Parfois, lors d'hémorragies cérébrales, la pression doit être évacuée en urgence par un trou dans le crâne. Cette procédure, nommée «trépanation», est l'une des plus anciennes pratiques chirurgicales de l'humanité, comme l'attestent les nombreux crânes percés retrouvés dans le monde. Certains datent de plus de 10000 ans et la cicatrisation autour de l'incision semble même indiquer que les patients auraient survécu.

Le LCR fascine donc les scientifiques depuis des millénaires et ce n'est pas fini… Des découvertes fantastiques attendent encore, tapies au fond des abysses. En transportant les messagers moléculaires à travers l'ensemble du cerveau, ce liquide propose une vision plus globale de la communication entre neurones. Ses circulations sont même envisagées comme de nouvelles voies d'accès pour des médicaments et son rôle d'élimination des déchets laisse entrevoir de nouvelles pistes pour traiter les maladies neurodégénératives… ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Spector *et al.*, **A balanced view of the cerebrospinal fluid composition and functions, Focus on adult humans,** *Exp. Neurol.*, vol. 273, pp. 57-68, 2015.

N. A. Jessen *et al.*, **The glymphatic system : A beginner's guide,** *Neurochem. Res.*, vol. 40, pp. 2583-2599, 2015.

A. Louveau *et al.*, **Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels,** *Nature*, vol. 523, pp. 337-341, 2015.

R. O. Carare *et al.*, **Solutes, but not cells, drain from the brain parenchyma along basement membranes of capillaries and arteries : Significance for cerebral amyloid angiopathy and neuroimmunology,** *Neuropathol. Appl. Neurobiol.*, vol. 34, pp. 131-144, 2008.



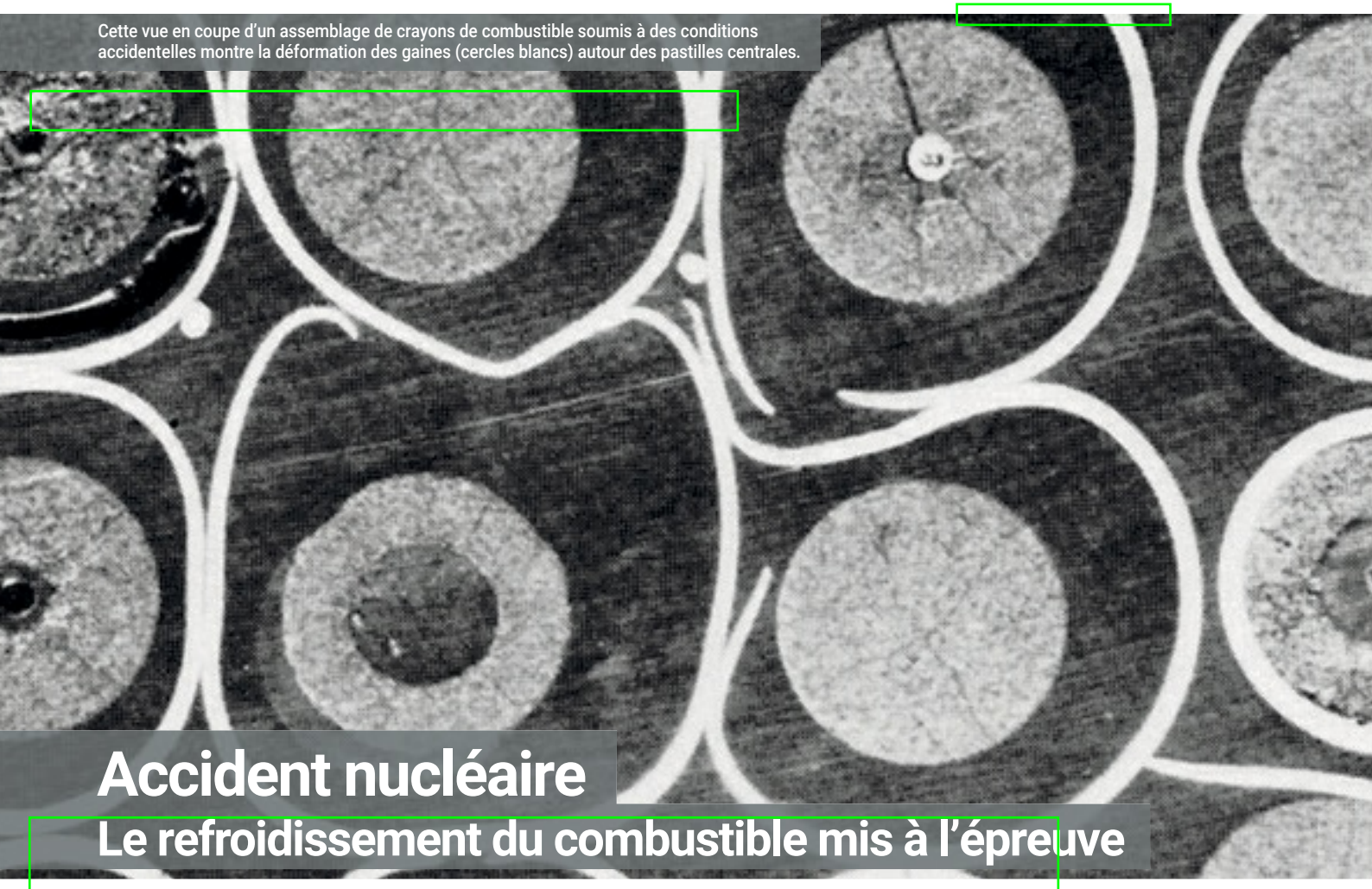
Tous les enfants font des rêves mais pour certains c'est vital de les réaliser.

Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves des enfants gravement malades.
Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie, nous avons besoin de vous.

Association Petits Princes

DON en CONFIANCE comitecharte.org

Devenez bénévole ou faites un don
www.petitsprinces.com - 01 43 35 49 00



Cette vue en coupe d'un assemblage de crayons de combustible soumis à des conditions accidentelles montre la déformation des gaines (cercles blancs) autour des pastilles centrales.

© Essai Phebus/IRSN

Accident nucléaire

Le refroidissement du combustible mis à l'épreuve

CONTEXTE

> La catastrophe de la centrale de Fukushima Daiichi en 2011 a remis la sûreté des centrales nucléaires au cœur des préoccupations. Elle a conduit à réexaminer l'efficacité des stratégies prévues en cas d'accident. En particulier de celles qui ont pour objectif d'éviter la fusion du cœur du réacteur. Le programme expérimental Perfroi lancé en 2014 et piloté par l'IRSN s'inscrit dans ce cadre.

Cahier partenaire réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

Dans le cœur d'un réacteur nucléaire accidenté, quand la température monte et la pression chute, les crayons de combustible peuvent se déformer. Leur refroidissement par les systèmes de secours est-il alors toujours efficace ? Pour le tester, un ensemble d'expériences, qui vont de l'étude de la déformation de ces crayons à des dispositifs qui reproduisent le comportement du combustible dans ces conditions dégradées, sont en cours.

Quand on évoque un accident de centrale nucléaire, on pense immédiatement à Three Miles Island, Tchernobyl, ou Fukushima, qui sont qualifiés de «graves», car ils ont conduit à la fusion du cœur d'un ou plusieurs réacteurs. Pour éviter d'en arriver là, c'est toute la séquence d'événements qui peut y mener qu'il faut maîtriser.

Parmi les divers scénarios possibles, le projet expérimental Perfroi, piloté par l'IRSN[1], s'intéresse à un type d'accident que les spécialistes désignent par le sigle APRP, pour Accident de Perte de Réfrigérant Primaire. Il recouvre les situations où une brèche affectant le circuit primaire du réacteur provoque une fuite (*voir infographie page suivante*). Dans un réacteur à eau sous pression, le circuit primaire assure la transmission de la chaleur dégagée par le cœur, où se produisent les réactions de fission nucléaire, aux générateurs de vapeur. L'eau y circule à une température moyenne d'environ 300 °C et à une pression de 155 bars. Une fuite de ce circuit de refroidissement entraîne donc une dépressurisation du circuit primaire et, pour les fuites importantes, un dénoyage du cœur qui conduit à une augmentation de la température des crayons de combustible. Aussitôt la dépressurisation détectée, le réacteur est automatiquement arrêté et une injection d'eau par des pompes de secours est mise en service : il faut en effet rétablir rapidement puis maintenir un niveau d'eau suffisant dans la cuve du réacteur pour assurer le refroidissement des crayons de combustible et éviter l'accident grave. >

> Deux critères sont à respecter impérativement dans les études de sûreté au niveau des crayons de combustible pour éviter leur fragilisation lors de cette phase, dite de renoyage, voire leur effondrement qui pourrait aboutir à un accident grave : une température maximale de 1204 °C associée à un taux d'oxydation maximal des gaines de l'ordre de 20 %.

Mais en dessous de ces limites, comment réagissent à ces conditions accidentelles les crayons qui contiennent les pastilles de combustible dans le cœur du réacteur ? Comment résiste la gaine de ces crayons qui garantit le confinement du combustible irradié et des gaz de fission produits lors des réactions nucléaires et qui constitue à ce titre la première barrière de confinement du réacteur ? *(voir infographie ci-dessous)*. Faute d'être suffisamment refroidie alors qu'elle est soumise à des variations de pression, elle peut se déformer jusqu'à éclater. Georges Repetto, responsable du projet Perfroi, explique pourquoi : *« Au sein des crayons, la pression est d'environ 100 bars. La cuve du réacteur, elle, est pressurisée à 155 bars. Une brèche sur le circuit de refroidissement fait chuter la pression, et si la taille de la brèche est très importante, on peut passer très rapidement de 155 à 3 bars. Résultat, sous l'effet de sa pression interne plus forte, la gaine gonfle comme un ballon de baudruche. De plus avec la chute de pression, l'eau se vaporise. Le matériau de gainage, normalement à 350 °C, monte alors en température : il peut atteindre entre 600 et 900 °C et perdre ses propriétés mécaniques. »*

Le scénario varie donc selon la taille initiale de la brèche. Le cas d'une dépressurisation quasi immédiate à 3 bars est extrême, puisqu'il correspond à une rupture de la canalisation du circuit primaire sur toute sa section (0,8 mètre) et n'a jamais eu lieu. À l'autre bout du spectre, le cas d'une toute petite brèche de quelques centimètres seulement doit également être examiné pour vérifier que les systèmes de contrôle de la centrale permettent de gérer la situation. Entre ces deux extrêmes, toutes les tailles de brèche doivent être envisagées car elles peuvent chacune poser des problèmes spécifiques différents.

DÉFORMATION EN BALLONS

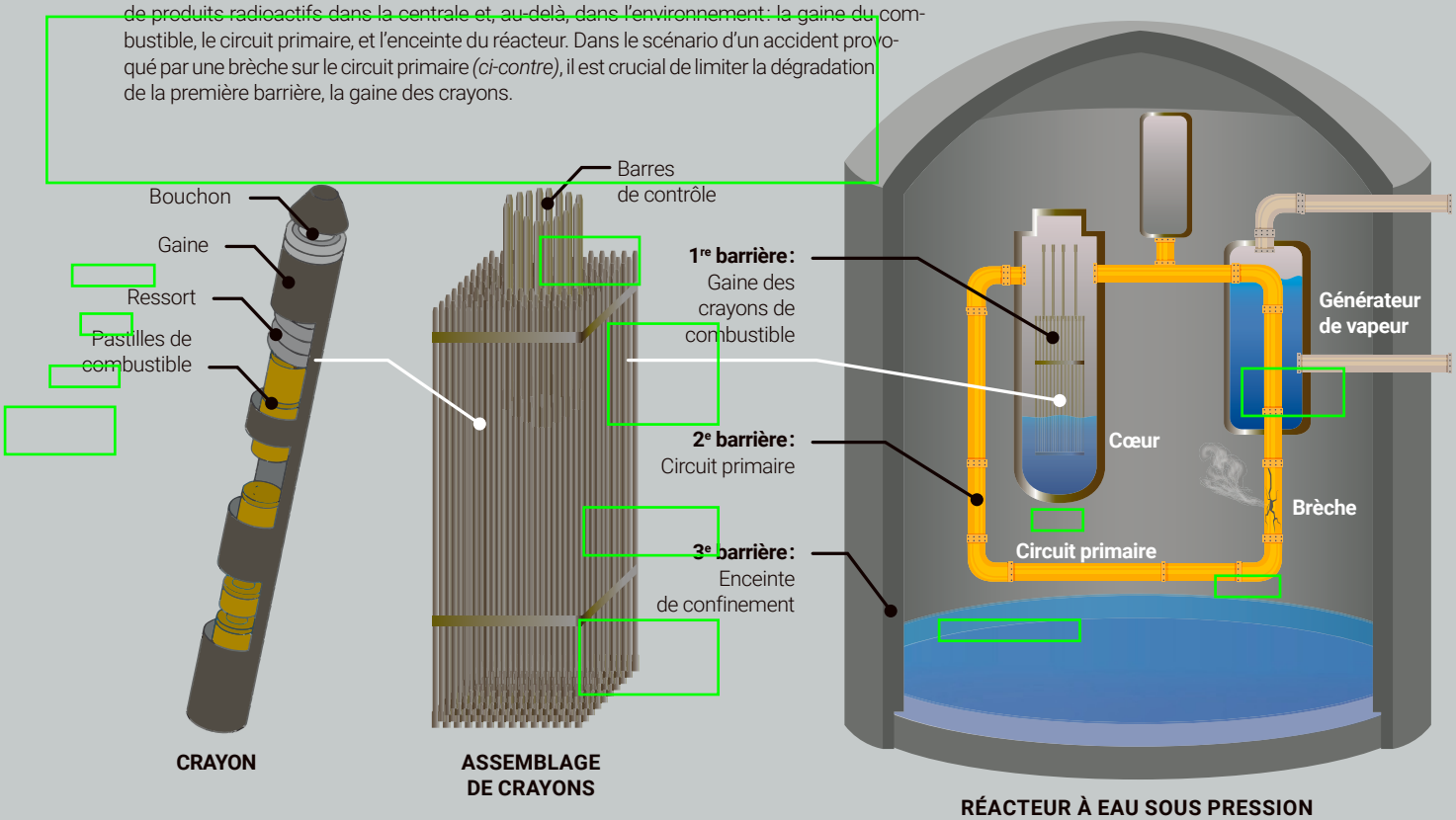
Ce sont ces situations que le projet PERFROI cherche à explorer pour anticiper l'évolution de la gaine des crayons. Car même si celle-ci ne va pas jusqu'à éclater, la déformation en *« ballons »* a des conséquences sur le refroidissement du cœur du réacteur. Premièrement, cette configuration de crayons gonflés peut empêcher l'eau injectée par les systèmes de secours de bien circuler – on parle de *« bouchage »* –. Deuxièmement, les pastilles de combustible, irradiées et fragmentées, peuvent se redistribuer par gravité dans ces ballons et augmenter localement la puissance thermique résiduelle.

Est-il alors encore possible de les refroidir efficacement ? Jusque-là, on se fondait essentiellement sur des résultats expérimentaux obtenus dans les années 1980 par la communauté internationale. Ces résultats avaient montré que le taux de *« bouchage »* maximal atteint était de 90 % et que même dans ce cas extrême, l'eau circulait. Mais il y a une quinzaine d'années, l'analyse exhaustive de l'état des connaissances menée par l'équipe de l'IRSN a révélé les limites de ces programmes expérimentaux. L'analyse pointait en particulier le fait que la source de chaleur électrique placée au centre des crayons expérimentaux pour reproduire la puissance thermique résiduelle n'était pas en contact avec la gaine, alors que c'est le cas dans un crayon irradié, et ne permettait pas de simuler correctement l'inertie thermique de ce crayon. Elle soulignait également un autre manque important : la surpuissance locale liée à la relocalisation du combustible fragmenté dans la gaine déformée, qui peut être d'un facteur 1,5, n'était pas prise en compte.

Depuis cet état des lieux, l'IRSN a cherché à répondre aux questions restées ouvertes : quel est réellement le taux de bouchage maximal ?

LES TROIS BARRIÈRES

Dans un réacteur à eau pressurisée, trois barrières sont prévues pour empêcher la dissémination de produits radioactifs dans la centrale et, au-delà, dans l'environnement : la gaine du combustible, le circuit primaire, et l'enceinte du réacteur. Dans le scénario d'un accident provoqué par une brèche sur le circuit primaire *(ci-contre)*, il est crucial de limiter la dégradation de la première barrière, la gaine des crayons.



Est-il acceptable ? Quel est l'impact de la relocalisation du combustible fragmenté ? Pour cela, l'équipe de Georges Repetto a proposé un nouveau programme expérimental.

Mais face au coût onéreux des dispositifs à mettre en œuvre, l'IRSN a d'abord opté pour une approche de modélisation numérique. Ainsi, à partir de 2006, a été développé le code de calcul Draccar qui décrit l'ensemble des phénomènes en jeu : de la déformation des crayons jusqu'aux échanges thermiques lors de la phase dite « de renoyage » – c'est-à-dire la phase d'injection d'eau de secours – dans des configurations de crayons déformés. Reste que les expériences sont nécessaires pour calibrer et valider ces modèles. C'est tout l'enjeu du projet PERFROI.

PREMIERS TESTS THERMOMÉCANIQUES

Le premier volet expérimental a démarré en 2014. Il était d'abord indispensable de connaître précisément l'évolution des propriétés mécaniques du matériau. C'était l'objectif de l'expérience Elfe qui a permis de mesurer la résistance mécanique et établir les lois de fluage et les critères de rupture sur des échantillons de 10 centimètres de long de zircaloy – matériau qui constitue la gaine du combustible – soumis à des température allant de 600 à 900 °C. Autant de données nécessaires pour dimensionner l'étape suivante, l'expérience Cocagne, réalisée, elle, de 2016 à 2020 (*voir photo et légende ci-contre*).

Cette fois, le dispositif testait la déformation d'un tronçon de crayon, un tube de gaine de 60 centimètres. Pour une pression interne donnée, chaque test a suivi le gonflement du crayon jusqu'à sa rupture en faisant monter la température jusqu'à 1 000 °C. Vingt-cinq tests, allant de 20 à 100 bars, ont été menés. Et pour la première fois, grâce à un système de contraintes internes exercées sur la paroi du crayon, ce dispositif permettait de simuler les contacts avec les crayons voisins déformés pour évaluer leur impact sur la longueur et la forme finale du ballon et par conséquent sur le taux de bouchage.

Les analyses définitives sont attendues pour la fin 2021, mais deux résultats importants ont déjà été présentés en avril 2021. Le premier confirme que le taux de bouchage n'excède pas les 90 %. Le deuxième est plus inattendu : aucune des vingt-cinq expériences ne montre de déformation axiale privilégiée liée aux contacts avec les crayons voisins. On prévoyait que cela aurait pour effet d'allonger les parties gonflées du crayon et ce n'est pas le cas. Les ballons entravent moins qu'attendu l'écoulement de l'eau.

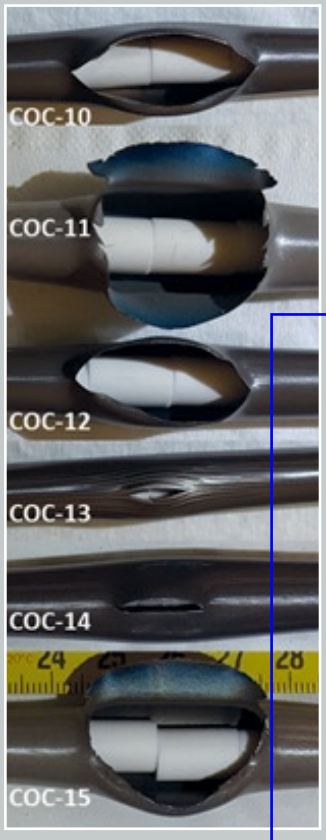
Entre-temps, le deuxième volet du projet, l'expérience Coal qui reproduit la phase de « renoyage » des crayons de combustible proprement dite, a démarré en octobre 2020 dans une installation de Stern Laboratories, au Canada. L'eau est injectée dans un assemblage de quarante-neuf (7x7) crayons expérimentaux de 3 mètres de long, toujours chauffés électriquement, mais en prenant en compte les analyses des expériences menées depuis 2006, afin d'améliorer les modèles expérimentaux pour reproduire correctement l'inertie thermique des crayons.

La toute première campagne d'essai a d'abord mis en jeu une géométrie de référence de crayons tous intacts. Des essais ont été réalisés avec une pression du fluide de 2 à 30 bars. Les premiers résultats valident globalement les calculs du logiciel Draccar pour les plus hautes pressions, de 10 à 30 bars. En revanche, ils montrent que, pour les pressions les plus basses, entre 2 et 10 bars, l'outil de simulation numérique a tendance à accélérer le renoyage, il devra donc être améliorer à l'avenir.

Ensuite, pour reproduire une zone de cœur de réacteur partiellement bouchée, seize crayons de l'assemblage sont déformés avant le test. La géométrie de l'assemblage des crayons déformés (taux de bouchage, longueur des ballons) est donc fixée au préalable. Au moment de l'injection d'eau, une surchauffe locale dans la zone déformée est maintenue pour tenir compte de l'effet de relocalisation du combustible fracturé par l'irradiation, le fameux facteur 1,5.

Puis, dans cette configuration donnée, on fait varier les paramètres de manière à simuler différentes tailles de brèches du circuit primaire : la pression (de 2 à 30 bars), le débit d'injection de l'eau (de 17 à 80 $kg.s^{-1}.m^{-2}$), la puissance résiduelle dans les crayons (de 2 à 3,3 kilowatts par crayon). Vingt-cinq à trente essais sont nécessaires par campagne pour couvrir l'ensemble des scénarios retenus.

Les deux autres campagnes vont tester deux géométries de crayons ballonnés, reproduisant respectivement un taux de bouchage de 80 % avec des ballons de 10 centimètres de long et un taux de bouchage de 90 % avec des ballons de 30 centimètres. La dernière simule le maximum de déformation et de bouchage, autrement dit, le pire des cas. Et l'on sait déjà que cette configuration majore largement les déformations en ballons, puisque selon les essais de l'expérience Cocagne, leur longueur ne dépasse jamais les 10 centimètres. La deuxième campagne s'est déroulée en juin et juillet 2021, les analyses sont en cours, et la troisième aura lieu en fin d'année. L'ensemble des résultats servira à valider et améliorer le code de simulation numérique Draccar, qui pourra alors être utilisé avec un niveau de confiance accru pour mener des études de sûreté d'autres séquences accidentelles susceptibles d'affecter un réacteur nucléaire. ■



ESSAIS SUR TUBE

Lors de l'expérience Cocagne, chaque test consistait à suivre la déformation mécanique d'un tube de gaine de combustible de 60 centimètres de long chauffé jusqu'à 1000 °C, pour une pression interne donnée. Et ce jusqu'à la rupture de la gaine. Sur ces images, figurent les résultats de six des vingt-cinq tests.
Les images 11 et 15 montrent particulièrement l'éclatement du « *ballon* » de quelques centimètres de long formé par gonflement du crayon.
D'ailleurs, dans l'ensemble de ces résultats, la longueur des ballons ne dépasse jamais les 10 centimètres.

RÉFÉRENCES

> C. Domínguez , *Journal of Nuclear Materials*, vol. 511, p 446-458, 2018.

> T. Glantz *et al.*, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 339, p 269-285, 2018.

> G. Repetto *et al.*, *19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19)*, Bruxelles, Belgique, 6 au 11 Mars 2022.

(1) Ce projet a été financé dans le cadre du projet RSNR (Recherche en matière de Sûreté Nucléaire et de Radioprotection) géré par l'Agence nationale de la Recherche (ANR), avec la participation de l'USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission), de KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) et d'EDF.

L'ESSENTIEL

> En 1955, à Los Alamos, aux États-Unis, eut lieu la première expérience numérique, dite « de Fermi-Pasta-Ulam » en l'honneur des trois physiciens qui l'ont réalisée : Enrico Fermi, John Pasta et Stanislaw Ulam.

> Cette expérience devrait pourtant être « de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou », en l'honneur de la jeune informaticienne, Mary Tsingou, qui conçut l'algorithme sur lequel la simulation reposait, le coda et fit tourner l'ordinateur.

> L'expérience a été l'un des points de départ d'un fort engouement pour la physique hors équilibre, dont les répercussions sont encore nombreuses aujourd'hui.

L'AUTEUR



THIERRY DAUXOIS
directeur de l'institut de physique du CNRS, directeur de recherche au CNRS au sein du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon

Mary Tsingou
dans l'ombre de la première expérience numérique

Embauchée dans les années 1950 à Los Alamos pour effectuer des calculs à la main, la mathématicienne, aujourd'hui tombée dans l'oubli, était pourtant une pionnière en programmation.

La programmation de la toute première expérience numérique, dite « de Fermi-Pasta-Ulam », a été effectuée par une jeune femme nommée Mary Tsingou, dont le nom a été malencontreusement oublié. Après plusieurs années de recherches infructueuses, il m'a été possible de retrouver sa trace, tout près du lieu de ses premiers travaux.

Cette simulation numérique est d'une importance capitale en physique non linéaire. Il est temps de faire réapparaître le nom de Mary Tsingou, écrit à l'encre sympathique sur l'article fondateur, comme nous allons le voir.

LE PROBLÈME DE FERMI-PASTA-ULAM

D'abord décrit dans un rapport classifié de Los Alamos en mai 1955, le problème de Fermi-Pasta-Ulam est souvent considéré comme le point de départ d'un nouveau domaine, la physique non linéaire ; mais c'est aussi la toute première expérience numérique. L'idée était de simuler l'analogue unidimensionnel d'atomes dans un cristal : une longue chaîne de masses reliées par des ressorts qui obéissent à la loi de Hooke.

Cette loi modélise de façon linéaire le comportement de systèmes élastiques soumis à des contraintes en stipulant que leur déformation – ici l'allongement des ressorts – est proportionnelle à la force exercée. On considère par ailleurs qu'il n'y a aucune perte d'énergie : les masses oscillent dans une seule direction et sans frottements.

Dans cette configuration, lorsque l'on excite la chaîne selon un certain mode de vibration, l'énergie associée à ce mode reste stable, car elle n'est pas transmise aux autres modes de vibration. Mais l'idée était ici de s'approcher de conditions réelles en ajoutant une composante non linéaire au dispositif, c'est-à-dire un faible terme non linéaire signifiant que la réaction des ressorts n'est plus proportionnelle à la force exercée. Dans ce cas, un transfert d'énergie est possible entre les modes.

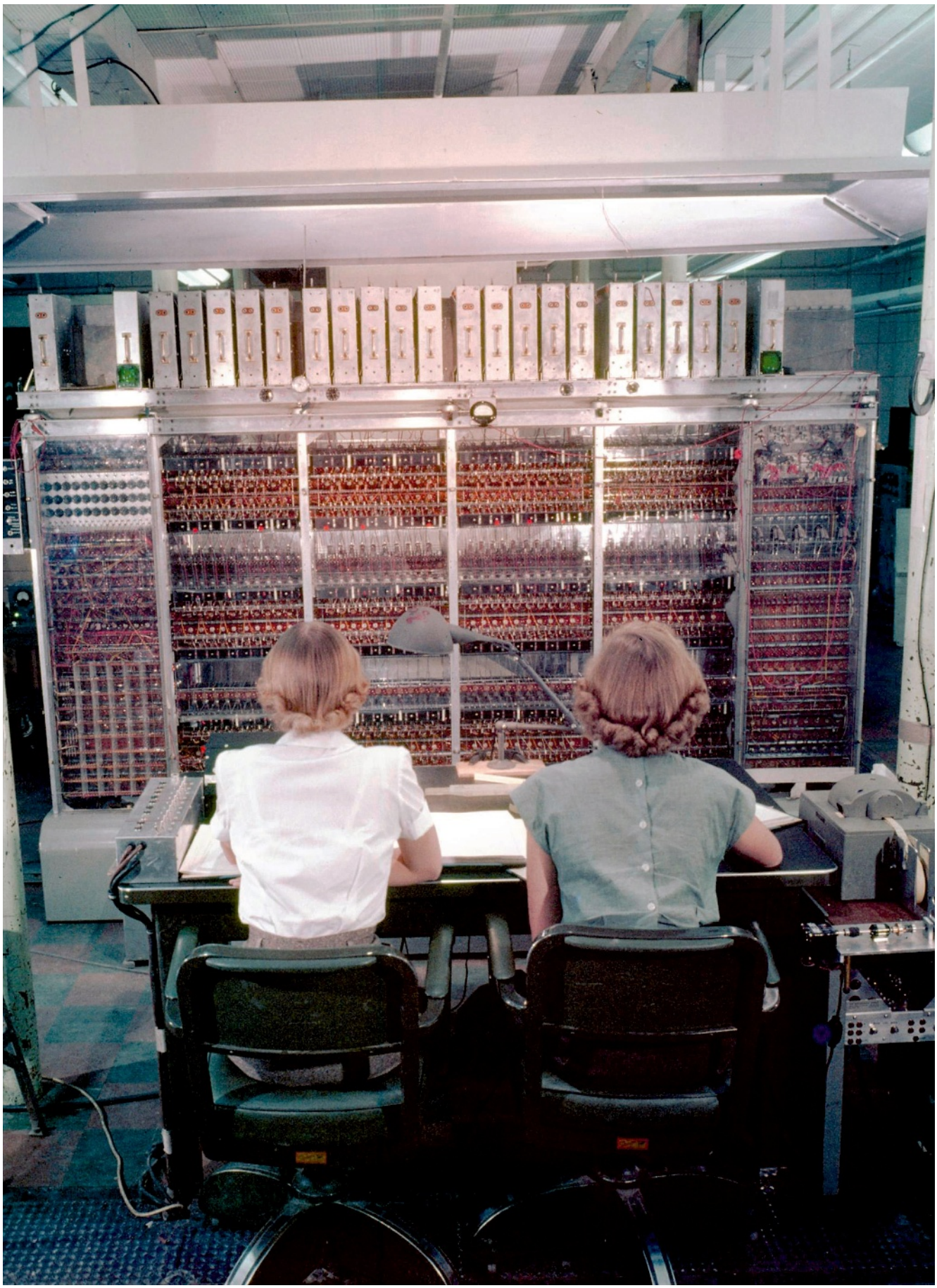
Dans certaines conditions, cependant, ce système dans sa version faiblement non linéaire présente un comportement surprenant : il n'évolue pas vers l'équipartition de l'énergie entre les modes de vibration prévue par la physique



MARY TSINGOU

En 1952, avec d'autres jeunes mathématiciennes, Mary Tsingou *(ici en 1955)* fut embauchée comme calculatrice à Los Alamos. On lui proposa vite d'apprendre à utiliser un nouvel ordinateur, le *Maniac I*, construit dans le cadre du projet Manhattan *(ci-contre)*.

© Mary Tsingou (ci-contre) ; © Cyril Frésillon/CNRS Photothèque (photo de l'auteur)



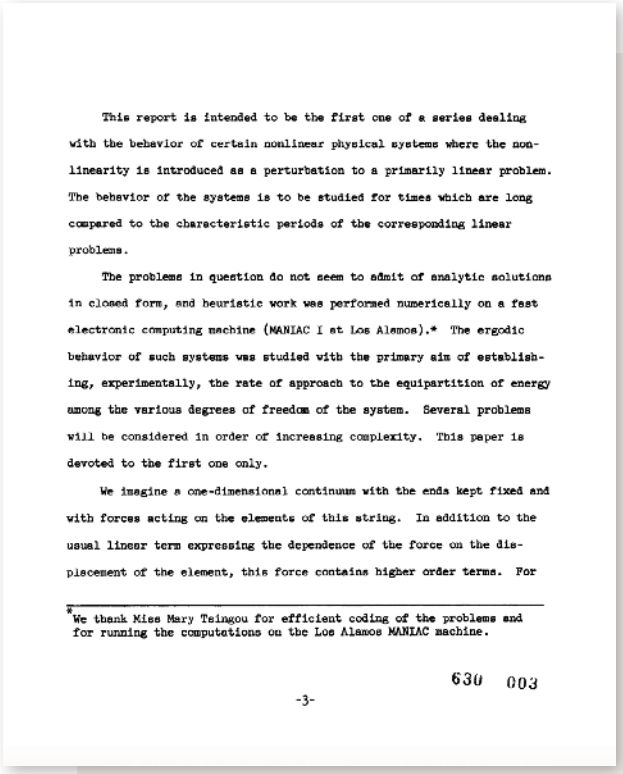
© Science History Images / Alamy Stock Photo

statistique à l'équilibre, mais retourne périodiquement vers la situation de départ (*voir la figure page 79*). Ce résultat tout à fait remarquable, connu sous le nom de paradoxe de Fermi-Pasta-Ulam, montre que la non-linéarité ne suffit pas à garantir l'équipartition de l'énergie.

Dans les années 1960, à la recherche de la solution du paradoxe de Fermi-Pasta-Ulam, les physiciens américains Norman Zabusky et Martin Kruskal ont examiné le problème dans l'espace réel plutôt que dans l'espace des modes de vibration (l'espace de Fourier). Cela leur a permis de reproduire et d'expliquer le comportement périodique grâce à la dynamique d'excitations non linéaires et localisées spatialement, que l'on connaît de nos jours sous le nom de « solitons ».

Ces ondes localisées, ou solitaires, auxquelles on peut associer des propriétés de particules (d'où le suffixe « -on », que les deux physiciens ont justement proposé dans leur article) ont de nombreuses applications physiques et constituent aujourd'hui un champ d'étude à part entière. Il couvre non seulement les tsunamis (un mot d'origine japonaise dont la signification, « vague dans le port », traduit très bien son aptitude à détruire) mais aussi la capacité de transmettre de l'information à très haut débit dans des fibres optiques, en passant par de nombreuses autres applications physiques.

Une autre ligne de recherche issue du paradoxe de Fermi-Pasta-Ulam, développée parallèlement aux travaux sur les solitons, s'est plus particulièrement focalisée sur la dynamique du mode de vibration de départ. En particulier,



This report is intended to be the first one of a series dealing with the behavior of certain nonlinear physical systems where the nonlinearity is introduced as a perturbation to a primarily linear problem. The behavior of the systems is to be studied for times which are long compared to the characteristic periods of the corresponding linear problems.

The problems in question do not seem to admit of analytic solutions in closed form, and heuristic work was performed numerically on a fast electronic computing machine (MANIAC I at Los Alamos).* The ergodic behavior of such systems was studied with the primary aim of establishing, experimentally, the rate of approach to the equipartition of energy among the various degrees of freedom of the system. Several problems will be considered in order of increasing complexity. This paper is devoted to the first one only.

We imagine a one-dimensional continuum with the ends kept fixed and with forces acting on the elements of this string. In addition to the usual linear term expressing the dependence of the force on the displacement of the element, this force contains higher order terms. For

*We thank Miss Mary Tsingou for efficient coding of the problems and for running the computations on the Los Alamos MANIAC machine.

630 003

-3-

L'algorithme mis au point par Mary Tsingou pour coder la première expérience numérique et retrouvé dans sa cave *(à droite)*. Dans le rapport de cette expérience publié en 1955, cependant, Mary Tsingou n'apparaît que dans une note de remerciement *(ci-dessus)*.

LES PHÉNOMÈNES HORS ÉQUILIBRE, AU CŒUR DE NOTRE MONDE

L'expérience numérique de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou peut être considérée comme l'un des points de départ d'un engouement très fort pour la physique hors équilibre, discipline toujours féconde aujourd'hui. La physique statistique s'est logiquement d'abord intéressée à l'équilibre, qui permet déjà d'expliquer de nombreux phénomènes ; mais le fait même que l'équilibre puisse être atteint n'est pas si évident, même pour des systèmes simples comme l'a montré l'expérience numérique de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou. Il n'est pas étonnant qu'Enrico Fermi se soit posé cette question puisque, à l'âge de 17 ans, il avait lu puis prolongé certains travaux du mathématicien Henri Poincaré, avant de développer à 25 ans la statistique à l'équilibre pour les particules quantiques connues maintenant sous le nom de « fermions ».

Aujourd'hui encore, cette problématique de la relaxation vers l'équilibre est au cœur de la physique. Il est désormais bien établi que les systèmes physiques avec des interactions à longue portée peuvent avoir des temps de relaxation gigantesques, voire ne pas relaxer vers l'équilibre sur des temps physiquement pertinents. Les systèmes gravitationnels, les fluides géophysiques, les lasers en interaction avec des particules appartiennent à cette catégorie. Cela permet de comprendre pourquoi, alors que les forces gravitationnelles et électromagnétiques sont centrales dans les cours de licence ou de classes préparatoires, elles ne sont pas traitées dans la majorité des cours et livres de mécanique statistique.

Les verres forment une deuxième catégorie de systèmes présentant des relaxations vers l'équilibre très lentes. Leur paysage énergétique est extrêmement ramifié et complexe, et explique vraisemblablement leur rigidité. Leurs descriptions dans le cadre de la physique statistique peuvent être aussi considérées comme des modèles pour l'étude des protéines où les questions aussi fondamentales que le désordre, la réponse non linéaire et la relaxation vers l'équilibre sont cruciales.

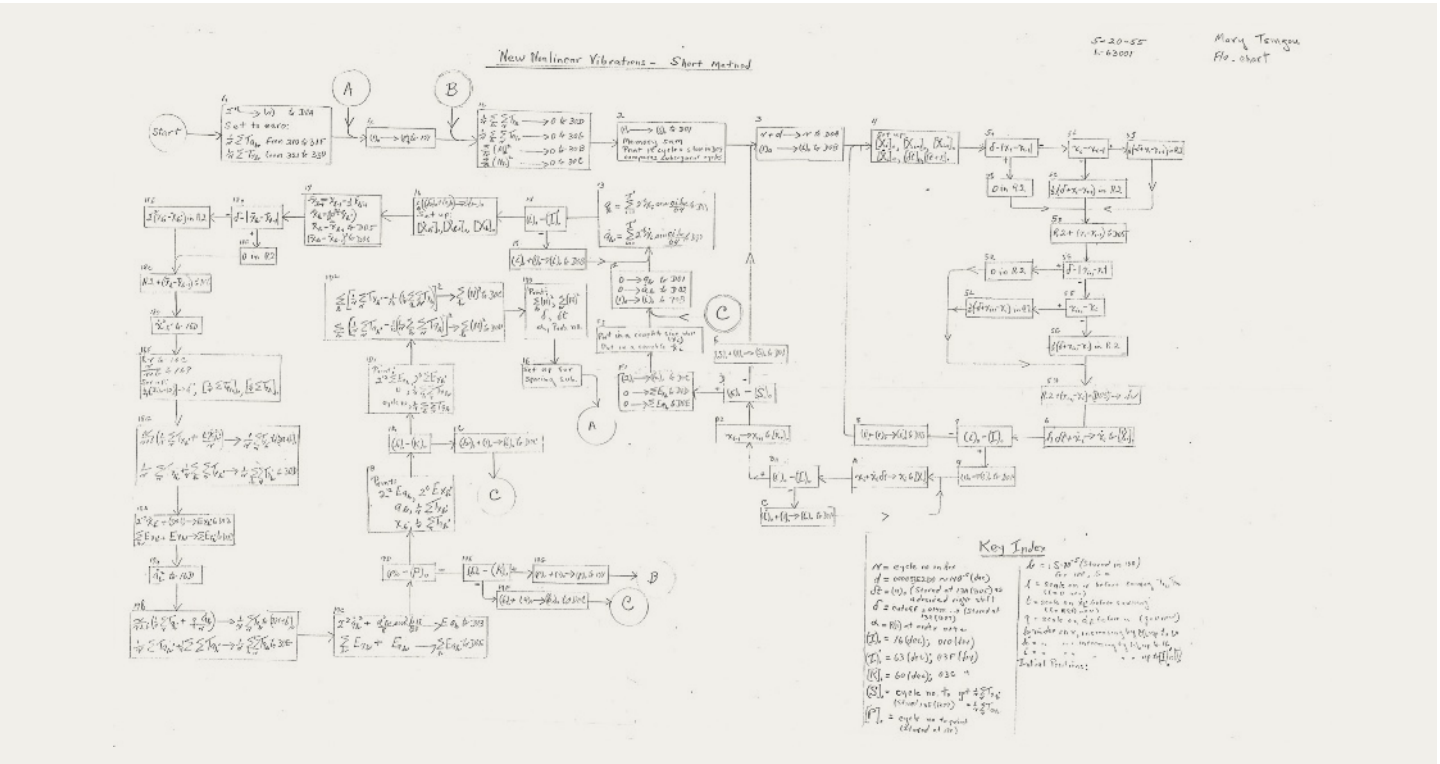
Plus récemment, c'est le monde quantique qui se passionne pour des études tant théoriques qu'expérimentales de cette relaxation vers l'équilibre. De belles expériences consistant à exciter des modes dans des condensats de Bose-Einstein sont même très proches, dans l'esprit, de l'expérience de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou. Étudier tous ces systèmes avec les outils de la physique non linéaire ouvre de nouveaux points de vue très fructueux.

N. Navon *et al.*, **Emergence of a turbulent cascade in a quantum gas,** *Nature,* vol. 539, pp. 72-75, 2016.

A. Campa *et al.*, **Physics of Long-Range Interacting Systems,** Oxford University Press, 2014.

A. P. Young (éd.), **Spin glasses and random fields,** World Scientific, 1998.

© U.S. Department of Energy, osti.gov/biblio/4376203 (domaine public)



avec la démonstration du théorème de Kolmogorov-Arnold-Moser sur la persistance de mouvements quasi périodiques en cas de perturbations faibles, dans les années 1960, il a été prouvé qu'en général, lorsqu'un système tel celui du problème de Fermi-Pasta-Ulam n'est que légèrement perturbé, sa dynamique reste quasi périodique. En revanche, si la perturbation est trop forte, la récurrence est détruite et l'équipartition de l'énergie entre les modes de vibration s'établit rapidement.

Le problème de Fermi-Pasta-Ulam est donc d'une importance centrale dans le domaine des solitons ainsi que dans celui du chaos, et est également intimement lié à la physique statistique hors équilibre (*voir l'encadré page ci-contre*). Encore aujourd'hui, de nombreux articles, séminaires et conférences sont dans cette lignée. Mais, malgré toute l'attention portée au problème de Fermi-Pasta-Ulam et à son histoire, un point intrigant n'a guère été mentionné.

LE MYSTÈRE DES SIGNATURES

La première page du rapport sur le travail déposé en 1955 à Los Alamos indique : « Report written by Fermi, Pasta, and Ulam. Work done by Fermi, Pasta, Ulam, and Tsingou. » Cette remarque, selon laquelle Mary Tsingou a participé à l'étude numérique mais n'est pas autrice du rapport, a déconcerté les scientifiques qui ont lu ce document. Programmer un ordinateur dans les années 1950 n'était pas une tâche triviale. Pourquoi sa contribution n'a-t-elle reçu qu'une note de deux lignes ?

Ceux qui approfondissent la littérature sur le problème de Fermi-Pasta-Ulam ont généralement lu un article publié en 1972 de James Tuck et M. T. Menzel. Une lecture attentive de l'introduction révèle que Menzel a été impliqué dans le codage du problème original, mais personne de ce nom n'est mentionné dans le rapport de Los Alamos. Comment résoudre ce paradoxe ?

La solution est que dans le nom M. T. Menzel, M est pour Mary et T pour Tsingou. Il n'y a donc pas de paradoxe, c'est la même personne, utilisant son nom de femme mariée ! Intrigué par cet élément, je me suis demandé alors ce que cette femme était devenue et j'ai posé des questions, longtemps restées sans réponse. Un jour, j'eus l'idée d'utiliser tout simplement la plateforme bibliométrique « Web of Science » (qui a donc bien une utilité !), qui révéla que M. T. Menzel avait publié avec un certain J. L. Gammel.

Coup de chance, au cours de ma thèse, j'avais logé plusieurs mois à Los Alamos chez Tinka Gammel, la fille de ce dernier. À peine avais-je évoqué cette histoire à ma logeuse (que je savais concernée par la cause des femmes), qu'elle fit son possible pour m'aider ; et nous avons découvert que son propre père, qui travaillait encore dans ce prestigieux laboratoire, avait effectivement travaillé avec M. Menzel, née Tsingou. Il l'avait perdue de vue, mais sa trace a pu être retrouvée.

C'est ainsi que j'ai découvert que Mary Tsingou Menzel était toujours en vie et résidait à Los Alamos, à quelques kilomètres seulement

© Mary Tsingou

de l'endroit où le problème de Fermi-Pasta-Ulam, si important dans le passé et le présent de la physique non linéaire, avait été conçu. Il est temps que son travail soit reconnu à sa juste valeur.

UNE FEMME PARMI LES PREMIERS PROGRAMMEURS

Née le 14 octobre 1928 dans une famille grecque vivant à Milwaukee, Wisconsin, Mary Tsingou a passé sa petite enfance aux États-Unis. En 1936, à cause de la Grande Dépression, sa famille s'est installée en Europe, où son père possédait une propriété en Bulgarie. Cependant, en juin 1940, suivant les conseils de l'ambassade américaine qui les incitait par précaution à retourner aux États-Unis, la famille est montée dans le dernier navire américain quittant l'Italie. Une semaine seulement après leur débarquement à New York, l'Italie déclarait la guerre à la France et au Royaume-Uni.

Mary Tsingou a obtenu sa licence en 1951 à l'université du Wisconsin et sa maîtrise en mathématiques en 1955 à l'université du Michigan. En 1952, à la suite d'une suggestion de sa professeuse d'équations différentielles, elle a posé sa candidature pour un poste au Los Alamos National Laboratory. À l'époque, les femmes n'étaient pas encouragées à poursuivre des études en mathématiques, mais la guerre de Corée avait créé une pénurie de jeunes hommes américains, de sorte que des postes étaient également offerts aux jeunes femmes. Elle a donc été embauchée, avec un groupe de jeunes diplômées, pour faire des calculs à la main.

Elle a d'abord été affectée à la division T1 de Los Alamos (T pour théorique) qui, pendant la Seconde Guerre mondiale, avait été dirigée par le grand physicien Rudolf Peierls et à laquelle appartenait le célèbre espion Klaus Fuchs. Il y avait à l'étage du dessous la division T7, dirigée par Nicholas Metropolis, qui possédait le tout nouvel ordinateur, le Maniac I, que quasiment personne ne savait programmer. On proposa à Mary Tsingou, ainsi qu'à d'autres jeunes recrues, d'apprendre justement à l'utiliser. Réussissant au premier essai un exercice qui consistait à coder la fonction sinus, elle impressionna l'instructeur et fut invitée immédiatement à changer de division (et donc d'étage !) pour intégrer le groupe des tout premiers programmeurs. L'ordinateur servait principalement à des tâches liées à la conception des bombes, mais, de temps en temps et surtout pendant le week-end, les chercheurs pouvaient l'utiliser pour étudier des problèmes de physique fondamentale et même pour jouer aux échecs. Mary Tsingou et le physicien John Pasta ont ainsi été les premiers à créer des graphiques sur l'ordinateur, lorsqu'ils étudièrent ensemble un problème simulant une explosion qu'ils ont pu visualiser sur un oscilloscope.

Mary Tsingou a ainsi interagi avec John Pasta, qui fut nommé plus tard à la tête de la National Science Foundation, et aussi avec Stanislaw Ulam, un brillant mathématicien d'origine polonaise, dont plusieurs contributions sur

Article initialement paru dans ***Reflets de la physique :*** T. Dauxois, « La (dis-)simulation FPU : une femme physicienne underground », n° 67, pp. 26-30, 11. 2020.

ENSEIGNER LA PHYSIQUE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES

Les phénomènes non linéaires sont la règle en physique ! Découvrir à travers un cours introductif les systèmes dynamiques et le chaos devrait faire partie de la formation de toute physicienne ou physicien et non être réservé aux spécialistes. Cette initiation sera essentielle si elle ou il ambitionne de mener des recherches, car la prédominance du concept de déterminisme dans nos formations cache certains comportements pourtant importants. C'est aussi central dans beaucoup d'autres domaines que la physique, par exemple en écologie ou bien en économie, puisque ces deux champs disciplinaires ont mis en évidence que les notions d'instabilité et de bifurcations entre régimes radicalement différents étaient capitales !

Ces idées sont trop peu enseignées dans nos formations et trop peu assimilées par nos concitoyens, surtout dans les sphères politiques ! Comprendre que prévoir la météo pour la fin de la semaine est notoirement difficile (justement les modèles sont chaotiques), mais que cela n'empêche pas de prédire le climat dans quelques dizaines d'années, est important. Cette idée était déjà contenue dans l'excellent article *Deterministic nonperiodic flow*, du météorologue américain Edward Lorenz, paru en 1963, et peut être présentée sans difficulté au niveau master 1, voire plus tôt à l'aide de splendides et très éducatives vidéos telles que celles du site www.chaos-math.org.

Lorenz ne s'est pas contenté d'identifier l'essence du chaos (Henri Poincaré l'avait d'ailleurs fait avant lui), en mettant en évidence qu'une description très précise du futur dépend de manière ultrasensible de notre connaissance du présent, beaucoup trop sensible en pratique pour faire des prédictions. Il a aussi, et peut-être surtout, montré qu'une approche statistique permet de prédire des comportements globaux. En effet, le chaos conduit en général à une exploration plus grande et surtout plus complète de l'espace des phases, un espace abstrait dont les coordonnées sont non pas des positions, mais des quantités de mouvement. Cela permet qu'une moyenne temporelle (de la quantité physique qui nous intéresse) supposant que tous les états accessibles sont équiprobables conduise à une prédiction beaucoup plus proche de la réalité dans le cas chaotique que dans le cas régulier.

À cause de la sensibilité forte aux conditions initiales, le prévisionniste ne sera donc pas en mesure d'affirmer que « le soleil illuminera l'École normale supérieure de Lyon tel jour précis ». En revanche, il pourrait prédire la température moyenne à Lyon au mois de juillet dans cinquante ans. C'est donc l'alliance de la physique non linéaire et de la physique statistique, ce que l'on nomme « physique hors équilibre », qui se révèle être la bonne approche. La première expérience numérique codée par Mary Tsingou a donc aussi permis de découvrir un domaine inexploré jusqu'alors et pourtant très important. Au cours des années, la communauté française a d'ailleurs joué un rôle prépondérant dans sa compréhension. Une autre histoire qui mériterait d'être racontée…

le développement de la bombe à hydrogène ainsi que sur la propulsion nucléaire furent décisives. Elle n'a eu en revanche que peu de contacts avec Enrico Fermi, qui était professeur à Chicago et ne visitait Los Alamos que pendant de courtes périodes durant l'été. Elle connaissait cependant beaucoup mieux la fille de Fermi, Nella, qui ne voulait pas rester en permanence avec ses parents pendant leurs visites à Los Alamos. Les deux jeunes femmes ont donc dormi dans le même dortoir, tandis qu'Enrico et Laura Fermi étaient accueillis par leurs bons amis Stan et Françoise Ulam.

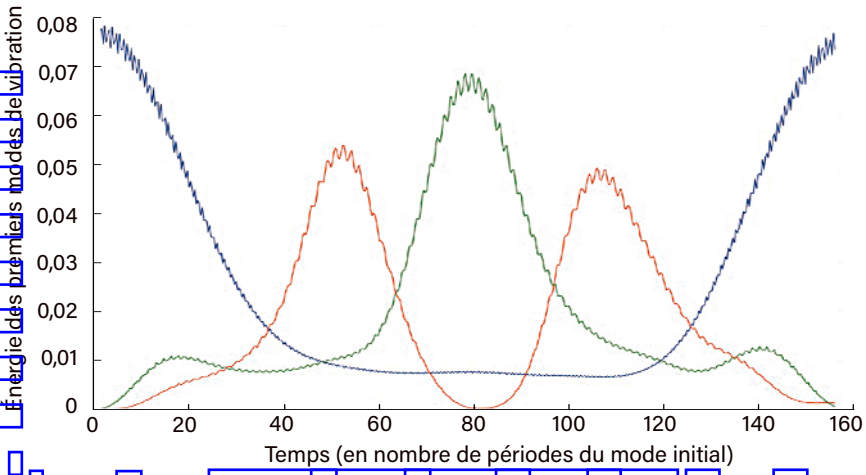
UNE IDÉE DE FERMI

C'est Fermi qui a eu le génie de proposer qu'au lieu de simplement effectuer des calculs standard, les ordinateurs puissent être utilisés pour tester une idée physique. Après ses contributions de toute première importance, tant expérimentales que théoriques, qui lui valent un respect éternel des physiciens, Fermi inventa ainsi le concept d'expériences numériques : c'est beaucoup moins connu. Fermi proposa donc de vérifier la prédiction de la physique statistique sur la thermalisation des solides, c'est-à-dire sur la propagation de la chaleur dans les solides.

Des calculs préliminaires ont confirmé le résultat attendu, à savoir que l'énergie introduite dans un mode de vibration unique dérive vers d'autres modes. Le comportement quasi périodique n'a pas été observé au début, car l'ordinateur était trop lent pour permettre à une simulation numérique de fonctionner assez longtemps. Mais un jour, l'ordinateur ne s'est pas arrêté comme prévu et le calcul a continué de tourner. Les chercheurs ont constaté à leur grande surprise que la quasi-totalité de l'énergie était revenue au mode initial et que l'état initial était presque parfaitement retrouvé. Ce fut le début d'une recherche fructueuse.

L'algorithme utilisé par Mary Tsingou sur le Maniac en 1955 pour simuler la relaxation de l'énergie dans un cristal modèle est reproduit page 77 ; je l'ai retrouvé en 2007 dans sa cave lors d'une visite chez elle. Sa complexité peut être comparée aux quinze lignes de code du logiciel Matlab qui sont suffisantes pour une simulation moderne du problème de Fermi-Pasta-Ulam. Programmer les premiers ordinateurs était une tâche qui exigeait beaucoup de perspicacité et d'originalité, et, tout au long des années 1960, voire plus tard, les programmeurs étaient souvent mentionnés comme coauteurs.

Il a été souvent avancé que la raison pour laquelle Mary Tsingou était citée comme collaboratrice, mais pas comme coautrice, est qu'elle n'avait pas participé à l'écriture du rapport, bien qu'elle ait produit certains graphiques. En fait, Fermi n'était pas impliqué dans l'écriture non plus puisqu'il est mort en 1954, avant la rédaction du rapport. On pourrait avancer, *a minima*, que la distinction entre l'écriture et le travail accompli sur le document classé secret a probablement été mal comprise par les lecteurs ultérieurs. La très humble Mary Tsingou n'en garde aucune amertume.



Dans l'expérience numérique de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou, on suit l'énergie totale (cinétique et potentielle) des différents modes linéaires de vibration, chacun étant associé à une longueur d'onde. Initialement, seul le mode de plus grande longueur d'onde est excité *(ci-dessus en bleu, unité arbitraire)*. Après un transfert vers les modes 2 *(en vert)*, 3 *(en rouge)*, etc., l'énergie revient presque complètement vers le premier mode : cette récurrence fut une surprise totale et resta longtemps inexpliquée.

En 1958, Mary Tsingou épousa Joseph Menzel, qui travaillait également à Los Alamos, pour la Force de protection de la Commission de l'énergie atomique. Elle resta dans cette petite ville alors même que ses collègues partaient : Metropolis pour Chicago, Pasta pour Washington et Ulam pour le Colorado. Elle travailla sur de nombreux problèmes différents, toujours avec des ordinateurs. Elle devint l'une des premières expertes en Fortran, inventé par IBM en 1955, et fut chargée d'aider les chercheurs du laboratoire.

Après son travail de programmation sur le Maniac, Mary Tsingou est revenue sur le problème de Fermi-Pasta-Ulam avec Tuck au début des années 1970 pour étudier les récurrences plus longues. Elle a également examiné les solutions numériques des équations de Schrödinger, en physique quantique, et a travaillé avec le brillant mathématicien et physicien d'origine hongroise John von Neumann pour étudier le mélange de deux fluides de densités différentes. Sous la présidence de Ronald Reagan, enfin, elle a été aussi profondément impliquée dans les calculs du projet *Star Wars*.

Retraitée en 1991, Mary Tsingou Menzel vit toujours aujourd'hui, à plus de 90 ans, avec son mari à Los Alamos, tout près de l'endroit où le problème de Fermi-Pasta-Ulam a été conçu et découvert. Reconnaissons sa contribution et parlons désormais du « problème de Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou » ! ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Dauxois, **Fermi, Pasta, Ulam, and a mysterious lady**, *Physics Today*, vol. 61, pp. 55-57, 2008.

G. Gallavotti (éd.), **The Fermi-Pasta-Ulam problem : A status report**, Springer, 2008.

T. Dauxois et M. Peyrard, **Physics of Solitons**, Cambridge University Press, 2006.

T. Dauxois *et al.*, **The Fermi-Pasta-Ulam « numerical experiment » : History and pedagogical perspectives**, *Eur. J. Phys.*, vol. 26, pp. S3-S11, 2005.

J. L. Tuck et M. T. Menzel, **The superperiod of the nonlinear weighted string (Fermi-Pasta-Ulam) problem**, *Adv. Math.*, vol. 9, pp. 399-407, 1972.

E. Fermi *et al.*, **Los Alamos Scientific Laboratory report LA-1940**, 1955.

© Thierry Dauxois

RENDEZ-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*

LE MONDE NUMÉRIQUE PASSE AU ZETTA

Les capacités de calcul et de stockage de l'information continuent de croître. Globalement, où en est-on aujourd'hui? Les estimations font apparaître l'ordre de grandeur de 10^{21} octets, c'est-à-dire le zettaoctet.

L'AUTEUR



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

Il y a une vingtaine d'années, plusieurs articles de cette rubrique traitaient de la quantité d'informations numériques sur Terre et de la capacité cumulée de calcul des dispositifs électroniques. Le nombre 10^{20} (100 milliards de milliards) était présenté comme un repère approximatif commode. La quantité d'informations numériques sur Terre – disques durs, mémoires des ordinateurs et téléphones, CD, DVD, etc. – était vers l'an 2000 d'environ 10^{20} octets (1 octet est égal à 8 bits d'information) et la capacité de calcul des dispositifs électroniques atteignait en ordre de grandeur 10^{20} instructions par seconde (IPS).

La loi de Moore, sous sa forme la plus générale, est l'affirmation que «les capacités des dispositifs informatiques pour un prix donné doublent tous les deux ans». Cette forme générale ne correspond pas vraiment à la loi énoncée par Gordon Moore, laquelle ne portait que sur le nombre de transistors par centimètre carré des puces électroniques dont ce cofondateur d'Intel pensait qu'il doublait environ tous les ans (énoncé de 1965), puis tous les deux ans (énoncé de 1975). Nous prendrons cependant comme repère la loi générale concernant tous les dispositifs informatiques, en la critiquant quand c'est nécessaire. Notre question principale sera: qu'est devenu le 10^{20} proposé il y a deux décennies?

L'ÈRE DU ZETTA, VOIRE DU YOTTA

Un doublement tous les deux ans pendant vingt ans donne une multiplication par 1000 environ, car $2^{10}=1024\approx10^3$, soit un ordre de grandeur gagné tous les sept ans environ. En sommes-nous alors à 10^{23} pour la mémoire numérique cumulée et pour la puissance de calcul mesurée en nombre d'instructions par seconde?

Il est difficile de répondre avec certitude. Les évaluations disponibles, nos calculs et les divers raisonnements formulés pour produire des réponses, nécessairement approximatives, ne permettent pas des affirmations certaines. Cependant, les conclusions que nous allons proposer sont justes à un ordre de grandeur près, parfois deux pour les plus délicates. Même s'il est impossible d'avoir des évaluations fines, nous pensons qu'il est utile de disposer des chiffres que nous indiquerons, plutôt que croire à tort que, par exemple, 10^{10}, 10^{15} ou 10^{30} sont des évaluations globales pour l'information ou le calcul.

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

Nous allons voir que pour la mémoire 10^{23} est sans doute un peu trop optimiste, mais que pour le calcul, ce nombre est dépassé. L'état du monde numérique aujourd'hui a donc franchi le repère 10^{21}, d'où le nom proposé d'« ère du zettaoctet ». En effet, après les préfixes kilo (10^3), méga (10^6), giga (10^9), téra (10^{12}), péta (10^{15}) et exa (10^{18}), vient zetta (10^{21}). Si l'on continue à gagner plus d'un ordre de grandeur tous les dix ans, comme cela s'est produit en gros pendant cinquante ans, nous serons dans l'ère suivante, l'ère numérique du yotta (10^{24}), avant 2040.

Cependant, la loi de Moore semble se fatiguer et donc l'ère du yotta se fera peut-être attendre un peu. La divergence entre les chiffres de la mémoire et ceux de la puissance de calcul, dont la croissance est plus rapide, risque d'ailleurs de se confirmer et de produire de nouveaux effets. Après le yotta, on aura, dans un futur encore lointain, le bronto (10^{27}), le geop (10^{30}), puis le sagan (10^{33}) (ces préfixes ne sont pas encore officiellement définis ni admis par tous).

Les calculs et évaluations pour le futur proposés ici ne prennent en compte ni les gains qu'on pourrait tirer de l'utilisation de la mécanique quantique, ni ceux qui proviendraient de la maîtrise du stockage massif d'informations grâce à l'ADN. Ces deux technologies progressent et il n'est pas exclu qu'elles finissent par changer le cours de l'histoire. Aujourd'hui toutefois, aucune de ces deux sources potentielles de progrès n'est sur le point de rattraper l'extraordinaire avance de l'électronique qui, sur sa lancée et grâce à plus d'un demi-siècle de progrès faramineux, nous précipite vers l'ère du yotta.

UTILITÉ DES ORDRES DE GRANDEUR

Connaître les ordres de grandeur actuels de la mémoire et du calcul permet par exemple de savoir ce qui est envisageable comme calcul massif pour mener des attaques de codes cryptographiques par la méthode de la force brute. Grâce à l'évaluation de la mémoire de masse globale, on évalue ce qu'un organisme étatique ou un *data broker* (firme qui réunit des données pour les revendre) peut stocker comme informations sur chacun d'entre nous. On peut aussi fixer, grâce à la connaissance des ordres de grandeur, ce qu'il est raisonnable de tenter comme tables mathématiques, géographiques, météorologiques, etc.

Si quelqu'un vous dit par exemple qu'il veut faire la table de tous les nombres premiers s'écrivant avec 50 chiffres ou moins, vous pouvez lui rire au nez. En effet, une telle table exigerait environ $50\times10^{50}/\log 10^{50} = 10^{50}/\log 10$ octets, soit plus de 10^{49} octets, sachant qu'il faut 50 octets en moyenne pour mémoriser un nombre premier de 50 chiffres et que la densité des nombres premiers autour de n est $1/\log(n)$. Si, grâce à un peu de codage, on réussit à n'utiliser qu'un bit par nombre premier de la table, alors la table envisagée nécessitera $10^{50}/(8\times\log 10^{50})$ octets, soit plus de 10^{46} octets. Dans aucun des deux cas, une table aussi volumineuse n'est envisageable dans un avenir prévisible.

Si la NSA (la *National Security Agency* des États-Unis) gardait un gigaoctet d'informations sur chaque individu de la planète, cela ferait environ $10^9\times10^{10} = 10^{19}$ octets. Ce n'est pas totalement impossible, mais difficile : le Cern, qui collecte une quantité colossale d'informations pour l'analyse des résultats de ses expériences, n'a atteint 10^{18} octets que récemment. En 2021, Facebook en est à 300 pétaoctets, soit 3×10^{18} octets (https://kinsta.com/blog/facebook-statistics/). Toujours pour 2021, le site statista.com a évalué à 2×10^{21} octets le total de la mémoire de tous les centres de données.

La population humaine totale est évaluée à 7,7 milliards, mais il est impossible d'avoir plus de précision ; dans le cas de la mémoire numérique totale sur Terre, les difficultés sont bien

1



UNE AMPOULE ALLUMÉE PENDANT UNE HEURE ?

On lit ou entend parfois qu'une requête sur le moteur de recherche de Google équivaut, en dépense d'électricité, à la consommation d'une ampoule pendant une heure. C'est faux, même si le calcul est assez délicat à mener.

Il est possible de majorer le coût d'une requête par le raisonnement suivant. Google consomme 12 TWh/an pour faire fonctionner les serveurs de tous ses centres de données et répondre à 7 milliards de requêtes chaque jour. Si l'on suppose que toute cette électricité est consacrée aux réponses aux requêtes (ce qui bien sûr donnera une valeur largement supérieure à la réalité), cela donne une dépense moyenne de $12\times10^{12}/(7\times10^9\times365) = 4{,}7$ Wh = 0,004 7 kWh par requête, c'est-à-dire de quoi allumer une ampoule de 100 W pendant moins de 3 minutes, électricité qui vous sera facturée moins de un millième d'euro.

Cette majoration est assez loin du chiffre de une heure. En 2009, date de l'apparition de la légende urbaine, Google a répondu en proposant sa propre évaluation. Google trouve que l'ampoule ne restera allumée que durant 10 secondes. Le calcul date d'il y a plus de dix ans : c'est probablement 5 ou 10 fois moins aujourd'hui.

Le numérique est coûteux en énergie, mais n'oublions pas qu'il progresse encore, d'où une baisse de la dépense d'électricité par opération, et surtout qu'il fait économiser de l'énergie en limitant l'impression et la circulation de documents matériels, ainsi que les déplacements physiques pour se rendre dans les centres de documentation et les réunions.

Le coût du numérique dépend par ailleurs des quantités de données que l'on fait circuler sur les réseaux, quantités aujourd'hui majoritairement liées à l'usage de la vidéo et non aux courriels ou aux requêtes sur des moteurs de recherche.

La pollution engendrée par le numérique est aussi due à la fabrication des machines (ordinateurs, téléphones, etc.) et leur destruction. Pour limiter cette pollution, le plus efficace est de ne pas changer trop souvent ses téléphones, tablettes et ordinateurs.

© Shutterstock.com/Somchai Som

plus grandes pour une série de raisons. Explicitons-en quelques-unes.

D'abord, il faut préciser ce qu'on veut mesurer ; pour nous, il s'agira de toutes les informations codées sous un format numérique (disques durs, disques SSD, clés USB, CD, DVD, puces de mémoire, etc.), à la condition qu'elles restent lisibles par des dispositifs appropriés encore disponibles. Pour une évaluation précise directe, il faudrait donc connaître les chiffres de tous les supports numériques produits par toutes les firmes concernées, qui ne publient pas nécessairement les données dont on aurait besoin.

DES DIFFICULTÉS POUR ESTIMER LA MÉMOIRE NUMÉRIQUE

Plus difficile encore, il faudrait pouvoir évaluer parmi tous les dispositifs numériques de stockage qui ont été produits quelle proportion est restée accessible et quelle proportion est maintenant perdue : ordinateurs mis au rebut, disques tombés en panne, etc. Heureusement certains types de dispositifs sont négligeables devant d'autres. Par exemple, les CD sont aujourd'hui passés de mode et comme ils ont des capacités assez modestes, comparés aux disques durs ou aux disques SSD, on peut se dispenser d'évaluer leur contribution avec précision.

En raisonnant par des méthodes indirectes, en prenant des conclusions de rapports déjà publiés il y a quelques années et en extrapolant leurs résultats, on obtient une série d'évaluations dont on tire une conclusion plausible. Nous avons mené une dizaine de raisonnements de ce type et en avons tiré la conclusion que 10^{22} octets est un ordre de grandeur raisonnable à retenir pour toute la mémoire numérique sur Terre en 2021 (*voir l'encadré 3*).

Sachant qu'une heure de vidéo de qualité moyenne exige environ 1 gigaoctet, soit 10^9 octets, combien de vies entières de 80 ans filmées pourrait-on conserver avec les 10^{22} octets de la mémoire numérique terrestre ? Le calcul, facile, aboutit à un résultat surprenant : $10^{22}/(10^9 \times 24 \times 365 \times 80)$, soit environ 14 millions de vies entières.

Si l'on partageait équitablement la capacité d'enregistrement numérique entre les 7,7 milliards d'humains, chacun disposerait de $(10^{22})/(10^9 \times 7{,}7 \times 10^9) \approx 1300$ heures de vidéo pour raconter sa vie et en conserver le film des moments les plus importants. Encore un petit effort et nous serons en mesure d'enregistrer le film de la vie de tous les humains !

Si la mesure de la mémoire numérique totale du monde n'est pas facile, celle de la capacité de calcul de tous les dispositifs électroniques est encore plus délicate. Il y a d'abord le problème de l'unité de puissance : opération logique par seconde, instruction par seconde pour un processeur moyen, opération entre nombres entiers codés sur 8 octets par seconde, opération en virgule flottante par seconde, hertz, etc. ?

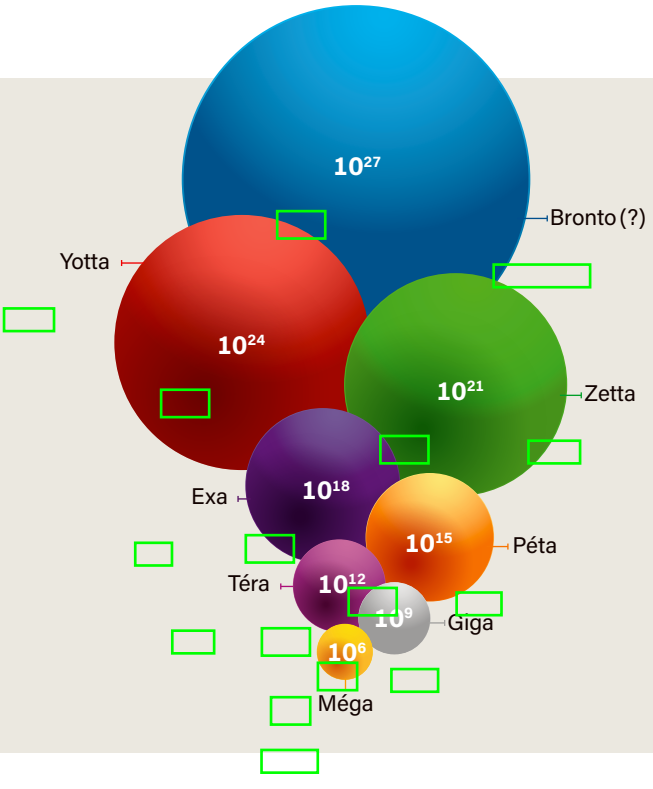
2 LES OCTETS ET LEURS MULTIPLES

Un octet de mémoire (*byte* en anglais) correspond à 8 bits d'information, c'est-à-dire à 8 choix entre 0 ou 1. Un octet peut coder un nombre entier compris entre 0 et 255, ou un caractère pris dans un alphabet de 256 caractères.

Le kilooctet vaut 2^{10} octets, c'est-à-dire 1 024 octets, mais on l'assimile souvent à 1 000 octets. En multipliant par 1 024 à chaque fois, on trouve ensuite :

- le mégaoctet : environ 1 million d'octets, c'est-à-dire le texte d'un livre de 400 pages environ, ou une image de qualité moyenne ;
- le gigaoctet : environ 1 milliard d'octets, qui est l'espace mémoire nécessaire pour une heure de vidéo de qualité moyenne ;
- le téraoctet : environ 10^{12} octets, de quoi stocker un million de livres ou 1 000 heures de vidéo ;
- le pétaoctet : environ 10^{15} octets, soit un milliard de livres ou un million d'heures de vidéo ;
- l'exaoctet : environ 10^{18} octets ; c'est la capacité de stockage du Cern, près de Genève, et le tiers de la capacité de Facebook ;
- le zettaoctet : environ 10^{21} octets, soit en gros la capacité de mémorisation de tous les disques durs produits en 2020.

Il y a ensuite le yottaoctet, puis, avec des préfixes qui ne font pas encore l'unanimité, le brontooctet, le geopoctet, le saganoctet, l'alphaoctet...



© Shutterstock.com/Juksy

Procédant comme pour la mémoire, nous avons mené différents raisonnements et utilisé différentes sources d'informations pour produire des estimations variées. Les résultats ne concordent qu'à un ou deux ordres de grandeur près, mais conduisent à affirmer qu'en 2021, on a dépassé 10^{23} opérations par seconde en quantité globale de calcul effectivement mise en œuvre et 10^{24} en capacité globale (non nécessairement active à chaque instant). Un ordre de grandeur au moins sépare donc maintenant mémoire et calcul.

Pourquoi la capacité de calcul s'accroît-elle plus vite que la capacité de stockage ? Plusieurs explications sont possibles.

Du côté des besoins, nous sommes de plus en plus des utilisateurs de calculs dont il n'est pas nécessaire de garder des traces. Ainsi, quand nous parcourons des pages internet, la plupart des informations que l'ordinateur reçoit, manipule (par exemple en préparant les images) et affiche sont rapidement effacées et oubliées, car nous sautons de page en page rapidement jusqu'à trouver ce que nous cherchons. Dans le cas du *streaming* audio ou vidéo, la situation est portée à son comble, car d'un instant au suivant tout est effacé. Déplacer les données, les décompresser et les afficher, tout cela demande du calcul, mais très rapidement la mémoire nécessaire à ces opérations est récupérée et réutilisée. Il en résulte que la pression pour avoir plus de calcul dépasse la pression pour avoir plus de mémoire.

Dans le domaine des algorithmes, de nombreux programmes opèrent massivement des calculs pour ne retenir que le résultat final qui prend peu de place comparé à la taille des calculs menés. Dans le cas de la circulation de l'information sur les réseaux, chaque serveur-relais oublie aussitôt ou assez rapidement la majeure partie de ce qui passe par lui. C'est clair, le développement de l'informatique des réseaux exige bien plus une accélération du calcul qu'une augmentation des capacités de stockage.

LE BITCOIN, UN CAS EXTRÊME

Le cas de la cryptomonnaie Bitcoin est caricatural : le « minage » qui permet d'attribuer les nouvelles unités créées à certains comptes consiste à essayer de produire, quasiment au hasard, une certaine configuration gagnante, comme quand on cherche à obtenir un triple « 6 » avec trois dés en les lançant jusqu'à réussir. L'objectif des « mineurs » de bitcoins est beaucoup plus difficile qu'un triple « 6 » et, chaque seconde, le réseau Bitcoin effectue le lancer des dés numériques environ 10^{20} fois en calculant 10^{20} fois la fonction notée SHA256, dont il efface instantanément le résultat si la configuration attendue n'est pas obtenue, comme quand on ramasse les dés parce que le

3

COMBIEN DE MÉMOIRE AU TOTAL ?

Voici ce qui semble le meilleur raisonnement pour évaluer la mémoire totale des dispositifs électroniques en 2021. On commence par repérer les sources les plus importantes de mémoire de masse créées et vendues en 2021.
Les diverses catégories sont, par ordre d'importance décroissante :
(a) Les « disques durs » (DD), qui sont des dispositifs de stockage magnétique sur disques rotatifs (A).
(b) Les « disques » SSD (*solide state drive*), c'est-à-dire la mémoire de masse sur puces électroniques (B). Ces « disques » remplacent progressivement les DD, et ils équipent la plupart des nouveaux ordinateurs portables.
(c) Les mémoires NVM (*non volatile memory*) utilisées pour des accès plus rapides au cœur des ordinateurs.
(d) Les mémoires optiques (CD, DVD, etc.) (C), de moins en moins utilisées.
(e) Les bandes magnétiques, réservées à certains usages professionnels (D).

D'après le site Datanami (https://www.datanami.com/2020/02/19/storage-in-the-exabyte-era/), la partie (a) de la mémoire numérique est la plus importante et représente 60 % de toute la mémoire nouvelle créée en 2021.

Connaître (a) donne donc accès à une évaluation de toute la mémoire créée en 2021. Le site statista.com indique que plus d'un zettaoctet de DD a été fabriqué et vendu en 2020 (https://www.statista.com/statistics/398951/global-shipment-figures-for-hard-disk-drives/).

En arrondissant, on arrive à 2,5 zettaoctets pour le total de la mémoire fabriquée et vendue en 2020, et, à quelques pourcents près, à la même valeur pour 2021.

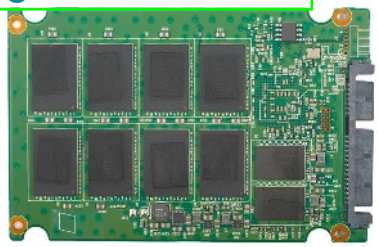
Reste à évaluer la quantité de mémoire produite les années précédentes et encore utilisée en 2021. C'est la partie la plus délicate. Le coefficient à appliquer est certainement situé entre 4 et 10, ce qui conduit donc à une valeur comprise entre 10^{22} et $2{,}5 \times 10^{22}$ octets pour la mémoire numérique totale sur la planète en 2021.

Le site import.io propose la valeur 7×10^{22} octets et le site statista.com indique 6×10^{22} pour 2020, mais sans donner de détails sur les raisonnements mis en œuvre pour parvenir à ces chiffres (voir https://www.import.io/post/idc-predicts-the-datasphere-to-reach-160-zettabytes-by-2025/ et https://www.statista.com/statistics/871513/worldwide-data-created/).

A



B



C



D



© Shutterstock.com/patrufilo, Peter Gudella, Eddie Phantana, tookitook



4 LA CROISSANCE DES RÉSEAUX

L'usage des réseaux s'accroît très rapidement. Voici quelques données qu'avait proposées en mai 2021 le site Alioze (https://www.alioze.com).

En 2021, il y a plus de 4,5 milliards d'internautes, dont plus de 50 % sont en Asie. Les appareils mobiles engendrent maintenant près de 60 % du trafic des réseaux, contre 40 % pour les ordinateurs.

On estime qu'il y a plus de 30 milliards d'appareils connectés dans le monde. Le trafic sur internet est, pour plus de la moitié, lié à la vidéo.

Il existe près de 2 milliards de sites internet dans le monde. Les cinq sites les plus visités sont, dans l'ordre : Google, YouTube, Facebook, Baidu, Wikipédia.

Plus de 90 % des requêtes sur moteur de recherche sont adressées à Google, qui répond à 7 milliards de recherches chaque jour.

Il y a plus de 3 milliards d'utilisateurs des réseaux sociaux, dont 2,3 milliards pour Facebook.

Selon les sources, le total du trafic des réseaux (trafic IP) atteint en 2021 entre 3 et 40 zettaoctets.

5 DES CALCULS SANS MÉMORISATION

Les progrès de l'électronique ont multiplié tant les capacités de calcul que celles de mémorisation. Cependant, le calcul a progressé plus vite. Cela est dû aux difficultés techniques à augmenter la mémoire numérique, mais aussi au rôle accru des calculs sans enregistrement.

C'est le cas pour faire circuler de l'information : chaque station relais d'un réseau doit faire certaines opérations pour recevoir et renvoyer une information, mais ne garde pas trace de ce qui circule. De même, quand nous consommons de la musique ou des vidéos en flux continu *(streaming)*, nos dispositifs de réception et de décodage calculent beaucoup, mais ne mémorisent rien ou presque.

Le cas le plus extraordinaire de calculs sans mémorisation est celui du minage des cryptomonnaies qui, comme le Bitcoin, utilisent les « preuves de travail ». Les calculs effectués par les ordinateurs d'un tel réseau servent pour l'essentiel à désigner lequel des ordinateurs recevra les nouvelles unités de monnaie créées. Rien de ce calcul colossal, qui consomme deux fois plus d'électricité que la production de toutes les éoliennes de France, n'est mémorisé.

Le plus absurde dans ces calculs est que la méthode utilisée (la preuve de travail) pour opérer l'attribution des nouvelles unités de monnaie peut être remplacée par une autre méthode dénommée « preuve d'enjeu » qui n'exige aucune dépense massive d'électricité.

Les machines qui effectuent ces calculs sont inutiles et consomment en vain de l'électricité. Si ceux qui possèdent ces machines et qui pourraient remplacer la méthode énergivore par la méthode économe refusent de le faire, c'est uniquement afin de maintenir leurs profits.

« triple 6 » n'est pas apparu. Le calcul est colossal. Il est mené en parallèle par des millions de processeurs spécialisés, et le réseau bitcoin ne retient de ce calcul qu'un résultat toutes les dix minutes, résultat qui alors engendre une nouvelle page de 1 mégaoctet (10^6 octets) de mémoire pour chaque validateur. Dans ce cas extrême, la demande en calcul n'a été accompagnée d'aucune, ou presque, demande en mémoire.

LE RAPPORT CALCUL/MÉMOIRE A BEAUCOUP AUGMENTÉ

Nous sommes aujourd'hui dans une situation inverse de celle qui existait avant le XX^{e} siècle. Les tables numériques de logarithmes, de fonctions trigonométriques, de nombres premiers ou autres étaient par exemple difficiles à obtenir, car les calculs se faisaient à la main. Une fois obtenus, les résultats étaient imprimés, c'est-à-dire enregistrés, un grand nombre de fois : le calcul était plus rare, toutes proportions gardées, que la mémoire.

L'examen du demi-siècle écoulé confirme que la capacité à calculer s'est accrue plus vite que la capacité à mémoriser. C'est la progression faramineuse de nos capacités dans les deux cas qui fait que nous n'avons pas toujours conscience de la différence de vitesse dans les deux domaines. Nous n'avons pas perçu que l'avance de la mémoire a été perdue et que le croisement s'est opéré vers l'année 2000, avec le 10^{20} mentionné quand on utilise comme unités l'octet et l'instruction par seconde.

J'ai effectué un calcul assez simple en comparant deux ordinateurs de bureau de la marque Apple, l'un de 1983 et l'autre de 2015. La vitesse de calcul a été multipliée par $1{,}7\times10^7$, alors que le gain en mémoire rapide (mémoire RAM) n'a été que de $1{,}6\times10^4$ et de 10^5 pour la mémoire de masse sur disque dur.

Une chose amusante confirme encore cette caractéristique de l'évolution technologique. La machine analytique de Charles Babbage, qui était une sorte d'ordinateur mécanique à engrenages conçu au milieu du XIX^{e} siècle, ne faisait qu'une multiplication toutes les 3 minutes et disposait pourtant de l'équivalent en mémoire centrale de plus de 5 kilooctets. Cette machine avait donc un rapport calcul/mémoire inférieur d'au moins 5 ordres de grandeur à celui d'un ordinateur de bureau d'aujourd'hui : toutes proportions gardées, c'est bien le calcul qui a le plus bénéficié des progrès de l'électronique.

Certes, la demande supérieure de calcul explique que les ingénieurs ont cherché à optimiser le calcul plus soigneusement que la mémoire, mais la cause profonde, du moins pour l'évolution récente, est peut-être assez simple et liée directement à la miniaturisation. Quand on augmente le nombre de transistors par centimètre carré sur une puce, on peut

© Shutterstock.com/Artistdesign29

aussi augmenter leur vitesse de travail, car les distances entre les transistors deviennent plus petites. Ainsi, le nombre de mémoires sur une puce évolue à peu près proportionnellement au nombre de transistors que l'on peut y mettre, en gros selon la loi de Moore de 1975, alors que la puissance de calcul qu'on en tire augmente plus vite que ce nombre de transistors, car elle bénéficie à la fois des progrès en nombre de transistors et en vitesse des processeurs. La vitesse de calcul des puces, mesurée en hertz, a d'ailleurs considérablement augmenté depuis les premiers microprocesseurs. C'est l'explication la plus simple des progrès supérieurs du calcul, comparé au stockage, au cours des cinquante dernières années.

On le voit sur cet exemple, la loi de Moore générale simplifie bien trop les choses et, d'ailleurs, si l'on regarde de près, aucun domaine de l'électronique n'a progressé à un rythme parfaitement régulier. Le cas de la vitesse des processeurs est caractéristique. Elle a progressé de 15% par an de 1978 à 1988, puis de 40% par an de 1988 à 2004, et de seulement 2% par an depuis.

Les capacités de calculs dont nous disposons ont permis le développement des réseaux et en particulier d'internet, et c'est pourquoi une autre mesure est aujourd'hui devenue importante, celle de la circulation de l'information dans les réseaux.

TRAFIC RÉSEAU : LE ZETTA AUSSI

Cette circulation des données a elle aussi atteint l'ordre de grandeur du zettaoctet. Les évaluations des experts n'aboutissent pas au même nombre pour l'année 2021. Ils concluent que le nombre d'octets qui circulent chaque seconde sur les réseaux entre ordinateurs, téléphones, tablettes, box-internet, petits objets connectés, etc. est compris entre 5 et 40 zettaoctets. On peut tout de même en déduire que, comme pour la mémoire, nous en sommes à 10^{22} en ordre de grandeur. Puisqu'il faut bien évidemment exécuter largement plus de 1 instruction pour faire circuler 1 octet d'information entre deux machines d'un réseau, ces évaluations du trafic d'internet confirment que pour le calcul en instructions par seconde, les ordres de grandeur 10^{23} et 10^{24} sont un minimum qui ne fait aucun doute.

Notons que les flux vidéo représentent plus de la moitié de ce trafic. Cela est en grande partie dû à l'explosion récente de la consommation de vidéos par internet, engendrée par le développement de la fibre optique et des offres de YouTube ou Netflix, du « replay » d'émissions télévisées, et plus récemment des visioréunions par Zoom et autres services du même type. L'importance en volume de tout cela écrase les autres types de consommation de la bande passante.

BIBLIOGRAPHIE

Wikipedia, **Zettabyte Era,** consulté en mai 2021 (https://en.wikipedia.org/wiki/Zettabyte_Era).

Ademe, **La face cachée du numérique,** janvier 2021 (https://bit.ly/3lq6N7A).

A.-C. Orgerie et L. Lefèvre, **Le vrai coût énergétique du numérique**, *Pour la Science*, n° 518, pp. 48-59, décembre 2020.

Arcserve, **The 2020 Data Attack Surface Report,** 2020 (https://bit.ly/3jq0KNs).

Cisco Annual Internet Report (2018-2023), mars 2020 (https://bit.ly/37oRt2A).

L. Dedryver, **Maîtriser la consommation du numérique,** Rapport n° 2020-15 de France-Stratégie, octobre 2020 (https://bit.ly/3fqGz0X).

J. Hennessy et D. Patterson, **Computer Architecture : A Quantitative Approach,** Elsevier (6e édition), 2019.

D. Efnusheva *et al.*, **A survey of different approaches for overcoming the processor-memory bottleneck,** *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 9(2), pp. 151-163, 2017.

J.-P. Delahaye, **Les chiffres de la complexité informatique,** *Pour la Science*, n° 314, décembre 2003.

Sur ce sujet, il semble que certaines personnes manquent singulièrement de bon sens. Quand vous envoyez un courriel ne contenant que du texte, sauf s'il est très long, vous faites circuler environ un kilooctet de données, alors que lorsque vous parcourez des pages internet en surfant, vous faites circuler des images et aurez rapidement fait se déplacer plus d'un mégaoctet de données. Et cela n'est rien comparé à ce qui se passe quand vous regardez un film en « replay » ou en utilisant un site de vidéo à la demande : en une heure, vous aurez fait circuler un gigaoctet de données au minimum. Il y a donc, en gros, mille fois plus de dépense électrique pour le surf sur internet et un million de fois plus pour une heure de vidéo en flux continu (*streaming*) que pour un courriel.

POUR ÉCONOMISER, REGARDONS MOINS DE VIDÉOS !

À partir de 2009, la presse a largement repris l'affirmation, tombée d'on ne sait où, qu'un courriel ou une requête sur un moteur de recherche dépense autant d'électricité qu'une ampoule allumée pendant une heure. Si c'était vrai, regarder une vidéo de une heure, ce qui demande un million de fois plus de transfert de données qu'un courriel, engendrerait une consommation invraisemblable que ni vous, avec votre facture d'électricité, ni le centre qui gère l'envoi de la vidéo ne pourrait supporter.

D'après un rapport de France-Stratégie (*voir la bibliographie*), le numérique consomme aujourd'hui 4000 térawattheures (TWh) par an dans le monde, alors que la production totale d'électricité est de l'ordre de 26000 TWh par an (un réacteur nucléaire produit environ 8 TWh/an). Certes, le numérique consomme de l'énergie, mais il en fait économiser beaucoup, car envoyer des documents par internet évite l'envoi des mêmes documents par la poste, et les réunions virtuelles évitent de nombreux déplacements.

Ceux qui évitent d'envoyer des courriels ou limitent le nombre de requêtes sur les moteurs de recherche pour éviter de polluer la planète se trompent d'ennemi. S'ils veulent avoir une action sensible, c'est à la vidéo qu'ils doivent penser !

Les chiffres de l'ère numérique du zetta sont le résultat du formidable travail des chercheurs et ingénieurs de l'électronique et de l'informatique. Cela a changé l'univers dans lequel nous vivons et, même si ces chiffres montrent qu'une part importante d'énergie doit être consacrée au monde nouveau et virtuel que nous avons créé, nous devons avoir pleinement conscience de tout ce que cela nous apporte. Par exemple, reconnaissons que la pandémie de Covid-19 aurait été bien plus difficile à vivre sans l'existence des réseaux et leur gigantesque puissance. ■



Les Époux Arnolfini, 1434, Jan Van Eyck, peinture sur bois (82,2 × 60 cm) , National Gallery, Londres.

© National Gallery
© G. Simon

LA PERSPECTIVE, UNE INVENTION FLAMANDE ?

Pour *Les Époux Arnolfini*, Jan Van Eyck aurait utilisé une « machine à perspective » complexe pour restituer au mieux l'espace de la scène représentée et la rendre conforme à la vision humaine.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint à Pour la Science

En 1434, Giovanni Arnolfini, un marchand toscan établi à Bruges, et sa femme posent devant le peintre flamand Jan Van Eyck. Au centre du tableau qui les immortalise, un miroir convexe, un « miroir aux sorcières », montre les protagonistes de dos et révèle deux autres personnages, dont un serait l'artiste. *Les Époux Arnolfini* (*voir la reproduction page ci-contre*), au départ une scène privée, est devenue l'une des toiles les plus célèbres du monde sur laquelle les historiens se perdent en conjectures. Ainsi, l'identité des personnages ne fait pas l'unanimité.

Un autre point débattu par les experts concerne la perspective. Traditionnellement, cette dernière aurait été théorisée dans l'Italie de la Renaissance par Filippo Brunelleschi et Leon Battista Alberti, dans les années 1430, avant de gagner toute l'Europe. Jan Van Eyck n'en aurait donc pas eu connaissance, et il ne l'aurait approchée que de façon empirique et approximative. Gilles Simon, du laboratoire Loria, à l'université de Lorraine, à Nancy, n'est pas d'accord et pense au contraire que le Flamand maîtrisait très bien la perspective.

L'informaticien s'est livré à une analyse des *Époux* (et de quatre autres œuvres) et a présenté ses travaux en août 2021 lors d'une conférence internationale, Siggraph 2021. Plus précisément, il a calculé une carte probabiliste des points de fuite à partir des différents éléments du tableau. Probabiliste, car elle tient compte d'une incertitude sur les extrémités des arêtes extraites de l'image. Résultat ? Les lignes fuyantes ne convergent pas vers un point unique, comme cela devrait être le cas dans une perspective linéaire typiquement italienne, mais en quatre points régulièrement espacés et alignés le long d'un axe vertical légèrement incliné (*voir la figure ci-contre*).

Gilles Simon en déduit que Van Eyck a peint son tableau en quatre bandes, chacune réunissant l'ensemble des arêtes associées au même point dans une perspective exacte. L'informaticien en conclut que l'artiste a utilisé un dispositif optique similaire à celui qu'affectionnera Léonard de Vinci quelques décennies plus tard : l'idée est de regarder à travers un œilleton grâce auquel on parvient à une projection d'une scène sur une surface plane. L'appareil de Van Eyck avait quatre trous pour représenter la scène depuis différents points de vue simultanément ! Avec cet outil et d'autres astuces visant à se rapprocher au mieux de la vision humaine, le Flamand serait donc un précurseur des médias d'art nomades comme la réalité augmentée ! ■



Les arêtes de la scène convergent en quatre points de fuite alignés.

G. Simon, **Jan Van Eyck's perspectival system elucidated through computer vision,** *ACM in Computer Graphics and Interactive Techniques*, à paraître, 2021. hal.univ-lorraine.fr/hal-03287031

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

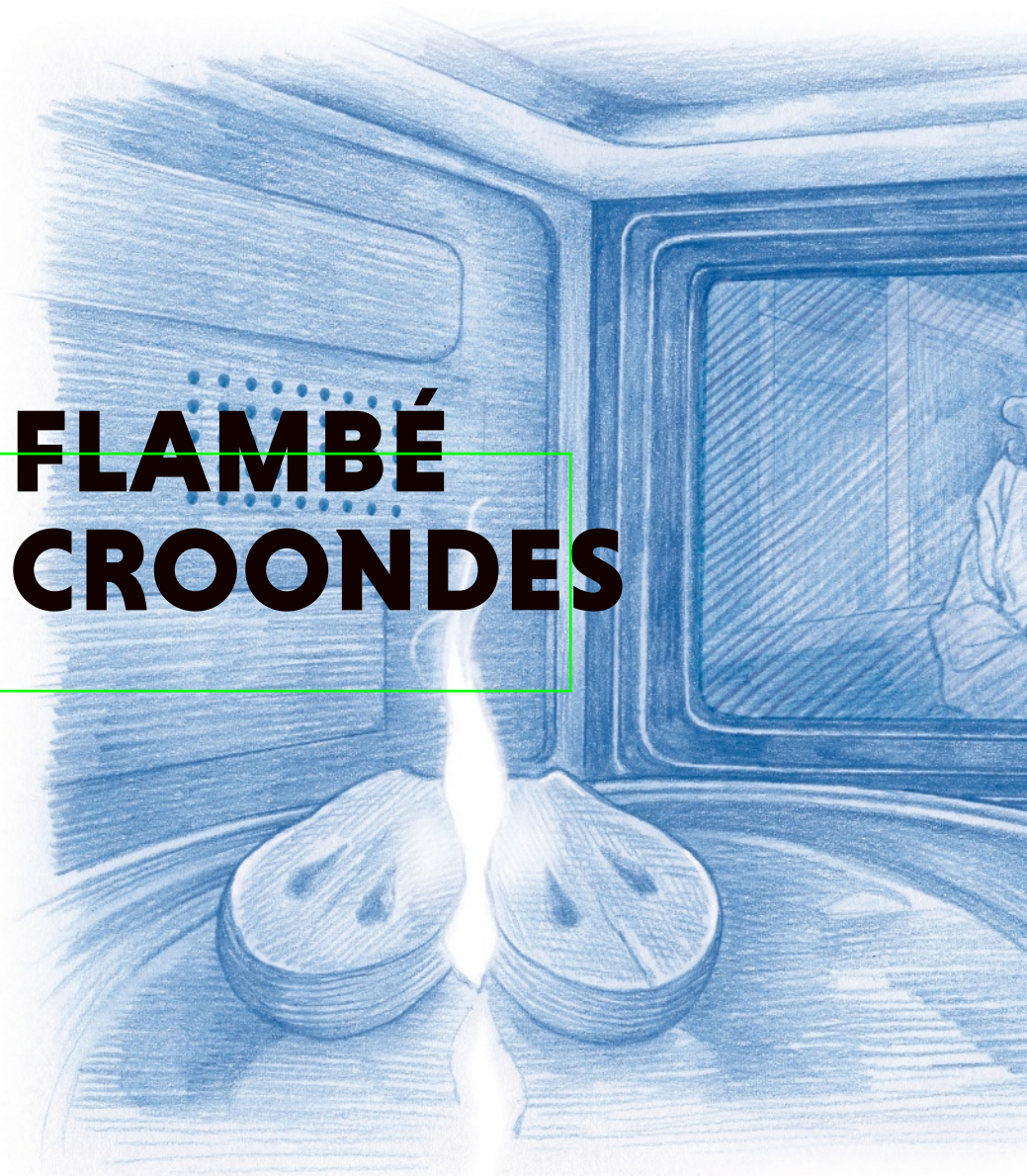
LES AUTEURS



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

RAISIN FLAMBÉ AUX MICROONDES

Dans un four à microondes, de fortes concentrations d'énergie peuvent apparaître dans la région qui sépare deux aliments très proches.



Une expérience rendue populaire par YouTube consiste à placer dans un four à microondes un grain de raisin coupé en deux, mais dont les deux hémisphères sont encore reliés par un petit morceau de peau, épargné lors de la découpe. Lorsqu'on allume le four, des flammes apparaissent entre les deux moitiés (*voir l'illustration*). À quoi cela est-il dû?

La plupart des explications prétendent que les deux hémisphères de raisin agissent comme une antenne et que le courant électrique intense circulant alors dans la peau serait à l'origine du plasma, le milieu gazeux chaud et ionisé formé entre les deux parties du fruit. Des expériences récentes, réalisées par trois physiciens au Canada (*voir la bibliographie*), montrent qu'il n'en est rien: le plasma est dû à la présence, au point de contact entre les deux moitiés du grain, d'un champ électromagnétique intense qui vaporise la matière et ionise les atomes de sodium et de potassium présents dans la chair du raisin.

UN ÉCHAUFFEMENT INHOMOGÈNE

Pour mieux comprendre le phénomène, commençons par l'expérience suivante. On place une belle pomme de terre crue dans un four à microondes, actionné pendant une vingtaine de secondes. On coupe ensuite cette pomme de terre en deux et on observe la température intérieure à l'aide d'une caméra thermique. Que constate-t-on? L'échauffement est très hétérogène, les deux endroits les plus chauds étant au cœur de la pomme de terre et distants d'environ 2 centimètres. Comme l'échauffement de la chair résulte de l'absorption des microondes, il est proportionnel à l'intensité du champ électromagnétique à l'endroit considéré: cela signifie que le champ microonde présente les mêmes inhomogénéités d'intensité que la température.

Pourquoi le champ est-il si hétérogène au sein de la patate? Serait-ce la conséquence de l'onde stationnaire formée par le champ électromagnétique dans le four et qui a pour effet de chauffer différemment les aliments selon l'endroit où ils se trouvent? La réponse est non, pour plusieurs raisons.

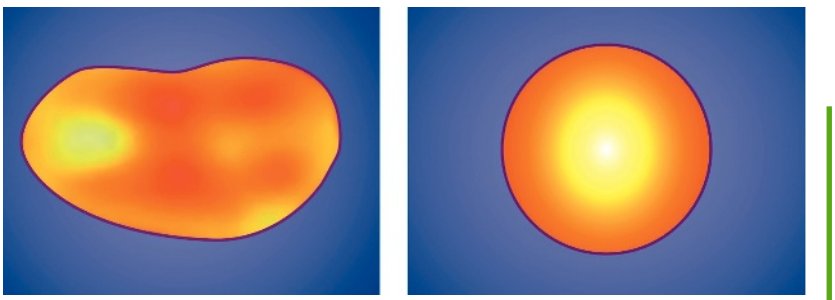
Tout d'abord, la pomme de terre est posée sur un plateau tournant et se déplace ainsi à travers les nœuds (minima) et les ventres (maxima) de l'onde stationnaire du champ microonde. Elle subit donc un chauffage uniforme en moyenne.



© Bruno Vacaro, d'après photo infrarouge de Jean-Michel Courty

THERMOGRAPHIE D'UNE POMME DE TERRE

Chauffons dans un four à microondes une pomme de terre, puis coupons-la immédiatement en deux et observons la face de coupe avec une caméra thermique. On constate que l'échauffement est bien plus important en certaines régions *(en tons clairs)* : au centre pour une pomme de terre sphérique, vers les foyers pour une pomme de terre en forme d'ellipsoïde de révolution. En fait, les microondes qui ont pénétré dans le tubercule s'en échappent assez difficilement, en raison des réflexions internes sur l'interface chair-air. De la conjonction de toutes ces ondes internes résultent des « résonances » qui concentrent l'énergie en certains endroits.



Quand on chauffe au four à microondes un grain de raisin coupé en deux et dont les moitiés sont encore reliées ou très proches, beaucoup d'énergie se concentre dans la zone de séparation et crée ainsi un plasma lumineux. Ce phénomène se produit aussi avec d'autres aliments, des pommes de terre par exemple.

Ensuite, la séparation entre deux ventres est de l'ordre de la demi-longueur d'onde du champ microonde, soit 6,5 centimètres (la fréquence des fours à microondes étant de 2,45 gigahertz) ; c'est bien plus que les 2 centimètres séparant les maxima de température constatés.

Enfin, les microondes sont absorbées progressivement en pénétrant dans les aliments : l'intensité diminue environ des deux tiers pour chaque centimètre traversé dans les fruits et légumes. Par conséquent, ne devrait-on pas observer un échauffement maximal non pas au cœur mais en surface, là où le champ n'est pas encore atténué par l'absorption ?

Il faut donc chercher une autre explication. Si l'on assimile la pomme de terre à un ellipsoïde de révolution, le champ semble s'être concentré aux foyers de cet ellipsoïde. Cela suggère que les microondes ont été fortement réfractées à leur entrée dans la pomme de terre. Pour savoir si tel est bien le cas, il faut s'intéresser à l'« indice optique » de la chair de la pomme de terre, c'est-à-dire au rapport entre la célérité de la lumière dans le vide et sa célérité dans le tubercule.

RÉFLEXIONS INTERNES

La pomme de terre est composée surtout d'eau : or, à 2,45 gigahertz, l'indice de l'eau est considérable et égal à 8,9 (à comparer avec 1,5, qui est l'indice du verre pour la lumière visible). En conséquence, la réfraction des microondes est effectivement forte lors de la traversée de l'interface air-pomme de terre et, une fois rentrées dans le tubercule, il leur est difficile d'en sortir. Ainsi, à l'intérieur de la patate, toute onde qui atteint l'interface avec une incidence supérieure à 6,5° (par rapport à la perpendiculaire à l'interface) subira une réflexion totale. Même sous des incidences plus faibles, une partie significative de l'onde est réfléchie (en incidence perpendiculaire à l'interface, près de 63 % de l'énergie est réfléchie).

Cela signifie donc que l'onde qui a pénétré dans la pomme de terre et qui s'y propage pourra être réfléchie plusieurs fois à l'interface avec l'air. Bien entendu, elle

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

sera atténuée à cause de l'absorption et des parties transmises dans l'air aux faibles incidences, mais elle n'en demeure pas moins partiellement piégée : la patate constitue donc pour le champ électromagnétique une espèce de cavité où ce dernier peut former une onde stationnaire. Même si cette cavité a un taux d'atténuation élevé, elle peut exhiber des résonances, c'est-à-dire des modes ondulatoires présentant des maxima et minima marqués, qu'une caméra thermique peut visualiser en raison de l'échauffement associé.

UN CHAMP BIEN CONCENTRÉ

Pour s'assurer de ces idées, on peut réaliser l'expérience de façon bien plus contrôlée avec une bille de polyacrylate de sodium (un matériau hyperabsorbant pour l'eau) gonflée d'eau, l'avantage étant que l'on peut choisir le diamètre de la bille et calculer complètement l'intensité du champ électromagnétique à l'intérieur et à l'extérieur.

Après avoir chauffé la bille au four à microondes puis l'avoir coupée en deux, on observe un point chaud au centre. Cela confirme que le champ microonde ne se contente pas de traverser la bille, mais qu'il s'y concentre. La bille, quelle que soit sa taille, est le siège d'une « résonance de Mie », du nom du physicien allemand Gustav Mie qui, au début du XX^{e} siècle, a étudié en détail les résonances au sein des sphères. Les calculs montrent que le maximum de cette résonance est situé au centre de la bille. En outre, ils rappellent l'existence d'une « onde évanescente » dans l'air, à l'extérieur de la bille : il s'agit d'un champ d'amplitude non négligeable qui déborde de l'objet, qu'on ne peut pas révéler par un échauffement, mais qui joue un rôle crucial dans la suite.

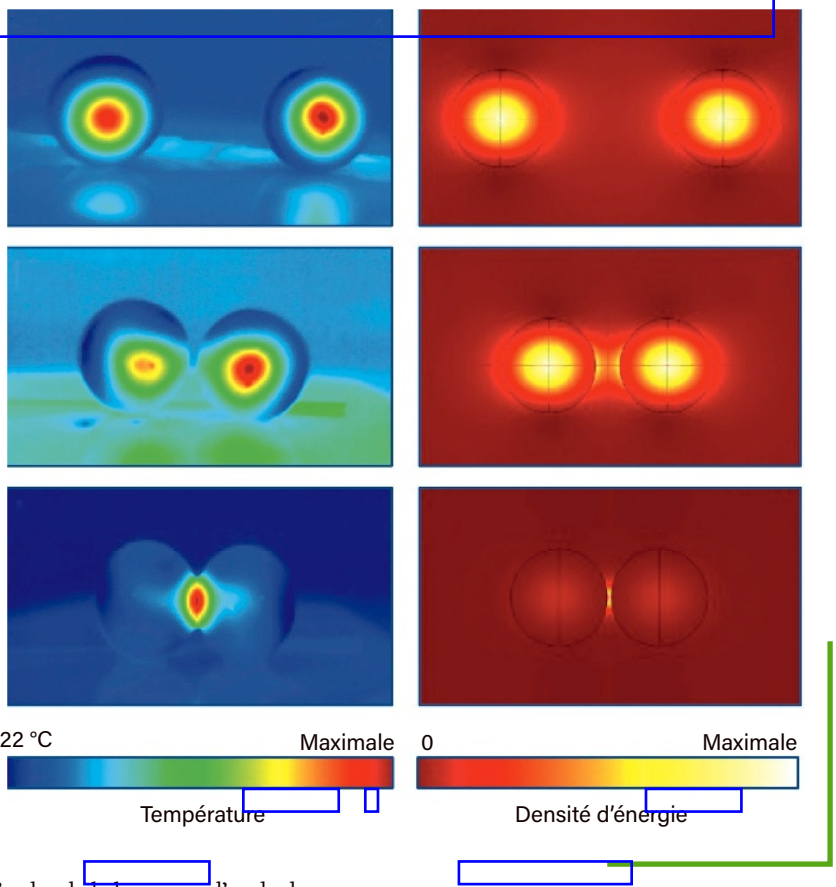
Considérons à présent deux billes identiques que l'on rapproche peu à peu. Lorsque leur écart est supérieur à leur diamètre, la structure du champ dans chacune des billes reste inchangée ou presque. Cependant, l'onde évanescente, à l'extérieur, s'intensifie sur l'axe qui joint les deux billes. À des distances plus courtes, la structure du champ finit par changer profondément : lorsque les deux billes deviennent très proches (0,5 millimètre de distance pour un diamètre de 16 millimètres), l'essentiel de l'énergie se voit concentré dans l'espace entre les billes et non plus en leurs centres, ce qui est très surprenant !

L'échelle typique de variation d'intensité dans les ondes stationnaires formées à partir d'ondes progressives est en général de l'ordre de la longueur d'onde du rayonnement. C'est ce que nous observions à l'intérieur de la pomme de terre. En revanche, dans le royaume des ondes évanescentes, il n'y a pas de limite : l'énergie peut se concentrer sur des zones de taille bien plus petite que la longueur d'onde.

Avec les deux billes très proches, nous en avons un exemple remarquable. L'épaisseur de la zone dans laquelle est confiné le champ est cent fois plus faible que la longueur d'onde de ce dernier, et son diamètre est une vingtaine de fois plus petit. L'intensité du champ électromagnétique à cet endroit est alors si élevée que la matière présente s'échauffe jusqu'à se vaporiser. Dans le cas de l'expérience avec le grain de raisin, le spectre de la lumière émise suggère que ce sont les atomes de sodium et de potassium présents dans la chair du raisin qui sont ionisés et qui forment le fameux plasma. ■

CARTES DE TEMPÉRATURE ET D'ÉNERGIE

La répartition de la température au sein de deux grains de raisin soumis au chauffage par microondes *(colonne de gauche)* dépend de la distance entre les deux objets. Lorsque les deux grains sont bien écartés, chaque grain a un point chaud au centre. Lorsqu'ils se touchent presque, c'est la zone intermédiaire qui devient chaude. Ces cartes de température mesurée correspondent assez bien aux cartes de la densité d'énergie électromagnétique établies par des simulations numériques *(colonne de droite)*.



BIBLIOGRAPHIE

H. K. Khattak, P. Bianucci et A. D. Slepkov, **Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimers,** *PNAS,* vol. 116(10), pp. 4000-4005, 2019.

J.-M. Courty, **Vidéo de *Merci la Physique !* sur l'expérience avec les pommes de terre :** https ://youtu.be/y_LKYu1yXQc

J.-M. Courty, **Vidéo de *Merci la Physique !* sur les modes ondulatoires dans le four à microondes :** https ://youtu.be/YfJeRYToXIM

© H. K. Khattak et al., PNAS, vol. 116(10), pp. 4000-4005, 2019

ABONNEZ-VOUS À Pour la Science

OFFRE RENTRÉE 1 AN

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
10 € DE RÉDUCTION		✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de ~~82,80 €~~	**69 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**89 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	29 % de réduction*	**40 %** de réduction*	**49 %** de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements Pour la Science – 56, rue du Rocher – 75008 Paris – Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG21REN

OUI, je m'abonne pour 1 an à Pour la Science

1 Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER** — **59 €** Au lieu de ~~82,80 €~~
- 12 n° du magazine papier

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — **69 €** Au lieu de ~~114,40 €~~
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **89 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

1-F-PAP-P-12N-59€ 1-F-HSPAP-P-12N-69€ 1-F-INT-P-12N-89€

2 J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal ..... Ville : .....

Téléphone .....

Courriel : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @.....

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

3 Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque à l'ordre de Pour la Science**

Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr/offres-rentree-PLS

*Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

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

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 58.14 Z

L'AUTEUR



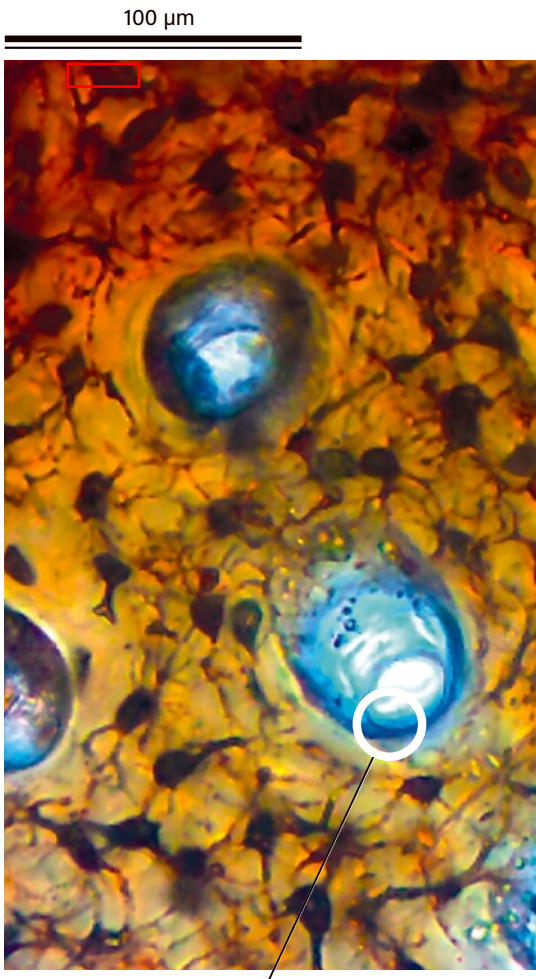
HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite
de biologie évolutive
à Sorbonne Université,
à Paris

SUR LES TRACES DES PREMIERS OSTÉOCYTES

Les ostéocytes sont les seules cellules dont la forme est préservée dans l'os des vertébrés fossiles. Une propriété fort utile pour enquêter sur leur rôle et leur origine chez des animaux vieux de 400 millions d'années…

Posez la question dans votre entourage : « Quel est le rôle du squelette ? » La majorité vous répondra que la charpente osseuse, par le jeu des muscles, permet le soutien et le déplacement du corps. Certains rajouteront la protection d'organes, comme le crâne pour le cerveau. Mais combien vous parleront de réservoir métabolique, en particulier de phosphore et de calcium ?

En effet, autour d'une trame protéique, nos os sont constitués en majorité de phosphate de calcium sous la forme cristalline d'hydroxyapatite, qui leur confère leur solidité. Loin d'être figés, ils sont continuellement remodelés et répondent ainsi aux contraintes mécaniques auxquelles ils sont soumis. Les joueurs de tennis peuvent en témoigner : les os du bras tenant la raquette présentent des différences morphologiques par rapport à ceux de l'autre. Le phosphore et le calcium ont par ailleurs de multiples rôles dans la vie des cellules. Aussi, le maintien de concentrations sanguines stables est indispensable au fonctionnement de ces dernières. Notre organisme nécessite donc un équilibre permanent – une homéostasie – du phosphore et du calcium entre les apports alimentaires, le stockage dans les os, les utilisations diverses et l'élimination. Une perturbation peut entraîner des effets majeurs, comme l'ostéoporose.



Les grandes zones blanchâtres correspondent aux trous laissés par les vaisseaux sanguins.

© Y. Handyet al., Sci. Adv., vol. 7, article eabb9113, 2021

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

EN CHIFFRES

42 MILLIARDS

Le corps humain compte environ 42 milliards d'ostéocytes. La surface totale du réseau qu'ils constituent est d'environ 215 m^2 et, mis bout à bout, l'ensemble des cellules et de leurs interconnexions s'étendrait sur 175 000 km.

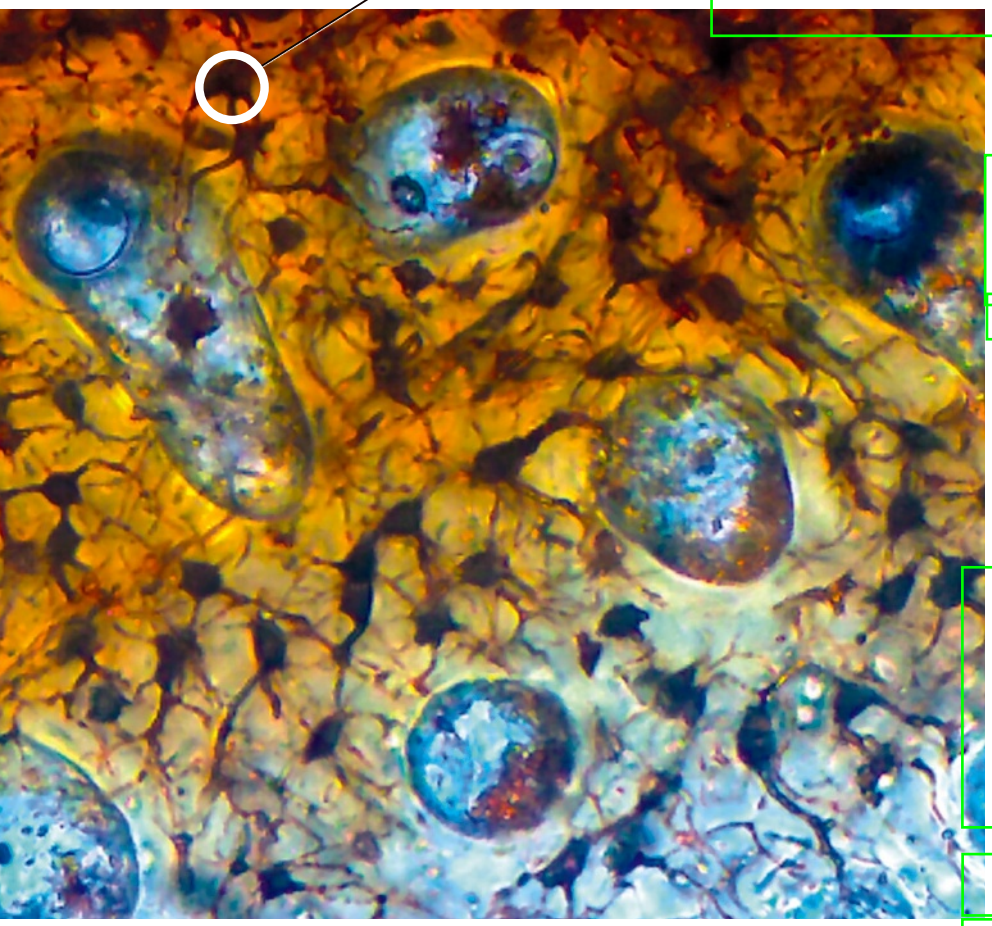
4

Il existe 4 types de cellules osseuses : les ostéoblastes, qui synthétisent et minéralisent la matrice osseuse, les ostéocytes, inclus dans la matrice, les ostéoclastes, qui résorbent la matrice osseuse, et les ostéoprogéniteurs, des cellules souches qui se différencient notamment en ostéoblastes.

10 %

Chaque année, environ 10 % du squelette humain est remodelé.

Sur cette coupe histologique d'un os fossilisé de l'ostéostracé *Trematapis mammillata*, un poisson sans mâchoire qui vivait il y a environ 420 millions d'années, on distingue les lacunes et canalicules qui, du vivant de l'animal, hébergeaient les ostéocytes et leurs prolongements.





Trematapis mammillata
Taille : env. 10 cm

© Wikimedia commons

Chez les mammifères, on connaît bien la biologie des cellules qui remodèlent le tissu osseux. Celui-ci comporte en son sein des cellules particulières, les ostéocytes. Piégées dans le tissu osseux lors de sa formation, ces cellules occupent de petites lacunes et forment un réseau de prolongements qui passent par de fins canalicules, constituant ainsi un réseau très dense. Ce réseau perçoit les contraintes mécaniques sur la matrice osseuse, envoie et reçoit des signaux qui contrôlent le remodelage de l'os, et participe ainsi à l'homéostasie du calcium et du phosphore.

Une question, cependant, est longtemps restée en suspens, faute d'outils pour l'appréhender : comment ces cellules sont-elles apparues au fil de l'évolution ? Mais récemment, une équipe autour de Florian Witzmann, du Muséum d'histoire naturelle de Berlin, a apporté un élément de réponse en examinant des fossiles vieux d'environ 400 millions d'années à l'aide d'une nouvelle technique d'imagerie.

EN QUÊTE D'INDICES PHYSIOLOGIQUES

Les mammifères sont loin d'être les seuls animaux à présenter des ostéocytes. Même si l'on remarque de nombreuses pertes secondaires, comme chez les poissons cartilagineux (chondrichthyens) ou les poissons à nageoires rayonnées (actinoptérygiens), ces cellules sont une caractéristique des vertébrés à mâchoires (gnathostomes). Il s'agissait donc d'explorer leurs ancêtres et proches cousins.

A priori, il paraît impossible de connaître la physiologie d'animaux dont il ne nous reste que des fossiles. Comment saisir la dynamique d'un organisme à partir de quelques structures préservées ? Mais la localisation des ostéocytes constitue un sérieux atout : dans les os fossiles, ils laissent en place des lacunes et des canalicules. Dès le milieu du XX^{e} siècle, des paléontologues ont eu l'idée d'analyser des coupes minces d'os fossiles en

microscopie optique ou électronique, dans l'espoir d'observer ces lacunes ou d'autres indices de la physiologie des animaux, comme la vitesse de croissance des os. Pour reconstituer une image tridimensionnelle de l'os, on réalisait une série de coupes, que l'on observait séquentiellement, puis raboutait. Un travail difficile, fastidieux et relativement imprécis qui, pourtant, a donné quelques résultats intéressants.

Ainsi, en 1974, Armand de Ricqlès, alors à l'université Paris VII, a montré, à partir de la structure microscopique des os longs, que les dinosaures étaient probablement des animaux à température constante, et non à température variable comme les lézards et les crocodiles auxquels on les comparait.

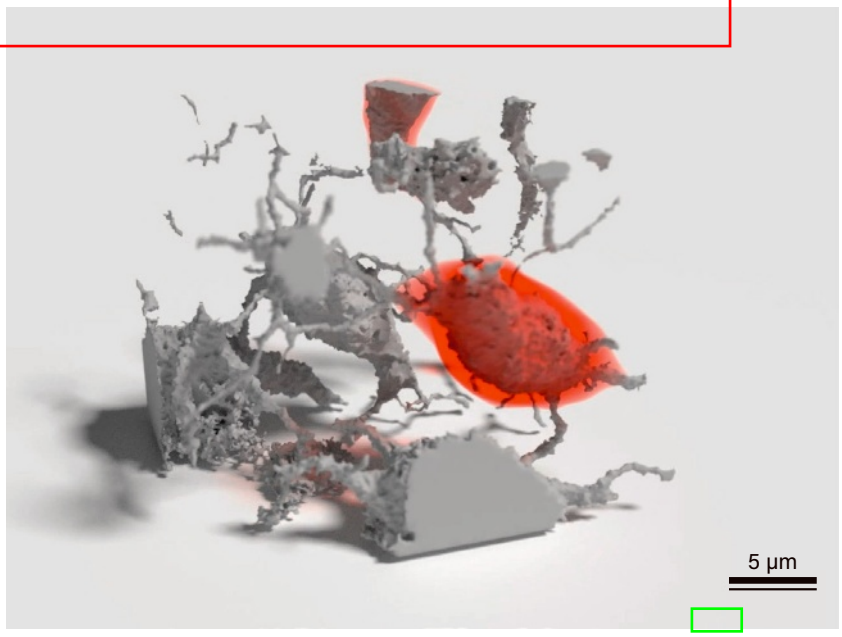
Néanmoins, la technique restait trop imprécise pour fournir des informations sur l'origine des ostéocytes. Mais une technique de tomographie nommée FIB-SEM, jusqu'à présent surtout utilisée en science des matériaux, a résolu le problème d'une manière élégante. Il s'agit d'allier un microscope électronique à balayage à une sonde ionique focalisée. Il y a donc deux faisceaux: l'un, constitué d'électrons, permet de réaliser les images; l'autre est formé d'ions gallium projetés à haute énergie sur la face de l'échantillon. Un tel faisceau est destructeur, car il pulvérise la matière. Sur la nouvelle face, les ions gallium s'insèrent dans une épaisseur de quelques nanomètres et rendent la surface amorphe. Pour réaliser la tomographie, il faut que les deux faisceaux soient bien synchronisés afin qu'une image soit prise à chaque fois que les ions gallium ont détruit une fine couche. Tout se passe donc comme si l'on effectuait des coupes sériées. On reconstitue ensuite une image tridimensionnelle de l'échantillon. Naturellement, ce dernier se trouve détruit à la fin du processus, mais ce n'est qu'un cube de moins de 50 micromètres d'arête.

UN RÉSEAU CELLULAIRE INTERNE

L'équipe de Florian Witzmann a utilisé cette technique sur deux espèces fossiles judicieusement choisies: *Trematapsis mammillata* est un ostéostracé du Silurien terminal (il y a entre 421 et 428 millions d'années), les ostéostracés étant un groupe frère des gnathostomes; *Bothriolepis trautscholdi* est un antiarche du Dévonien terminal (il y a entre 372 et 382 millions d'années) et appartient donc au groupe le plus ancestral des gnathostomes.

DE MYSTÉRIEUX HALOS SOMBRES

L'observation d'échantillons d'os du poisson fossile *Trematapsis mammillata* par la technique de tomographie FIB-SEM a révélé non seulement des lacunes et des canalicules *(ci-dessous en gris)*, signes que le tissu osseux comportait bien un réseau de cellules, mais aussi, autour de certaines lacunes, une zone de faible intensité du signal *(en rouge)*. Cette zone, structurellement altérée, ne peut être un artefact attribué à la technique ou à la fossilisation, car seules certaines régions sont concernées. Il s'agirait d'une zone de faible densité formant comme un halo sombre, contrastant avec le noir de la lacune et le gris de l'os fossile.



On observe des lacunes et canalicules chez les deux. Mais, chez *T. mammillata*, une lacune de forme ovoïde est curieusement entourée d'une zone de faible densité formant comme un halo sombre *(voir l'encadré ci-dessus)*. Comment interpréter cette zone sombre, trouvée autour d'autres lacunes et de canalicules? Pour les chercheurs, elle est le résultat d'une ostéolyse due à un processus physiologique, c'est-à-dire d'une destruction du tissu osseux, vraisemblablement liée au métabolisme du phosphore.

Et comme on n'observe pas ce phénomène chez *B. trautscholdi*, on peut avancer que la demande en phosphore de l'organisme a été le principal acteur de la sélection des ostéocytes, dont le rôle s'est stabilisé chez les gnathostomes: les premières cellules parvenues dans le tissu osseux ont peut-être juste commencé par augmenter la surface de contact des cellules avec le tissu osseux, ce qui a pu favoriser sa dissolution en cas de déséquilibre phosphocalcique. Il reste à comprendre comment les premiers ancêtres des vertébrés luttaient contre l'ostéoporose. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Haridy *et al.*, **Bone metabolism and evolutionary origin of osteocytes : Novel application of FIB-SEM tomography,** *Sci. Adv.*, vol. 7, article eabb9113, 2021.

S. Giles *et al.*, **Histology of « placoderm » dermal skeletons : Implications for the nature of the ancestral gnathostome,** *J. Morphol.*, vol. 274, pp. 627-644, 2013.

A. J. de Ricqlès, **Evolution of endothermy : Histological evidence,** *Evol. Theory*, vol. 1, pp. 51-80, 1974.

© Y. Haridy et al., Sci. Adv., vol. 7, article eabb9113, 2021

ABONNEZ-VOUS À Pour la Science

OFFRE RENTRÉE — DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS	**5,75 €** PAR MOIS	**7,40 €** PAR MOIS
		Au lieu de ~~6,50 €~~ par mois	Au lieu de ~~8,20 €~~ par mois

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements Pour la Science – 56, rue du Rocher – 75008 Paris – Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr

☑ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG21REN

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE **PAPIER** — 4,90€ PAR MOIS
- 12 n° papier par an

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — 5,75€ PAR MOIS
- 12 n° papier par an
- 4 Hors-série papier par an

1-F-HSPAP-P-3PVT-5,75€

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — 7,40€ PAR MOIS
- 12 n° du magazine (papier et numérique) par an
- 4 Hors-série (papier et numérique) par an
- Accès illimité aux contenus en ligne

1-F-INT-P-3PVT-7,4€

2 / Mes coordonnées

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tel. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Courriel : ..... @.....
(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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 : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter
BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

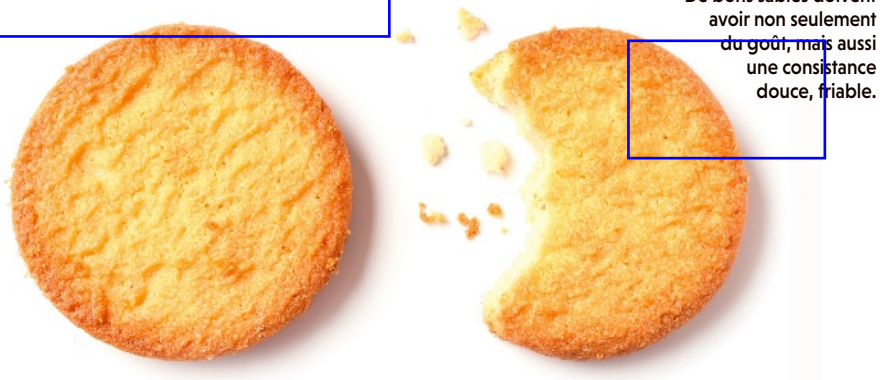
L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste, directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra, à Paris

DES SABLÉS BIEN GOÛTEUX

La précuisson des ingrédients – farine, beurre, œuf et sucre – exalte le goût de ces biscuits et leur confère une agréable consistance.



De bons sablés doivent avoir non seulement du goût, mais aussi une consistance douce, friable.

Comment faire de bons sablés ? Les recettes sont aussi nombreuses qu'hasardeuses. Parfois ce sont les proportions qui manquent, parfois les auteurs des recettes préconisent des conditions de cuisson très personnelles, voire incohérentes.

Un esprit scientifique chasse les adjectifs : que signifie « bon » ? Il faut une consistance sableuse, friable, mais il faut surtout beaucoup de goût, à partir des ingrédients classiques que sont la farine, les œufs, le beurre et le sucre… sans oublier la sempiternelle pincée de sel qui favorise la libération des composés odorants en même temps qu'elle renforce la composante sapide du goût.

Concentrons-nous d'abord sur la consistance. L'expérience qui consiste à faire une boule de pâte à partir de farine et d'eau, puis à procéder à une « lixiviation » (on malaxe la pâte dans de l'eau) conduit, comme l'a montré le chimiste strasbourgeois Johannes Kesselmeyer en 1759, à comprendre que la farine est faite d'amidon et de « gluten » (un mélange de protéines). Cette dernière matière est à l'origine de la cohésion de la pâte, l'eau assurant un pontage des protéines, qui forment alors un réseau (un filet tridimensionnel) où les grains d'amidon sont enchâssés. Une telle matière serait redoutablement dure, à l'opposé des friables sablés que nous visons.

Certes, le sucre aidera à défaire le réseau. On observe en effet que si l'on ajoute du sucre glace à une boule faite de farine et d'eau, la pâte perd en quelques instants sa consistance et se met à couler, parce que le sucre a capté l'eau de pontage des protéines, produisant un sirop où sont suspendus les grains d'amidon. Reste que l'on aimerait réduire la contribution du gluten, ce que l'on peut faire facilement si l'on torréfie préalablement la farine. Cette opération est réalisable sous le gril, ou dans une casserole, à sec, et l'on obtient alors une délicieuse farine torréfiée, débarrassée d'une partie de ses protéines, qui fera des consistances parfaitement friables quand on ajoutera sucre, œuf et beurre. Sans compter que cette farine torréfiée a un goût qui peut aller jusqu'à ressembler à celui du chocolat.

Et nous en arrivons donc maintenant à la question du goût : comment en donner beaucoup aux sablés ? Certes, le beurre a du goût, mais pourquoi ne pas lui en donner davantage, en le cuisant préalablement, pour faire un « beurre noisette » ? Cette fois, ce sont les protéines du beurre qui bruniront, engendrant le goût de noisettes grillées qui s'ajoutera à celui de la farine torréfiée. Le sucre ? Cuisons-le aussi, pour en faire du caramel, qui ajoutera une note gustative puissante.

DE L'HYDROGÈNE SULFURÉ

Reste l'œuf, dont il est bon de savoir que, fortement chauffé, il libère de l'hydrogène sulfuré (H_2S), comme le montre l'expérience (non comestible) qui consiste à placer au-dessus d'un œuf qui cuit un papier imbibé d'une solution incolore d'acétate de plomb : l'apparition d'une couleur noire révèle ce gaz qui, à forte concentration, est toxique et nauséabond, mais qui, à plus faible concentration, apporte de très agréables notes d'œuf cuit. Bref, nous diviserons l'œuf de la recette en deux moitiés : l'une sera fortement chauffée, avant d'être broyée et ajoutée au mélange de farine torréfiée, sucre caramélisé et beurre noisette, tandis que l'autre moitié contribuera à la consistance des sablés, en coagulant doucement lors de leur cuisson.

Et nous aurons ainsi, grâce à l'analyse scientifique, des sablés bien friables, avec beaucoup de goût. ■

LA RECETTE

❶ Dans une casserole, chauffer 250 g de farine et 50 g de poudre d'amande jusqu'à coloration blonde ou brune (selon le goût).
❷ Dans une autre casserole, cuire 150 g de beurre jusqu'à l'apparition d'une couleur blonde et d'une odeur de noisette.
❸ Dans une troisième casserole, chauffer 100 g de sucre avec une cuillerée à soupe d'eau jusqu'à coloration légère de caramel.
❹ Faire cuire un blanc d'œuf sur le plat, jusqu'à produire une puissante odeur d'œuf cuit.
❺ Quand toutes les préparations précédentes ont refroidi, les mélanger intimement, puis ajouter le jaune d'œuf et une forte pincée de sel.
❻ Mettre au froid pendant une heure, puis étaler sur une plaque à pâtisserie et détailler à l'emporte-pièce.
❼ Cuire à four chaud (210 °C) pendant 12 minutes.

© Shutterstock.com/Rufina

AVEZ-VOUS



DES RESSOURCES QUE L'ON ÉCONOMISE QUAND ON RECYCLE ?

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

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

p.60 ARACHNOÏDE

Trois membranes, les méninges, enveloppent le cerveau et la moelle épinière : la dure-mère à l'extérieur, la pie-mère à l'intérieur et, entre les deux, l'arachnoïde. Celle-ci doit son nom à son aspect évoquant une toile d'araignée. Le petit espace entre l'arachnoïde et la pie-mère est rempli de liquide céphalorachidien. Ce liquide, vital pour le système nerveux, est produit dans les ventricules cérébraux et circule dans tout l'organe.

p.74 1955

Cette année-là, à Los Alamos, aux États-Unis, Enrico Fermi, John Pasta et Stanislaw Ulam réalisèrent la première expérience numérique. Celle-ci reposait sur un algorithme conçu et mis en œuvre par Mary Tsingou, dont le nom a été injustement oublié.

p.14

Du fait des échelles de temps de réponse de l'océan et des calottes de glace, la montée des mers est inéluctable et il est certain qu'elle se poursuivra dans les prochains siècles, voire millénaires.

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE paléoclimatologue au CEA et coprésidente du groupe 1 du Giec

p.50 23%

C'est à peu près, dans le monde ou en Europe, la part que représente le gaz naturel dans la consommation totale d'énergie. Aux États-Unis, cette part est bien plus élevée et atteint 32 % de l'énergie consommée. Rappelons que la combustion du gaz naturel émet du CO_2...

p.40 EFFET JANZEN-CONNELL

Le sol dans lequel un arbre est enraciné contient des microorganismes. Quand ceux-ci sont des parasites de l'espèce à laquelle appartient l'arbre, les jeunes plantules de la même espèce ne peuvent se développer à proximité de l'arbre adulte, et sont remplacées par d'autres espèces végétales, ce qui favorise la diversité.

p.6 CRISTAL DE WIGNER

En 1934, le physicien hongrois Eugene Wigner a prédit qu'en deux dimensions, sous l'effet de leurs répulsions électrostatiques et si leur densité est assez faible, des électrons libres se disposeraient selon un réseau régulier de triangles. Deux équipes ont mis en évidence de tels cristaux de Wigner sans l'aide d'un champ magnétique – une première.

p.80 ZETTA

Ce préfixe correspond à 10^{21}, soit mille milliards de milliards. L'ensemble des mémoires informatiques d'aujourd'hui se compte ainsi en zettaoctets. Le cap du yottaoctet (10^{24} octets) pourrait être franchi avant 2040. Au-delà du yotta, les noms des préfixes pour 10^{27}, 10^{30}, 10^{33}, etc. ne sont pas encore homologués.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal : 5636 – Octobre 2021 – N° d'édition : M0770528-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 256 864 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

Institut du Cerveau ICM

BRAINCAST

La voix des neurones

en partenariat avec l'Institut du Cerveau

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



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

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

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

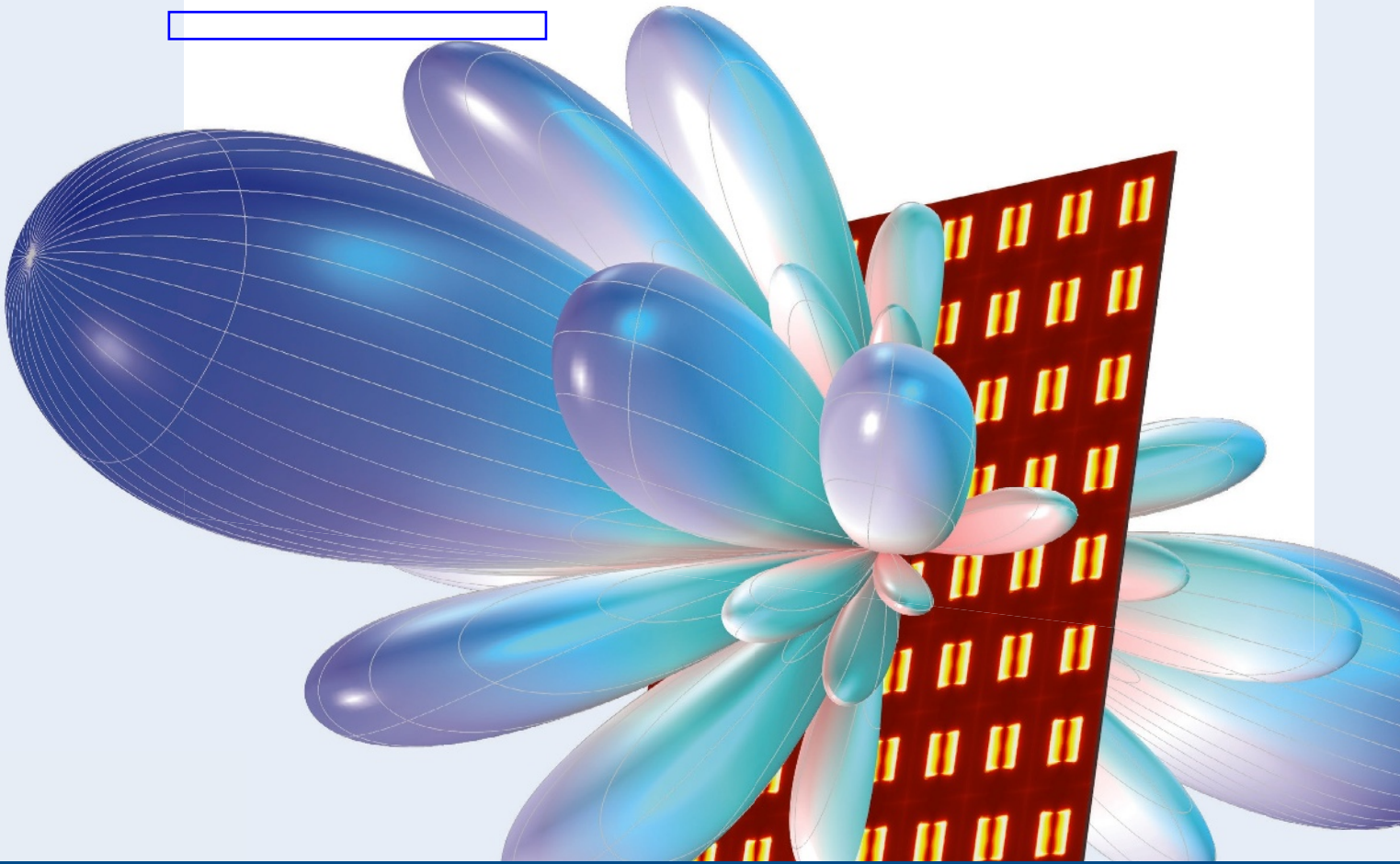
Cerveau & Psycho

ÉTUDE DE CAS

L'IoT impose une communication rapide entre capteurs.

Le développement du réseau mobile 5G n'est probablement pas la seule étape vers un Internet des objets pleinement fonctionnel, mais reste une étape importante et elle s'accompagne de fortes exigences en matière de performance. La simulation permet d'optimiser la conception des dispositifs compatibles 5G, comme cette antenne réseau à commande de phase.

EN SAVOIR PLUS *comsol.blog/5G*



COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.