POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

L 13256 - 516 - F: 6,90 € - RD

OCTOBRE 2020
N° 516

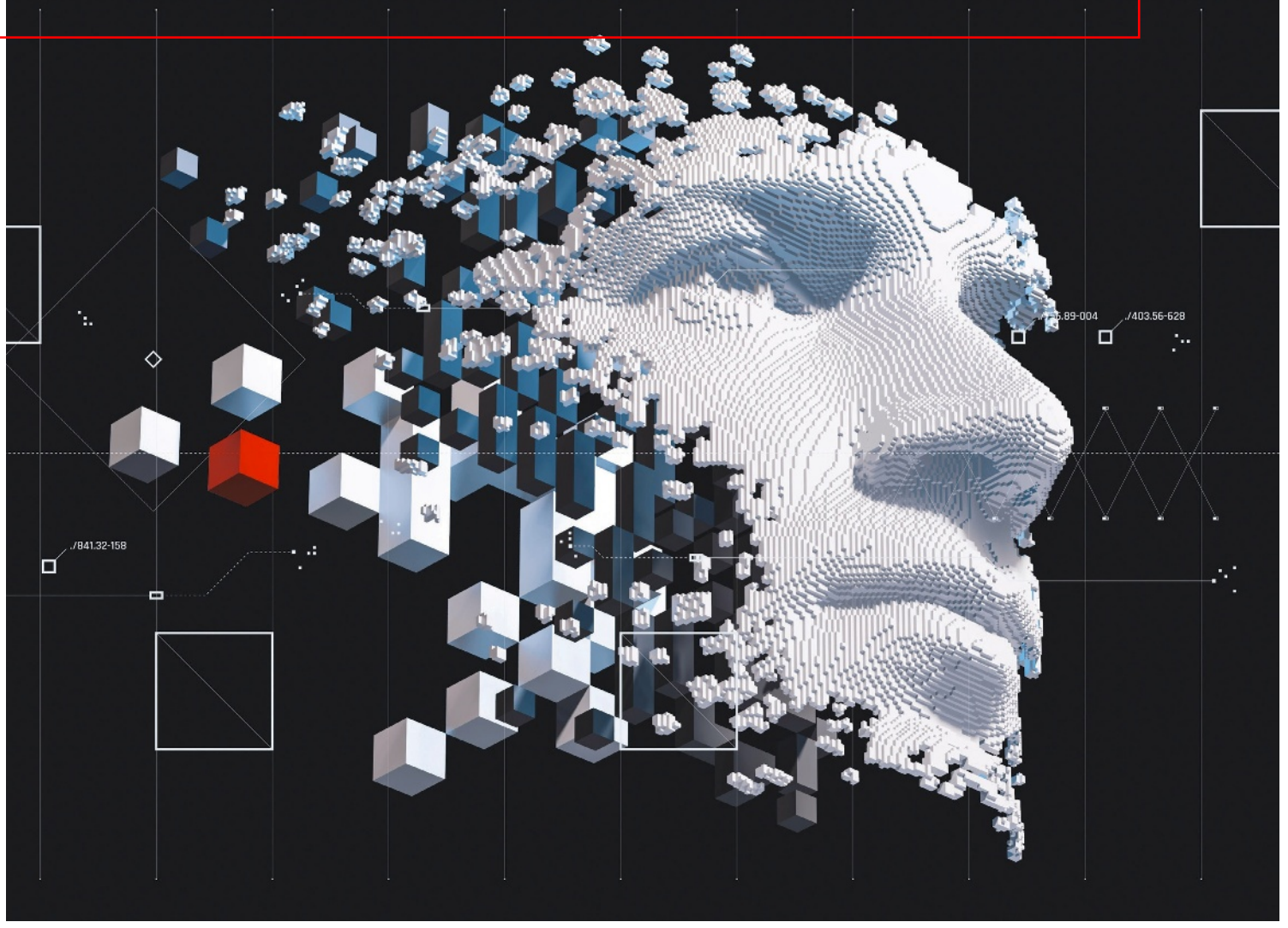
ASTROPHYSIQUE
VOIR NAÎTRE DES SYSTÈMES PLANÉTAIRES

ÉVOLUTION
L'ÉTONNANT SUCCÈS DES CHÊNES

HISTOIRE DES SCIENCES
L'EFFET DOPPLER, DU REJET AU TRIOMPHE

BEL : 7,6 € - CAN : 11,6 CAD - DOM/S : 7,7 € - Réunion/A : 9,9 € - ESP : 7,6 € - GR : 7,6 € - ITA : 7,6 € - LUX : 7,6 € - MAR : 64 MAD - TOM : 1 040 XPF - PORT.CONT. : 7,6 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 9,1 TND

ALZHEIMER
Les 5 voies du futur



POUR LA SCIENCE

Vous êtes un fidèle lecteur de *Pour la Science* et vous êtes concerné par la vie de votre magazine ?

Qu'il s'agisse de choisir la prochaine couverture du magazine, de débattre des thématiques abordées ou de construire un nouveau format de revue, votre point de vue nous est précieux et nous permet de répondre au mieux à vos attentes. C'est en maintenant le lien avec vous que nous souhaitons avancer.

Pour cela, nous souhaitons constituer un **Club de lecteurs**. Pour y participer, il s'agirait dans un premier temps de nous faire part de votre désir de contribuer à ce projet et de nous en dire plus sur vous.

Pour plus de détails et pour répondre au formulaire d'inscription, merci de vous connecter à l'adresse suivante :

pourlascience.fr/statics/club-lecteurs

Nous avons besoin de votre avis !

En vous remerciant pour votre fidélité et pour le temps accordé,

L'équipe de *Pour la Science*

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr
170 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Paris
Tél. 01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

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

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe
Community manager: Aëla Keryhuel

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:
Pierre Audebert, Isabelle Bellin, Maud Bruguière, René Cuillierier, Olivier Darrigol, Marie-Christine Gallas, David Grémillet, Hélène Hirbec, Laurent Husson, Thomas Perrin, Laurence Plévert, Géraldine Rauchs, Germain Rousseaux, David Wallon

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: https://boutique.pourlascience.fr
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél. 03 67 07 98 17
Adresse postale:
Next2C – Service abonnements Pour La Science
26 bd du Président-Wilson
CS 40032 67085
Strasbourg Cedex
Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmuth
President: Dean Sanderson
Executive vice president: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

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

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

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

COMPRENDRE, PRÉDIRE… ET TRAITER ?

Parmi les cas de démence, terme qui désigne une dégradation de la mémoire, du raisonnement, du comportement et de l'aptitude à effectuer les activités quotidiennes, 60 à 70 % sont dus à la maladie d'Alzheimer. Et quand on sait que plus de 50 millions de personnes dans le monde (environ 1 million en France) souffrent de démence, chiffre qui triplera d'ici à 2050, on mesure l'ampleur du fléau Alzheimer, avec la souffrance des malades – généralement des personnes âgées – et celle de leurs proches, et le fardeau que cette pathologie constitue pour le système de santé et la société.

Malgré les efforts des chercheurs et des médecins, la maladie d'Alzheimer reste mal comprise et, surtout, sans traitement efficace. On sait qu'elle se manifeste dans le cerveau par la mort de neurones, liée à une accumulation de microagrégats de certaines protéines. Aussi la recherche s'est-elle concentrée sur des médicaments susceptibles d'éliminer du cerveau ces dépôts délétères. Avec hélas peu de résultats. Le neurobiologiste américain Kenneth Kosik juge donc aujourd'hui «indispensable de reconsidérer la biologie fondamentale de la maladie»; et explicite cinq grandes pistes à explorer afin de mieux comprendre l'origine et les mécanismes de la maladie (*voir son article pages 22 à 31*), ce qui orienterait de façon plus efficace la recherche de traitements.

Cependant, traiter une maladie suppose de la détecter. Or, généralement, plus le diagnostic est précoce, plus il y a de chances que les traitements soient effectifs. D'où l'intérêt d'un autre pan de recherches: celles qui tentent d'identifier des signes précurseurs, biologiques ou autres, de la maladie d'Alzheimer. Plusieurs études sur des centaines de patients sont en cours dans le monde et livrent d'ores et déjà des résultats intéressants et parfois surprenants, montrant par exemple que la présence des agrégats protéiques dans le cerveau n'est pas, à elle seule, un facteur prédictif de la maladie, ou que le risque est réduit pour les personnes cultivées (*voir l'entretien avec Bruno Dubois, pages 32 à 37*). La maladie d'Alzheimer n'est pas encore vaincue, mais l'espoir est permis puisque la science l'attaque désormais sur plusieurs fronts. ■

SOMMAIRE

N° 516 /
Octobre 2020

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- L'eau sur Terre, présente dès le début?
- La polio sauvage éradiquée en Afrique
- Des lymphocytes dans le cerveau sain
- Les «eaux mortes» expliquées
- Pointes de flèche flûtées en Arabie
- Nouvelle lumière sur Grenoble
- ADN et ARN, même origine?
- Des poux sous haute pression
- Des solides fluos encore plus brillants
- Comment le fer intervient dans certaines métastases
- Le fou danse comme l'abeille

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Un ordinateur à soi
Gilles Dowek

P. 20
QUESTIONS DE CONFIANCE
À quel sein le politique doit-il se vouer?
Virginie Tournay

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

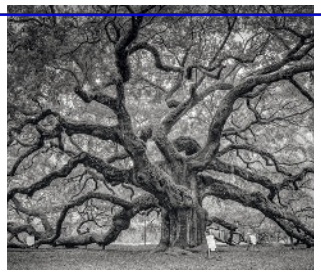
Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr

En couverture:
© pinkeyes / shutterstock.com

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

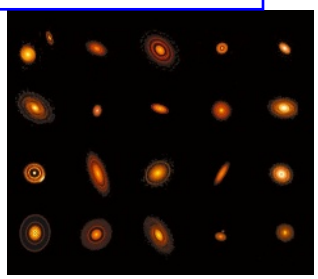
Ce numéro comporte un encart d'abonnement *Pour la Science*, jeté en cahier intérieur, sur toute la diffusion kiosque en France métropolitaine. Il comporte également un courrier de réabonnement, posé sur le magazine, sur une sélection d'abonnés.

GRANDS FORMATS



P. 42
ÉVOLUTION
L'ÉTONNANT SUCCÈS ÉVOLUTIF DES CHÊNES
Andrew Hipp, Paul Manos et Jeannine Cavender-Bares

Les quelque 435 espèces de chênes dominent dans les forêts de tout l'hémisphère Nord. Comment ces arbres se sont-ils imposés et diversifiés à ce point? Les chercheurs tentent de le comprendre en reconstituant l'histoire de leurs migrations.

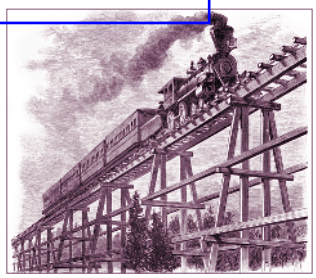


P. 54
ASTROPHYSIQUE
VOIR NAÎTRE DES SYSTÈMES PLANÉTAIRES
Meredith MacGregor

Comment apparaît et évolue un système planétaire autour d'une étoile? Des images en haute résolution de divers disques circumstellaires, ces amas de poussière en rotation qui subsistent autour des étoiles après leur formation, commencent à le montrer.

P. 62
ARCHÉOLOGIE
QUAND LES AGRICULTEURS SE SONT IMPOSÉS EN EUROPE
Laura Spinney

Lorsque les premiers éleveurs-cultivateurs ont gagné l'Europe au Néolithique, ils ont forcément rencontré des populations de chasseurs-cueilleurs. Quelles ont été leurs interactions ?



P. 72
HISTOIRE DES SCIENCES
LA CHUTE ET L'ASCENSION DE L'EFFET DOPPLER
David Nolte

L'effet d'un mouvement sur la fréquence des ondes, prédit dès 1842 par Christian Doppler, est aujourd'hui bien connu et familier. Les idées du physicien autrichien se sont pourtant heurtées à beaucoup de scepticisme avant de triompher un demi-siècle plus tard.

À LA UNE

NEUROSCIENCES

P. 22

ALZHEIMER
Les voies du futur

Kenneth S. Kosik

La maladie d'Alzheimer ne se résume pas à la destruction de neurones liée à l'accumulation d'amas protéiques dans le cerveau. On s'aperçoit aujourd'hui que pour vaincre cette pathologie, il est indispensable de revenir à sa biologie fondamentale. Cinq voies suscitent ainsi de nouveaux espoirs.

P. 32

« TOUS LES PORTEURS DE LÉSIONS N'AURONT PAS ALZHEIMER »

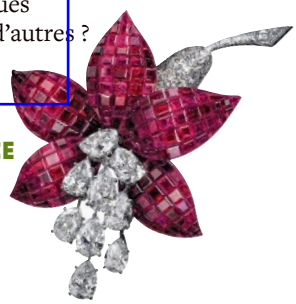
Entretien avec Bruno Dubois

Dans la lutte contre la maladie d'Alzheimer, un défi de taille consiste à diagnostiquer la maladie plus tôt. Des facteurs de risque commencent à émerger d'études épidémiologiques et offrent ainsi des pistes pour mieux cibler les personnes susceptibles de développer la maladie.

RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL
DU FLOU ET DU FAUX EN MATHÉMATIQUES
Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques sont la plus précise et la plus exacte des sciences... Leur histoire nous montre pourtant de nombreux exemples d'erreurs importantes. Comment limiter les risques d'en produire d'autres ?



P. 86
ART & SCIENCE
L'expression des gemmes
Loïc Mangin

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
L'horloge qui marche au chaud et froid
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Comment le moustique vous repère
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Des mousses au goût maîtrisé
Hervé This

P. 98
À PICORER

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À III (APRÈS P. 38)

Anticiper les effets secondaires des nouvelles techniques de radiothérapie

Parrainé par

IRSN

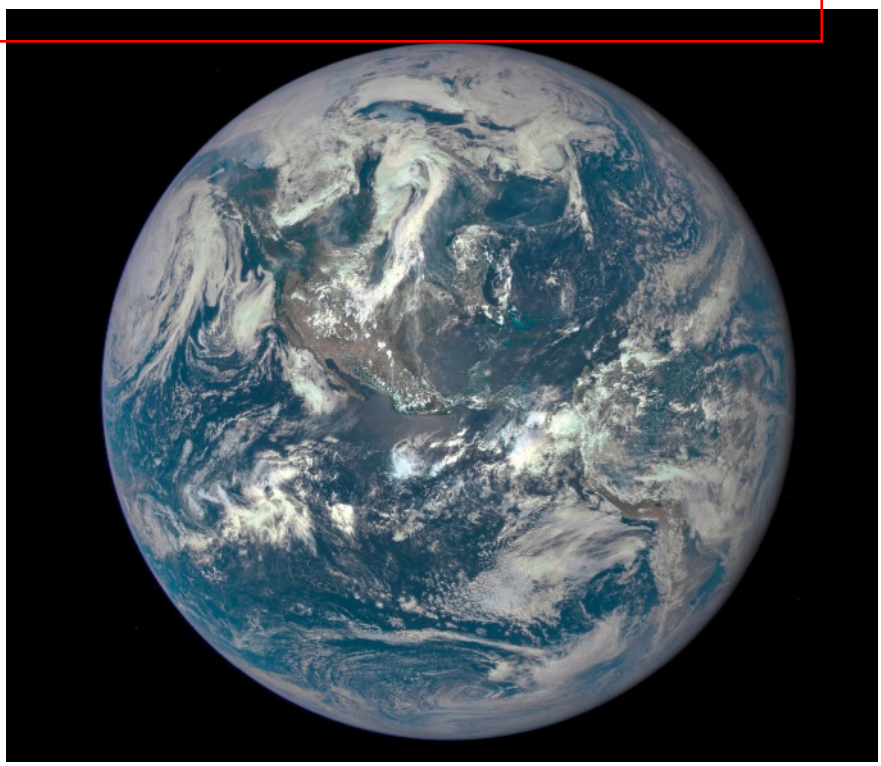
ACTUALITÉS

P.6 *Échos des labos*
P.16 *Livres du mois*
P.18 *Homo sapiens informaticus*
P.20 *Questions de confiance*

PLANÉTOLOGIE

L'EAU SUR TERRE, PRÉSENTE DÈS LE DÉBUT ?

L'analyse de matériaux météoritiques proches de ceux ayant formé la Terre suggère que l'eau était en grande partie déjà présente dans notre planète à sa naissance.



D'où vient l'eau de notre planète ? L'équipe de Laurette Piani a montré que ce composé a pu être apporté dès la naissance de la Terre par des chondrites à enstatite provenant du Système solaire interne, dont la météorite Sahara 97 096 ci-dessus est un exemple.

L'eau est indispensable à la vie et contribue grandement à la beauté de la Planète bleue. Mais d'où vient cette eau, qui recouvre aujourd'hui 71 % de la surface de la Terre et dont une masse plus importante encore que celle des océans est emmagasinée dans les profondeurs de la planète ?

La question est débattue depuis longtemps. Parmi les divers scénarios proposés, deux dominent : l'idée d'une eau originaire du Système solaire externe, apportée sur Terre vers la fin de sa formation, et celle d'une eau déjà présente dans les roches constitutives de notre planète. Laurette Piani et son équipe, du Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (CNRS et université de Lorraine), ont conforté le second scénario en montrant que les chondrites à enstatite – des météorites dont on considère la composition comme proche de celle des matériaux issus du Système solaire interne qui se sont agrégés pour former la Terre – contenaient assez d'eau pour fournir l'équivalent d'au moins trois fois le volume des océans.

Le scénario d'une eau provenant de la partie externe du Système solaire était appuyé par l'observation que plus on s'éloigne du Soleil, plus les planétésimaux contiennent des matériaux hydratés, voire de la glace. On pensait ainsi que l'eau était arrivée sur Terre au sein de matériaux du genre des chondrites carbonées, de très anciennes météorites rocheuses originaires d'astéroïdes et comètes du Système solaire externe, qui contiennent de l'eau à hauteur de plusieurs points de pourcentage (en masse) et dont les rapports isotopiques deutérium/hydrogène (D/H) se trouvent être proches de celui de l'océan mondial.

Le deutérium, hydrogène lourd dont le noyau atomique a un neutron en plus du proton, est en effet plus ou moins présent dans les molécules d'eau (H_2O, HDO, D_2O) selon les conditions dans lesquelles elles se sont formées, bref selon l'origine de l'eau. C'est pourquoi, pour commencer à tester le scénario d'une eau terrestre primordiale originaire du Système solaire interne, l'équipe de Lydia Hallis, de l'Institut d'astronomie de l'université de Hawaii, a mesuré en 2015 le rapport D/H de très anciennes roches volcaniques hydratées de l'île de Baffin (Arctique canadien) d'origine

À gauche : © Christine Fieni/Laurette Piani ; à droite : © Nasa

profonde, donc *a priori* datant des débuts de la Terre. Ce rapport s'est révélé inférieur de 22% à celui de l'océan, ce qui suggère que l'eau océanique actuelle ne serait pas primordiale.

L'équipe de Laurette Piani a, elle, mesuré l'abondance en hydrogène et le rapport D/H de 13 chondrites à enstatite différentes. Les chercheurs avaient besoin de cette diversité pour s'assurer d'abord que les diverses histoires thermiques de ces météorites n'avaient pas changé leurs compositions primitives. Il en ressort que toutes les chondrites analysées ont des teneurs en eau variant entre 0,08 et 0,54%, et des rapports D/H proches de celui de l'eau du manteau terrestre.

Grâce à ces résultats, les chercheurs ont prédit la proportion d'eau terrestre ayant pu être directement héritée de ses constituants originels dans le cadre de trois modèles de composition de la Terre proposés lors d'études précédentes. Ces modèles permettent d'expliquer la composition des roches terrestres par un mélange de matériaux ressemblant aux météorites primitives connues, témoins des matériaux planétaires présents dans le Système solaire à sa naissance, il y a 4,55 milliards d'années. Dans les trois cas, les chondrites à enstatite contribuent au bilan d'eau de la Terre dès sa formation, puisqu'elles peuvent fournir entre environ 3 et 23 fois la masse d'eau des océans actuels !

Les travaux de Laurette Piani et ses collègues favorisent donc le scénario d'une Terre primordiale déjà riche en eau. Il faut cependant noter que l'eau présente aujourd'hui résulte aussi de la tumultueuse évolution de la planète, des bombardements qu'elle subit, de la tectonique qui mélange ses couches et d'autres phénomènes ; et il reste à expliquer pourquoi l'eau terrestre profonde et l'eau des océans ont des compositions isotopiques si différentes. ■

FRANÇOIS SAVATIER

L. Piani *et al.*, *Science*, vol. 369, pp.1110-1113, 2020

SANTÉ PUBLIQUE

La polio sauvage éradiquée en Afrique

Fin août, l'Organisation mondiale de la santé a salué l'éradication, en Afrique, du virus sauvage responsable de la poliomyélite. On observe pourtant une recrudescence de cas de paralysie poliomyélitique. Comment expliquer ce paradoxe ? Le point avec le virologue Francis Delpeyroux.

Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

FRANCIS DELPEYROUX
virologue à l'Institut Pasteur, à Paris

En quoi consiste la lutte contre la poliomyélite ?

C'est une lutte vaccinale. La maladie est due au poliovirus, un virus à ARN qui se transmet par voie féco-orale, se réplique dans l'intestin et, dans certains cas, détruit les neurones moteurs du système nerveux central, causant une paralysie flasque. Avant la vaccination, c'était une maladie saisonnière très contagieuse qui touchait à peu près tous les individus d'une population donnée, dont quelques-uns (1 sur 200) avec paralysie. Mais dans les années 1950, deux vaccins ont été mis au point. Utilisés intensivement dans le cadre du programme mondial d'éradication de la poliomyélite, ils ont réduit le nombre de cas à quelques centaines.

Le premier est un vaccin inactivé injectable, constitué de souches du virus sauvage inactivées grâce à des agents chimiques. Son injection induit une bonne immunité générale qui empêche le virus de passer de l'appareil digestif au système nerveux central. Il est donc très efficace pour prévenir la maladie. Le second est un vaccin atténué administré par voie orale, constitué de souches vivantes du virus sélectionnées pour la protection qu'elles conféraient à des singes. Leur atténuation est due à des mutations. Ce vaccin qui protège contre la maladie induit de surcroît une forte immunité intestinale qui limite la circulation du virus entre les humains et est donc capable de faire disparaître les souches sauvages si la couverture vaccinale est suffisante.

Pourquoi n'utilise-t-on pas seulement le premier, comme en France ?

Ce vaccin injectable demande du personnel médical et des rappels. Il est donc utilisé dans les pays qui ont les moyens d'effectuer ces inoculations et de contrôler l'immunité de la population. Dans les pays où le niveau d'hygiène est correct, il suffit pour prévenir la maladie ; mais dans ceux où le virus circule encore – dorénavant le Pakistan et l'Afghanistan, à cause des conflits qui entravent la couverture vaccinale –, seul le vaccin oral est capable actuellement d'arrêter sa circulation.

Entre le 19 août 2019 et le 18 août 2020, on a répertorié 572 cas de paralysie poliomyélitique, dont 403 en Afrique, et encore 18 durant la seule semaine du 26 août, dont 11 au Soudan. Comment est-ce possible si le virus sauvage a été éradiqué en Afrique ?

Les virus à ARN mutent beaucoup, car ils ne disposent pas d'outil pour réparer le génome lorsqu'une mutation apparaît durant sa réplication. Ainsi, dans de rares cas, le poliovirus atténué mute, se réplique et même circule d'enfants vaccinés à d'autres non vaccinés en cas de couverture vaccinale insuffisante, voire redevient pathogène. Or dans plusieurs régions, notamment en Afrique, la couverture vaccinale diminue pour diverses raisons, notamment chaque fois qu'une autre épidémie focalise l'attention (grippe H1N1, Ebola, Covid-19…).

Mais un nouveau vaccin oral pourrait bientôt aider à diminuer le nombre de cas. L'ARN viral a été modifié de façon à rendre plus fidèle l'enzyme qui le réplique et à stabiliser les domaines impliqués dans l'atténuation du virus. Le vaccin a passé des premiers essais cliniques favorables (phases I et II) et est en cours de production pour une utilisation plus large.

Vous êtes donc optimiste pour la suite ?

Oui, l'éradication du virus sauvage en Afrique est une excellente nouvelle. Cela confirme que ce continent est capable d'éliminer la poliomyélite. Malgré les problèmes, dont le terrorisme, il s'est doté d'un réseau efficace de surveillance de la maladie, capable de différencier virus sauvage et virus vaccinal, voire de s'occuper d'autres maladies infectieuses virales.
Ce n'est donc pas seulement l'histoire de la polio qui s'écrit, mais aussi celle de la surveillance et de la prévention des maladies virales. ■

NEUROBIOLOGIE

DES LYMPHOCYTES DANS LE CERVEAU SAIN

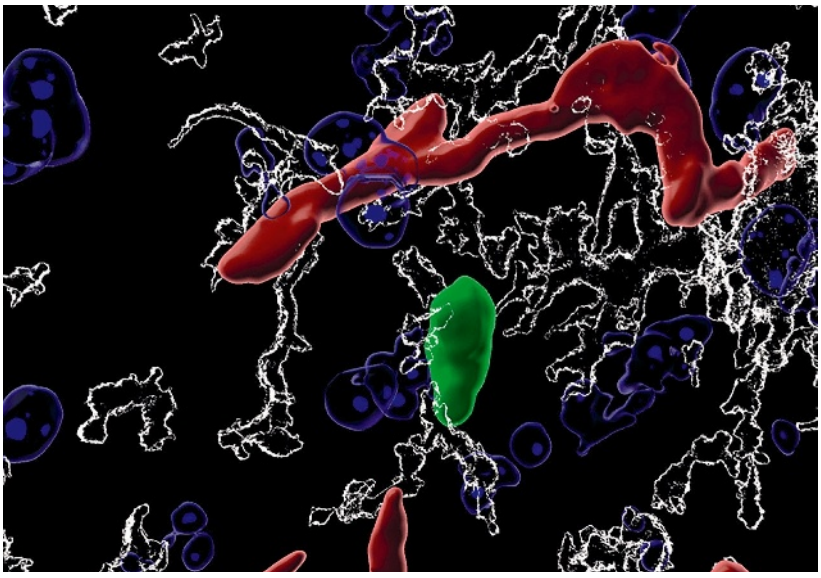
Des cellules immunitaires que l'on pensait cantonnées à la circulation sanguine sont en fait présentes dans le cerveau de souris à la naissance et interviennent dans le développement cérébral.

Le cerveau est protégé de tout ce qui circule dans le reste du corps par la barrière hématoencéphalique. Les cellules immunitaires qui le défendent en cas d'infection ou de dommage tissulaire, la microglie, pénètrent d'ailleurs dans le cerveau au moment du développement embryonnaire et s'y spécialisent *in situ*. La question de la présence, dans le cerveau sain, de lymphocytes, des globules blancs qui, dans le reste du corps, produisent la réponse immunitaire, est débattue. Une équipe internationale autour d'Adrian Liston, de la KU Leuven, en Belgique, et de l'institut Babraham, à Cambridge, vient de montrer chez des souris non seulement que des lymphocytes franchissent la barrière hématoencéphalique, mais aussi qu'ils jouent un rôle clé dans le développement de la microglie et le comportement.

Les expériences de l'équipe dévoilent que le cerveau des souris et le cerveau humain contiennent une petite fraction de lymphocytes T d'un type noté CD4. Normalement, ces intermédiaires de la réponse immunitaire circulent dans le sang et activent d'autres cellules immunitaires quand ils rencontrent des antigènes présentés par des cellules infectées. Chez les souris, l'infiltration des cellules CD4 dans le cerveau est maximale lors de la naissance. Elles y restent environ sept semaines avant de mourir ou de le quitter. Leur profil d'expression génique diffère de celui de leurs analogues de la circulation sanguine.

À l'aide de souris transgéniques, les chercheurs ont par ailleurs montré que pour pénétrer dans le cerveau, ces cellules requièrent une activation par des antigènes présents en périphérie, hors du cerveau. En particulier, des souris dépourvues de microbiote intestinal (les microorganismes qui peuplent l'intestin) contiennent beaucoup moins de lymphocytes T CD4 dans leur cerveau, ce qui suggère un rôle du microbiote dans l'activation de cette population.

Afin de déterminer la fonction de ces lymphocytes T CD4, les chercheurs ont supprimé ces cellules chez des souris. Résultat : la microglie restait bloquée à un stade de développement intermédiaire entre le stade fœtal immature et le stade adulte, faute d'activation de l'expression de certains gènes nécessaires à sa maturation. Il s'ensuivait un dysfonctionnement des synapses, les connexions entre neurones, dont la morphologie était altérée. De plus, les animaux présentaient des comportements anormaux, comme une mobilité réduite et une anxiété augmentée.



Sur cette image 3D d'une coupe de cerveau de souris, un lymphocyte T *(en vert)* issu de la circulation sanguine *(en rouge)* interagit avec des cellules microgliales en cours de maturation *(en blanc)* dans le mésencéphale.

Plusieurs études récentes avaient suggéré l'implication de lymphocytes T CD4 ou B (qui sécrètent des anticorps), respectivement dans le comportement chez l'adulte ou le développement cérébral, mais ces cellules étaient localisées dans les méninges et non à l'intérieur même du cerveau sain.

« Il reste à confirmer le rôle des lymphocytes cérébraux dans les effets observés, en les discriminant de ceux des méninges. Cette étude reste pionnière en ce qu'elle montre que cette population immunitaire résidente existe », estime Antoine Louveau, chercheur en neurosciences à la clinique de Cleveland, aux États-Unis. Reste aussi à déterminer à quel moment cette infiltration a lieu chez l'humain et quels rôles elle assume dans le cerveau. ■

NOËLLE GUILLON

E. Pasciuto *et al.*, Cell, vol. 182(3), pp. 625-640, 2020

© James Dooley, institut Babraham

EN BREF

COMMENT LES RASOIRS S'ÉMOUSSENT

Une équipe du MIT a étudié comment les rasoirs s'émoussent alors que les poils humains sont 50 fois moins durs que l'acier de la lame, lequel est en outre souvent recouvert par une microcouche de matériau encore plus dur. Cem Tasan et ses collègues ont montré que sous certaines conditions, une touffe de poils suffit à fissurer le tranchant et qu'autour d'une fissure initiale, d'autres fissures se multiplient jusqu'à émousser complètement la lame.

Science, 7 août 2020

DE L'EAU LIQUIDE SUR CÉRÈS

La planète naine est célèbre pour ses taches brillantes de carbonate de sodium. L'analyse des données de la sonde *Dawn* de 2018 suggère que de l'eau salée aurait percolé depuis un réservoir large de plusieurs centaines de kilomètres et profond de 40 kilomètres vers la surface, où elle se serait évaporée en laissant un dépôt brillant. La détection d'eau dans les sels suggère que cette activité géologique est récente, voire qu'elle se poursuit encore aujourd'hui.

Nature Astronomy, 10 août 2020

DES PANNEAUX SOLAIRES TRANSPARENTS

Le cahier des charges semble contradictoire : convertir efficacement l'énergie des photons en électricité tout en laissant passer la lumière ! L'équipe de Stephen Forrest, de l'université du Michigan, a néanmoins développé un panneau solaire organique (à base de carbone) transparent dans le visible et absorbant dans le proche infrarouge. Le rendement est de 8 % et la transparence de 43,3 %. À terme, de tels dispositifs pourraient servir de fenêtres pour les bâtiments.

PNAS, 17 août 2020

© Jérémie Vosges

PHYSIQUE

LES « EAUX MORTES » EXPLIQUÉES

En 31 avant notre ère, lors de la bataille navale d'Actium, les navires d'Octave auraient profité de la lenteur anormale de la flotte adverse pour défaire celle-ci. Pourquoi la flotte d'Antoine et Cléopâtre n'a-t-elle pas pu atteindre une vitesse suffisante pour éperonner les bateaux d'Octave ? Selon la légende rapportée par Pline l'Ancien, des rémoras, des poissons à ventouse, se seraient fixés sur la coque des navires et auraient freiné ces derniers. Pour Germain Rousseaux, de l'institut P', à Poitiers, et ses collègues, la raison serait plutôt le phénomène dit « des eaux mortes », bizarrerie maritime dont ils ont entrepris d'expliquer l'origine, comprise seulement en partie.

En 1904, l'océanographe suédois Vagn Walfrid Ekman avait observé que lorsqu'un bateau passe sur une zone de mer stratifiée (avec des couches d'eau de salinités ou de températures différentes), des vagues se forment sous la surface à l'interface de deux couches. Ce sillage ralentit le bateau qui avance alors à vitesse réduite, mais constante. Germain Rousseaux et ses collègues ont précisé l'origine d'un second effet qui avait été remarqué et qui fait osciller la vitesse du bateau. Ils ont montré que cet effet est lié à la formation d'un front d'ondes de pression variable sous le bateau. « Ce front est le résultat de la combinaison de la stratification, du confinement latéral de la cuve de l'expérience (que l'on retrouve aussi dans les canaux fluviaux ou à l'entrée des ports) et de l'accélération initiale du bateau, qui part d'une vitesse nulle ou faible. Il agit alors comme un tapis roulant bosselé sur lequel évolue le navire », explique Germain Rousseaux. ■

© Nasa

La configuration du golfe Ambracique, où s'est déroulée la fameuse bataille navale d'Actium, pourrait être propice à la formation des eaux mortes à son embouchure.

THÉO TORCQ

J. Fourdrinoy *et al.*, *PNAS*, vol. 117(29), pp. 16770-16775, 2020

ARCHÉOLOGIE

POINTES DE FLÈCHE FLÛTÉES EN ARABIE

Une équipe franco-américaine vient de montrer que les tailleurs de flèches des sites néolithiques de Manayzah, au Yémen, et d'Ad-Dahariz, au sultanat d'Oman, flûtaient les pointes de leurs projectiles, comme le faisaient déjà les tailleurs paléo-indiens des Amériques 5000 ans plus tôt. Flûter consiste à alléger une pointe bifaciale en détachant un éclat central sur une ou deux faces. Cinq ans durant, Jérémie Vosges, de la maison de l'Orient et de la Méditerranée, à Lyon, a reconstitué les chaînes opératoires à l'origine de ces pointes vieilles de 8000 à 7000 ans. Contrairement à ce qui se pratiquait en Amérique, où l'on flûtait les pointes pour créer une plus grande surface d'adhérence avec leur manche, les pointes de Manayzah et d'Ad-Dahariz ne sont flûtées que sur une face. Pour les alléger ? Non, pensent les chercheurs, puisque le flûtage n'était pas universel dans la péninsule Arabique comme dans les Amériques. Pour eux, il s'agit plutôt d'un trait par lequel des tailleurs locaux se distinguaient. ■

Quelques-unes des pointes flûtées taillées par le préhistorien Jérémie Vosges lors de ses expérimentations.

F. S.

R. Crassard *et al.*, *Plos One*, vol. 15(8), article e0236314, 2020

NOUVELLE LUMIÈRE SUR GRENOBLE

En décembre 2018, le synchrotron européen de Grenoble, l'ESRF (*European synchrotron radiation facility*), fermait ses portes pour une longue période de modernisation. Après vingt mois de travaux, cette machine, où un faisceau d'électrons circule le long d'un anneau de 844 mètres de circonférence, est devenue le premier synchrotron de quatrième génération à haute énergie du monde et offre de nouveau ses services aux scientifiques.

Le rayonnement synchrotron est le rayonnement électromagnétique émis par des charges électriques lorsqu'elles effectuent un mouvement circulaire. À haute énergie (donc grande vitesse) comme c'est le cas à l'ESRF, ce rayonnement est formé pour l'essentiel de rayons X émis tangentiellement à la trajectoire. En le recueillant à plusieurs endroits le long de la trajectoire, on dispose alors de « lignes de lumière » qui constituent autant de laboratoires où le faisceau – fin, cohérent, intense et de haute énergie – de rayons X permet d'étudier la structure de la matière et des matériaux à des échelles microscopiques, allant jusqu'à celle du nanomètre. De multiples domaines en bénéficient : science des matériaux, chimie structurale, biologie moléculaire, recherche pharmaceutique, archéologie, paléontologie…

La nouvelle machine, nommée EBS pour *Extremely brilliant source*, est dite « de quatrième génération » parce qu'elle produit des faisceaux de rayons X cent fois plus brillants qu'avec le dispositif précédent, qui était de troisième génération. Des performances que l'on doit notamment à un « nouvel agencement de plus de mille aimants innovants » (près du double du nombre d'aimants qui équipaient auparavant l'anneau de stockage des électrons).

MAURICE MASHAAL

Sur le site internet de l'ESRF : https://www.esrf.eu/about/upgrade, https://www.esrf.eu/home/news/general/content-news/general/opening-of-esrf-ebs-a-new-generation-of-synchrotron.html

© ESRF/Pierre Jayet

BIOCHIMIE

ADN ET ARN, MÊME ORIGINE ?

Lors de l'apparition de la vie, quelle molécule portait l'information génétique, l'acide ribonucléique (ARN) ou l'acide désoxyribonucléique (ADN) ? Pour répondre à cette question, les chercheurs simulent artificiellement les conditions de la Terre primordiale et étudient les différentes voies prébiotiques possibles de synthèse de ces molécules. Jianfeng Xu, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues viennent de mettre en évidence une voie prébiotique qui conduirait à la synthèse à la fois d'ARN et d'ADN. Ce qui relance l'hypothèse d'une coexistence primordiale de ces deux supports génétiques.

L'hypothèse du « monde à ARN » est séduisante, car certaines séquences d'ARN sont susceptibles à la fois d'exercer les fonctions métaboliques essentielles à la vie et de s'autorépliquer. En revanche, l'ARN est plus fragile et s'hydrolyse plus facilement que l'ADN. Leur coexistence serait donc un scénario plus convaincant pour les débuts de la vie.

Jianfeng Xu et ses collègues ont cherché à reproduire des conditions primordiales où des mares s'assèchent périodiquement, en présence de minéraux ferreux, magnésiens, et

© Shutterstock.com/deepadesigns

L'ADN et l'ARN ont-ils émergé à la même époque dans des mares riches en molécules prébiotiques ?

sulfurés. Les chercheurs ont reconstitué de telles conditions en laboratoire, sous rayonnements ultraviolets et en présence de composés simples (cyanoéthylène, thiocyanate d'ammonium, chlorure de magnésium…) ou plus complexes comme l'amino-oxazoline, dont la synthèse prébiotique a déjà été démontrée.

Ils ont obtenu un mélange de désoxynucléosides, les briques élémentaires de l'ADN, et de nucléosides, les briques de l'ARN. Il est ainsi possible que les deux biopolymères aient été présents avant la vie, et aient donc pu concourir à son apparition. ■

MARTIN TIANO

J. Xu *et al.*, *Nature*, vol. 582, pp. 60-66, 2020

ÉVOLUTION

LE POINT CHAUD DE HENGDUAN

Pourquoi certains endroits jouissent-ils d'une biodiversité plus riche qu'ailleurs ? Richard Ree, du Field Museum, à Chicago, et ses collègues se sont intéressés au cas des monts Hengduan et du plateau de Qinghai, en Chine, un « point chaud de biodiversité », qui abrite un tiers de toutes les espèces végétales recensées en Chine.

À partir d'une analyse génétique, les chercheurs ont reconstruit l'histoire évolutive des plantes de la région, qu'ils ont comparée aux registres géologiques. L'équipe suggère que la formation des montagnes himalayennes il y a 30 millions d'années et les fortes pluies de la mousson ont creusé des vallées profondes, créant des environnements « barrières » difficile à franchir qui isolent très localement les populations de plantes. Cette configuration a

© Jian Huang

Exemple de végétation dans les monts Hengduan, en Chine.

conduit à l'accélération du processus évolutif : les groupes de plantes séparés ont alors divergé génétiquement et morphologiquement. D'où la riche diversité végétale des monts Hengduan, de l'Himalaya et du plateau de Qinghai. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

W.-N. Ding *et al.*, *Science*, vol. 369, pp. 578-581, 2020

EN BREF

LES MIRETTES D'UN VIEUX TRILOBITE

Avec un collègue, Brigitte Schoenemann, de l'université de Cologne, a étudié le système visuel d'un fossile d'*Aulacopleura koninckii*, un trilobite de 429 millions d'années, et montré que cet arthropode primitif était doté d'un système visuel moderne, dont les yeux à facettes sont comparables à ceux d'une abeille, d'une libellule ou de nombreux crustacés diurnes actuels. Il fallait manifestement y voir clair pour échapper aux prédateurs de l'océan paléozoïque !

Scientific Reports, 13 août 2020

UNE CRÉMATION IL Y A 7 000 ANS

Il y a environ 7 000 ans, les habitants du site néolithique de Beisamoun, dans la haute vallée du Jourdain, en Israël, ont placé sur un bûcher le corps d'un jeune adulte, qui avait survécu à la blessure d'un projectile en silex. L'équipe internationale menée par Fanny Bocquentin, du CNRS, a combiné plusieurs techniques (zooarchéologie, étude des phytolithes, bioanthropologie, etc.) pour confirmer et retracer cette crémation, la plus ancienne connue.

Plos One, 12 août 2020

MICROPLASTIQUES ATLANTIQUES

L'équipe de Katsiaryna Pabortsava, du Centre national d'océanographie du Royaume-Uni, a estimé par des mesures que les 200 premiers mètres de l'océan Atlantique contiennent en suspension entre 11,6 et 21,1 millions de tonnes de fragments de polyéthylène, polypropylène ou polystyrène de tailles comprises entre 32 et 651 micromètres. C'est plus de dix fois ce qu'on estimait auparavant, et largement assez pour combler l'écart que l'on constatait avec les quantités de plastiques apportées à l'océan depuis les années 1950.

Nature Comm., 18 août 2020

BIOLOGIE ANIMALE

LE SIGNAL DE L'ESSAIM

Les essaims de criquets sont connus pour leurs effets dévastateurs sur les cultures agricoles en Afrique, au Moyen-Orient et en Asie. On suspectait qu'une phéromone déclenchait le rassemblement de milliards de ces insectes sur des centaines de kilomètres carrés. Le Kang, de l'Académie chinoise des sciences, à Beijing, et ses collègues ont identifié cette molécule chez le criquet migrateur (*Locusta migratoria*) : le 4-vinylanisole. Cette phéromone serait émise dès que quatre ou cinq criquets se rejoignent. Elle attire alors aussi bien des insectes solitaires que grégaires et peu importe leur sexe ou leur âge. Les chercheurs ont aussi identifié le récepteur olfactif associé. Une piste pour contrôler ces ravageurs. ■

SEAN BAILLY

X. Guo *et al.*, *Nature*, vol. 584, pp. 584-588, 2020

ENTOMOLOGIE

DES POUX SOUS HAUTE PRESSION

Les poux qui parasitent les phoques, éléphants de mer et autres pinnipèdes accompagnent-ils leurs hôtes lors de leurs plongées ou les quittent-ils avant d'être durablement immergés ? Pour le savoir, Claudio Lazzari, de l'université de Tours, Maria Soledad Leonardi, de l'Ibiomar (institut de biologie des organismes marins), en Argentine, et leurs collègues ont prélevé, sur des bébés d'éléphants de mer du sud (*Mirounga leonina*), des poux de l'espèce *Lepidophthirus macrorhini* et ont testé en laboratoire leur résistance à la pression sous-marine. Ces insectes ont presque tous (69 sur 75) supporté les pressions exercées, allées jusqu'à 200 kilogrammes par centimètre carré – ce qui correspond à une profondeur de 2 000 mètres, celle que les éléphants de mer du sud sont capables d'atteindre. Il est donc très vraisemblable que les poux restent fixés sur leurs mammifères hôtes lors de leurs plongées. Reste à éclaircir comment ils résistent à de telles pressions. ■

M. M.

M. S. Leonardi *et al.*, *Journal of Experimental Biology*, en ligne le 17 juillet 2020

CHIMIE

DES SOLIDES FLUOS ENCORE PLUS BRILLANTS

© Amar Flood

Dans le matériau solide, les molécules de cyanostar isolent spatialement et électroniquement les molécules fluorescentes les unes des autres. Il en résulte un solide très brillant.

Grâce à leur brillance et à leurs propriétés optiques, les matériaux fluorescents ont de nombreuses applications dans des domaines comme l'énergie solaire, l'imagerie cellulaire ou encore certains lasers. À ce jour, il existe des dizaines de milliers de colorants fluorescents, mais il est parfois difficile de les incorporer à un mélange pour produire un matériau solide conservant cette propriété. Lorsque des colorants sont mélangés puis solidifiés, ils se couplent électroniquement et subissent un processus de « désactivation » qui engendre une diminution de l'intensité de leur fluorescence.

Or Amar Flood, de l'université de l'Indiana, aux États-Unis, et ses collègues ont mis au point une nouvelle technique pour produire des solides très brillants. Les chimistes se sont intéressés à une molécule à structure cyclique, la cyanostar, connue pour sa capacité à lier des ions négatifs. En s'assemblant dans une solution, les cyanostars forment un réseau semblable à un damier et engendrent la formation d'un « treillis d'isolation ionique » qui empêche le couplage électrique des colorants. Les chercheurs ont ensuite transformé ces treillis en cristaux, puis les ont précipités pour former une poudre sèche, elle-même directement incorporée dans des polymères.

Le procédé ne permet toutefois pas d'éviter la réabsorption partielle de la lumière émise, un problème inhérent aux molécules fluorescentes. D'autres solutions existent pour ce problème. Par exemple, Pierre Audebert, de l'École normale supérieure Paris-Saclay, travaille avec les tétrazines, des molécules qui constituent d'excellents colorants fluorescents non réabsorbants lorsqu'on les disperse dans des polymères. ■

W. R.-P.

C. R. Benson *et al.*, *Chem*, vol. 6, pp. 1978-1997, 2020

BIOCHIMIE

COMMENT LE FER INTERVIENT DANS CERTAINES MÉTASTASES

Un nouveau mécanisme de régulation de l'activité cellulaire impliquant le fer a été identifié. Il doterait certaines cellules cancéreuses de propriétés métastatiques.

Comment certaines cellules cancéreuses deviennent-elles métastatiques, c'est-à-dire capables de migrer et de s'implanter dans l'organisme loin de la tumeur primaire ? Depuis les années 1990, une protéine, notée CD44, focalise nombre de recherches, car elle est connue pour être associée aux cellules tumorales susceptibles de conduire à des métastases. Toutefois, jusqu'à présent, la fonction biologique de CD44 dans ce contexte restait à préciser. C'est ce que viennent de faire Raphaël Rodriguez, de l'institut Curie, à Paris, et ses collègues, dévoilant au passage une voie inattendue de régulation du fer ingéré par les cellules.

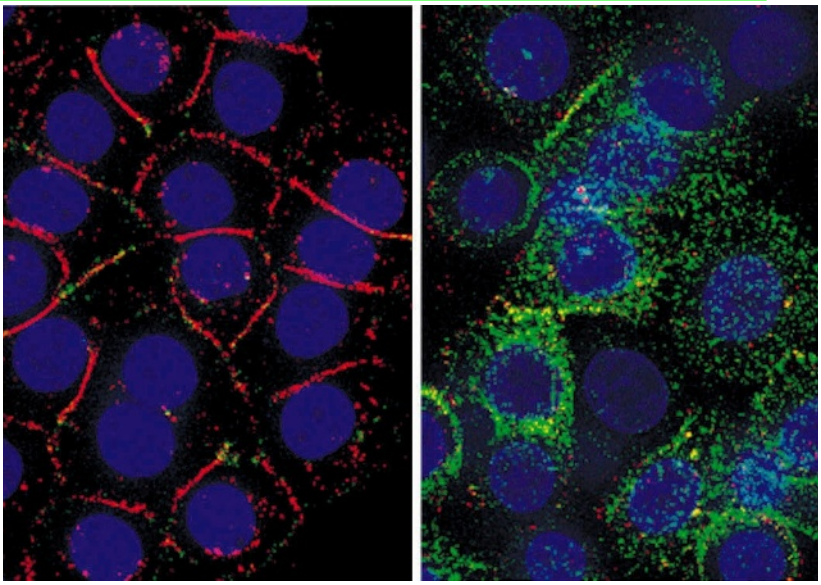
Le récepteur CD44 est connu pour intervenir dans divers processus liés au développement, aux inflammations, aux réponses immunitaires, à la réparation tissulaire ou encore au cancer. Dans tous ces processus, les cellules impliquées ont la capacité d'entrer de façon réversible dans une transition vers un état mésenchymateux. Quand certaines cellules cancéreuses subissent cette transition, elles deviennent alors plus invasives, une première étape vers la formation de métastases. Quel rôle joue CD44 dans ce processus ?

Dans les années 1990, il a été montré que l'acide hyaluronique, une molécule très présente dans le milieu extracellulaire de l'organisme et très abondante dans les tumeurs, est le principal ligand du récepteur CD44. Or l'acide hyaluronique fixe par ailleurs très bien le fer. L'équipe de Raphaël Rodriguez a donc étudié le rôle de CD44 dans la régulation du fer dans la cellule.

La surprise a été de taille. Jusqu'à présent, on ne connaissait qu'un seul mécanisme pour l'endocytose du fer, c'est-à-dire l'internalisation de fer dans la cellule. Il impliquait la transferrine et son récepteur membranaire TfR1. Or l'équipe de Raphaël Rodriguez a montré que pendant la transition épithélio-mésenchymateuse des cellules tumorales, une nouvelle voie d'endocytose se mettait en place, où l'acide hyaluronique et CD44 remplaçaient progressivement la transferrine et son récepteur.

Dans les cellules, on sait que l'ingestion du fer déclenche la production de métabolites qui contribuent à moduler l'expression de certains gènes au niveau épigénétique, c'est-à-dire par des modifications chimiques qui ne changent pas la séquence d'ADN et qui sont fortement impliquées dans la régulation différentielle de l'expression des gènes. Le fer est ainsi connu pour inhiber la production du récepteur de la transferrine TfR1 au niveau de son ARN messager. L'équipe a montré qu'à l'inverse il favorise l'expression du gène qui code CD44 et de gènes impliqués dans la régulation de la transition épithélio-mésenchymateuse, dont certains jouent un rôle dans la dissémination métastatique.

« Grâce à ce résultat, souligne Raphaël Rodriguez, nous avons identifié de nouvelles stratégies pour exploiter ce mécanisme qui dépend du fer afin d'éradiquer les cellules à fort potentiel métastatique. » Jusqu'à cette étude, on ne connaissait pas de rôle majeur du fer dans la plasticité épigénétique. « Nous travaillons maintenant aussi sur d'autres maladies, des processus inflammatoires ou immunitaires qui impliqueraient ce lien entre fer et expression du génome. » ■



En comparant des cellules cancéreuses *(noyau marqué en bleu)* par microscopie à fluorescence avant *(à gauche)* et après *(à droite)* la transition épithélio-mésenchymateuse, on constate une augmentation de l'expression de la protéine CD44 *(en vert)*. On observe également une diminution de la protéine épithéliale cadhérine E *(en rouge)*. La perte des cadhérines est souvent associée à la formation de métastases.

S. B.

S. Müller *et al.*, *Nature Chemistry*, en ligne le 3 août 2020

© Avec l'aimable autorisation de Springer Nature, S. Müller et al., CD44 regulates epigenetic plasticity by mediating iron endocytosis, Nature Chemistry, 2020

EN BREF

GRÊLE D'AMMONIAQUE SUR JUPITER

Grâce aux données de la sonde *Juno*, Tristan Guillot, de l'observatoire de la Côte d'Azur, et ses collègues ont précisé la dynamique de violents orages qui animent l'atmosphère de Jupiter. Ces orages se forment à environ 50 kilomètres de profondeur sous les nuages visibles. De forts mouvements ascendants entraînent des cristaux de glace vers la haute atmosphère, où ces particules se mêlent à l'ammoniac (NH_3) pour former d'abord de l'ammoniaque liquide puis des grêlons. Ces derniers plongent alors dans les profondeurs de la planète, où ils s'évaporent.
Ce scénario explique certaines observations plus anciennes qui mettaient en évidence des régions atmosphériques appauvries en ammoniac.

JGR Planets, 6 août 2020

ÉTHOLOGIE

LE FOU DANSE COMME L'ABEILLE

Grâce à sa danse, l'abeille indique aux autres butineuses où trouver des fleurs pour y récupérer le nectar et le pollen. Cette chorégraphie indique à la fois la direction et la distance à parcourir. Avec leurs collègues, Nicolas Courbin et David Grémillet, du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive de l'université de Montpellier, viennent de montrer que la danse du fou du Cap (*Morus capensis*) aurait une fonction similaire à celle des abeilles.

Ces oiseaux marins sont connus pour réaliser une danse nuptiale complexe à chaque fois que l'un des partenaires rentre au nid. Mais derrière ces figures se cache en réalité un système de communication qui permet notamment d'indiquer les zones de pêche à privilégier. Entre 2013 et 2016, Nicolas Courbin et ses collègues ont étudié la colonie de fous du Cap de l'île de Malgas, au large de l'Afrique du Sud, qui regroupe près de 19000 couples d'oiseaux. Ils ont suivi leurs déplacements grâce à des balises GPS et ont filmé leur retour au nid pour analyser la danse. Ils ont montré que les différentes figures indiquent la direction et l'effort fourni sur la zone de pêche. Enfin, plus la danse est courte, plus le périple a été long, et plus la source principale de nourriture est éloignée du site de reproduction. ■

JULES COIGNARD

N. Courbin *et al.*, *Animal Behaviour*, vol. 166, pp. 95-108, 2020

TRIBUNES DU MUSÉUM

UNE PLANÈTE, UNE SANTÉ
Samedi 10 octobre de 15h à 17h

L'environnement et la santé font partie des grands défis face aux changements globaux et l'actualité récente nous le rappelle. Quelles sont les interactions entre **santé environnementale, santé humaine et santé animale ?**
Dans un format innovant et interactif alternant mises en situation et discussions avec des experts, participez à la Tribune et **devenez acteurs de cet événement, et pourquoi pas… de la santé de notre planète !**

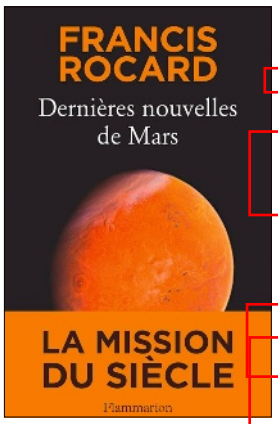
Jardin des Plantes
Amphithéâtre Verniquet
57 rue Cuvier, Paris 5e

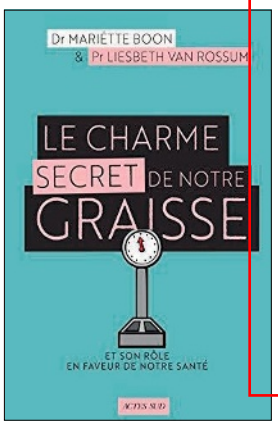
Entrée gratuite
Info/résa sur **mnhn.fr**

POUR LA SCIENCE
France Culture

© 3Dstock | Shutterstock.com

© Shutterstock.com/Vittorio Ricci





ESPACE

DERNIÈRES NOUVELLES DE MARS

Francis Rocard
Flammarion, 2020
176 pages, 12 euros

L'exploration de la planète Mars continue de susciter l'intérêt des scientifiques et les ambitions de divers États. Ainsi, en juillet 2020, la Chine a lancé la mission *Tianwen-1*, les Émirats arabes unis la sonde *Hope*, les États-Unis la mission *Mars 2020*. Il semble de plus en plus clair que l'homme ira un jour sur Mars.

Francis Rocard nous explique les raisons de cette mobilisation et analyse les obstacles à surmonter. Y a-t-il eu, y a-t-il encore de la vie sur Mars? Quels sont les moyens à mettre en œuvre pour effectuer une mission habitée vers Mars? L'auteur expose clairement tous ces sujets, depuis le survol de la planète jusqu'à un séjour prolongé de l'homme.

À condition de mieux connaître la composition du sol, on peut envisager d'installer une base de production des ergols nécessaires à la propulsion du véhicule qui permettra de revenir sur Terre. On peut penser aussi à extraire de l'eau martienne. Ces questions et bien d'autres font l'objet d'un programme par étapes, chacune constituant un maillon essentiel du voyage vers Mars, processus très différent de celui qui a permis d'aller sur la Lune, car dans ce cas, tous les problèmes avaient été considérés ensemble avant le voyage.

En outre, les conditions de développement des programmes spatiaux ont changé. Aujourd'hui, la conquête spatiale aux États-Unis est l'objet de partenariats public-privé comme ceux conclus avec Jeff Bezos ou Elon Musk. Des ambitions gigantesques sont exprimées. Elon Musk voudrait coloniser la planète Mars, à l'instar de Stephen Hawking qui était convaincu que les humains devraient s'installer sur une autre planète pour survivre.

Astrophysicien et responsable des programmes d'exploration du Système solaire au Cnes, Francis Rocard ne rentre pas dans ce débat, mais établit un état des lieux aussi objectif que possible.

JEAN COUSTEIX
ISAE-SUPAÉRO, TOULOUSE

SCIENCES SOCIALES

LA FABRIQUE DU CONSOMMATEUR

Anthony Galluzzo
Zones, 2020
264 pages, 19 euros

Sans prétention théorique, sans idéologie affichée, ce livre bien documenté raconte très simplement, en multipliant les points de vue et les exemples, l'évolution du commerce entre 1800 et 2000. Cette période a vu naître le consommateur. En 1800, la plupart des Français étaient des paysans, vivant plus ou moins en autarcie et produisant eux-mêmes ce dont ils avaient besoin. Aujourd'hui, nous ignorons à peu près tout de la façon dont est produit ce que nous achetons et qui vient souvent de loin: nous sommes des consommateurs.

Le livre montre sur le vif l'incroyable capacité du capitalisme marchand à tirer profit de toutes les situations. Inventions techniques ou changements dans les états d'esprit, tout lui sert. Grâce au chemin de fer, étape inaugurale, les marchandises ont pu être transportées vite et par tous les temps. Les progrès dans la reproduction des images ont permis de faire rêver, donc désirer, donc acheter, jusqu'au fond des campagnes. Les grands magasins ont su inciter à acheter ce dont on n'avait pas besoin. Le magazine (terme dérivé de « magasin ») a été le premier média de masse entièrement consacré à promouvoir des habitudes de consommation. La publicité s'adapte en un clin d'œil aux changements sociaux. Le féminisme des années 1900 ou la contre-culture des années 1960 ne lui ont pas inspiré moins de slogans que les valeurs conformistes. S'entendant à proposer une solution en même temps qu'elle crée le problème, la publicité entretient le mécontentement des masses à l'égard de leur genre de vie: l'insatisfaction pousse à consommer.

La progression de la société marchande, qui ne peut pas finir bien mais a toutes les apparences de l'inexorable, donne à ce livre une saisissante allure de tragédie antique!

DIDIER NORDON
ESSAYISTE ET MATHÉMATICIEN ÉMÉRITE

NUTRITION

LE CHARME SECRET DE NOTRE GRAISSE

Mariette Boon
et Liesbeth Van Rossum

Actes Sud, 2020
304 pages, 21 euros

À l'ère où le surpoids a atteint des proportions épidémiques à travers le monde, l'obésité est de plus en plus vue comme une maladie plutôt que comme un simple excès de poids ou de graisse. Le grand public peine à suivre les innombrables conseils, souvent contradictoires, pour se mettre à l'abri de ce fléau du XXIe siècle. Ce livre apporte une bouffée fraîche et bienvenue de vulgarisation scientifique. D'emblée, le « charme secret » attribué aux tissus gras nous éloigne de la stigmatisation par la société de ce véritable organe. Les autrices nous révèlent ensuite quelles grandes découvertes de « secrets de la graisse » nous ont valu les avancées des techniques moléculaires et cellulaires du tournant de ce millénaire.

Ces « secrets » sont énoncés dans leur contexte historique et culturel, souvent avec humour, dans un véritable « manuel médical » écrit avec une élégante simplicité. En onze chapitres, les autrices nous communiquent les notions de base sur les nutriments et leurs destins métaboliques et expliquent le rôle vital de la graisse dans la gestion de nos carburants, les sécrétions hormonales, la survie en temps de disette, la reproduction, la thermorégulation et la défense immunitaire. Elles nous amènent par la suite à mieux comprendre le rôle de chef d'orchestre de la graisse dans la régulation du poids, l'inefficacité des divers régimes proposés ainsi que les dysfonctionnements amenant au diabète, maladies cardiovasculaires et cancers. La description de « cas cliniques » rencontrés par les autrices au cours de leur pratique quotidienne est particulièrement instructive. L'ouvrage contient aussi quelques conseils pour mieux contrôler son poids, qui sont intéressants, même si leur efficacité reste parfois à démontrer.

ABDUL DULLOO
DÉPARTEMENT DE MÉDECINE
DE L'UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE

ÉCOLOGIE

UNE HISTOIRE NATURELLE DE L'HOMME

Bertrand Alliot

L'Artilleur, 2020
192 pages, 15 euros

Le parcours atypique de l'auteur explique sans doute l'originalité de son propos provocateur. Après un diplôme d'ingénieur en gestion de l'environnement et une thèse en sciences politiques sur la crise écologique, il est aujourd'hui responsable du lien avec les entreprises à l'université Gustave-Eiffel, à Marne-la-Vallée. Il est aussi depuis longtemps ornithologue amateur et depuis peu administrateur de la Ligue de protection des oiseaux. Issu dans une bonne mesure des sciences humaines, il conteste cependant la capacité de comprendre avec ces seules sciences notre espèce et estime qu'elles embrouillent plutôt l'analyse en considérant l'homme comme un être hors normes, alors qu'il est une espèce comme les autres. L'auteur estime qu'il faut revenir à l'observation naturaliste pour nous réinsérer dans le monde vivant.

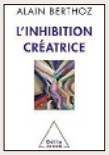
On s'attend donc à ce qu'il soit écologiste militant. Or il considère l'écologie politique comme une diversion verbeuse et mystique: « En matière d'écologie, l'homme parle beaucoup, mais agit très peu… grâce à de grands récits, il aimait à se considérer comme un être d'exception! Il faut donc se méfier de ce qu'il "dit" et s'intéresser plutôt à ce qu'il "fait". » Pour lui, l'homme n'est qu'un « oiseau chanteur »: « Prendre au sérieux ses bavardages, c'est rentrer dans son jeu. »

L'auteur est-il catastrophiste et « collapsologue »? Au contraire et cela surprend: « On n'a jamais autant parlé de crise écologique alors que l'humanité ne s'est jamais aussi bien portée: la population a augmenté de manière spectaculaire et les hommes ont gagné sur tous les continents en confort et en espérance de vie. »

Le livre est facile à lire et argumenté, mais peu référencé. L'auteur ne craint pas d'y soulever la question démographique, que les écologistes éludent comme la plupart des politiques – une question explosive, mais déterminante pour notre avenir proche.

PIERRE JOUVENTIN
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS

ET AUSSI



LES JEUNES, LA SEXUALITÉ ET INTERNET

Yaëlle Amsellem-Mainguy et Arthur Vuattoux

Éditions François Bourin, 2020,
224 pages, 16 euros

La sexualité des jeunes angoisse les adultes. Les conversations analysées ici par deux sociologues révèlent qu'internet est devenu pour beaucoup de jeunes un moyen de préciser son identité sexuelle, puis de construire dans le partage une sexualité. Les contenus « pour adultes » jouent désormais, selon les auteurs, un grand rôle dans l'élaboration des normes sexuelles avec, pour les jeunes, les risques de stéréotypes et de fausses représentations corporelles, mais aussi l'avantage d'avoir un outil constructif de la sexualité.

LE SOMMEIL RACONTÉ PAR UN MÉDECIN ITINÉRANT

Alain Buguet

L'Harmattan, 2020,
292 pages, 30 euros

Certains ont le privilège d'avoir exploré un phénomène partout sur la planète. Il faut les lire. Élève de Michel Jouvet, qui découvrit le sommeil paradoxal, l'auteur, médecin militaire et scientifique, a étudié le sommeil sous de nombreuses latitudes, et particulièrement la maladie du sommeil dont il a montré qu'il s'agit avant tout d'une perturbation du rythme circadien. Il a préparé ici pour l'Afrique (mais pour nous aussi) une extraordinaire somme de culture scientifique sur le sommeil et ses pathologies.

L'INHIBITION CRÉATRICE

Alain Berthoz

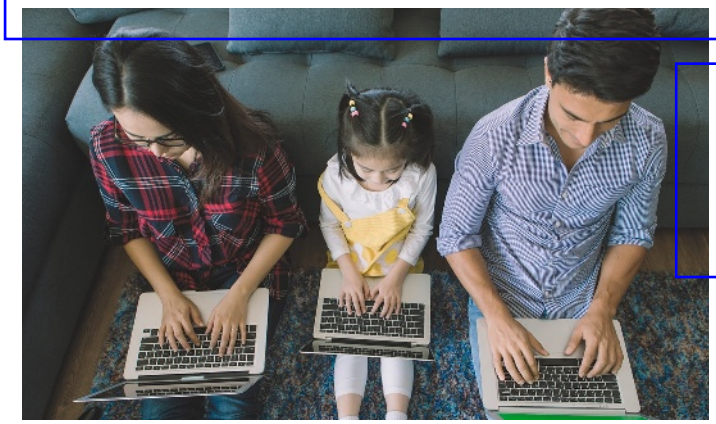
Odile Jacob, 2020
384 pages, 27,90 euro

L'inhibition de certaines pensées et impulsions fonde notre capacité à agir, choisir, décider, apprendre, se souvenir ou au contraire oublier, bref à vivre. Professeur honoraire au Collège de France, Alain Berthoz nous explique les bases neurales multiples de ce mécanisme avant de passer en revue les diverses sortes d'inhibition qui nous permettent d'agir, d'apprendre… et aussi de créer. Un pouvoir qui résulterait notamment de la faculté d'« inhiber un référentiel, lorsqu'un autre est requis pour la tâche ».

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

UN ORDINATEUR À SOI

Si la tendance actuelle est à la mutualisation des ressources, le télétravail montre que certains objets sont difficiles à partager.



Télétravail, enseignement à domicile: des activités qui nécessitent que chaque membre de la famille soit équipé d'un ordinateur.

Le récent déploiement du télétravail et du téléenseignement a attiré notre attention sur les personnes qui ne disposent pas, à leur domicile, d'un appareil connecté à internet. En France, ces personnes représentent aujourd'hui 12% de la population. L'instruction étant obligatoire en France et l'école gratuite, la collectivité aurait le devoir de les équiper si le téléenseignement, même partiel, venait à se pérenniser.

Ces statistiques occultent cependant un point essentiel: dans une famille qui dispose d'un ordinateur connecté à internet, une seule personne peut l'utiliser à la fois. Les enfants n'y ont souvent accès, pour téléapprendre ou simplement pour se documenter, que lorsque les adultes n'en ont pas besoin pour télétravailler.

Il y a bientôt cent ans, Virginia Woolf suggérait, dans *Un Lieu à soi*, que, pour produire une œuvre littéraire, une femme devait, entre autres choses, disposer d'un lieu à elle, qu'elle puisse fermer à clé, afin de pouvoir écrire sans être dérangée par sa famille. De même, pour accéder à la connaissance, un élève doit aujourd'hui non seulement habiter un logement équipé d'un ordinateur connecté à internet, mais aussi avoir un ordinateur à lui.

Que chacun ait un «ordinateur personnel», et non uniquement l'usage d'un ordinateur familial, serait une transformation significative de notre utilisation des objets informatiques. Une transformation comparable à celle qui a mené, à la fin du XX[e] siècle, chacun à avoir une adresse électronique à soi, et non une adresse postale partagée avec sa famille, ou un téléphone à soi, et non l'usage du téléphone du domicile, qui induisait des rituels aujourd'hui désuets: «Bonjour, excusez-moi de vous déranger, je souhaiterais parler à...»

> **Le développement de l'informatique transforme la notion d'individualité**

Ces revendications individualistes peuvent surprendre et semblent aller à contre-courant du développement actuel de l'informatique qui nous a habitués à substituer les notions de partage et d'usage à celle de propriété. Nous étions naguère propriétaires de disques vinyles et compacts – et même de fichiers audio, savamment classés sur les disques de nos ordinateurs –, de bibliothèques et d'encyclopédies, de vélos et de voitures, de photos, etc. Désormais, nous écoutons de la musique en flux continu, nous utilisons des moteurs de recherche et des encyclopédies en ligne, nous louons des vélos et parfois des voitures à l'heure, nous archivons nos photos et nos données dans les nuages, etc. Nous utilisons même parfois des machines physiques dont les plans ont été rendus publics, pour que chacun puisse les fabriquer, les modifier, les distribuer et les utiliser librement.

Mais nous ne devons pas oublier que certains objets ne peuvent pas être si facilement partagés: les données sont duplicables à coût nul, mais pas les objets physiques tels que les ordinateurs ou les téléphones. Les vélos et les voitures peuvent être partagés, car nous ne nous en servons que quelques heures par jour, alors que nous utilisons les ordinateurs en permanence quand nous télétravaillons ou téléapprenons. Les machines à laver sont rarement communes, car cela induit des coûts de partage trop élevés. Tout comme les brosses à dents, trop proches de notre corps.

Ainsi, le développement de l'informatique induit des mouvements individualistes et collectivistes contradictoires, qui ne font pas disparaître la notion d'individu, mais la transforment, en en gommant certains traits, mais en en accentuant d'autres, telle l'autonomie que procure le fait d'avoir une pièce à soi, une adresse à soi, un téléphone à soi et un ordinateur à soi. ■

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

© Sura Nualpradid/Shutterstock.com

cité
sciences
et industrie

30 ans de *Hubble* : une révolution astronomique

témoignages et rencontres

dimanche 25 octobre — 15h

© Nasa

Le télescope spatial *Hubble*, mis en orbite le 24 avril 1990 par la navette spatiale *Discovery*, a permis de prodigieuses découvertes aussi bien en astrophysique qu'en science planétaire ou en cosmologie.

À l'occasion des 30 ans de l'instrument, nous reviendrons sur son épopée incroyable, soulignerons les apports de ses observations aux sciences astronomiques et aborderons le futur de l'observation spatiale.

L'aventure *Hubble* : de son lancement aux missions de réparations

Avec **Charles Bolden**, astronaute à la Nasa, pilote lors de la mission de lancement du télescope ; **Jean-François Clervoy**, astronaute à l'Esa, a participé à l'une des missions de réparation en 1999 ; **Claude Nicollier**, astronaute à l'Esa, a participé à deux missions de réparation en 1993 et 1999.

Les avancées scientifiques et le futur de l'observation spatiale

Avec notamment les astrophysiciens :
Roger-Maurice Bonnet (Esa), **Daniel Kunth** (IAP).

> Séance anniversaire organisée en partenariat avec la Société astronomique de France (SAF) et animée par **Gilles Dawidowicz**, SAF, et **Frédéric Castel**, journaliste scientifique.

EN PARTENARIAT AVEC SAF

AVEC LE SOUTIEN DE L'ASTRONOMIE POUR LA SCIENCE

Cité des sciences et de l'industrie
30, avenue Corentin-Cariou - 75019 Paris

Ⓜ Porte de la Villette Ⓑ 3b Cité des sciences et de l'industrie

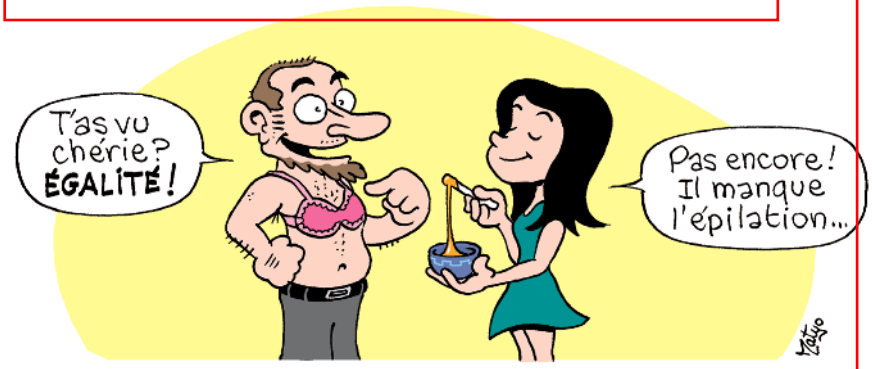
Accès gratuit sur réservation

Informations sur ***cite-sciences.fr***

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

À QUEL SEIN LE POLITIQUE DOIT-IL SE VOUER ?

Le refus de porter un soutien-gorge est une tendance qui s'affirme en France. Avec des motivations et des réactions parfois contradictoires.



« Couvrez ce sein que je ne saurais voir », s'offensait Tartuffe à la vue d'un décolleté, de peur que ne surgissent en lui de coupables pensées. Jouant de la satire, la plume de Molière ironise sur le puritanisme de l'âge classique. De nos jours, cette injonction morale apparaît bien désuète. D'ailleurs, la sortie du confinement lié à la pandémie de Covid-19 revigore une revendication vestimentaire : le « *no-bra* » ou le refus du soutien-gorge. C'est ce que révèle un sondage de l'Ifop réalisé en juin 2020, analysant les comportements collectifs liés au dévoilement des poitrines féminines.

Plus marquée chez les Françaises de 18-25 ans (18 %), cette pratique répond à des motivations parfois contradictoires, dont l'inventaire souligne la complexité de ce qui fonde la confiance en matière de conduite sociale. Elle va du souci de protection publique au désir d'émancipation individuelle.

L'inconfort du soutien-gorge est le principal argument avancé par les répondantes qui pratiquent le *no-bra*, toutes classes d'âge confondues. À l'instar du corset, le retrait de cette pièce de lingerie, surtout observé en contexte de vacances et de sortie, est vécu par certaines comme une émancipation historique : impact négatif du soutien-gorge sur les seins et affranchissement des normes esthétiques. En revanche, nombreuses sont celles (et ceux) qui considèrent le *no-bra* comme étant inadapté au monde professionnel.

> La dimension érotique n'intervient qu'en deuxième intention

La dimension érotique ne vient qu'en deuxième intention. Ainsi, près d'un tiers des femmes de moins de 25 ans ne portent pas de soutien-gorge pour lutter contre la sexualisation de la poitrine, tandis que 16 % d'entre elles considèrent au contraire que l'absence de cette pièce contribue à les rendre plus désirables. Inversement, une majorité de femmes refusant le *no-bra* évoquent la gêne de faire apparaître les tétons et la crainte du harcèlement. La moitié de la population (hommes et femmes confondues) prend au sérieux ce risque, et une personne sur cinq accorde des circonstances atténuantes en cas d'agression sexuelle dans ce contexte !

Symbole de désagrément, d'insécurité, voire de négation sexuelle pour les unes, de confort, de séduction et d'émancipation pour les autres, le *no-bra* témoigne d'une contradiction structurelle quant à l'image de la poitrine féminine dans l'espace public. En effet, 36 % des femmes n'aiment pas voir des seins dénudés sur une affiche publicitaire. Mais 54 % ne souhaitent pas que les photos où des tétons de femmes ressortent soient censurées sur les réseaux sociaux quand ceux des hommes ne le sont pas. Ainsi, deux demandes inconciliables coexistent : liberté d'afficher la poitrine pour être à égalité sociale avec le torse masculin et nécessité de la cacher pour ne pas subir la concupiscence.

On comprend pourquoi le traitement politique de la poitrine féminine reste une gageure. Au nom de l'égalité des sexes, 58 % de la population est favorable à une loi qui affirmerait que les seins des femmes ne sont pas un attribut sexuel. L'heure ne serait donc plus à la tartufferie d'aseptiser l'espace public de tout désir masculin en camouflant ce qui est susceptible de l'éveiller.

Mais le cas récent d'une femme refoulée d'un commerce du Var pour cause de décolleté prononcé laisse songeur. Si la solidarité avec la victime sur les réseaux sociaux (#JeKiffeMonDecollete) marque une émancipation, la dimension érotique des poitrines ne saurait être gommée. Dès lors, la désexualisation de celles-ci par le droit ne suffira sans doute pas à redonner confiance en la liberté vestimentaire de chacune. Il faut accepter le constat anthropologique du sein comme symbole maternel et érotique, sans y perdre l'allégorie républicaine de la liberté conquise. Avec son sein dénudé, que Marianne était jolie ! ■

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

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American

HORS-SÉRIE

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

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

N° 100 (août 18)
réf. DO100

N° 99 (mai 18)
réf. DO099

N° 98 (févr. 18)
réf. DO098

N° 97 (nov. 17)
réf. DO097

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR **BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML**

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Next2C – Service abonnements Pour La Science – 26 BD Président Wilson CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr

☑ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,90 €.**

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

1re réf. 0 1 x 10,90 € = 1 0 9 0 €
2e réf. ..... x 10,90 € = ... €
3e réf. ..... x 10,90 € = ... €
4e réf. ..... x 10,90 € = ... €
5e réf. ..... x 10,90 € = ... €
6e réf. ..... x 10,90 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

Offre valable jusqu'au 31/12/20 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter **boutique.pourlascience.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.

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*
☐ **Carte bancaire**
N° .....
Date d'expiration .....
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

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

PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'ESSENTIEL

> À ce jour, aucun traitement contre la maladie d'Alzheimer ne s'est révélé efficace.

> Une raison est sans doute que l'on s'est concentré sur un aspect de la maladie : les agrégats de protéines anormales qui s'accumulent dans le cerveau.

> Pourtant, d'autres voies touchant la biologie fondamentale de la maladie sont prometteuses, comme l'étude des défauts d'élimination des protéines anormales ou des dégâts causés par l'inflammation cérébrale.

> Ces voies, entrecroisées, plaident pour une approche plus globale de la maladie.

L'AUTEUR

KENNETH S. KOSIK
chercheur et professeur en neurosciences à l'université de Californie à Santa Barbara

ALZHEIMER
Les voies du futur

La maladie d'Alzheimer ne se résume pas à la destruction de neurones liée à l'accumulation d'amas protéiques dans le cerveau. On s'aperçoit aujourd'hui que pour vaincre cette pathologie, il est indispensable de revenir à sa biologie fondamentale. Cinq voies suscitent ainsi de nouveaux espoirs.

Aucun obstacle fondamental ne nous empêche, en principe, de développer un traitement contre la maladie d'Alzheimer. D'autres troubles, qui se manifestent par de la violence, de l'avidité ou de l'intolérance par exemple, ont des origines bien plus diverses et complexes que cette maladie qui, par essence, est un problème de biologie cellulaire dont la solution devrait être à notre portée. Il existe même de fortes chances pour que la communauté scientifique dispose déjà – sans le savoir – d'un traitement potentiel stocké quelque part parmi les fioles d'un quelconque laboratoire. De même, des indices d'importance majeure pourraient se cacher dans les gigantesques bases de données, les registres de dossiers cliniques, les études menées en imagerie cérébrale, les analyses sanguines, les génomes, les enregistrements de l'activité neuronale, etc., attendant d'être repérés.

Si nous sommes passés à côté de ces éventuels indices, c'est parce que, depuis des décennies, nous avons systématiquement poursuivi, bille en tête, toute découverte un tant soit peu miroitante, au lieu d'explorer à fond la biologie qui sous-tend cette maladie. Seules quelques hypothèses ont piloté la recherche, dont celle qui accorde à un fragment de protéine nommé « bêta-amyloïde » un rôle majeur dans la maladie. Dès lors, plusieurs médicaments ont été conçus pour réduire les concentrations de ces « peptides amyloïdes » chez les patients. Malheureusement, aucun n'est parvenu à stopper le déclin cognitif de façon significative. Désormais, il apparaît simpliste de penser qu'il sera possible de guérir les patients en éliminant ou en inhibant ces peptides, sans comprendre véritablement comment ils se développent et >

© Sauf mention contraire, les illustrations sont de Galen Dara

> s'accumulent (*voir l'encadré page 26*). En suivant cette hypothèse, nous ne nous sommes pas nécessairement trompés de voie, mais notre zèle nous a amenés à en ignorer d'autres, voire les racines mêmes de cette voie-là.

Il est temps de revenir aux fondamentaux. Depuis trente ans, je mène des projets de recherche sur des familles présentant un risque élevé de développer la maladie d'Alzheimer et sur des stratégies de prévention. Mes collègues et moi-même étudions également la physiologie des lésions des cellules cérébrales des patients atteints de la maladie. Nous qui travaillons dans des champs scientifiques et médicaux pourtant variés sommes unanimement convaincus qu'il est indispensable aujourd'hui de reconsidérer la biologie fondamentale de la maladie et de réexaminer les connaissances acquises à ce jour, pour y rechercher des indices que nous aurions négligés.

Au moins cinq voies, liées à d'importantes découvertes effectuées ces dernières années, méritent d'être explorées et pourraient fournir des pistes de nouveaux traitements. Ces voies concernent aussi bien les dysfonctionnements de l'élimination des protéines anormales dans le cerveau que les dégâts causés par l'inflammation cérébrale ou encore des perturbations dans la transmission des signaux électriques entre neurones. Des domaines différents, mais qui, en s'accumulant, provoquent diverses maladies du cerveau. Et lorsqu'un seul est présent – voire deux –, ils sont susceptibles d'engendrer la maladie d'Alzheimer.

VOIE N° 1

COMPRENDRE POURQUOI DES PROTÉINES SONT MAL ÉLIMINÉES

Au début du XXe siècle, plusieurs neuropathologistes, dont Aloïs Alzheimer, qui a donné son nom à la maladie, ont décrit les lésions microscopiques observées dans le cerveau de patients décédés, atteints de différentes formes de démence. Aujourd'hui, on sait que ces lésions sont des amas de protéines malformées et non éliminées. Dans le cas de la maladie d'Alzheimer, certains sont composés de fragments de peptide bêta-amyloïde et se logent entre les cellules : ce sont les plaques séniles ou dépôts amyloïdes. D'autres amas, appelés dégénérescences neurofibrillaires, s'accumulent au sein même des neurones et sont composés d'une protéine appelée « tau » (pour *Tubulin associated unit*, protéine associée aux microtubules, de longs polymères du squelette des cellules).

Plus d'un siècle plus tard, nous ne savons toujours pas pourquoi les cellules ne parviennent pas à éliminer ces amas anormaux. Les mécanismes normalement à l'œuvre dans les cellules pour éliminer les protéines endommagées sont aussi anciens que la vie elle-même, mais, dans le cas de la maladie d'Alzheimer, ils semblent tout bonnement enrayés. Qu'est-ce qui dysfonctionne ? Cette question s'avère aussi cruciale dans la maladie d'Alzheimer que celle de la prolifération anarchique des cellules dans le cancer. Des observations, menées notamment par Celeste Karch et ses collègues de l'université Washington de Saint Louis, indiquent que les protéines tau anormales semblent capables de s'extraire des cellules en déjouant les systèmes habituels de détection des molécules nuisibles. Il reste à découvrir comment elles y parviennent.

De façon générale, les cellules disposent de deux systèmes pour éliminer les protéines intracellulaires anormales : le système ubiquitine-protéasome (UbPr) et l'autophagie. Dans le premier cas, les protéines anormales sont insérées dans une structure cellulaire en forme de tonneau nommée « protéasome », où elles sont découpées en petites portions réutilisables. Dans le second cas, la cellule les capture, les enveloppe et les détruit complètement. Il arrive aussi que les neurones expulsent ces protéines anormales et confient leur destruction aux cellules microgliales, les principales cellules immunitaires du cerveau.

En fonction de sa taille, une protéine anormale sera traitée soit par le système UbPr, soit par autophagie. En effet, le protéasome

EN CHIFFRES

50 MILLIONS
Dans le monde, on compte environ 50 millions de personnes atteintes de démence, c'est-à-dire d'un syndrome dans lequel on observe une dégradation de la mémoire, du raisonnement, du comportement et de l'aptitude à réaliser les activités quotidiennes.

60-70 %
La maladie d'Alzheimer serait la cause de 60 à 70 % des cas de démence.

10 MILLIONS
On estime que près de 10 millions de nouveaux cas de démence apparaissent chaque année dans le monde, dont 49 % en Asie, 25 % en Europe, 18 % en Amérique et 8 % en Afrique.

152 MILLIONS
Le nombre total de personnes atteintes de démence devrait atteindre 82 millions en 2030 et 152 millions en 2050, principalement à cause du nombre croissant d'individus concernés vivant dans les pays à faible ou moyen revenu.

27 MILLIONS
La démence frappe plus souvent les femmes que les hommes. En 2016, sur un total estimé de 43,8 millions de personnes atteintes dans le monde, 27 millions étaient des femmes, contre 16,8 millions d'hommes.

1 MILLION
En France, environ 1 million de personnes âgées de plus de 60 ans souffraient d'une démence en 2010. Entre les années 1990 et 2000, l'incidence de la maladie y a diminué de façon significative, mais seulement chez les femmes.

Sources : OMS ; World Alzheimer Report 2015 ; Lancet. Neurol., vol. 18, pp. 88-106, 2019 ; Santé Publique France

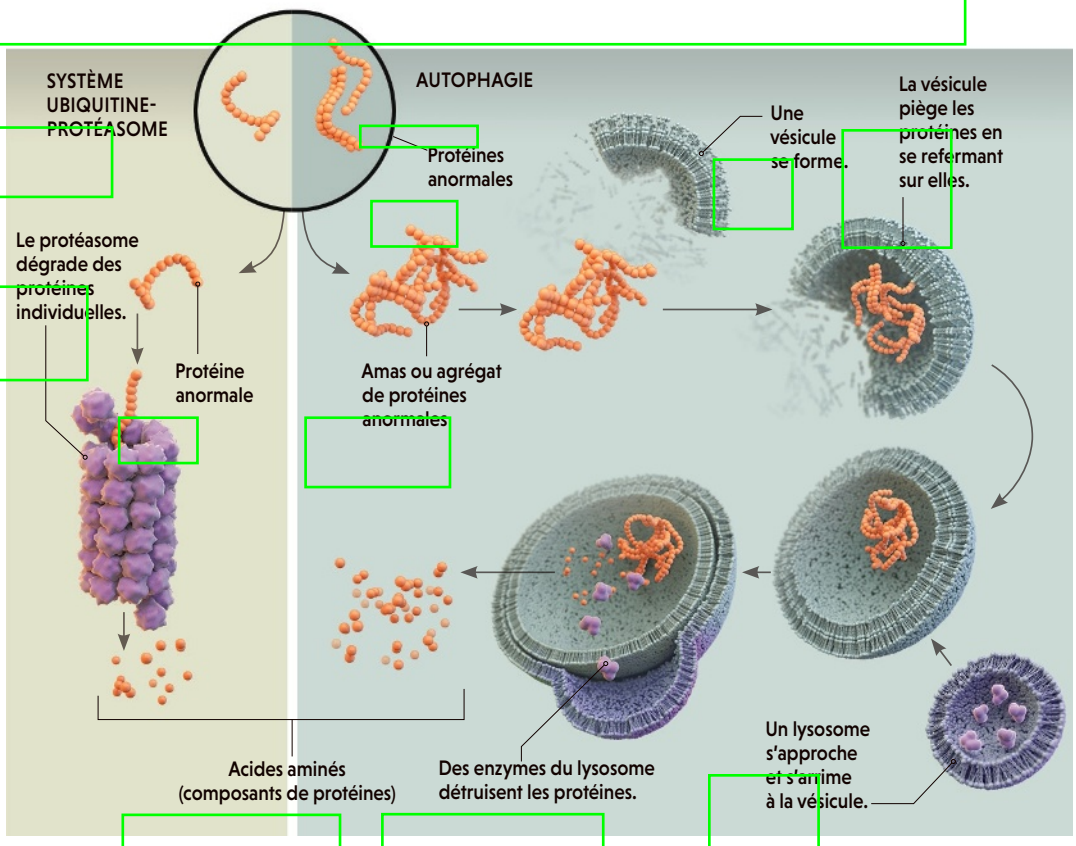
dispose d'une ouverture étroite à chaque extrémité, semblable à un pore, qui ne peut accepter que des protéines fines et filiformes. À l'intérieur de ce pore, des enzymes décomposent les protéines en acides aminés (leurs constituants), qui sont alors réutilisés dans la synthèse de nouvelles protéines. Les molécules trop volumineuses pour se faufiler dans un protéasome, telles que des amas de protéines ou des protéines particulièrement déformées, sont prises en charge par le système autophagique, où de puissants organites les détruisent : les lysosomes.

Dans la maladie d'Alzheimer, quelque chose déraille, de sorte que les cellules du cerveau ne parviennent plus à se débarrasser des amas amyloïdes et des protéines tau, qui en s'agglomérant les endommagent davantage ou les étouffent. C'est pourquoi il est essentiel de mieux comprendre le fonctionnement de ces deux systèmes d'élimination, ainsi que le mécanisme grâce auquel ils détectent les protéines anormales. Les protéines malformées, comme tau, n'apparaissent en effet pas d'un seul coup. Elles subissent des mutations et accumulent des modifications qui les prédisposent à un mauvais repliement, puis s'agrègent en structures de plus en plus volumineuses et organisées. À quelle étape de ce processus les systèmes de surveillance sont-ils capables de détecter qu'une protéine est anormale ?

Un élément intrigant est cette capacité des protéines tau de s'extraire des cellules et de se déplacer dans l'espace extracellulaire, où des cellules voisines les absorbent à leur tour. Nous ignorons la fonction de ce système de transit. L'échange de protéines tau entre cellules relève-t-il d'un mécanisme normal ou les cellules se débarrassent-elles des molécules nuisibles en exfiltrant les protéines tau anormales ? Nous >

ÉLIMINER LES PROTÉINES ANORMALES

Les marqueurs classiques de la maladie d'Alzheimer sont des amas de fragments de protéines nommés « peptides bêta-amyloïdes » et des enchevêtrements d'une protéine nommée « tau » dans le cerveau. Chez les patients atteints de la maladie, les deux mécanismes que les neurones mettent habituellement en œuvre pour se débarrasser des protéines défectueuses sont défaillants. En temps normal, les petites protéines individuelles sont transportées vers le système ubiquitine-protéasome : un organite en forme de tonneau (le protéasome) découpe les protéines en acides aminés. Les amas sont traités par autophagie : ils sont encapsulés avant d'être décomposés par les enzymes d'un autre organite, le lysosome.



© Campbell Medical Illustration

LA LUTTE LABORIEUSE CONTRE LES DÉPÔTS AMYLOÏDES

L'idée phare pour contrer la maladie d'Alzheimer se révèle de plus en plus difficile à mettre en œuvre.

En mars 2019, l'entreprise Biogen a mis fin à deux essais cliniques de grande ampleur, lancés pour évaluer l'efficacité de son médicament contre la maladie d'Alzheimer, l'aducanumab. Ce traitement s'était révélé sans effet sur la mémoire des patients. Plusieurs mois plus tard, surprenant volte-face : la société et son partenaire, le laboratoire pharmaceutique japonais Eisai, ont annoncé qu'ils allaient demander à l'Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux de valider le traitement. Selon Biogen, une nouvelle analyse avait montré que, dans l'un des essais, un sous-ensemble de personnes prenant les doses les plus élevées avait tiré des bénéfices du composé, lequel dissout les dépôts de peptides bêta-amyloïdes qui s'accumulent dans le cerveau durant la maladie. Ce retournement de situation, ainsi que les échecs répétés d'autres composés contre les dépôts amyloïdes, laissent les experts divisés : le traitement contre les dépôts amyloïdes – longtemps considéré comme la meilleure stratégie dans la maladie d'Alzheimer – est-il toujours une approche prometteuse ?

Certains des scientifiques qui mettent en cause « l'hypothèse amyloïde » sont les mêmes qui ont contribué à la formuler jadis. « Elle tient sur pieds, mais boite », explique le généticien John Hardy, à la tête d'un programme de neurosciences moléculaires à l'University College de Londres et coauteur des études dont a émergé cette idée. « Le concept que nous avons esquissé en 1998 est trop simpliste. Il comportait, à l'époque, beaucoup de points d'interrogation, mais nous étions persuadés qu'ils seraient vite levés. Or, vingt ans plus tard, ces questions demeurent en suspens. » De nombreux experts continuent toutefois de penser que l'hypothèse amyloïde reste valable et que la recherche de traitements ciblant cette protéine doit être poursuivie.

Le peptide bêta-amyloïde se forme lorsque la protéine précurseuse de la protéine bêta-amyloïde (ou APP) est coupée par les enzymes bêta-sécrétase et gamma-sécrétase. Chez les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer, cette voie dysfonctionne et conduit à l'accumulation de peptides bêta-amyloïdes autour des neurones. Des enchevêtrements d'une autre protéine, tau, se forment aussi à l'intérieur des neurones. Peu à peu, les cellules meurent et le cerveau dégénère. C'est pourquoi les neuroscientifiques ont supposé que le peptide bêta-amyloïde était une cause de la maladie.

D'autant que des patients atteints d'une forme génétique particulière portent des mutations sur un gène parmi trois impliqués dans la formation du peptide : l'un code l'APP, les deux autres des composants de la gamma-sécrétase. Or leurs neurones éliminent avec difficulté les peptides bêta-amyloïdes. L'importance de ces peptides a été confirmée à la suite de recherches sur le syndrome de Down. Les personnes touchées portent une copie en trop du chromosome 21 – où se situe le gène de l'APP – et produisent ces peptides en excès. Elles présentent aussi un risque plus élevé que les autres de développer une démence avant l'âge de 50 ans. Toutes ces découvertes ont conduit à penser que la maladie d'Alzheimer était due à un mécanisme défectueux d'élimination des peptides bêta-amyloïdes.

Aujourd'hui, au vu des échecs thérapeutiques, certains chercheurs reconsidèrent l'efficacité des stratégies ciblant uniquement ces peptides. D'une part, ces derniers s'accumulent souvent pendant des années avant que les signes de démence n'apparaissent. D'autre part, toutes les personnes présentant des dépôts amyloïdes ne développent pas la maladie. De plus, en février, deux médicaments visant les peptides bêta-amyloïdes, le solanezumab (Eli Lilly) et le gantenerumab (Roche), ont échoué dans un essai clinique concernant une forme génétique précoce de la maladie d'Alzheimer supposée liée leur métabolisme.

Désormais, de nombreuses études montrent que l'accumulation de peptides bêta-amyloïdes n'est qu'un élément d'une cascade complexe d'interactions. Des chercheurs comme Karen Duff, de l'université Columbia, défendent l'idée que les amas de protéines tau jouent un rôle aussi – voire plus – important que celui des dépôts amyloïdes. En effet, le degré de dysfonctionnement lié à la protéine tau est plus corrélé à la gravité des symptômes cognitifs.

D'autres pensent que l'inflammation ou des défauts dans la barrière hématoencéphalique joueraient un rôle critique. Mais les médicaments ciblant tau et l'inflammation n'ont, à ce jour, pas montré leur efficacité non plus, comme le souligne Howard Feldman, neurologue à l'université de Californie à San Diego et directeur d'un consortium de laboratoires universitaires et gouvernementaux américains menant des essais cliniques de traitements contre la maladie d'Alzheimer, qui prône une combinaison d'approches : « Une seule approche pourrait ne jamais suffire, en dehors des formes génétiques [à apparition précoce] de la maladie. »

> Le concept que nous avons esquissé en 1998 est trop simpliste

Il y a d'autres idées. Ces dernières années, John Hardy et ses collègues en sont venus à considérer que les formes tardives de la maladie d'Alzheimer et d'autres maladies neurodégénératives résultent d'une mauvaise gestion des lésions. Selon eux, l'accumulation précoce de peptides bêta-amyloïdes endommagerait la membrane des neurones (ces peptides se nichent dans la membrane). Si, pour une raison ou une autre, les cellules immunitaires du cerveau nommées « cellules microgliales » ne parvenaient plus à éliminer ces protéines défectueuses et les membranes endommagées, les neurones n'arriveraient plus à réguler correctement le surplus de peptides bêta-amyloïdes, entraînant un cercle vicieux de détériorations. Cette hypothèse est corroborée par le fait que la majorité des gènes identifiés comme facteurs de risque dans la forme tardive de la maladie d'Alzheimer sont impliqués dans le métabolisme des cellules microgliales ; d'autres codent pour des protéines qui aident à construire et à réparer… les membranes cellulaires.

Cependant, d'autres scientifiques comme David Holtzman, neurologue à l'université Washington de Saint Louis, pensent toujours que les peptides bêta-amyloïdes jouent un rôle primordial tant leur agrégation est corrélée à la gravité des symptômes. Pour John Hardy, bien que plus sceptique qu'il y a vingt ans, l'hypothèse repose sur des données solides et les médicaments contre les peptides bêta-amyloïdes mènent à de mauvais résultats parce qu'ils sont prescrits bien trop tard dans l'évolution de la maladie. Quand les cliniciens seront capables de prédire le risque de développer la maladie en mesurant des biomarqueurs génétiques, sanguins ou issus du liquide céphalorachidien, on pourra traiter les futurs malades avant qu'ils ne développent les symptômes…

D'ailleurs, pour certains, c'est en tant que biomarqueurs de la maladie que les peptides se révéleront vraiment intéressants. « C'est un marqueur d'une importance capitale pour évaluer le risque et déterminer à quel stade la maladie peut être diagnostiquée », déclare Denise Park, spécialiste du vieillissement du cerveau à l'université du Texas à Dallas. À l'avenir, il semble donc peu probable que l'hypothèse amyloïde soit abandonnée. En revanche, les scientifiques paraissent enfin prêts à adopter une approche plus globale de la maladie.

TANYA LEWIS
rédactrice en chef adjointe
du magazine Scientific American,
en charge de la santé et la médecine

pensons que, dans la maladie d'Alzheimer, une partie de ces protéines tau situées en dehors des cellules présentent un repliement anormal. De fait, lorsque de telles protéines tau anormales pénètrent dans une cellule voisine, elles transmettent l'anomalie de leur conformation à d'autres protéines tau. Ce phénomène de mimétisme conformationnel permet la propagation de formes anormalement repliées de tau aux cellules environnantes, en un funeste effet boule de neige.

Pour le stopper, des scientifiques envisagent de profiter de ce que ces protéines sont en dehors des cellules pour les intercepter et les éliminer à l'aide d'anticorps donnés au patient. Mais cette approche ne fonctionnera qu'à condition de savoir exactement comment les protéines tau sont déformées afin de concevoir un anticorps spécifique. Il s'agira aussi de déterminer où elles ont migré dans l'espace, complexe, entre les cellules. En particulier, atteignent-elles les synapses, ces zones de connexion entre les neurones ? Les synapses sont des fentes étroites difficiles d'accès pour les anticorps. Une approche peut-être plus prometteuse consiste à comprendre avec précision comment les cellules exfiltrent les protéines tau et à l'aide de quels récepteurs les cellules voisines les happent de nouveau ; de récentes expériences menées au laboratoire suggèrent que nous sommes sur la voie d'un tel récepteur.

VOIE N° 2

IDENTIFIER COMMENT LES PROTÉINES SONT MODIFIÉES

Une deuxième voie concerne les protéines elles-mêmes. En 2017, Anthony Fitzpatrick, alors au laboratoire de biologie moléculaire du Medical Research Council, à Cambridge, en Grande-Bretagne, et ses collègues ont réalisé une des avancées majeures de ces dernières années sur la maladie d'Alzheimer. Ils sont parvenus à obtenir une image de protéines tau anormales, enchevêtrées sous la forme d'une dégénérescence neurofibrillaire, avec un niveau de détail jamais atteint jusqu'alors. Cette image, obtenue par cryomicroscopie électronique, montre des milliers de protéines alignées par paires et verrouillées dans une configuration en forme de C. Il est envisageable d'exploiter les caractéristiques de ces inclusions solides pour concevoir de petites molécules capables de s'insérer dans les interstices des protéines anormales et de les désintégrer. Cependant, détruire ces structures est un défi pour plusieurs raisons, à commencer par la nécessité de déterminer quelle force maintient l'enchevêtrement. Une autre piste serait de déterminer les étapes par lesquelles les protéines tau passent de leur état fluide naturel à un état rigide tel celui observé par >

> cryomicroscopie, ainsi que les modifications qui les prédisposent à ce changement.

Le passage de l'état liquide à l'état solide s'appelle une «transition de phase». Les biologistes s'intéressent de plus en plus à ces transitions de phase dans les cellules vivantes en raison de leur éventuel rôle dans la maladie. Depuis des années, les physicochimistes étudient les séparations de phase, par exemple la coalescence de gouttelettes d'huile dans l'eau. L'huile et l'eau sont liquides à température ambiante. Pourtant, elles restent séparées en raison de l'équilibre entre les forces d'attraction et de répulsion qui s'exercent entre les molécules. Dans les cellules vivantes, grâce à des séparations similaires de phase, un ensemble spécifique de molécules peut être concentré en un seul endroit, ce qui favorise certaines activités cellulaires. Par exemple, des protéines près d'un gène sont capables d'en contrôler l'expression, ainsi que Benjamin Sabari, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), aux États-Unis, et ses collègues l'ont montré en 2018. Dans cette configuration, bien qu'à l'état liquide, les protéines restent groupées, comme les molécules au sein d'une gouttelette, sous l'effet des interactions physiques faibles. Cette configuration permet à des ensembles de protéines de se déplacer et de fonctionner de conserve sans être enveloppés dans une membrane, ce qui serait plus coûteux en énergie pour la cellule.

Toutefois, dans certains cas, comme avec la protéine tau, il arrive que la concentration des protéines soit si forte dans une gouttelette que les molécules s'agrègent en un enchevêtrement. De telles protéines, capables d'une transformation de phase, sont dites «intrinsèquement désordonnées». Comme le dieu grec Protée, elles prennent de nombreuses formes, contrairement aux protéines dites «ordonnées», qui n'en prennent qu'un nombre limité. Chaque forme est associée à un niveau d'énergie. Certaines protéines intrinsèquement désordonnées se replient parfois dans un état d'énergie si bas qu'elles ne peuvent plus en sortir, ce qui accroît leur rigidité et leur tendance à s'enchevêtrer.

Par ailleurs, les cellules regroupent diverses protéines et d'autres molécules, comme les ARN messagers (les intermédiaires de production des protéines à partir de l'ADN), dans des organites sans membrane appelés «granules de stress» et «granules d'ARN messager». Bien que tassées, ces molécules restent, généralement, à l'état liquide. Cependant, au-delà d'une certaine concentration, il arrive qu'elles s'agglomèrent et entament une transition de phase vers un état solide, ce qui les rend plus difficiles à éliminer par les cellules et ce qui accroît le risque qu'elles provoquent des lésions cérébrales. Autant de raisons de mieux comprendre les conditions qui favorisent ce processus.

La maladie d'Alzheimer est plus fréquente chez les femmes

VOIE N° 3

CERNER L'INFLUENCE DES GÈNES

Une troisième voie consiste à rechercher, dans les génomes, des prédispositions à la maladie. Chez les personnes âgées de moins de 65 ans, la maladie d'Alzheimer résulte parfois de mutations génétiques dans l'un des trois gènes *APP*, *PSEN1* et *PSEN2*, provoquant une forme familiale rare, dramatique héritage transmis d'une génération à l'autre. Mais, dans la plupart des cas, la maladie d'Alzheimer apparaît chez les individus de plus de 65 ans et n'implique alors pas ces gènes. En passant au peigne fin des dizaines de milliers de génomes, des généticiens ont découvert d'autres modifications de l'ADN associées à la maladie d'Alzheimer. Jusqu'à présent, ils ont identifié une vingtaine de gènes présentant des variants qui augmentent ou diminuent le risque de développer la maladie. Le variant le plus connu et le plus fréquent lié à la maladie d'Alzheimer est le variant e4 du gène *APOE*. Une combinaison de plusieurs variants de ces gènes de susceptibilité augmente la

probabilité de contracter la maladie. À noter que, comme ces variants génétiques sont aussi associés à l'origine ethnique, nous aurions besoin, pour faire une évaluation fiable du risque génétique dans toutes les populations, de données beaucoup plus complètes que les analyses de gènes et les registres actuellement disponibles, essentiellement fondés sur des individus caucasiens.

Chacun de ces variants ouvre une voie pour explorer comment une petite modification génétique peut augmenter le risque de développer la maladie d'Alzheimer. Certains parmi les plus fréquemment rencontrés, menant donc potentiellement aux pistes les plus intéressantes, sont des gènes ou des segments d'ADN jouant un rôle dans le fonctionnement des cellules microgliales. Ainsi, en 2019, Alexi Nott, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont identifié un variant associé au risque de contracter la maladie d'Alzheimer au sein d'un gène connu sous le nom de *BIN1*. En temps normal, ce gène est impliqué dans le mécanisme qui permet aux cellules microgliales de phagocyter des molécules extérieures nocives et, ce faisant, de protéger les neurones voisins. Le variant identifié influerait sur l'efficacité avec laquelle les cellules microgliales éliminent les protéines parasites.

Certains variants, parmi la vingtaine mise en évidence, sont associés à l'âge et au sexe des individus. Même en tenant compte de la différence de durée de vie entre les hommes et les femmes, la maladie d'Alzheimer est plus fréquente chez ces dernières. Les effets combinés de ces variants pourraient expliquer, au moins en partie, cette différence en fonction du sexe. Chaque variant associé à la maladie d'Alzheimer contribue probablement, de façon limitée, aux différences observées d'un individu à l'autre. Il reste à comprendre pourquoi et comment chacune de ces contributions agit.

VOIE N° 4

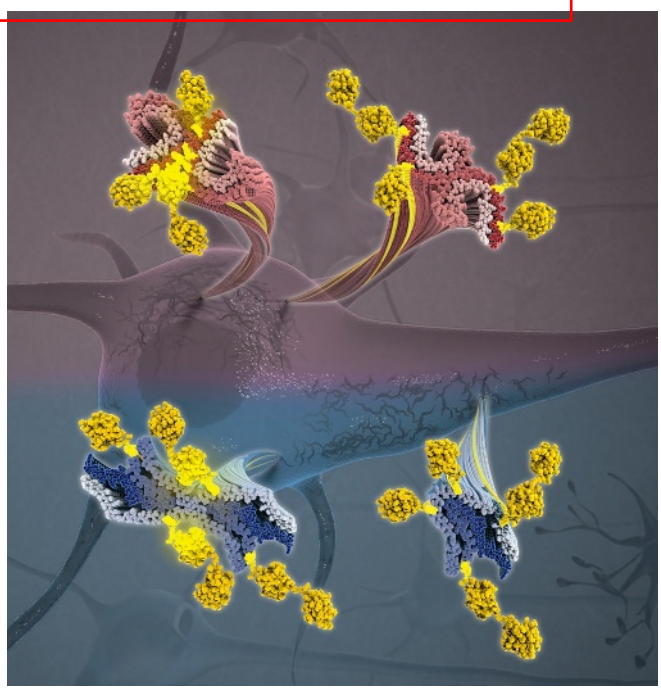
APPRIVOISER L'INFLAMMATION

L'étude des réactions immunitaires du cerveau est aussi une voie prometteuse. Quand le cerveau détecte une source de lésions, comme des dépôts amyloïdes ou des dégénérescences neurofibrillaires, il lance une alerte et met en place un barrage immunitaire constitué de cellules de défense et de molécules du système immunitaire appelées « cytokines ». Cette réponse provient, en grande partie, des cellules microgliales et entraîne une réaction inflammatoire destinée à détruire tout tissu qui présenterait des anomalies. Ce système « inné » constitue la première barrière de défense. Il tire quelque peu tous azimuts et fonctionne très différemment du système immunitaire « adaptatif », plus subtil, qui produit des cellules immunitaires et des anticorps ciblant uniquement des envahisseurs spécifiques, tels que des bactéries ou des virus.

Le système adaptatif monte une défense plus adaptée, mais, dans le cerveau, et donc dans la maladie d'Alzheimer, c'est le système inné qui prédomine. Lorsque les lésions prolifèrent au-delà de la capacité interne d'un neurone à se débarrasser des détritus ou de celle des cellules microgliales à éliminer les amas de peptides amyloïdes, cette réponse inflammatoire s'emballe et touche aussi des cellules encore saines du cerveau. En 2015, Kim Green, de l'université de Californie à Irvine, et son équipe ont montré que l'élimination des cellules microgliales anciennes chez des souris âgées incitait les animaux à en produire de nouvelles. Ce renouvellement des >

UNE PROTÉINE TAU PARTICULIÈRE

Dans la maladie d'Alzheimer *(en rouge)* et dans la dégénérescence corticobasale *(en bleu)*, deux maladies liées à une agrégation de protéines tau anormales en filaments, la structure des protéines tau diffère. C'est ce qu'ont récemment montré Anthony Fitzpatrick, de l'université Columbia, aux États-Unis, et ses collègues en combinant cryomicroscopie électronique et spectrométrie de masse. Ces différences sont dues à des modifications de la protéine tau survenant juste après la traduction de son gène en séquence protéique : des ajouts, à différents endroits de la protéine tau, de chaînes d'ubiquitine *(en jaune)*, une protéine connue pour changer les propriétés de sa cible.



© Veronica Falconieri Hays et Anthony Fitzpatrick/Institut Zuckerman de l'université Columbia

> cellules microgliales a amélioré la mémoire spatiale des souris, inversé les modifications liées à l'âge dans l'expression des gènes des neurones et même favorisé la naissance de nouveaux neurones tout en accroissant la densité de leurs prolongements (dendrites).

Cette réaction inflammatoire plutôt brutale, déclenchée par la présence de dépôts amyloïdes ou de dégénérescences neurofibrillaires, s'ajoute probablement à une inflammation à bas bruit qui apparaît de façon naturelle avec le vieillissement. En effet, de nombreuses personnes âgées présentent des concentrations élevées de cytokines pro-inflammatoires, comme le facteur de nécrose tumorale TNF, ce qui suggère un état légèrement inflammatoire dans le corps entier à ce stade de la vie, ainsi que l'ont montré Martin Michaud et ses collègues du Gérontopôle de Toulouse en 2013. Personne ne vieillit de façon identique. De même, les effets de la maladie d'Alzheimer et sa progression varient d'un individu à l'autre, ce qui provient probablement des caractéristiques du système immunitaire propres à chacun. D'une part, chaque personne hérite d'une configuration singulière de gènes impliqués dans les réponses immunitaires. D'autre part, le système immunitaire est modifié tout au cours de la vie, car il est exposé à des microbes symbiotiques, présents, par exemple, dans les intestins, et à des microbes pathogènes de l'environnement. Finalement, les caractéristiques génétiques d'un individu, ainsi que l'exposition du système immunitaire aux divers agents pathogènes, définissent un profil immunitaire individuel ou «immunotype» qui influe sur l'évolution de la maladie d'Alzheimer.

Pour les chercheurs qui tentent de réduire les dégâts causés dans le cerveau par une inflammation généralisée, le défi consiste à distinguer des autres réponses immunitaires celle, souhaitable, que le cerveau met en place pour combattre les lésions et la dégradation ordinaire que le vieillissement induit.

VOIE N°5

DÉCRYPTER LES DÉCONNEXIONS ÉLECTRIQUES

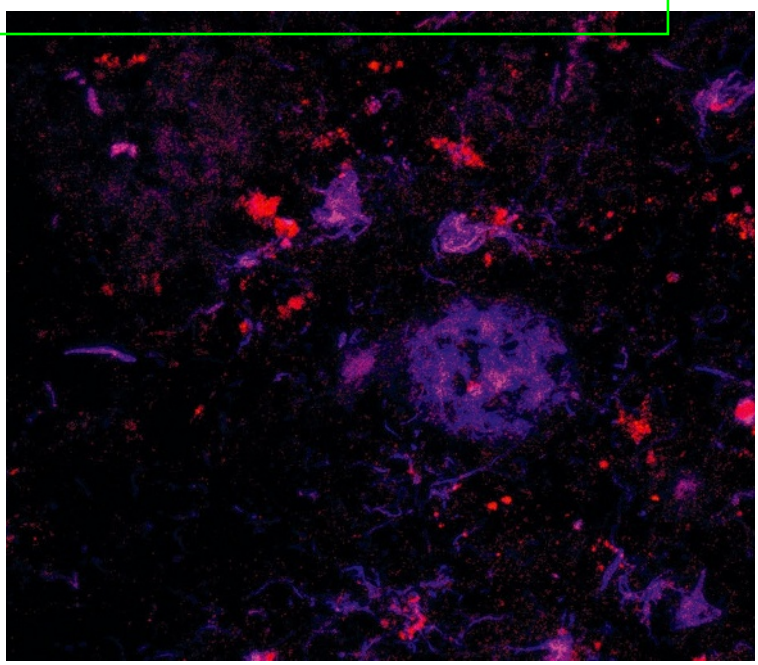
La cinquième voie qui me paraît cruciale est la compréhension des perturbations de transmission du signal électrique dans les neurones. Le cerveau est un organe électrique, capable de coder et de transmettre des informations sous forme de signaux électriques entre les neurones, grâce à des substances chimiques, les neurotransmetteurs. Jusqu'à présent, nous n'avons pas suffisamment exploré comment la maladie d'Alzheimer perturbe ce processus et l'organisation des cellules en circuits de mémoire fonctionnels. Mais grâce aux progrès techniques, il est désormais possible de visualiser les connexions structurelles et fonctionnelles avec une précision inégalée.

Certaines de ces avancées s'appuient sur l'optogénétique, une technique que les chercheurs utilisent pour stimuler des neurones spécifiques dans le cerveau d'un animal (une souris, le plus souvent) à l'aide de lumière. Le principe est le suivant. D'abord, on modifie génétiquement des neurones de l'animal que l'on souhaite étudier afin de les rendre sensibles à la lumière grâce à l'expression d'une protéine «photoactivable». Puis on les active ou inhibe à l'aide d'une fibre optique implantée dans le cerveau de l'animal.

C'est ainsi qu'en 2012, Susumu Tonegawa (Prix Nobel de physiologie en 1987) et ses collègues du MIT ont réussi, chez la souris, à observer et à manipuler la trace d'un souvenir spécifique dans le cerveau, ou «engramme»,

CIBLER LA PROTÉINE APOE ?

Une piste pour détruire les dépôts amyloïdes *(ici en bleu dans un tissu cérébral issu d'une personne atteinte de la maladie d'Alzheimer)* est de cibler la protéine APOE à l'aide d'un anticorps spécifique *(en rouge)*. En effet, la protéine APOE intervient dans le métabolisme du peptide bêta-amyloïde et son agrégation, et reste associée aux dépôts amyloïdes. En 2018, chez des souris modifiées pour produire la protéine APOE humaine, David Holtzman, de l'université Washington de Saint Louis, et ses collègues ont découvert un tel anticorps, nommé HAE-4, qui non seulement se lie préférentiellement aux protéines APOE associées aux dépôts amyloïdes (la protéine APOE joue aussi un rôle de transporteur de lipides dans le sang), mais diminue aussi l'accumulation du peptide dans le cerveau des souris. Reste à savoir si cet anticorps est transposable chez l'humain.



© Monica Xiong

c'est-à-dire la population de neurones qui encode ce souvenir (en l'occurrence une expérience désagréable – une décharge électrique – suscitant la peur). L'équipe avait repéré la zone du cerveau qui s'activait lors de l'expérience initiale. Elle a donc modifié génétiquement les neurones de cette zone chez des souris avant qu'elles ne subissent cette expérience, puis, une fois ce souvenir créé, elle a stimulé la population de neurones à l'aide de lumière. Elle a ainsi montré que cette stimulation était suffisante pour susciter la peur chez les souris.

Ce n'est pas tout. Cette année, Chao Wang, de l'université de médecine du Zhejiang, à Hangzhou, en Chine, et ses collègues ont réalisé une autre avancée majeure. Ils ont découvert que les cellules microgliales jouent probablement un rôle dans l'oubli des engrammes. On savait qu'une de leurs fonctions est d'éliminer les synapses en trop dans le cerveau en développement et de réguler la dynamique des connexions synaptiques entre neurones tout au long de la vie, mais on ignorait si l'oubli était lié à cette activité. Chao Wang et ses collègues ont montré chez des souris adultes que les cellules microgliales éliminent des synapses dans l'hippocampe, une région clé pour la mémoire, et qu'en bloquant cette activité, ils empêchaient les souris d'oublier des souvenirs.

Par ailleurs, on sait que les protéines anormales en jeu dans la maladie d'Alzheimer perturbent les neurones de différentes façons. Par exemple, les protéines tau s'accumulent plus spécifiquement dans les neurones qui utilisent le glutamate comme neurotransmetteur et produisent des signaux d'excitation, et beaucoup moins dans ceux qui inhibent les signaux en libérant un autre neurotransmetteur, GABA. Il est important de mieux comprendre les fondements de cette sélectivité cellulaire et ses conséquences, encore mal connus. En 2014, l'équipe de David Holtzman, de l'université Washington de Saint Louis, a aussi observé que l'activité neuronale augmente la dispersion de la protéine tau hors des neurones. L'équilibre entre libération de ces protéines dans le milieu extracellulaire et nettoyage de ce milieu pourrait donc être une autre pièce importante du puzzle, puisque certaines formes de protéines tau extracellulaires semblent contribuer à la propagation des agrégats de tau à d'autres neurones.

Non seulement la maladie touche différemment les cellules selon leur fonction excitatrice ou inhibitrice, mais ses effets varient aussi selon les zones du cerveau. Par exemple, les régions liées à la mémoire, aux émotions et au sommeil sont gravement affectées, tandis que celles des fonctions motrices et sensorielles primaires sont relativement épargnées. Par ailleurs, ses effets pourraient dépendre aussi de l'activité cérébrale. Même quand notre cerveau est au repos, il reste actif (il vagabonde toujours plus ou moins). En 2017, Lorenzo Pasquini, de l'université de Californie à San Francisco, et ses collègues ont montré que, dans cet état appelé «état de repos» ou «mode par défaut», les zones actives sont celles où, lorsque l'on développe la maladie d'Alzheimer, les agrégats amyloïdes se déposent en premier. Ce qui ne signifie pas pour autant qu'avoir un esprit vagabond favorise les dépôts amyloïdes.

La privation de sommeil augmente la production de protéines amyloïdes

Le sommeil est un autre état électrique du cerveau dont le rôle dans la maladie d'Alzheimer est de plus en plus reconnu. Les concentrations en protéines bêta-amyloïdes et tau varient au cours du cycle normal veille-sommeil. La privation de sommeil augmente drastiquement la production de protéines bêta-amyloïdes et diminue leur élimination. En revanche, le sommeil profond est caractérisé par des oscillations lentes de grande amplitude dans le liquide céphalorachidien (le fluide qui baigne le cerveau et la moelle épinière) qui interviendraient dans l'élimination des toxines comme les peptides amyloïdes. Cette activité rythmique oscillatoire induirait en effet des changements d'état des cellules, des flux d'ions et de liquide qui pourraient favoriser l'élimination des toxines. Malheureusement, la durée du sommeil profond tend à diminuer avec l'âge. Ce constat pourrait stimuler des recherches sur des approches pharmacologiques pour rétablir le sommeil profond.

Il existe certainement de nombreuses autres pistes. Mais ces cinq voies sont toutes si liées qu'elles peuvent déjà être explorées de façon croisée et féconde. Souhaitons que cela incite les chercheurs des différents domaines à travailler ensemble ! Un de mes espoirs est qu'à mesure que les lacunes seront comblées, des théoriciens interviendront pour modéliser les effets de la maladie d'Alzheimer sur les circuits cérébraux et les voies de signalisation cellulaire. C'est en partageant nos idées que nous réussirons à faire reculer cette terrible maladie. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. A. Josselyn et S. Tonegawa, **Memory engrams : Recalling the past and imagining the future,** *Science*, vol. 367, article eaaw4325, 2020.

C. Wang *et al.*, **Microglia mediate forgetting via complement-dependent synaptic elimination,** *Science*, vol. 367, pp. 688-694, 2020.

B. R. Sabari *et al.*, **Coactivator condensation at super-enhancers links phase separation and gene control,** *Science*, vol. 361, article eaar3958, 2018.

A. W. P. Fitzpatrick *et al.*, **Cryo-EM structures of tau filaments from Alzheimer's disease,** *Nature*, vol. 547, pp. 185-190, 2017.

M. Michaud *et al.*, **Proinflammatory cytokines, aging, and age-related diseases,** *J. Am. Med. Dir. Assoc.*, vol. 14(12), pp. 877-882, 2013.

BRUNO DUBOIS
est professeur de neurologie à Sorbonne Université, et chef du service des maladies cognitives et comportementales à l'hôpital de la Salpêtrière, à Paris, au sein duquel il dirige aussi l'unité de recherche Inserm « Cognition, neuro-imagerie et maladies du cerveau », à l'Institut du cerveau et de la moelle épinière. En 2019, il a publié chez Grasset un ouvrage intitulé *Alzheimer. La vérité sur la maladie du siècle*.

Tous les porteurs de lésions n'auront pas Alzheimer

Dans la lutte contre la maladie d'Alzheimer, un défi de taille consiste à diagnostiquer la maladie plus tôt. Des facteurs de risque commencent à émerger d'études épidémiologiques et offrent ainsi des pistes pour mieux cibler les personnes susceptibles de développer la maladie. Le point avec Bruno Dubois, qui coordonne l'une de ces études, nommée Insight.

En 2013, vous avez lancé Insight, une vaste étude sur les conditions de survenue de la maladie d'Alzheimer, dont la première phase vient de s'achever. En quoi consiste cette étude ?

L'objectif était de recruter quelques centaines d'individus âgés sans aucun trouble cognitif qui accepteraient d'être suivis sur plusieurs années, avec des examens réguliers. L'idée était de repérer, parmi toutes les caractéristiques mesurées, des indices susceptibles d'indiquer à un stade préclinique, c'est-à-dire avant que des symptômes cognitifs n'apparaissent, si l'on a un risque plus élevé de développer la maladie, afin d'agir tôt pour réduire ce risque.

Une question en particulier nous intéressait : la présence de marqueurs lésionnels de la maladie d'Alzheimer – des agrégats de la protéine bêta-amyloïde ou de la protéine tau dans le cortex – signifie-t-elle systématiquement que l'on va développer la maladie ? Pour répondre à cette question de façon statistiquement satisfaisante, nous devions avoir, parmi les participants, au moins 88 personnes présentant des lésions amyloïdes (à l'époque, on ne savait détecter les dépôts de tau avec certitude que *post mortem*) et au moins autant de personnes sans lésions.

© Bruno Dubois

Comment détecte-t-on ces marqueurs lésionnels ?

Il existe actuellement deux méthodes pour en repérer des signes chez une personne en vie. La première, indirecte, consiste à mesurer les concentrations des protéines bêta-amyloïde et tau dans le liquide céphalorachidien prélevé par ponction lombaire. En effet, lorsque ces protéines s'accumulent dans le cerveau, leurs concentrations changent dans le liquide céphalorachidien : en général, celle de la protéine bêta-amyloïde diminue d'environ 50 %, tandis que celle de la protéine tau augmente jusqu'à 200 ou 300 %. On obtient donc un indice d'une présence possible des lésions.

La seconde méthode consiste à rechercher les lésions amyloïdes dans le cerveau au moyen d'un examen de tomographie par émission de positrons (TEP-amyloïde). On injecte au patient un traceur radioactif ayant une forte affinité pour les dépôts amyloïdes, et sa détection *via* sa radioactivité signale les zones touchées du cerveau. Des traceurs de la protéine tau commencent à émerger, mais ils n'étaient pas encore disponibles au début de l'étude Insight.

Quel est le profil des personnes intégrées à l'étude Insight ?

Finalement, l'étude a débuté en 2014 avec 318 sujets de la région parisienne âgés de 76 ans en moyenne (ils avaient tous entre 70 et 85 ans au début de l'étude) et normaux sur le plan cognitif. Un examen par TEP-amyloïde a révélé des dépôts amyloïdes chez 88 d'entre eux, sans qu'aucun ne présente de symptômes de la maladie. L'étude a ensuite été menée en double aveugle : ni les personnes concernées ni les auteurs de l'étude ne savaient qui présentait des lésions amyloïdes.

Concrètement, comment avez-vous procédé ?

Tous les six mois, les 318 participants ont passé des tests cognitifs. Tous les ans, ils ont par ailleurs eu des prélèvements sanguins, un encéphalogramme et une mesure de leur activité motrice à l'aide d'un accéléromètre fixé au poignet ; et tous les deux ans, un examen complet d'imagerie par résonance magnétique, une mesure de l'activité métabolique du cerveau par tomographie par émission de positrons (TEP-FDG, une technique qui suit le métabolisme d'une molécule de glucose rendue radioactive) et une TEP-amyloïde pour évaluer l'évolution des lésions amyloïdes.

Quels résultats avez-vous obtenus au bout de cinq ans de suivi ?

Nous avons eu l'agréable surprise de constater que sur les 88 personnes présentant des lésions amyloïdes (de 82 ans en moyenne au bout de cinq ans), seules 12 ont progressé vers une maladie d'Alzheimer, identifiée par la présence conjointe de ces biomarqueurs et d'un syndrome clinique compatible avec ce diagnostic.

C'est un élément fort : ces 12 personnes nous ont permis de définir un troisième groupe dans notre étude, qui jusqu'alors n'en comptait que deux : les 88 « amyloïdes positifs » (présentant des lésions amyloïdes) et les 230 « amyloïdes négatifs » (n'en présentant pas). Ce nouveau groupe, nommé les « amyloïdes positifs convertisseurs », rassemble les participants qui présentaient des lésions et qui ont évolué vers la maladie. Il est défini sur une base extrêmement rigoureuse par un comité indépendant : il fallait qu'à deux reprises, soit à six mois d'intervalle, les personnes aient une diminution de leurs performances cognitives, évaluées à l'aide de trois marqueurs – un test d'intelligence globale, un test de mémoire et un test de comportement.

Le point intéressant est que c'est l'examen clinique, et non biologique, qui signalait un cas possible de déclenchement de la maladie. Pour ne pas être orienté par la présence de lésions amyloïdes, le statut amyloïde des sujets était gardé secret. Nous avons ensuite constaté que tous ceux dont le profil clinique suggérait un déclenchement de la maladie avaient des lésions amyloïdes dans leurs cerveaux au début de l'étude.

À l'inverse, d'autres personnes ayant des lésions amyloïdes n'ont donc pas déclenché la maladie ?

Tout est là. Sur les 88 sujets présentant des lésions au début de l'étude, 86 % sont restés stables après cinq ans. En d'autres termes, avoir des lésions amyloïdes ne suffit pas pour déterminer si une personne a la maladie d'Alzheimer.

Mais peut-être la maladie survient-elle si l'on a les deux types de lésions, amyloïdes et tau ?

Dans notre étude, sur les quelques patients pour lesquels nous disposions de liquide céphalorachidien, nous avons recherché des traces de lésions tau. Leur présence n'augmentait pas le risque de développer la maladie, mais nous n'avons pas encore assez de données pour conclure. En revanche, les données de la littérature sont claires : quand il y a détection de lésions tau, ou de lésions amyloïdes et tau, il n'y a pas plus de risque de développer la maladie que ce que nous avons obtenu avec la détection des lésions amyloïdes. En fait, on observe que les lésions amyloïdes s'accompagnent souvent de lésions tau. En résumé, les lésions sont nécessaires, mais pas suffisantes. D'autres facteurs interviennent.

Quels sont ces facteurs ?

Le premier est l'âge : les convertisseurs sont en moyenne plus âgés que les amyloïdes négatifs >

> (77,5 ans versus 76 ans au début de l'étude). Les personnes les plus âgées sont donc les plus à risque. Le deuxième est génétique : les convertisseurs portaient beaucoup plus souvent le variant e4 du gène *APOE* que les amyloïdes négatifs (75% des convertisseurs contre 13% des amyloïdes négatifs). Ce gène code une protéine impliquée dans le métabolisme des graisses. C'est un facteur de risque connu de la maladie d'Alzheimer, mais nous l'avons trouvé ici très fortement associé à la survenue de la maladie.

Par ailleurs, même si les 12 convertisseurs avaient des performances normales aux tests cognitifs, ces dernières étaient un peu diminuées dès le début de l'étude dans les tests de mémoire par rapport aux amyloïdes négatifs. Notamment, dans le test FCSRT (pour *free and cued selective reminding test*, «test de mémoire sélective libre et avec indice»), considéré comme un signe clinique fort de la présence ou de l'absence de la maladie, les amyloïdes négatifs avaient des scores plus élevés au départ que ceux qui ont évolué vers la maladie.

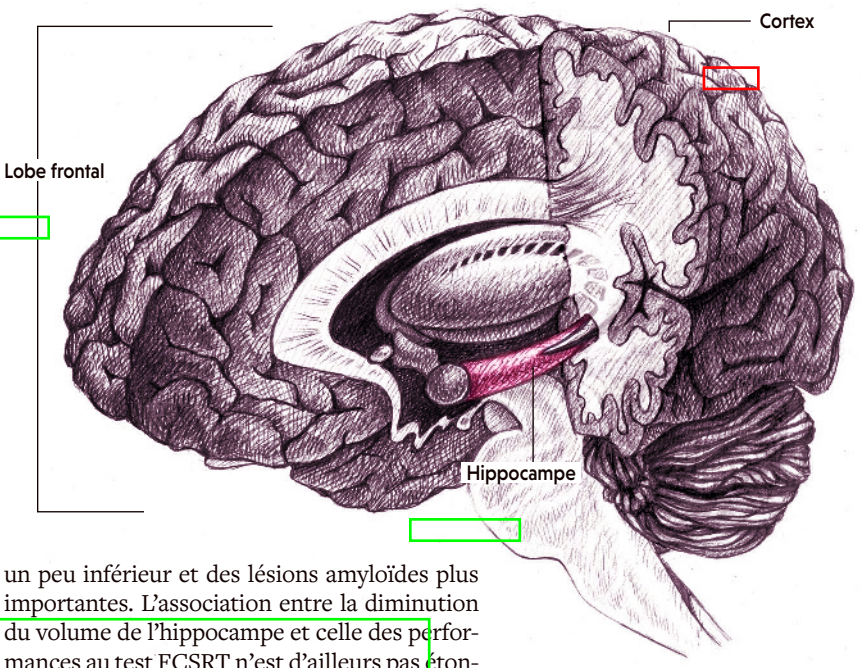
Le dernier facteur que nous avons repéré est la taille de l'hippocampe, une structure située sous le cortex, impliquée dans la mémorisation et la navigation spatiale, qui est par ailleurs l'une des premières régions atteintes dans la maladie d'Alzheimer. Au début de l'étude, son volume était de 2,43 centimètres cubes en moyenne chez les convertisseurs contre 2,72 chez les amyloïdes négatifs.

À l'inverse, nous n'avons observé aucune différence liée au sexe, au niveau d'éducation, à la fluidité lexicale et sémantique ou au métabolisme du glucose dans le cortex lors de l'inclusion dans l'étude, ni même aux fonctions cognitives telles que mesurées par le test MMSE (pour *mini-mental state examination*), un questionnaire qui évalue les capacités d'orientation, d'apprentissage, d'attention, de praxie et de rappel d'information.

Et par rapport aux «amyloïdes positifs stables», c'est-à-dire aux personnes qui ont des lésions amyloïdes mais n'ont pas développé la maladie?

De nouveau, les convertisseurs avaient des performances un peu moins bonnes au test de mémoire et un hippocampe plus petit à l'inclusion. Ils présentaient aussi des lésions amyloïdes plus importantes. Le seul point nouveau concernait le variant e4 du gène *APOE*: les convertisseurs n'étaient pas plus nombreux à présenter ce variant que les amyloïdes positifs stables. En d'autres termes, ce variant est plus associé à la formation de lésions amyloïdes qu'au développement de la maladie.

Ainsi, entre ces deux groupes, les caractéristiques qui prédisent le déclin sont au départ des performances un peu moins bonnes au test de mémoire FCSRT, un volume de l'hippocampe un peu inférieur et des lésions amyloïdes plus importantes. L'association entre la diminution du volume de l'hippocampe et celle des performances au test FCSRT n'est d'ailleurs pas étonnante, car une équipe américaine vient de montrer que ce test est un marqueur de l'état de l'hippocampe et du stade de lésion de la maladie d'Alzheimer. En effet, elle a observé que chez des sujets atteints de troubles de la mémoire, le FCSRT est le meilleur test de mémoire pour prédire la présence de biomarqueurs des lésions amyloïdes dans le liquide céphalorachidien, voire leur concentration.



L'hippocampe, une structure impliquée dans la mémorisation et la navigation spatiale, est l'une des premières régions atteintes dans la maladie d'Alzheimer.

Quel genre de questions pose-t-on dans ce test pour qu'il soit si particulier?

Il y a trois étapes dans la mémoire. La première est l'entrée de l'information, qui repose sur l'attention et la vigilance: ainsi, la performance sera moins bonne si l'on est dépressif ou si l'on prend un médicament qui diminue les ressources attentionnelles. Une fois que l'information est bien perçue par le système attentionnel, elle est envoyée vers l'hippocampe, qui est le péage de l'autoroute des souvenirs: pour qu'une information arrive dans le système de mise en mémoire, elle doit entrer dans l'hippocampe. C'est la deuxième étape. Quand cette région est endommagée, l'information n'entre pas ou partiellement, ce qui entraîne un trouble du stockage. La troisième étape est la récupération, qui nécessite l'activation de stratégies de récupération. Quand on vieillit, on a plus de mal à récupérer l'information, car cela met en jeu des stratégies du cerveau qui dépendent du lobe frontal. Or le vieillissement est justement associé à un fonctionnement diminué du lobe frontal.

Pour déterminer si un trouble de la mémoire est dû à un hippocampe endommagé, c'est-à-dire à un trouble du stockage, il s'agit donc de contrôler que les deux autres étapes, l'attention et la récupération, ne sont pas perturbées. C'est ce que fait le test FCSRT en utilisant des indices sémantiques. Par exemple, on dit à la personne des mots issus

© Marie Marty

de champs sémantiques différents, puis on lui demande de les citer en fonction du champ sémantique : quel était le nom de l'insecte, du lieu, de la boisson, etc. On lui demande ensuite quels étaient les mots présentés. En général, il en manque un ou deux. On fournit alors l'indice sémantique associé, ce qui facilite la récupération et permet de contrôler que l'attention et le stockage ont fonctionné.

Il s'agit alors de vérifier que les mots ont bien été stockés. Donc dix minutes plus tard, on redemande la liste. S'il en manque lors du rappel spontané, on peut alors aider le sujet en fournissant les indices sémantiques. Par ces indices, on facilite la récupération pour savoir si le sujet a bien stocké la bonne information. Si avec l'indice «ustensile de cuisine», il répond «casserole» au lieu de «passoire», par exemple, cela signifie qu'il n'a pas enregistré le bon item et a produit le prototype de la catégorie. Il a donc peut-être un problème d'hippocampe, et donc potentiellement la maladie d'Alzheimer.

Comment utilisez-vous ce test pour suivre l'évolution de la maladie ?

Le test compte trois listes de 16 mots, soit 48 items. Nous avons fixé une norme : se rappeler plus de 42 mots est considéré comme normal. Tous nos sujets se rappelaient plus de 42 mots au départ, mais ceux qui ont évolué vers la maladie étaient plutôt à 43-45 mots lors de l'inclusion, tandis que les meilleurs étaient à 47-48. Il y avait donc probablement déjà au départ des traces d'une petite souffrance hippocampique en train de s'installer. On a refait le test tous les six mois et, à un moment, on a observé un décrochage. Les 12 sujets ont plongé sur le plan de la mémoire, signe qu'une atteinte hippocampique s'installait. Ce décrochage constitue la première étape de l'entrée dans la maladie.

Avez-vous repéré d'autres facteurs de risque ?

Il y a probablement des facteurs de comorbidité. Par rapport aux sujets amyloïdes négatifs, les convertisseurs ont en effet plus souvent des anomalies soit de la glycorégulation (principalement du diabète), des facteurs de risque vasculaire ou des troubles des lipides. L'inflammation fait aussi partie des hypothèses. Ce qu'il faut retenir, c'est que si les lésions sont un marqueur essentiel de la maladie, on ne peut résumer celle-ci à leur présence. >

D'AUTRES COHORTES DANS LE MONDE

Ces quinze dernières années, d'autres équipes se sont également lancées dans la traque des marqueurs précoces de la maladie d'Alzheimer. Les principales sont l'étude australienne AIBL, lancée en 2006 sur plus de 1 000 personnes de plus de 60 ans, dont 768 sans aucun trouble cognitif ; l'étude néerlandaise SCIENCe, qui analyse les caractéristiques de 151 participants de plus de 45 ans sans déficit aux tests neuropsychologiques, mais ayant remarqué un déclin de leurs capacités cognitives ; l'étude espagnole ALFA, qui depuis 2013 suit 2 700 personnes âgées alors de 45 à 74 ans, sans déclin cognitif, et dont la plupart sont des descendants de personnes qui ont eu la maladie ; l'étude suédoise BioFINDER, commencée en 2010 sur près de 1 000 personnes, dont 550 présentant des troubles cognitifs légers ou un déclin subjectif ; ainsi que plusieurs études américaines (HABS, à l'université Harvard, MCSA à la Mayo Clinic, BIOCARD, à l'université Johns-Hopkins, ou encore la cohorte multicentrique ADNI).

En 2018, une métaanalyse des résultats préliminaires issus de ces diverses cohortes estimait que parmi les sujets sans trouble cognitif, mais chez qui on observait des lésions cérébrales de la maladie d'Alzheimer grâce à l'imagerie cérébrale ou à l'analyse du liquide céphalorachidien, la proportion des sujets qui verront apparaître par la suite des troubles cognitifs caractéristiques d'une démence durant leur vie variait de 5 à 42 % selon l'âge, le sexe et le degré de sévérité des lésions cérébrales de type Alzheimer. À l'inverse, parmi les sujets sans trouble cognitif et sans lésion cérébrale de la maladie d'Alzheimer, le risque d'apparition de troubles cognitifs caractérisés était plus faible, sans être nul cependant puisqu'il s'échelonnait entre 2 et 20 %.

Ces résultats sont très importants car, comme ceux de l'étude Insight, ils remettent en question la façon de penser des chercheurs et médecins : ce n'est donc pas parce qu'une personne a des lésions cérébrales de type Alzheimer que cela la mènera de façon certaine à l'apparition d'une démence durant sa vie. De plus, ils rappellent de façon éloquente que d'autres causes que la maladie d'Alzheimer peuvent aussi mener à l'apparition de troubles cognitifs, de façon non négligeable.

Ces résultats sont confirmés par d'autres, plus récents, issus des cohortes SCIENCe, ADNI et BIOCARD, où, suivant l'étude, le risque statistique d'apparition de troubles cognitifs était estimé augmenté d'un facteur 2 à 7 chez les sujets sans trouble cognitif mais avec mise en évidence de lésions cérébrales de la maladie d'Alzheimer, par comparaison avec les sujets sans lésion.

De nombreux facteurs semblent donc influencer le lien qui existe entre ces lésions et l'apparition des troubles cognitifs. C'est tout l'enjeu des travaux en cours au sein de ces diverses cohortes internationales, lesquels permettront de mieux préciser le risque individuel et d'expliquer la variabilité importante qui reste observée entre les études. En effet, plusieurs facteurs sont susceptibles d'induire des différences d'une étude à l'autre. Les plus importants sont des éléments démographiques (âge, sexe, niveau d'éducation), mais aussi la fragilité globale de l'individu ou le variant du gène *APOE* qu'il porte. Or, d'une étude à l'autre, l'ajustement des résultats obtenus en fonction de ces paramètres n'est pas toujours possible par manque de puissance statistique…

NICOLAS VILLAIN
neurologue, docteur en neurosciences, hôpital de la Pitié-Salpêtrière, Paris

R. Brookmeyer et N. Abdalla, *Alzheimer's & Dementia*, vol. 14, pp. 981-988, 2018.

> D'où l'importance des termes employés: il vaut mieux dire à une personne avec lésions mais sans symptômes que c'est un sujet à risque et non un sujet atteint de la maladie, car on change alors complètement d'attitude. On laisse un espoir à la personne et on cible plus les traitements sur les patients qui en ont vraiment besoin, ceux qui présentent un niveau de risque élevé, ce qui évite d'infliger inutilement aux autres des éventuels effets secondaires indésirables.

Le mode et l'hygiène de vie ont-ils une influence ?

Difficile de le dire, c'est un aspect sur lequel on travaille. Et dans les autres études, il faut rester prudent, car, souvent, elles examinent le lien avec la démence et non avec la maladie d'Alzheimer, qui n'est qu'une de ses formes. Ce qui est démontré formellement en revanche, c'est le rôle du niveau culturel. Il est établi que le fait d'avoir développé jeune un réseau synaptique substantiel par son niveau culturel éloigne la survenue de la maladie (c'est d'ailleurs un biais de l'étude Insight). Un niveau culturel élevé ne diminue pas le nombre de lésions, mais contrebalance leur effet par un réseau synaptique très développé (on considère que chaque neurone peut établir jusqu'à 10000 connexions avec ses voisins).

C'est l'une des raisons pour lesquelles la maladie est plus fréquente chez les femmes aujourd'hui. Celles en âge d'avoir la maladie font partie d'une génération qui n'a pas été très poussée en classe. Des études épidémiologiques faites à vingt ans d'intervalle montrent que cette fréquence diminue. La maladie est par ailleurs plus fréquente dans les pays où le niveau culturel est plus bas. C'est l'un des facteurs qui conduisent à dire que la maladie a tendance à être moins fréquente aujourd'hui.

Sait-on mieux quand débute la maladie, par exemple grâce à d'autres études sur des personnes plus jeunes ?

Oui, grâce à l'étude américaine DIAN, qui s'intéresse aux patients atteints d'une forme familiale de la maladie d'Alzheimer, héritée par une mutation génétique qui s'exprime de façon dominante. Ces personnes portent des mutations sur l'un des trois gènes *APP*, *PSEN1*, *PSEN2* et ont une probabilité de 50% de développer la maladie si l'un des deux parents porte aussi la mutation. Au sein d'une même famille, de nombreuses personnes sont donc susceptibles d'être touchées tôt et d'en mourir vers 50 ans. Randall Bateman, à l'université Washington de Saint-Louis, qui coordonne l'étude DIAN, a constitué en 2013 un réseau mondial de 194 patients atteints de toutes ces formes de la maladie, d'une part pour en étudier les caractéristiques et, d'autre part, pour leur proposer des traitements. Il a ainsi notamment montré que des changements survenaient dans les paramètres biologiques de ces sujets quinze ans avant l'apparition des premiers symptômes.

Ce faisant, il nous apprend beaucoup sur la progression de la maladie, et notamment sur la cascade biologique des événements qui surviennent avant les symptômes. L'étude est aussi une façon de tester l'hypothèse selon laquelle si les médicaments utilisés donnent peu de résultats, c'est peut-être parce qu'ils sont prescrits trop tard.

Un niveau culturel élevé contrebalance l'effet des lésions

Essaye-t-on de donner des médicaments plus tôt ?

C'est ce que fait Reisa Sperling dans l'étude américaine A4, qu'elle a lancée en 2014 : elle teste l'effet d'une molécule anti-amyloïde sur 1150 personnes qui ont des lésions amyloïdes mais pas de symptômes de la maladie. Toutefois, au bout de cinq ans d'étude, elle s'est rendu compte que très peu de sujets développaient la maladie, comme dans l'étude Insight, ce qui complique l'analyse. D'où l'intérêt de cibler les personnes à risque !

Quelle est la suite du programme pour l'étude Insight ?

Nous allons poursuivre les examens sur les mêmes sujets (moins les 12 convertisseurs qui sont sortis de l'étude pour suivre un protocole thérapeutique) en ajoutant un examen de tomographie par émission de positrons de la protéine tau. Il faut qu'on sache : tous les amyloïdes positifs vont-ils évoluer vers la maladie ?

Finalement, quelle est la définition de la maladie d'Alzheimer ?

Je dirais qu'il y en a deux. Pour la recherche, on peut la définir par la présence de lésions amyloïdes et tau, car cela a le mérite de fournir un modèle de la maladie qui permet une approche rationnelle. Pour la clinique, en revanche, ce sont définitivement les symptômes cognitifs qui importent. ■

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

B. Dubois *et al.*, **Low rate of progression of preclinical Alzheimer's disease : A 5-year follow-up of Insight study**, article soumis pour publication.

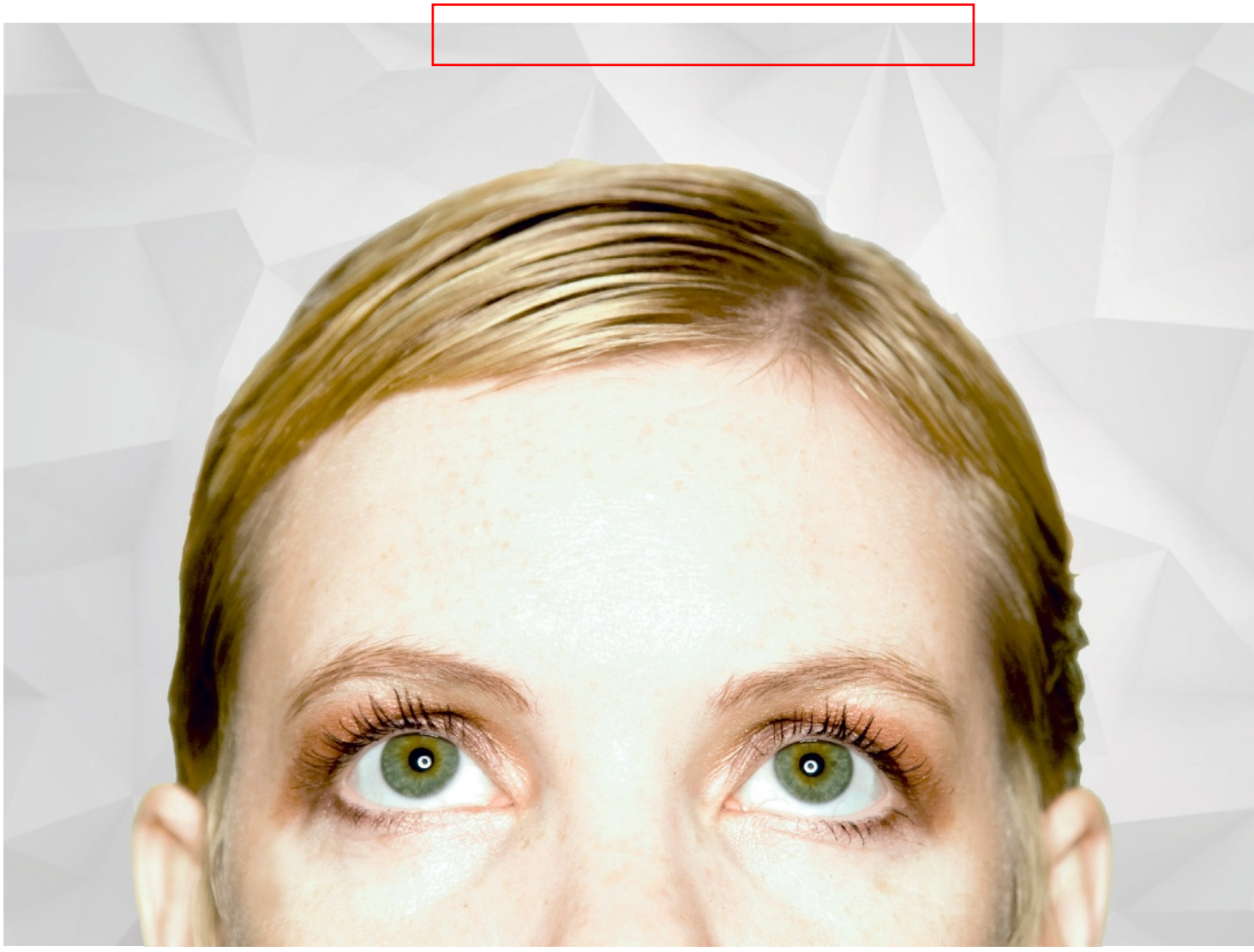
B. Dubois *et al.*, **Clinical diagnosis of Alzheimer's disease : recommendations of the International Working Group (IWG)**, *The Lancet*, à paraître.

B. Dubois *et al.*, **Cognitive and neuroimaging features and brain ß-amyloidosis in individuals at risk of Alzheimer's disease (Insight-preAD) : a longitudinal observational study**, *The Lancet*, vol. 17(4), pp. 335-346, 2018.

B. Dubois *et al.*, **Advancing research diagnostic criteria for Alzheimer's disease : the IWG-2 criteria**, *The Lancet*, vol. 13, pp. 614-629, 2014.

AcademiaNet

La base de données qui rassemble toutes les femmes scientifiques de renommée internationale



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

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

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

Partenaires

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

nature

Pour la Science

www.academia-net.org

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 :

Next2C Service abonnements Pour La Science 26 Bd Président Wilson - CS40032 67085 Strasbourg Cedex email: pourlascience@abopress.fr

PAG20REN

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

D'ABORD

PUIS

ENFIN

2 J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Téléphone .....

Email : (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**

☐ **Carte bancaire**

N° ....

Date d'expiration ..... Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

* 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 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.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

Anticiper les effets secondaires des nouvelles techniques de radiothérapie

CONTEXTE

> La mortalité liée au cancer diminue régulièrement en France grâce à des diagnostics plus précoces et des traitements plus efficaces. Aujourd'hui, environ 200 000 patients sont traités chaque année par radiothérapie, l'un des outils incontournables pour soigner cette maladie. Mais les risques de séquelles induits par ce traitement, en particulier par les techniques et pratiques les plus récentes, restent mal connus. Or avec un nombre croissant de guérisons, réduire ces risques devient un enjeu de santé public de plus en plus important. Pour comprendre et anticiper ces effets secondaires l'IRSN a développé un programme de recherche préclinique sur la souris.

Cahier partenaire réalisé avec
IRSN
www.irsn.fr

En quelques années, les technologies de radiothérapie ont fait d'énormes avancées : elles ciblent plus précisément les tumeurs. Mais quels sont les effets à long terme de ces nouvelles techniques d'irradiation sur les tissus sains ? De nouvelles études en radiothérapie stéréotaxique, un des outils très prometteurs notamment pour traiter le cancer du poumon, donnent un premier éclairage sur l'apparition des lésions induites par le traitement.

Selon l'Institut national du cancer (INCa), près de 50 % des personnes atteintes de cancer sont traitées par radiothérapie, technique qui utilise les rayonnements ionisants pour détruire les cellules cancéreuses. Il s'agit essentiellement de radiothérapie dite « externe », c'est-à-dire que l'appareil qui délivre la dose de rayonnement est situé à distance du patient. Il vise la tumeur de la manière la plus précise possible pour épargner au mieux les cellules saines avoisinantes. Suivant la tumeur et l'organe touché, au cours de l'ensemble d'un traitement, des doses comprises entre 20 et 80 grays (Gy) sont ainsi administrées à travers la peau. En bloquant la capacité à survivre ou à se diviser des cellules cancéreuses, l'irradiation permet d'éradiquer la tumeur.

Malheureusement, et c'est la principale limite de cette approche, les tissus sains de la zone irradiée sont aussi endommagés, ce qui provoque des effets indésirables tels que la fatigue, des irritations de la peau ou des muqueuses situées dans cette zone. Mais les cellules des tissus sains se réparent mieux que les cellules tumorales. L'efficacité de la radiothérapie repose donc sur cette différence de réponse entre tissu sain et tumeur ainsi que sur la capacité à cibler cette dernière. Et tout protocole radiothérapeutique est guidé par le rapport entre le bénéfice que procure le traitement et le risque qu'il fait courir au patient.

Ces dernières années, des avancées technologiques majeures, avec des outils de plus en plus complexes (scanner intégré, micro-collimateurs de particules) ont permis à la fois d'administrer des doses plus fortes par fraction et de mieux cibler la tumeur. Mais ces développements rapides et leurs applications cliniques précèdent les connaissances fondamentales en radiobiologie : « *On manque crucialement de données sur la réponse des petits volumes de tissus sains irradiés à forte dose* », explique Fabien Milliat, responsable du Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales à l'IRSN. >

> Pour lui, le meilleur exemple d'un tel outil très performant et prometteur dont il faut comprendre les effets secondaires est la radiothérapie stéréotaxique.

Cette technique de radiothérapie, guidée par l'image de haute précision, adapte la dose de rayonnements à la tumeur et la délivre en tournant autour du malade. Fondée sur un ciblage très précis et en trois dimensions de la tumeur à l'aide de minifaisceaux de rayons X convergents, elle permet d'irradier un très petit volume, de quelques millimètres cubes (voir encadré). Ces petits faisceaux permettent aussi d'augmenter les doses : la dose délivrée en une seule séance peut ainsi atteindre 20 Gy alors qu'elle est seulement de 2 Gy en radiothérapie classique. Un traitement de 60 Gy habituellement réalisé en 30 séances est réalisé en 3 fois ! Un avantage considérable pour les patients et tout le système de santé.

Au départ, la radiothérapie stéréotaxique était indiquée pour les tumeurs cérébrales. Aujourd'hui, elle est proposée aux patients atteints du cancer du poumon le plus fréquent, dit « non à petites cellules », qui sont inopérables ou à ceux qui refusent l'intervention chirurgicale. Pour l'instant, c'est donc seulement une alternative à la chirurgie, qui reste le standard thérapeutique. Mais Fabien Milliat note une constante augmentation de l'utilisation de ce traitement depuis cinq ans et en anticipe une généralisation.

Il insiste également sur le fait que les patients ayant survécu à un cancer sont de plus en plus nombreux : « *On estime qu'il y aura en France environ 4 à 5 millions de survivants du cancer en 2022. C'est évidemment une bonne nouvelle, mais cela signifie aussi que les séquelles des traitements et plus précisément celles d'une radiothérapie et leur impact sur la qualité de vie après guérison devient une préoccupation de santé publique de plus en plus forte* ». Or malgré des volumes irradiés plus petits, les patients peuvent développer des effets délétères tardifs après radiothérapie stéréotaxique comme des pneumopathies et des fibroses* pulmonaires.

Il était donc impératif selon le radiobiologiste de développer un modèle expérimental « préclinique » pour comprendre comment ces lésions se développent. Autrement dit, étudier les effets de ce type d'irradiation *in vivo*, sur les tissus sains d'un petit animal comme la souris, qui développe des pathologies analogues à celles observées chez l'homme.

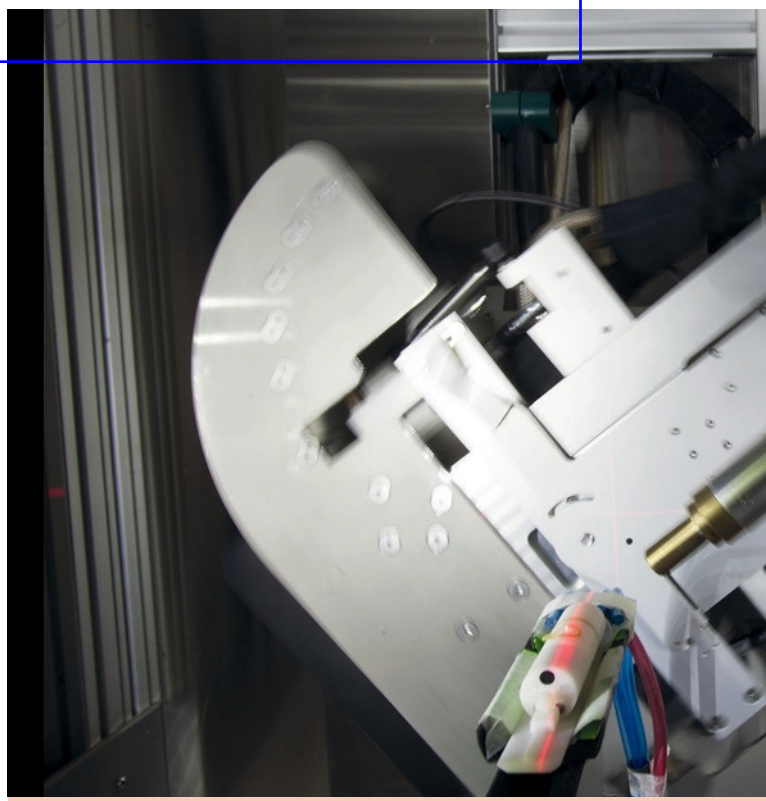
FORTE DOSE POUR PETIT VOLUME

Pour ce faire, en 2015, l'IRSN s'est doté d'un nouvel équipement très innovant, un SARRP (Small Animal Radiation Research Platform) (voir encadré). L'appareil combine un système d'imagerie scanner et une source de rayonnement X installés sur un bras qui tourne autour de la souris ainsi qu'un logiciel de planification de traitement. Il permet de scanner entièrement l'animal, d'analyser tous ses organes et, sur la base de ces images, de définir la dose à administrer et le volume précis à irradier. Grâce à ses collimateurs à champ variable, la taille de ce volume peut varier. « *On peut irradier un volume de 1 mm³ à un endroit spécifique du poumon de la souris, et comme on le fait en tournant autour de l'animal, l'irradiation est répartie sur la globalité de l'arc parcouru ce qui évite un effet focalisé sur un seul point d'entrée* », explique Morgane Dos Santos, physicienne et responsable de la plateforme. « *Cela permet de délivrer une dose très forte exactement dans ce volume, impossible sans cet équipement* », renchérit Fabien Milliat.

En développant cette expertise technologique sur ce modèle animal, l'équipe est parvenue à reproduire expérimentalement les conditions d'apparition des lésions induites par l'irradiation, les plus proches possible de celles observées chez l'homme. On peut ainsi cibler 4 % du volume pulmonaire de l'animal, ce qui est comparable à la proportion irradiée chez l'homme pour une tumeur pulmonaire non à petites cellules, en condition stéréotaxique.

Un premier axe de recherche a porté sur le rôle même de l'administration de ces fortes doses sur les tissus sains : à partir de quelles doses les lésions apparaissent-elles ? Est-ce lié à la manière (volume visé, fractionnement de l'irradiation) dont la dose est délivrée ? Autant de questions auxquelles ont cherché à répondre Agnès François et Annaïg Bertho en testant durant trois ans différentes configurations, prolongeant ainsi les travaux de Jérémy Lavigne. Leurs expériences *in vivo* révèlent une assez grande tolérance des tissus pulmonaires de la souris quand on irradie de très petits volumes. Par exemple, une dose de 90 Gy délivrée sur un volume sphérique de 1 millimètre de diamètre ne provoque pas de lésion. Alors que cette dose administrée avec un champ d'irradiation de 3x3 mm crée une lésion. Elles ont ainsi déterminé pour la première fois les conditions d'apparition de ces effets secondaires tardifs : elle montre que pour qu'une fibrose pulmonaire se développe suite à une irradiation en stéréotaxie chez la souris, il faut délivrer 60 Gy en une dose unique sur un volume d'au moins 3 mm x 3 mm². La fibrose apparaît alors six mois après l'irradiation. Une progression lente à l'échelle de la souris, assez semblable à celle observée en clinique chez les patients.

Forte de ce nouveau modèle expérimental (qui comprend les conditions d'irradiation spécifiques d'une souris par le SARRP et les données de références associées), unique en France, l'équipe du Laboratoire de radiobiologie des expositions médicales a pu aborder un deuxième type de questionnement fondamental pour guider les stratégies à mettre en œuvre afin de limiter ces effets : quels sont les mécanismes biologiques qui conduisent à la



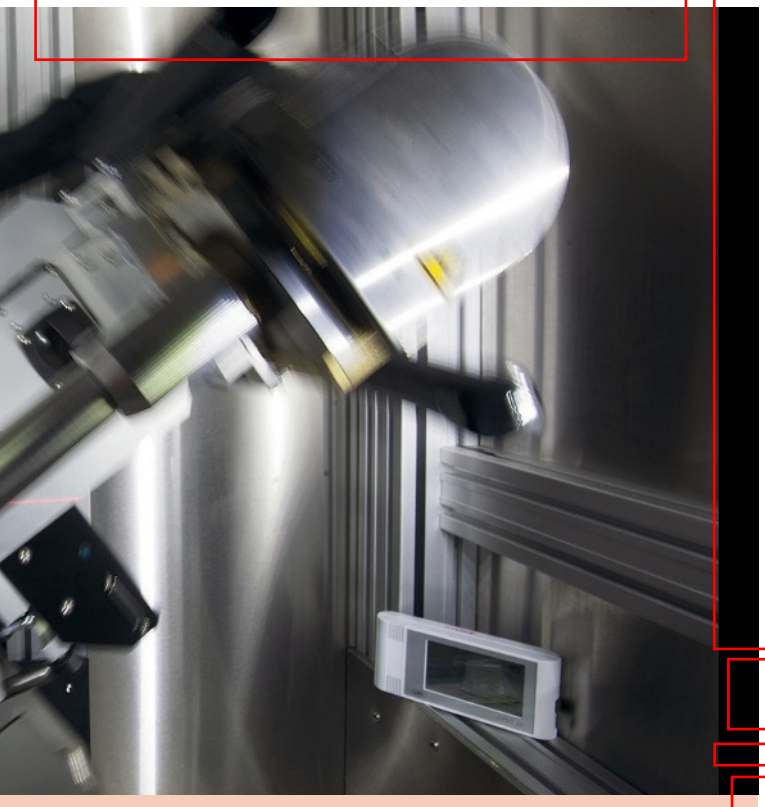
PLATEFORME DE RADIOTHÉRAPIE STÉRÉOTAXIQUE POUR SOURIS

Le SARRP (Small Animal Radiation Research Platform) est un « micro-irradiateur » guidé par l'image qui permet d'irradier un petit rongeur. Il utilise une source de rayonnements X montée sur un bras centré qui tourne à plus ou moins 180° et qui sert à la fois pour l'irradiation et l'imagerie. La cabine d'irradiation est équipée d'un scanner

formation des lésions et à la fibrose ? Quelles cellules sont impliquées dans l'apparition et la progression des lésions ?
Les expériences et les analyses histologiques conduites par Jérémy Lavigne et Frédéric Soysouvanh répondent à la deuxième question : ils démontrent que trois types de cellules contribuent à ces processus : des cellules épithéliales –cellules du tissu qui protège les alvéoles pulmonaires– des cellules endothéliales vasculaires, celles qui tapissent l'intérieur des vaisseaux sanguins, et des macrophages, les cellules du système immunitaire.

SENESCENCE CELLULAIRE

Mais par quels mécanismes y participent-elles ? Depuis quelques années, les scientifiques s'intéressent à l'un d'entre eux : la sénescence, cet état de vieillissement de la cellule, caractérisé par l'arrêt complet et irréversible de la division cellulaire. C'est un puissant mécanisme suppresseur de tumeurs, mais sa persistance peut devenir délétère pour les tissus environnants. Car, bien que les tissus ne se régénèrent plus, les cellules sénescentes peuvent provoquer la sécrétion de facteurs pro-inflammatoires et des réactions immunitaires qui pourraient contribuer à l'apparition tardive de lésions. La présence de sénescence avait déjà été observée au sein de lésions induites par irradiation sur des tissus sains, mais sans que l'on puisse établir qu'elle était à l'origine de la fibrose.
Pour explorer cette hypothèse, Frédéric Soysouvanh s'est intéressé plus particulièrement au rôle de la sénescence induite par le rayonnement sur les trois types de cellules qu'ils ont identifiées. Il a pour cela étudié des souris transgéniques qui permettent de détecter par bioluminescence les cellules sénescentes. Il a utilisé le modèle développé au sein du laboratoire sur la plateforme SARRP pour les soumettre à une irradiation stéréotaxique provoquant des lésions. Résultat, qu'il s'agisse d'une dose unique de 90 Gy ou d'une dose fractionnée en 5 fois 20 Gy, l'imagerie en bioluminescence révèle bien la présence de cellules sénescentes dans le volume pulmonaire irradié de 3 x 3 mm^2 et autour de la lésion. Par des analyses histologiques l'équipe a montré que la sénescence des trois types de cellules –épithéliales, endothéliales et macrophages– persiste jusqu'à 21 mois après l'irradiation. Mieux encore, ces analyses montrent que la quantité de cellules sénescentes augmente à mesure que la fibrose s'installe, suggérant un lien.
Ces avancées prometteuses, ainsi que d'autres résultats sur le système immunitaire obtenus par l'équipe, poussent le laboratoire à focaliser ses recherches sur le rôle particulier des macrophages. Plusieurs études précliniques ont décrit l'importance de ces cellules à la fois dans la réponse de la tumeur et dans celle des tissus sains qui suit une radiothérapie conventionnelle mais très peu de données sont disponibles après radiothérapie stéréotaxique. Ces premiers résultats indiquent donc que ces cellules immunitaires sont une piste de recherche intéressante et une cible potentielle pour de futures stratégies de limitation des effets secondaires des radiothérapies. Et plus globalement pour optimiser l'effet du traitement sur la tumeur (voir encadré « Impact sur la tumeur »). Toutes ces données acquises sur la souris ne sont évidemment pas directement transposables à l'homme. Mais ce sont des connaissances indispensables pour poser les jalons de ces stratégies thérapeutiques futures qui visent à la fois à limiter les lésions aux tissus sains et à augmenter l'efficacité anticancéreuse de la radiothérapie. ■



qui permet de réaliser des images de la souris avec une résolution de 200 µm et de cibler une structure anatomique particulière de l'animal avec une précision de 0,2 mm. Le traitement est planifié en temps réel en fonction de ces images grâce à un logiciel de planification de traitement intégré à l'appareil : l'instrument peut irradier l'endroit ciblé dans un volume de taille variable allant de 0,5 mm de diamètre (collimateur circulaire) à 10 mm x 10 mm² (collimateur à champ carré).

IMPACT SUR LA TUMEUR

Parallèlement à l'étude des effets de la radiothérapie stéréotaxique sur les tissus sains du poumon de la souris, l'IRSN étudie, grâce à l'approche préclinique développée chez la souris, l'impact sur les cellules tumorales pour augmenter l'efficacité de ce traitement. Avec l'équipe du Pr Éric Deutsch, radiothérapeute à Gustave Roussy, et celle d'Alexandre Boissonnas, immunologiste au Centre d'immunologie de la Pitié-Salpêtrière, il participe à un projet financé par l'INCa, focalisé sur le rôle de certaines cellules immunitaires (dont les macrophages) dans la réponse de la tumeur au traitement. Avec l'idée d'utiliser, le cas échéant, les stratégies de ciblage du système immunitaire contre les cellules tumorales.

NOTES

> La fibrose pulmonaire radio-induite est une accumulation excessive de matrice extracellulaire, notamment des collagènes qui envahissent la zone irradiée et impactent la capacité respiratoire.

RÉFÉRENCES

> https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/outils-scientifiques/installations-moyens-experimentaux/irradiateur-SARRP/Pages/irradiateur-SARRP.aspx

> Lung stereotactic arc therapy in mice: Development of radiation pneumopathy and influence of HIF- 1alpha endothelial deletion. Lavigne J. et al. Int J Radiat Oncol Biol Phys, vol 104, p 279-290, 2019

> Stereotactic Lung Irradiation in Mice Promotes Long-Term Senescence and Lung Injury , Int Radiat Oncol Biol Phys, Soysouvanh F. et al. Vol. 106, p. 1017-1027, 2020

> Preclinical Model of Stereotactic Ablative Lung Irradiation Using Arc Delivery in the Mouse: Effect of Beam Size Changes and Dose Effect at Constant Collimation, Bertho A. et al., Int J Radiation Oncol Biol Phys, Vol. 107, pp. 548-562, 2020

L'étonnant succès évolutif des chênes

Andrew Hipp, Paul Manos et Jeannine Cavender-Bares

Les quelque 435 espèces de chênes dominent dans les forêts de tout l'hémisphère Nord. Comment ces arbres se sont-ils imposés et diversifiés à ce point ? Plusieurs équipes de recherche tentent de le comprendre en reconstituant l'histoire de leurs migrations – une épopée de près de 60 millions d'années.

En Caroline du Sud, sur l'île de Johns, *Angel Oak* est un vénérable chêne âgé de 400 à 500 ans, de l'espèce *Quercus virginiana* (appelée aux États-Unis *southern live oak*).

L'ESSENTIEL

> Les chênes forment un groupe d'espèces ligneuses très diversifiées, largement répandues dans l'hémisphère Nord, et d'importance écologique majeure.

> Les progrès récents de la génomique ont permis de reconstituer leur histoire évolutive et celle de leur diffusion.

> Ces recherches peuvent nous aider à gérer les forêts de chênes afin d'assurer leur maintien face au réchauffement climatique.

LES AUTEURS

ANDREW HIPP
responsable de l'herbier au Morton Arboretum à Lisle, aux États-Unis

PAUL MANOS
professeur au département de biologie de l'université Duke, aux États-Unis

JEANNINE CAVENDER-BARES
professeuse à la faculté de sciences biologiques de l'université du Minnesota, aux États-Unis

Pour ceux qui connaissent les forêts nord-américaines, imaginez qu'on vous y dépose il y a 56 millions d'années. Vous n'auriez pas reconnu le paysage, quel que soit l'endroit où vous auriez été téléporté. À l'époque, à l'aube de l'Éocène, la Terre était plus chaude et plus humide qu'aujourd'hui. Une mer venait tout juste de se refermer au milieu des Grandes Plaines, cette zone aujourd'hui semi-aride qui traverse toute l'Amérique du Nord au centre du continent, du Canada (province du Saskatchewan) jusqu'au Texas au sud. Quant à la grande chaîne des montagnes Rocheuses, qui s'étend sur tout l'ouest du continent du nord au sud, elle n'avait pas encore atteint sa hauteur actuelle.

Les communautés végétales et animales étaient radicalement différentes. Dans le Haut-Arctique canadien (à l'extrême nord du continent américain), au lieu de la toundra actuelle au maigre couvert végétal, s'épanouissait une flore riche et variée grâce au maintien de températures positives toute l'année ; l'île d'Ellesmere, à l'extrême nord du Canada, en face de la côte nord-ouest du Groenland, abritait des alligators et des tortues géantes.

À quoi ressemblaient les forêts à cette époque? À une forêt tropicale humide appréciée des primates dans ce qui est le sud-est actuel des États-Unis, alors que des forêts de feuillus recouvraient le nord-est: certaines espèces à feuillage caduc (qui tombe) telles que des ginkgos, des viornes, des bouleaux ou des ormes, d'autres aux larges feuilles persistantes. Les arbres à feuillage caduc, qui couvrent aujourd'hui 11% des forêts allant du Mexique à l'Amérique du Nord, étaient encore peu nombreux. Mais ces paysages allaient radicalement changer avec la propagation et l'extraordinaire diversification d'un groupe d'espèces ligneuses d'importance écologique et économique majeure: les chênes.

Au cours de ces 56 millions d'années, les chênes, qui appartiennent tous au genre *Quercus*, sont passés d'une population unique, indifférenciée, aux quelque 435 espèces que l'on trouve aujourd'hui dans l'hémisphère Nord sur les cinq continents, du Canada à la Colombie, de la Norvège à Bornéo. Ce sont des espèces clés des écosystèmes de cet hémisphère. Elles hébergent une grande biodiversité, des champignons aux guêpes, en passant par les oiseaux et les mammifères. Comme toutes les plantes, elles contribuent à rendre notre air respirable en séquestrant le dioxyde de carbone et en absorbant les polluants atmosphériques. Au cours des siècles, les sociétés humaines se sont nourries de leurs glands, ont utilisé leur bois pour construire habitations, meubles et bateaux. Les chênes figurent même en bonne place dans de nombreux mythes et légendes.

Quercus est le genre ligneux dominant des forêts de l'hémisphère Nord, du continent nord-américain tout comme de l'Amérique centrale, de l'Europe et de l'Asie. L'Amérique héberge environ 60% des nombreuses espèces actuelles de chênes. En Amérique du Nord et au Mexique, cela représente aujourd'hui plus de biomasse forestière que toutes les autres plantes ligneuses.

Comment en est-on arrivé là? Remonter la longue histoire de l'évolution des chênes permet d'appréhender nos forêts actuelles, leur biodiversité et leurs réseaux trophiques. Pendant des décennies, il était impossible de la reconstituer. Les scientifiques ne pouvaient que spéculer, car les restes fossiles étaient lacunaires et les techniques biomoléculaires, qui permettent de déduire des événements de l'évolution des organismes vivants à partir de leur ADN, n'étaient pas assez performantes.

Les progrès récents dans le séquençage et l'analyse du génome nous ont permis, avec l'aide d'autres chercheurs, de reconstituer une image détaillée de l'origine, de la diversification et de la diffusion des chênes. Comme nous allons le voir, il s'agit d'une remarquable réussite évolutive. Les résultats de ces recherches devraient également nous aider à prévoir comment ces arbres essentiels réagiront au changement climatique et à élaborer des plans de gestion pour assurer leur survie.

Page précédente: © Dawna Moore / Alamy

Les différences entre les grands groupes de chênes sont évidentes, même pour un observateur néophyte. Sur le continent américain, les chênes sont dominés par deux grandes lignées sur les huit qui existent aujourd'hui dans le monde : les chênes rouges (*red oaks* en anglais, qui forment ce qu'on appelle la section *Lobatae*) et les chênes blancs (*white oaks*, qui forment la section *Quercus*).

Les chênes rouges ont des feuilles dont les lobes ont des extrémités pointues, alors que celles-ci sont arrondies chez les chênes blancs (et les feuilles des chênes blancs contiennent plus de nutriments et enrichissent ainsi davantage les sols). Leur reproduction se distingue aussi. Le pollen transporté par le vent sur les fleurs femelles ne féconde l'ovule que l'année suivante pour donner naissance à des fruits matures – les glands –, alors que les glands des chênes blancs sont issus de fécondation qui s'est produite l'année même de la pollinisation. Il arrive même que les glands de chênes blancs germent avant de tomber. Les écureuils gris ne s'y trompent pas : ils cachent de préférence les glands de chênes rouges, car ils se conservent mieux que ceux de chênes blancs.

Parmi les autres différences notables, les chênes blancs parviennent mieux que les rouges à faire barrière à la propagation de maladies fongiques telles que le flétrissement du chêne. Due au champignon *Ceratocystis fagacearum*, dont les filaments (le mycélium) se propagent dans les vaisseaux par lesquels circule la sève, cette maladie entraîne la défoliation de l'arbre puis sa mort. Les chênes blancs sont capables d'obstruer efficacement les vaisseaux infectés en produisant des excroissances de cellules qu'on appelle des « thylles ». Ce n'est pas le cas des chênes rouges, qui sont donc beaucoup plus sensibles à cette maladie. Leur bois reste d'ailleurs poreux. C'est aussi la raison pour laquelle les chênes blancs sont utilisés en tonnellerie ou pour la construction des navires, et non les chênes rouges.

Les insectes défoliateurs font d'ailleurs très bien la différence entre ces bois et la plupart ont une préférence pour les uns ou les autres. Même les champignons mycorhiziens, qui permettent aux racines des arbres de profiter des nutriments du sol, semblent distinguer les chênes rouges des blancs et la plupart favorisent des relations symbiotiques spécifiques.

VARIATIONS GÉNÉTIQUES ET HYBRIDATION

Au-delà de ces deux grandes lignées, les espèces de chênes étroitement apparentées sont particulièrement difficiles à distinguer. Les variations au sein d'une même espèce, conséquences de l'évolution des arbres, des variations génétiques entre individus et des réponses au milieu, sont souvent aussi importantes que celles entre espèces. Sans compter que les chênes s'hybrident souvent entre eux, que ce soit au sein des lignées de chênes blancs ou rouges ou de chacune des six autres grandes lignées. Ces deux facteurs – la variabilité génétique au sein d'une espèce et l'hybridation – compliquent beaucoup la classification des chênes.

Cette hybridation rend également délicate la reconstitution de l'histoire évolutive des chênes, quand les analyses moléculaires classiques ne reposent que sur le séquençage d'un nombre limité de gènes. Car les données issues de gènes individuels retracent souvent des histoires différentes. Par ailleurs, une même espèce peut s'être hybridée avec de nombreuses autres espèces au cours de son passé, de sorte que l'analyse génétique sur différents gènes pris individuellement révèle parfois différentes histoires sur une même aire de répartition géographique. Ainsi, le génome du chêne est une véritable mosaïque façonnée tant par la spéciation que par l'hybridation. Se fonder sur le séquençage d'un seul ou de quelques gènes ne suffit pas pour reconstituer toute l'histoire.

Heureusement, les techniques ont évolué. Il y a deux décennies, nous ne pouvions mener nos recherches qu'à partir de séquences d'ADN de chloroplastes – les structures intracellulaires qui captent la lumière et assurent la photosynthèse – et de quelques gènes nucléaires (c'est-à-dire du noyau cellulaire). Cela suffisait pour discerner les principaux rameaux de l'arbre phylogénétique des différentes espèces de chênes. Mais pas pour atteindre les dernières branches, correspondant aux espèces actuelles.

En 2008, nous nous sommes rendu compte que les nouvelles techniques moléculaires que nous utilisions pour étudier l'hybridation et les différentes espèces de chênes rouges pouvaient également nous servir à retracer l'histoire évolutive des chênes. Depuis, en collaboration avec des collègues du monde entier, nous utilisons cette approche nommée RAD-seq ou « séquençage ciblé de régions génomiques adjacentes à des sites de restriction » : elle permet de lire de courtes séquences d'ADN très largement réparties dans l'ensemble du génome. Nous analysons ces données à l'aide de méthodes statistiques afin de reconstituer l'ordre dans lequel les espèces se sont ramifiées à partir d'ancêtres communs et celles qui se sont hybridées ensuite. En associant ces analyses aux données provenant des fossiles, nous sommes en mesure de remonter aux événements clés de l'évolution des chênes. Ainsi, malgré leur histoire génétique particulièrement complexe, nous avons pu déduire une grande partie de la spéciation des chênes et remonter jusqu'aux origines. Qu'avons-nous découvert ?

Nous ne saurons probablement jamais exactement quand et où les tout premiers >

Les feuilles des « chênes rouges » (ici une feuille – verte – de *Quercus rubra*) présentent des lobes dont les extrémités sont pointues ; celles des « chênes blancs » (ici une feuille de *Quercus alba* en couleur automnale) ont des extrémités de lobes de forme arrondie.

© John Seiler / Getty Images (en haut) ; Arterra/Universal Images Group via Getty Images (en bas)

LA LONGUE MARCHE DES CHÊNES

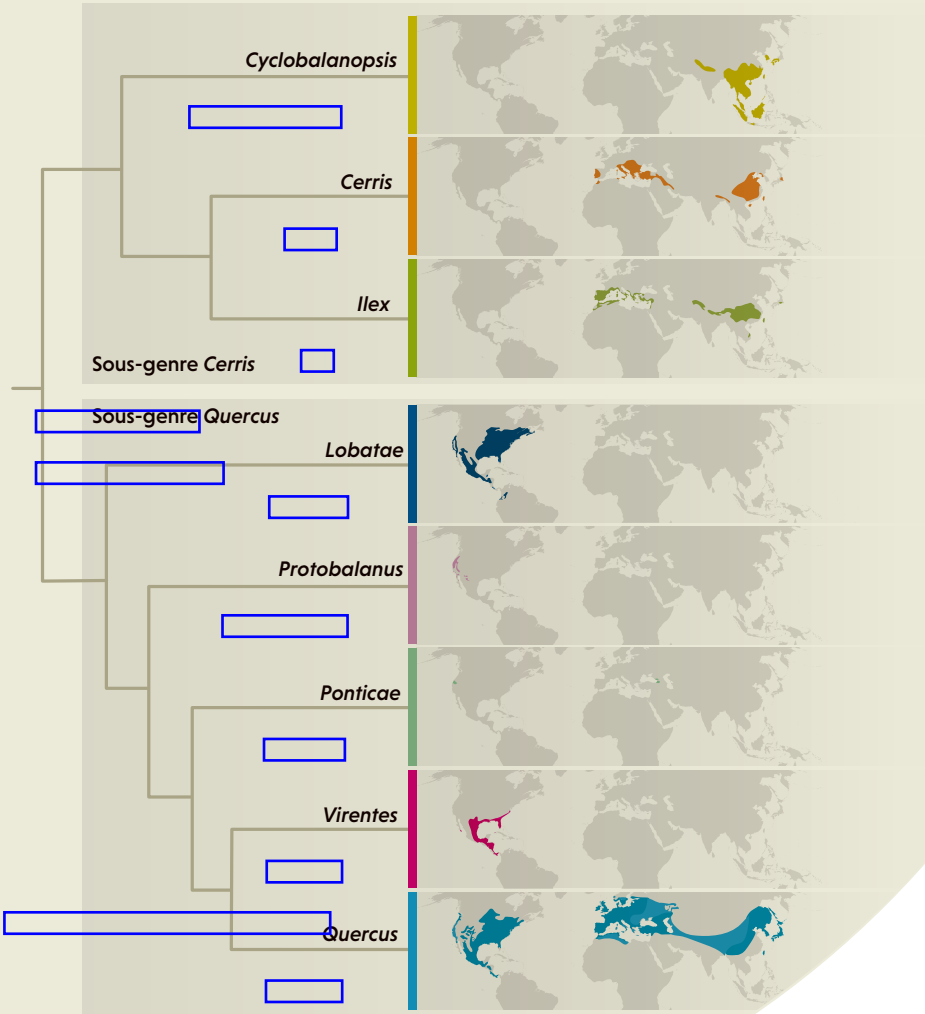
En quelque 56 millions d'années, 435 espèces de chênes sont apparues. Globalement, elles sont aujourd'hui présentes sur les cinq continents. En étudiant leurs génomes, des chercheurs ont pu reconstituer l'histoire évolutive de ces arbres. On comprend mieux d'où vient leur formidable diversité, en particulier sur le continent américain qui héberge environ 60 % des espèces

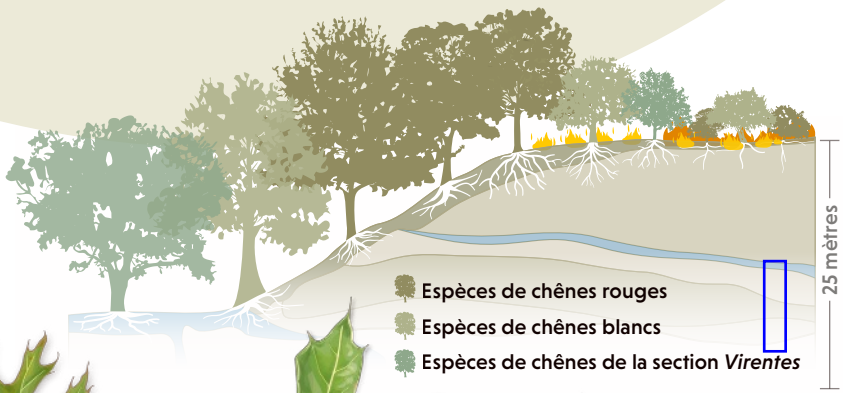
LA CLASSIFICATION DES CHÊNES

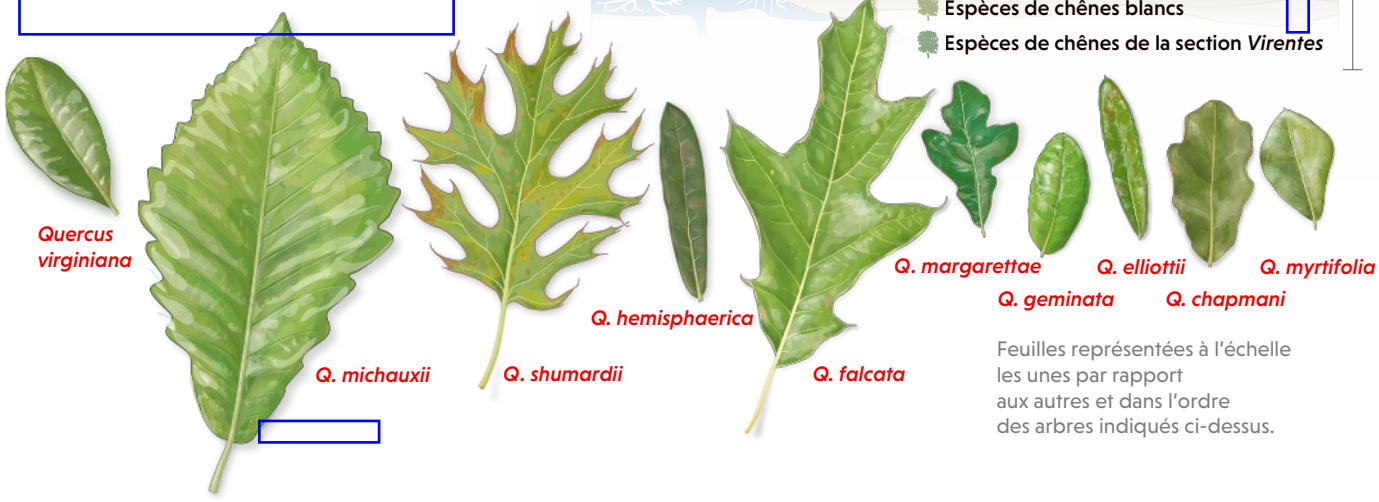
Toutes les espèces actuelles de chênes font partie du genre *Quercus*. Celui-ci comprend huit grandes lignées, qu'on appelle des « sections », dont deux se sont particulièrement répandues sur le continent américain : la section *Lobatae* (qu'on qualifie en général de chênes rouges) et la section *Quercus* (ou chênes blancs).

DIVERSITÉ AU SEIN DES COMMUNAUTÉS

Chênes rouges et chênes blancs poussent souvent ensemble dans les mêmes milieux en Amérique du Nord et centrale. Ces deux grandes lignées ont colonisé les mêmes zones et ont profité indépendamment des mêmes conditions écologiques. Par exemple, dans les basses terres de Floride, différentes espèces de chênes blancs se sont installées dans des milieux karstiques de sable, de broussailles et de ravins, milieux secs où les incendies sont fréquents. Deux autres communautés de chênes s'y sont également installées : des chênes rouges et des membres d'une troisième lignée, *Virentes* (qui ont un feuillage persistant).



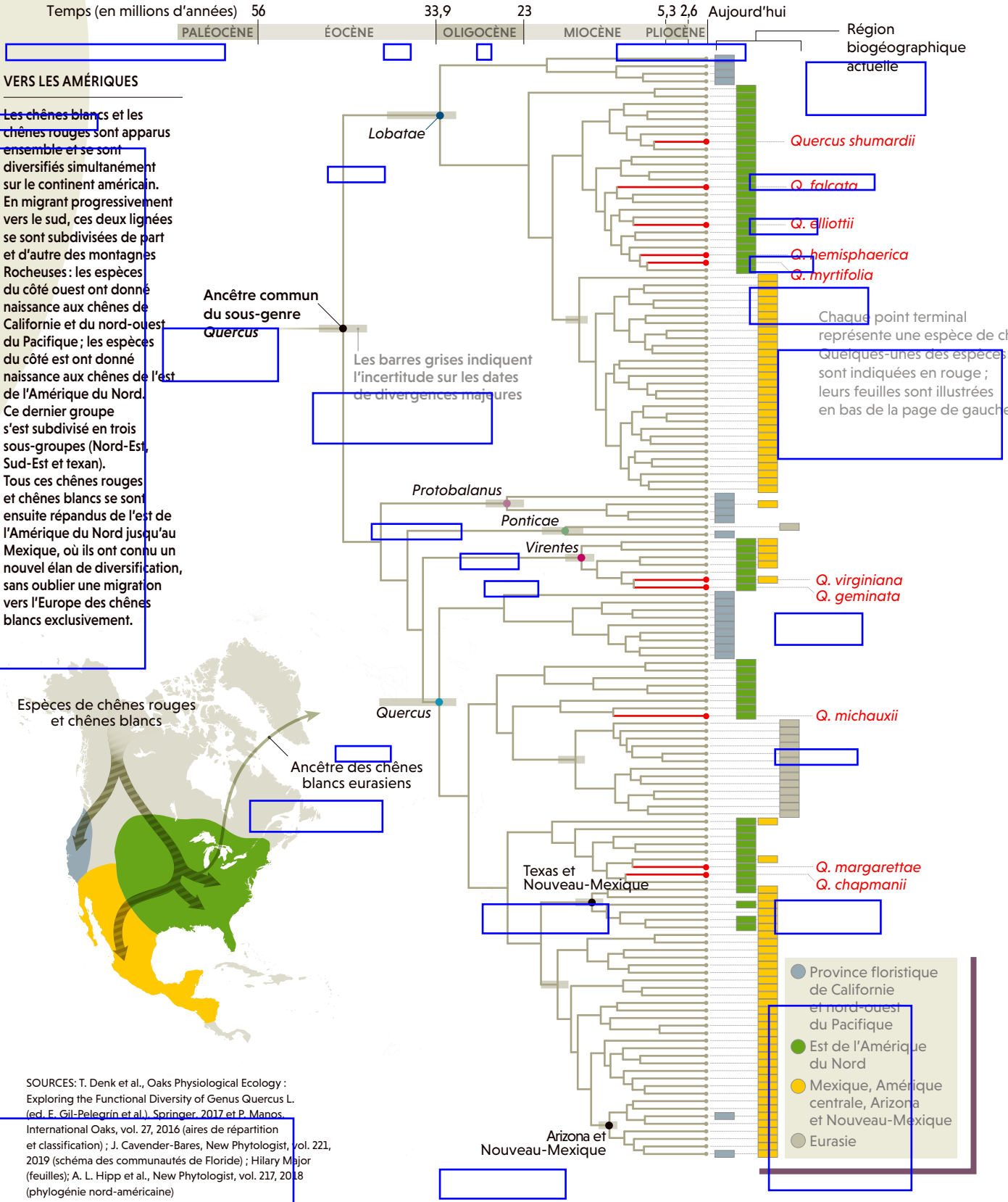




Feuilles représentées à l'échelle les unes par rapport aux autres et dans l'ordre des arbres indiqués ci-dessus.

VERS LES AMÉRIQUES

Les chênes blancs et les chênes rouges sont apparus ensemble et se sont diversifiés simultanément sur le continent américain. En migrant progressivement vers le sud, ces deux lignées se sont subdivisées de part et d'autre des montagnes Rocheuses : les espèces du côté ouest ont donné naissance aux chênes de Californie et du nord-ouest du Pacifique ; les espèces du côté est ont donné naissance aux chênes de l'est de l'Amérique du Nord. Ce dernier groupe s'est subdivisé en trois sous-groupes (Nord-Est, Sud-Est et texan). Tous ces chênes rouges et chênes blancs se sont ensuite répandus de l'est de l'Amérique du Nord jusqu'au Mexique, où ils ont connu un nouvel élan de diversification, sans oublier une migration vers l'Europe des chênes blancs exclusivement.



SOURCES: T. Denk et al., Oaks Physiological Ecology : Exploring the Functional Diversity of Genus Quercus L. (ed. E. Gil-Pelegrín et al.). Springer, 2017 et P. Manos, International Oaks, vol. 27, 2016 (aires de répartition et classification) ; J. Cavender-Bares, New Phytologist, vol. 221, 2019 (schéma des communautés de Floride) ; Hilary Major (feuilles); A. L. Hipp et al., New Phytologist, vol. 217, 2018 (phylogénie nord-américaine)

© Daisy Chung (illustrations), Mapping Specialists (cartes)

chênes sont apparus. En revanche, on a retrouvé dans des boues, près de Salzbourg, en Autriche, un peu de l'énorme quantité de pollen produite chaque printemps par une population de chênes. C'était il y a environ 56 millions d'années. Ces grains de pollen sont les plus anciens témoignages fossiles non équivoques de chênes qui aient été répertoriés. Ils ont la forme d'un ballon de rugby avec trois rainures dans le sens de la longueur; leur texture varie selon la lignée.

UNE LONGUE MARCHE VERS LE SUD

Rappelons qu'au début de l'Éocène, l'Amérique du Nord et l'Eurasie étaient reliées par des terres qui enjambaient les océans Atlantique et Pacifique tels que nous les connaissons aujourd'hui. Les plantes et les animaux évoluaient donc librement entre ces deux continents par ces connexions terrestres. Ainsi, les chênes constituaient très probablement une vaste forêt s'étendant sur les continents d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie. On ne peut donc pas affirmer que les tout premiers chênes sont originaires d'Eurasie et se sont déployés vers l'Amérique, ou l'inverse. La seule chose dont nous soyons à peu près sûrs est que les chênes viennent du «Nord».

On sait que, très peu de temps après leur apparition sur Terre, les chênes ont commencé à se séparer en deux grandes branches: le sous-genre *Cerris* que l'on retrouve aujourd'hui uniquement en Europe, Asie et Afrique du Nord, et le sous-genre *Quercus* présent essentiellement sur le continent américain mais aussi en Eurasie. Mais, au début, la séparation entre les continents n'était pas franche et des échanges restaient possibles. Ainsi, le plus ancien fossile attribué au chêne à anneaux (de la section *Cyclobalanopsis* du sous-genre *Cerris*, *voir l'encadré pages 46-47*), ainsi nommé à cause des anneaux concentriques d'écailles sur la cupule de son gland, a été identifié dans l'Oregon et date d'environ 48 millions d'années, alors que cette lignée n'existe aujourd'hui qu'en Asie du Sud-Est. À l'inverse, on a trouvé en Europe des fossiles de chênes rouges datant d'environ 35 millions d'années, alors que cette lignée est aujourd'hui spécifiquement américaine.

Une chose est sûre: lorsque les températures ont commencé à baisser, il y a environ 52 millions d'années, les chênes ont progressivement disparu au nord et se sont déplacés vers le sud tant en Eurasie qu'en Amérique du Nord. La séparation entre les deux continents était alors devenue plus nette. Aucune espèce de la branche eurasienne n'a ensuite été observée sur le continent américain et seules deux sous-branches de la branche américaine ont été identifiées en Eurasie.

Avant de s'être acclimatés plus au sud, les chênes s'étaient subdivisés en huit grandes lignées, celles que nous connaissons aujourd'hui de par le monde. Trois d'entre elles n'existent que sur le continent américain et ont donné naissance aux chênes rouges (les arbres de la section *Lobatae*), aux chênes dits «dorés» ou «intermédiaires» (de la section *Protobalanus*) et aux chênes à feuillage persistant du Sud (de la section *Virentes*). Une lignée, celle des chênes blancs (de la section *Quercus*), originaire du continent américain, a fait un retour en Eurasie.

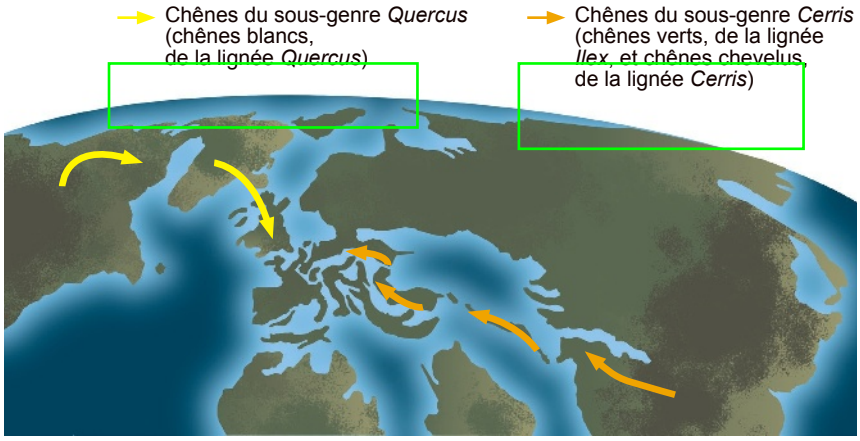
On peut affirmer que ces huit grandes lignées sont apparues tôt dans l'évolution des chênes, car l'un des plus anciens fossiles de chêne américain est un chêne blanc de 45 millions d'années provenant de l'île Axel Heiberg, au Nunavut, au Canada. On peut le distinguer des chênes rouges et de toutes les autres grandes lignées de chênes. Mais nous avons du mal à attribuer avec certitude les plus anciens fossiles à telle ou telle grande lignée. C'est en nous appuyant sur des données moléculaires que nous parvenons à estimer quand sont apparues des lignées indépendantes. Grâce à ces données moléculaires et aux fossiles sélectionnés, nous avons pu estimer que les huit grandes lignées mondiales de chênes sont apparues très tôt. Cela nous a permis de comprendre ce qui s'est passé ensuite lorsque les chênes d'Amérique du Nord ont connu leurs propres ramifications.

En même temps que le climat mondial se refroidissait, celui de l'Amérique du Nord devenait plus saisonnier. Les montagnes Rocheuses continuaient à s'élever, créant une sorte d'écran aux pluies pour le versant sous le vent, qui a progressivement asséché les Grandes Plaines. Les forêts tropicales et les forêts de feuillus persistants d'Amérique du Nord étaient repoussées vers le sud, et ont disparu partiellement ou totalement de certaines régions il y a environ 40 millions d'années. Une véritable aubaine écologique dont les chênes ont vite profité. De nombreuses empreintes de pollen et de feuilles attestent de leur présence dans des fossiles nord-américains datant de 35 millions d'années. Ainsi, à partir du nord du Mexique, le paysage tropical prenait de plus en plus une allure de climat tempéré.

DES SITUATIONS ÉCOLOGIQUES MISES À PROFIT

En progressant vers le sud, les chênes rouges et les chênes blancs se sont ensuite scindés en deux lignées, l'une à l'ouest des montagnes Rocheuses, qui a donné naissance aux chênes actuels de Californie et du nord-ouest du Pacifique (sections *Lobatae*, *Quercus* et *Protobalanus*), l'autre sur le côté est dont sont issues les trois lignées de chênes de l'est de

L'HISTOIRE DES CHÊNES D'EUROPE



Sur cette carte montrant l'Eurasie et le nord de l'Amérique à l'Oligocène, il y a environ 30 millions d'années, sont indiquées les grandes voies de migration des chênes vers l'Europe (ces voies ne sont pas toutes contemporaines de cette époque précise).

Tout comme pour l'Amérique, les parties septentrionales de l'Europe et de l'Asie étaient couvertes d'une vaste forêt comprenant des chênes au début du Tertiaire (il y a environ 65 millions d'années), quand ces trois continents étaient connectés dans l'Atlantique nord par un pont terrestre reliant la Scandinavie au Groenland et au Canada. Cette forêt est à la base des deux sous-genres du genre *Quercus* *(voir l'encadré pages 46-47)*, le sous-genre *Quercus* qui s'est différencié en Amérique du Nord et le sous-genre *Cerris* qui s'est différencié en Eurasie. L'Europe est par la suite devenue le réceptacle des mouvements migratoires de ces deux sous-genres, d'où une double histoire pour les chênes européens.

La première histoire retrace la migration des chênes blancs (sous-genre *Quercus*) d'Amérique du Nord vers l'Europe *via* le pont terrestre nord-atlantique, qui s'est progressivement disloqué en un chapelet d'îles, mais qui a permis la migration des espèces jusqu'au Miocène *(voir la figure de l'encadré page 47 pour les périodes correspondant aux ères géologiques mentionnées ici)*.

Les fossiles de chênes blancs de cette époque, nombreux et largement répartis en Europe, en témoignent. La découverte de fossiles présentant des affinités avec les chênes rouges est plus rare et correspond à des populations préexistantes ne résultant sans doute pas de migrations d'Amérique du Nord. Pourquoi la différenciation parallèle chênes blancs/chênes rouges présente en Amérique du Nord ne s'est pas reproduite en Europe reste un mystère. Quoi qu'il en soit, ce sont les chênes blancs qui se sont diversifiés en Europe durant le Miocène, aboutissant aux espèces que nous reconnaissons aujourd'hui.

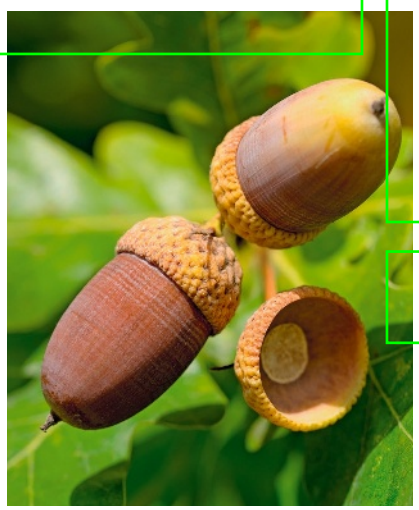
La seconde histoire est celle des chênes appartenant au sous-genre *Cerris*, et qui ont colonisé l'Europe à partir de l'Asie de l'Est. Là encore, ce sont les changements orogéniques (c'est-à-dire des reliefs) qui permettent de comprendre les voies migratoires suivies. Les premières présences de chênes asiatiques montrant des affinités avec les chênes des groupes actuels *Cerris* et *Ilex* remontent au début de l'Oligocène, quand le bassin méditerranéen et l'Asie Mineure étaient couverts par la mer Paratéthys. Les études paléontologiques et phylogénétiques suggèrent que les chênes verts ont emprunté un corridor constitué de forêts humides maintenues sur les marges du massif himalayen. Ces migrations se sont poursuivies *via* les îles de la Paratéthys en Europe et en Afrique du Nord.

La migration d'Amérique du Nord vers l'Europe a duré jusqu'au Miocène

Les changements climatiques occasionnés par le retrait de la Paratéthys ainsi que les cycles glaciaires-interglaciaires devenus de plus en plus prononcés au début du Pliocène ont été accompagnés d'extinctions de chênes. Bien que l'ampleur de ces extinctions reste mal connue, elle a conduit aux différences actuelles du nombre d'espèces de chênes en Europe, en comparaison de l'Amérique du Nord et de l'Asie. Seule une trentaine d'espèces peuplent aujourd'hui l'Europe et l'Afrique du Nord, contre plus de 200 en Amérique du Nord et plus de 150 en Asie.

L'histoire européenne au cours du Pliocène est rythmée par les changements climatiques de grande ampleur dus à l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires. Ces changements se sont accompagnés de mouvements migratoires récurrents depuis les zones demeurées suffisamment clémentes au cours des périodes froides (péninsules Ibérique, italienne, balkanique, Turquie) vers l'Europe centrale et septentrionale rendues accessibles en périodes chaudes.

Les analyses génétiques à partir d'ADN moderne et ancien, ainsi que l'exploitation des données sur les pollens fossiles, ont permis de retracer les dynamiques démographiques et les voies de migration empruntées par les chênes. Elles ont notamment mis en évidence que l'hybridation entre espèces a favorisé la dispersion, mais aussi l'adaptation, des arbres. Contrairement à l'Amérique du Nord, où la diversification entre espèces a contribué à l'expansion continentale des chênes, en Europe, ce sont les mécanismes évolutifs internes à l'espèce (dispersion, adaptation), stimulés en partie par l'hybridation, qui ont conduit à la répartition quasi générale d'un nombre limité d'espèces, et notamment du chêne sessile *(Q. petraea)* et du chêne pédonculé *(Q. robur)*.



Des glands de chêne pédonculé, espèce parmi les plus répandues en Europe.

ANTOINE KREMER
Directeur de recherches émérite au laboratoire Biogeco (Inrae et université de Bordeaux), à Cestas

© En haut : Charlotte Calament/Pour la Science, d'après carte paléogéographique de Deep Time Maps (https://deeptimemaps.com). En bas : © M. Schuppich / shutterstock.com

> l'Amérique du Nord (*Lobatae*, *Quercus* et *Virentes*). Cette dernière lignée s'est redifférenciée en trois ensembles reconnus aujourd'hui: celui du Nord-Est, du Sud-Est et un ensemble texan. Poursuivant leur longue « marche », chênes rouges et blancs de l'Est ont atteint le Mexique il y a 10 à 20 millions d'années, peut-être en passant par le Texas.

C'est la variété de milieux ouverts et d'aubaines écologiques dues à la disparition des palmiers et des feuillus persistants qui ont permis aux chênes de se diversifier. On qualifie cette diversification de radiation évolutive: une évolution rapide, à partir d'un ancêtre commun, d'un ensemble d'espèces caractérisées par une grande diversité écologique et morphologique. Ces nouvelles populations de chênes, écologiquement très différentes les unes des autres, se sont progressivement isolées sur le plan reproductif: les échanges de gènes se sont faits au sein de chaque population de chênes plutôt qu'entre les différentes populations, et les mutations génétiques ont ainsi progressivement formé de nouvelles espèces. Les conséquences de cette diversification sont particulièrement spectaculaires au Mexique et en Amérique centrale, puisqu'on y trouve environ 40% de toutes les espèces de chênes du monde.

Comment expliquer cette radiation évolutive au Mexique? Les chênes étant particulièrement adaptés au froid, en migrant vers le sud du Mexique, ils se sont installés plus en altitude dans les conditions écologiques qui leur convenaient le mieux, retrouvant en quelque sorte le milieu tempéré adapté à leur développement. On constate également que les espèces qui sont apparues dans les différentes régions du Mexique, à plus ou moins haute altitude, étaient capables de supporter des conditions plus ou moins sévères de sécheresse. De pair avec la séparation physique liée à l'altitude, cette différenciation écologique a très probablement aussi contribué à isoler les populations sur le plan de la reproduction. Rappelons par ailleurs que l'installation des chênes au Mexique étant relativement récente, on ne peut pas imputer leur grande diversité d'espèces à l'effet du temps.

Dès lors, si ce ne sont pas les températures locales plus élevées qui sont la cause de la grande diversité d'espèces de chênes présents au Mexique, mais une radiation évolutive notamment due à l'installation des chênes en altitude, pourquoi une telle diversité d'espèces n'est-elle pas apparue dans les montagnes Rocheuses? Les conditions y étaient probablement trop rudes, avec de courtes saisons végétatives et des hivers froids. On y trouve une seule espèce, un chêne blanc, le chêne de Gambel (*Quercus gambelii*), dans une zone limitée au sud des Rocheuses.

On ne sait pas exactement ce qui a finalement arrêté la progression des chênes vers le sud – peut-être une réduction trop importante de la saisonnalité ou une trop forte concurrence des espèces tropicales. Ces arbres sont néanmoins parvenus à traverser l'isthme de Panama pour atteindre le nord de l'Amérique du Sud. Mais ce n'est pas tout. Comme les chênes blancs et rouges s'étaient déjà séparés au moment où ils ont commencé à migrer vers le sud, l'histoire s'est en fait dédoublée. Elle s'est déroulée parallèlement, simultanément et aux mêmes endroits pour ces deux lignées, distinctes mais très proches.

Nous avons ainsi pu retracer l'histoire biogéographique que nous venons de décrire chez

Les chênes ont atteint le Mexique il y a 10 à 20 millions d'années, peut-être via le Texas

les chênes rouges comme chez les blancs: ces deux lignées se sont déplacées vers le sud, séparées autour des montagnes Rocheuses pour se diriger vers le Mexique à partir d'un ancêtre de l'est de l'Amérique du Nord. Cette double conquête du sud explique en partie tant la richesse en espèces que l'abondance des chênes sur le continent américain.

RELATIONS DE BON VOISINAGE

L'un des aspects les plus passionnants de nos recherches a été de pouvoir associer des analyses génomiques, qui permettent de comprendre l'arbre de parenté des chênes, à des études physiologiques qui lèvent le voile sur l'adaptation des espèces au climat et au milieu, ainsi qu'à des analyses de communautés d'espèces associées aux chênes.

Nous avons ainsi établi que, à mesure qu'ils se déployaient vers le sud et se diversifiaient, les chênes blancs et les chênes rouges ont rencontré des milieux similaires et s'y sont adaptés. Parallèlement et à plusieurs reprises, ils ont ainsi résolu les mêmes problèmes écologiques, et de façon inédite. On trouve ainsi souvent des chênes rouges et des chênes blancs poussant ensemble dans les mêmes milieux. Par exemple, sur les sols rocheux pauvres et les falaises de l'est des États-Unis, on trouve le chêne blanc *Quercus stellata*, ou chêne à poteaux, au bois dur et

Ce gland fossile, trouvé dans l'Oregon, date de l'Éocène (époque qui s'étend de 56 à 34 millions d'années avant le présent).

résistant. À proximité, on trouve le chêne rouge *Quercus marilandica*, ou chêne du Maryland, communément appelé chêne noir. Dans les montagnes du sud de l'Arizona, l'emblématique chêne blanc *Quercus arizonica* pousse souvent à côté du chêne rouge *Quercus emoryi*.

Cette cohabitation dans les formations forestières est présente dans la majeure partie du pays, mais avec une autre caractéristique intrigante : on trouve rarement ensemble des chênes étroitement apparentés dans la même lignée, alors que des espèces génétiquement plus éloignées ont tendance à pousser à proximité. C'est le cas par exemple dans les montagnes Chiricahua du sud de l'Arizona : différentes espèces de chênes blancs se succèdent sur des zones étendues en montant en altitude. Il en est de même pour les chênes rouges. Autre exemple : dans les basses terres de Floride, on trouve différentes espèces de chênes blancs et de chênes rouges à travers des milieux de sable, de broussailles et de ravins, façonnés par la topographie karstique et les incendies.

Comment expliquer cette coexistence entre espèces ? La différenciation écologique au sein des chênes rouges et blancs tient en partie au fait qu'aucune espèce n'est adaptée à tous les milieux. Au contraire, les espèces ont tendance à se spécialiser pour s'installer sur une zone limitée du milieu disponible. Autrement dit, chez les chênes, des compromis physiologiques apparaissent au sein de chaque lignée, ce qui subdivise en quelque sorte le milieu de telle façon que les espèces proches parentes ont moins de chance de cohabiter.

Par exemple, dans les montagnes Chiricahua, c'est la résistance à la sécheresse, plus ou moins forte en fonction de l'altitude, qui dicte l'abondance des différentes espèces. Au pied de ces monts, on trouve les espèces adaptées à la sécheresse, dont les feuilles tombent lors des saisons sèches. À plus haute altitude, là où l'humidité est plus importante, sont installées des espèces qui tolèrent bien les fluctuations quotidiennes de disponibilité en eau : leurs feuilles supportent sans dommage de plus faibles teneurs en eau.

En Floride, région au relief plutôt plat, ce sont d'autres phénomènes qui structurent les communautés de chênes : l'humidité du sol et l'intensité des feux qui y sévissent régulièrement. Certaines espèces présentent des compromis entre taux de croissance et tolérance à la sécheresse en fonction de l'humidité du sol. D'autres jouent sur l'épaisseur de l'écorce et la capacité à drageonner selon l'intensité des feux. Que ce soit en Floride, dans l'Arizona ou même ailleurs aux États-Unis, on retrouve de tels compromis tant chez les chênes rouges que chez les chênes blancs, et les arbres des deux lignées ayant des traits convergents tendent à cohabiter.

Chênes rouges et blancs ont même tendance à mieux coexister dans un milieu donné car ils ne sont pas sensibles aux mêmes maladies : cela limite les risques d'épidémie. On a même montré que les deux lignées de chênes peuvent faciliter réciproquement leur installation en créant un environnement pédologique favorable aux champignons mycorhiziens dont ils ont besoin pour acquérir les nutriments du sol. Ensuite, une fois la forêt établie, les chênes deviennent l'espèce dominante et empêchent les autres espèces de s'installer.

Nos travaux montrent clairement que l'histoire évolutive des chênes a façonné des interactions écologiques complexes qui permettent d'expliquer pourquoi ces arbres sont si abondants et les espèces si diversifiées en Amérique du Nord.

L'HYBRIDATION, MÉCANISME DE DIVERSIFICATION ET D'ADAPTATION

Après avoir retracé en détail l'histoire des ramifications de l'arbre « généalogique » des chênes, nous nous sommes intéressés à la propension de ces arbres à s'hybrider. On considère souvent que l'hybridation est réductrice, qu'elle estompe les différences génétiques entre espèces. L'histoire des chênes prouve le contraire : collectivement ils constituent ce que l'on appelle un « syngaméon », un ensemble d'espèces qui reste écologiquement et physiquement distinctes malgré un flux génétique continu entre elles.

On pense d'ailleurs que des gènes migrant entre les espèces du syngaméon du chêne pourraient aider celles-ci à s'adapter à de nouveaux environnements. Ainsi, les gènes du chêne à poteaux (*Quercus stellata*) facilitant l'adaptation à la sécheresse ne pourraient-ils pas contribuer, par hybridation naturelle, à améliorer l'adaptation du chêne à bogue (*Quercus* >

© Thomas J. Bones

> *macrocarpa*) dans la partie centrale du Sud-Est où les deux espèces coexistent et où le chêne à bogue est soumis aux contraintes du changement climatique?

Concrètement, nous savons qu'un certain flux génétique existe entre les différentes espèces de chênes et que les gènes échangés diffèrent selon les espèces, l'endroit où elles se trouvent, les espèces voisines, le climat et le milieu. Nous savons également qu'une fois que les gènes passent d'une espèce à l'autre, ils peuvent se transmettre au-delà de l'aire de répartition de l'espèce en question, apparemment sous l'effet des flux de gènes et de la sélection environnementale. Ces exemples suggèrent que les flux de gènes ont pu jouer un rôle adaptatif dans l'évolution des chênes. En associant des études génomiques et écologiques, nous commençons tout juste à élucider ces processus.

Il nous reste encore à comprendre quels gènes et quels paramètres – période de floraison, milieu, distance géographique – déterminent la spéciation des chênes. Ainsi qu'à déterminer si les caractéristiques écologiques des espèces évoluent lorsqu'elles se développent ensemble ou seulement séparément. Pour l'heure, nous sommes sur le point de comprendre quels sont les gènes qui façonnent la différenciation entre espèces.

Ainsi, des travaux récents sur les chênes européens, menés à l'unité Biogeco de Bordeaux par Antoine Kremer et ses collègues, pointent des gènes impliqués dans l'aptitude à se croiser et à s'adapter à des conditions écologiques particulières telles que la tolérance à la sécheresse, au froid ou aux maladies. Mais ces résultats indiquent seulement que ces différences d'adaptation écologique varient selon les espèces, et non qu'elles guident la différenciation.

La même équipe a simulé différents scénarios de spéciation par analyse statistique pour tenter d'expliquer les variations génomiques entre quatre espèces de chênes blancs répandus en Europe (chêne sessile, *Quercus petraea*; chêne pubescent, *Q. pubescens*; chêne tauzin, *Q. pyrenaica*; chêne pédonculé, *Q. robur*), qui s'hybrident aujourd'hui quand elles coexistent. Ces chercheurs montrent que ces variations génomiques sont apparues sur des espèces formées dans des zones géographiques différentes en Europe, les flux de gènes entre espèces intervenant dans un second temps lorsque celles-ci sont entrées en contact à la fin du dernier âge glaciaire, il y a 20000 ans. Ces données montrent que la «perméabilité» génétique a été maintenue malgré la longue séparation entre espèces, et que cette perméabilité (par hybridation avec le chêne pédonculé) a contribué à l'adaptation notamment du chêne sessile à des climats plus froids lors de sa migration vers le nord.

Et pour revenir au contexte américain, la coexistence de nombreuses espèces soulève la question de la contribution de l'hybridation à la grande diversité spécifique présente sur le nord du continent.

Comprendre quand, où et comment est apparue la diversité des chênes est fondamental pour prévoir comment ils peuvent résister et s'adapter aux transformations rapides de leur environnement. Les chênes ont rapidement recolonisé les terres à la suite du recul des glaciers continentaux il y a environ 20000 ans.

Dans sa migration, le chêne sessile a suivi le chêne pédonculé en s'hybridant avec lui

L'hybridation y a également contribué, comme l'ont montré les études sur le couple chêne pédonculé-chêne sessile en Europe: dans sa migration postglaciaire, le chêne sessile a «suivi» le chêne pédonculé en s'hybridant avec lui.

Les connaissances que nous pouvons acquérir sur les avantages conférés par les transferts génétiques en matière d'adaptation sont essentielles pour prédire la résistance des chênes au changement climatique. Ces arbres devront notamment faire face à des maladies fongiques et à des insectes nuisibles auxquels ils n'ont jamais été confrontés. D'autant plus qu'en raison de printemps précoces, les insectes qui transportent des champignons pathogènes voient leur aire de répartition s'élargir et leur mode de reproduction se modifier. Les chênes pourraient avoir bien du mal à résister s'ils ne sont pas en mesure de faire face à ces nouvelles maladies et d'évoluer aussi rapidement que le climat change.

Notre défi pour la prochaine décennie, en tant que spécialistes de la biodiversité végétale, sera de déterminer comment la différenciation des espèces et les transferts de gènes entre elles influeront sur l'évolution des populations de chênes et leur maintien. Si nous comprenons suffisamment bien ces processus, nous serons capables de prédire à quoi ressembleront nos forêts dans un siècle et au-delà. Nous espérons ainsi pouvoir guider la gestion forestière pour assurer la survie à long terme de ces arbres vitaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Kremer et A. L. Hipp, **Oaks : An evolutionary success story**, *New Phytologist*, vol. 226(4), pp. 987-1011, 2020.

T. Leroy *et al.*, **Massive postglacial gene flow between European white oaks uncovered genes underlying species barriers**, *New Phytologist*, vol. 226, pp. 1183-1197, 2020.

T. Leroy *et al.*, **Adaptive introgression as a driver of local adaptation to climate in European white oaks**, *New Phytologist*, vol. 226, pp. 1171-1182, 2020.

B. Fallon et J. Cavender-Bares, **Leaf-level trade-offs between drought avoidance and desiccation recovery drive elevation stratification in arid oaks**, *Ecosphere*, vol. 9(3), article e02149, 2018.

UN

NE MEURT JAMAIS.

EN TRIANT VOS JOURNAUX, MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES, PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS DURABLE. PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Voir naître des systèmes planétaires

Comment apparaît et évolue un système planétaire autour d'une étoile ? Des images en haute résolution de divers disques circumstellaires, ces amas de poussière en rotation qui subsistent autour des étoiles après leur formation, commencent à le montrer.

L'ESSENTIEL

> Le radiotélescope *Alma*, inauguré en 2011, a permis aux astronomes d'observer pour la première fois les détails au sein des disques de gaz et de poussière qui entourent les étoiles.

> Ces disques dits « circumstellaires » apprennent aux scientifiques comment les systèmes solaires lointains se sont formés et ont évolué, tandis que certaines structures telles que des voilures ou la présence de grumeaux indiquent parfois la présence de planètes.

> De nouveaux télescopes en projet devraient dans les prochaines années faire progresser l'étude des disques circumstellaires en permettant de photographier directement les planètes qui y gravitent.

L'AUTRICE

MEREDITH MACGREGOR
maîtresse de conférences à l'université du Colorado à Boulder, aux États-Unis

La semaine où j'entrais à l'école doctorale étaient publiés les premiers projets d'observation du tout nouveau radiotélescope millimétrique et submillimétrique à large base de l'Atacama, au Chili, nommé *Alma* (pour *Atacama large millimeter array*). Cet instrument révolutionnaire coordonne des dizaines d'antennes radio pour créer des images aussi détaillées que celles que produirait un unique télescope de 16 kilomètres de diamètre. Avec une telle résolution, *Alma* est capable d'observations plus profondes et détaillées, dans les longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques, que n'importe quel télescope antérieur.

J'ai aussitôt sauté sur l'occasion de me joindre à l'un des tout premiers projets, l'étude d'un disque de débris et de poussière autour d'une étoile proche nommée AU Mic. Avant *Alma*, aucun scientifique n'avait pu voir le disque que nous voulions observer avec autant de détail. Les débris et la poussière peuvent ne pas sembler un sujet très excitant. Ce sont pourtant les ingrédients dont sont faites les planètes, et cet observatoire nous donnait l'occasion de voir le processus de formation en action.

Il nous a fallu attendre encore un an pour recueillir les résultats. De nos jours, l'astronomie se pratique souvent à distance. On ne passe plus de longues nuits dans un observatoire au sommet d'une lointaine montagne. Tout ce que nous avions à faire était de fournir une séquence informatique expliquant au télescope ce qu'il devait observer, où et quand. Ensuite, nous avons attendu patiemment (ou plutôt impatiemment) que nos observations soient programmées dans la file d'attente puis effectuées. Je me souviens encore de la boule au ventre que j'avais en attendant le téléchargement des données, et de mon émerveillement lorsque l'image est apparue sur l'écran de mon ordinateur – une longue et fine forme lumineuse dotée de trois taches brillantes : une au centre et deux de part et d'autre, à chaque extrémité.

Ce que nous avions sous les yeux, c'était un système solaire en cours de maturation. La petite tache centrale n'était autre que l'étoile, dont nous savons aujourd'hui qu'elle est le siège d'éruptions qui expédient dans l'espace des flots de particules de haute énergie. Les deux autres petites taches marquaient les bords d'un disque de débris entourant l'étoile centrale et comparable à la ceinture de Kuiper, qui gravite autour de notre Soleil. Nous pensons que cette ceinture contient les « gravats » restés après que des planètes se sont formées autour d'AU Mic, une jeune étoile naine de type M distante d'environ 32 années-lumière.

D'autres scientifiques ont récemment découvert deux planètes dans ce système : l'une de masse comparable à celle de Jupiter et l'autre à celle de Saturne, toutes deux en orbite relativement près de leur étoile. Désormais, nous avons une occasion inédite d'étudier la façon dont le matériau du disque a évolué et interagi avec ces planètes récemment formées.

Depuis cette première image, les capacités d'*Alma* n'ont cessé de s'accroître tandis que le réseau a acquis de nouvelles antennes, une résolution plus élevée et que la gamme de longueurs d'onde auxquelles il opère s'est étendue. Dans le même temps, l'étude des disques circumstellaires et de la formation des planètes a littéralement explosé. *Alma* a obtenu des images de centaines de pouponnières planétaires. Cela nous a aidés à renouveler notre compréhension de leur formation et révélé au passage toute une flopée de nouvelles planètes extrasolaires que nous n'aurions jamais découvertes autrement.

EMBRYONS DE PLANÈTES

Les étoiles se forment à partir de vastes nébuleuses de gaz et de poussière nommées nuages moléculaires. La densité typique de l'espace vide n'est que d'environ un atome par centimètre cube, mais les zones les plus épaisses au sein des nuages moléculaires peuvent afficher >

Ces disques protoplanétaires dont les images ont été réalisées par le radiotélescope *Alma* ne sont autres que de jeunes systèmes solaires. Ces disques de gaz et de poussière en rotation sont les restes de la naissance d'une étoile et constituent le matériau de base pour la formation des planètes.

© ALMA (ESO, NAOJ et NRAO), S. Andrews et al. et N. Lira

> des densités 10000 à 1 million de fois supérieures à cette norme. Lorsque ces grumeaux ou «cœurs protostellaires» deviennent assez denses, ils commencent à s'effondrer sous leur propre gravité pour former des étoiles. Au cours du processus, l'effet conjugué de la rotation initiale du «cœur» en effondrement et de la conservation du moment cinétique engendre naturellement un disque, qualifié de «circumstellaire», autour de la nouvelle étoile.

Lorsque les étoiles sont encore très jeunes (quelques millions d'années seulement), leur disque circumstellaire est relativement imposant. Dans la plupart des systèmes, sa masse représente typiquement 1 à 10% de celle de l'étoile centrale. Dans le cas d'une étoile comme le Soleil, cela équivaut à un disque d'une masse de l'ordre de 100 fois celle de Jupiter. Ces jeunes et massifs «frisbees» sont dits «protoplanétaires», car on pense qu'ils sont le siège d'un intense processus de formation de planètes. Les roches, les métaux et les glaces se condensent au sein du disque pour former des germes planétaires.

En entrant en collision et en se collant les uns aux autres, ces germes grossissent, jusqu'à ce que leur gravité soit suffisante pour commencer à attirer à eux le matériau environnant, un mécanisme connu sous le nom d'accrétion. Ces jeunes protoplanètes sont en orbite à l'intérieur du disque et continuent, tels des Pac-Man cosmiques, d'accumuler de la matière et de créer ainsi des espaces annulaires vides. Pratiquement toutes les étoiles âgées de moins de quelques millions d'années sont entourées de tels disques, qui hébergent très probablement toute une ménagerie de nouveaux systèmes planétaires.

La phase protoplanétaire de l'évolution des disques dure plusieurs millions d'années. Après, l'essentiel du gaz et de la poussière du disque circumstellaire initial a été évacué. La façon exacte dont ce ménage est fait et les échelles de temps nécessaires font l'objet de recherches actives, mais on pense qu'une grande partie de la poussière du disque originel peut soit migrer vers l'intérieur avant de tomber sur l'étoile centrale, soit être soufflée vers l'extérieur par d'intenses vents stellaires.

Au bout d'environ 10 millions d'années, il ne subsiste plus qu'une étoile, arrivée à maturité, entourée d'un jeune système planétaire et d'un disque de petits corps – astéroïdes et comètes. La masse totale de ce matériau, vestige de la formation des planètes, est faible: probablement de l'ordre de 10% de la masse de la Terre. Bien qu'il puisse subsister assez de matière pour former en principe de petits mondes de type terrestre ou des corps semblables à Pluton, on peut se représenter ces débris comme des fossiles, témoins abandonnés de l'époque de la formation des planètes. La structure de ces disques est façonnée par les interactions des débris avec les planètes nouvellement formées, tandis que leur composition nous renseigne sur le matériau d'origine qui a servi à construire lesdites planètes.

Les astronomes ont observé ces disques pour la première fois après le lancement du satellite astronomique infrarouge *Iras* en 1983. Il s'agissait du premier télescope spatial conçu pour cartographier l'ensemble du ciel dans le domaine infrarouge (en l'occurrence à des longueurs d'onde comprises entre 12 et 100 micromètres). Lorsqu'*Iras* a cartographié le ciel infrarouge, les astronomes ont découvert que beaucoup d'étoiles étaient plus brillantes dans ce domaine qu'attendu. Pourquoi? Une réponse possible impliquait la présence de grandes quantités de poussière: si ces étoiles étaient entourées de disques de poussière, les grains en seraient chauffés par l'étoile et émettraient alors un rayonnement thermique dans le domaine infrarouge. Un nouveau domaine de recherche en a résulté. Pour tout dire, les quatre premiers disques de débris découverts grâce à *Iras* – Véga, Bêta Pictoris, Epsilon Eridani et Fomalhaut – sont toujours intensément étudiés aujourd'hui.

AU MOINS 20 À 25% DES ÉTOILES ONT UN DISQUE DE DÉBRIS

Jusqu'ici, l'instrumentation infrarouge utilisée pour repérer ces points chauds a permis aux astronomes de confirmer qu'au moins 20 à 25% des étoiles sont entourées d'un disque de débris. Mais étant donné ce que l'on croit savoir sur la formation des systèmes planétaires, on pourrait s'attendre à ce que ce soit en fait le cas de toutes les étoiles – après tout, l'étude statistique de l'énorme échantillon d'étoiles étudiées par la mission *Kepler* indique que toutes les étoiles de la galaxie sont probablement accompagnées d'au moins une exoplanète.

Le Système solaire lui-même a son propre agencement de ceintures de débris – la ceinture d'astéroïdes et celle de Kuiper. Pourtant, le Système solaire est très pauvre en poussière, comparé aux autres systèmes dont nous avons des images. En fait, les recensements infrarouges les plus exhaustifs n'ont pu identifier jusqu'ici que des disques dont les masses sont supérieures d'au moins un ordre de grandeur à ce que l'on observe dans le Système solaire. Cela veut-il dire que notre foyer cosmique est un endroit très particulier? Nous n'en sommes pas encore sûrs. Nous n'avons étudié jusqu'ici que les disques les plus massifs, les plus extrêmes, mais il reste à découvrir probablement bien plus de disques de faible masse qui nous aideront à mieux situer la place du Système solaire parmi ses congénères dans la galaxie.

Les astronomes ont donc commencé à soupçonner la présence de disques de poussière dès les premières observations

À haute altitude dans le désert chilien de l'Atacama, l'observatoire *Alma* coordonne les signaux de plusieurs dizaines d'antennes pour, entre autres, enregistrer des images de systèmes planétaires lointains.

infrarouges, dans les années 1980, mais ils ont longtemps ignoré à quoi ils ressemblaient. Avant les progrès de l'instrumentation réalisés dans les années 1990 et 2000, un seul système stellaire avait pu être «résolu»: Bêta Pictoris. Le télescope spatial *Hubble*, notamment, utilisait un coronographe, technique consistant à occulter la lumière de l'étoile centrale de façon à observer les objets environnants moins lumineux, pour photographier la lumière diffusée par les grains de poussière dans les disques circumstellaires. Beaucoup de ces premières images étaient indistinctes, mais, déjà, suggéraient que les disques circumstellaires avaient des structures variées et complexes. Dans le cas du disque de débris de Bêta Pictoris, les premières images de *Hubble* révélaient une voilure de la région centrale du disque; les astronomes ont supposé qu'elle serait due à une planète. Des images directes l'ont plus tard confirmé.

UN RADIOTÉLESCOPE QUI EN COMBINE PLUSIEURS DIZAINES

La longueur d'onde de la lumière que nous recevons après sa réflexion sur un nuage de poussière correspond grossièrement à la taille des grains: la lumière visible ou de l'infrarouge proche provient donc de grains minuscules d'une taille de quelques micromètres au plus, tandis que l'infrarouge lointain ou les ondes millimétriques proviennent de grains comparables à ceux du sable. On pense que ces grains plus gros reflètent mieux la structure sous-jacente des disques circumstellaires.

En effet, au sein des disques se produisent continuellement des collisions à la chaîne. De grosses comètes ou des astéroïdes se percutent et sont moulus en débris de plus en plus fins. En dehors des planètes proprement dites, les objets les plus massifs au sein du disque de débris sont appelés «planétésimaux» et leurs positions résultent de leurs interactions avec les planètes du système. Lorsque nous parvenons à localiser les planétésimaux, il est possible d'utiliser cette information pour en déduire la présence de planètes, même si nous ne pouvons pas observer ces mondes directement.

Les grains de poussière les plus minuscules sont facilement dispersés par les frottements du gaz interstellaire ou sont tout simplement soufflés par les vents de matière ou le rayonnement émis par l'étoile. Les grains plus gros, comparables au sable, sont moins touchés et offrent de meilleures chances d'observer la structure sous-jacente du disque et la présence de planètes, grâce à leur influence gravitationnelle.

En conséquence, pour étudier la structure des disques et y rechercher la signature de planètes cachées, il nous faut les observer à de grandes longueurs d'onde. Cela semble assez évident, mais il y a un piège. Le pouvoir de résolution d'un télescope est proportionnel à la longueur d'onde utilisée divisée par le diamètre de l'instrument. Ainsi, en augmentant la longueur d'onde du domaine optique vers le domaine millimétrique, il faut considérablement augmenter la taille du télescope pour conserver le même pouvoir de résolution. Le télescope *Hubble* a un diamètre de 2,4 mètres et donne une résolution de 0,13 seconde d'angle lors d'observations dans l'infrarouge proche, autour de 1 micromètre de longueur d'onde. Pour obtenir la même résolution à des longueurs d'onde de l'ordre de 1 millimètre, il faudrait augmenter le diamètre de l'instrument d'un facteur 1000, ce qui ferait plus de 2 kilomètres!

Comme il est impossible de construire des télescopes aussi énormes, on recourt à une technique appelée «interférométrie». Pour l'essentiel, au lieu d'utiliser un seul télescope de 2 kilomètres de diamètre, un interféromètre est formé d'une multitude de télescopes plus petits sur plus de 2 kilomètres de distance et combine leurs signaux pour atteindre une résolution équivalente.

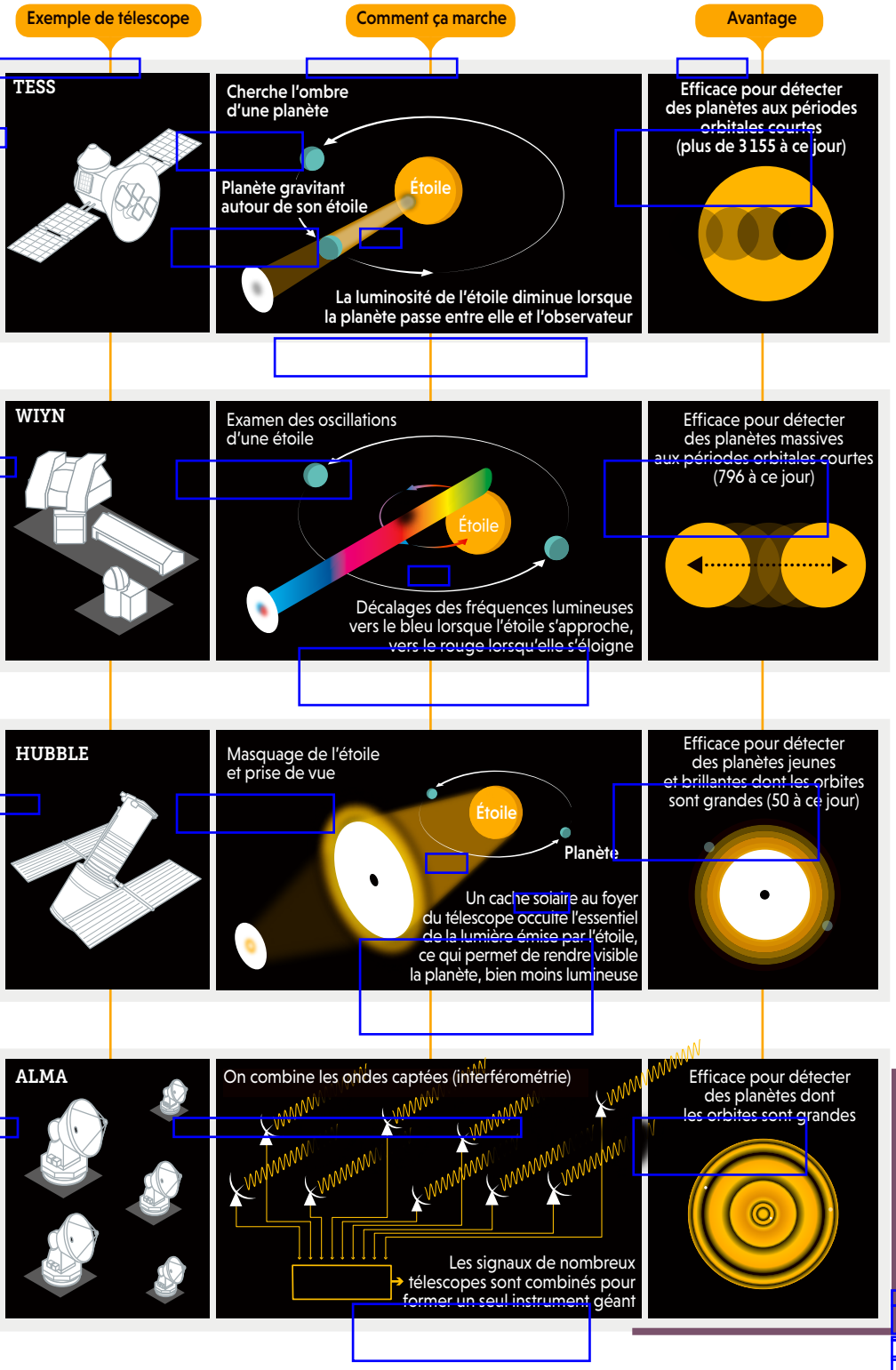
Alma, qui a enregistré ses premières images dès 2011, est encore aujourd'hui l'interféromètre le plus puissant du monde. Situé à environ 5000 mètres d'altitude dans le désert chilien de l'Atacama, *Alma* est constitué de 66 antennes que l'on peut déplacer sur leurs lignes de base avec des écarts variables allant de 150 mètres à 16 kilomètres, ce qui offre la possibilité de varier les configurations, compactes ou étendues, selon la sensibilité et le zoom souhaités. Ces progrès aussi bien dans le domaine de la sensibilité que de la résolution autorisent la réalisation d'images inédites d'objets très peu lumineux. C'est ainsi qu'*Alma* a contribué à bouleverser notre compréhension des disques circumstellaires.

L'une des premières images d'*Alma* à faire le tour du monde a été prise en 2014. Il s'agissait de HL Tau, un jeune système stellaire >

© Clem et Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com) et ESO

LA CHASSE AUX PLANÈTES

D'après les astronomes, pratiquement toutes les étoiles de la galaxie sont accompagnées de planètes, même si beaucoup, et même la plupart, restent indétectables. Chacune des stratégies utilisées pour déceler ces exoplanètes présente ses propres forces et faiblesses et souffre d'un biais favorisant la détection d'un type particulier de mondes. Les petites planètes comparables à la Terre qui parcourent de longues orbites autour de leur soleil sont particulièrement difficiles à détecter de loin, ce qui explique pourquoi très peu d'exoplanètes connues appartiennent à cette catégorie.



© Nigel Hawtin

probablement âgé de moins de 100000 ans. Sur cette photographie, ce que l'on imaginait auparavant être un disque continu apparaissait en réalité marqué d'une série d'anneaux séparés par des espaces vides. Étant donné l'extrême jeunesse de ce système, si ces régions évidées ont bien été creusées par des embryons de planètes, il faut en conclure que la formation planétaire démarre bien plus tôt qu'on ne le pensait.

DSHARP (sigle anglais pour « Projet d'observation des structures discales à haute résolution angulaire »), un recensement de 20 disques protoplanétaires, a permis une autre découverte notable en 2018 : chacun d'entre eux, sans exception, est marqué par des successions d'anneaux et de divisions semblables, et certains sont mêmes dotés de structures spirales. Il semble donc que ces caractéristiques ne soient pas spécifiques à HL Tau, mais se retrouvent universellement dans tous les jeunes disques circumstellaires.

UN MOYEN DE DÉTECTION DE PLANÈTES EXTRASOLAIRES

L'étude de ces disques ne nous renseigne pas seulement sur les mécanismes de formation planétaire. Elle constitue un nouveau moyen de détecter des exoplanètes que nous serions incapables de déceler autrement.

Les télescopes spatiaux tels que *Kepler* et *Tess* (pour *Transiting exoplanet survey satellite*, « Satellite de recensement des transits planétaires ») et d'autres programmes de recensement basés au sol ont détecté jusqu'ici des milliers d'exoplanètes. Cependant, la plupart de ces planètes sont plus massives et gravitent plus près de leur étoile mère que les planètes du Système solaire. Ces types de mondes ne sont cependant pas nécessairement les plus communs, ils nous sont simplement plus faciles à détecter.

Les deux méthodes principales de détection des exoplanètes sont la technique du transit, qui scrute les diminutions périodiques de la lumière stellaire lorsqu'une planète en orbite passe devant son étoile, et la méthode des vitesses radiales, qui déduit la présence de planètes par l'observation des petits changements de vitesse qu'elles infligent à leur étoile mère du fait de leur attraction gravitationnelle. Les deux méthodes favorisent la détection de planètes volumineuses (ou massives) et dont les orbites sont rapides, parce qu'il faut observer de multiples orbites successives avant de confirmer une détection.

Cela signifie que les astronomes qui utilisent ces méthodes ratent sans doute un grand nombre d'autres planètes. La période orbitale de Neptune, par exemple, est d'environ 165 ans : si vous étudiiez le Système solaire depuis une étoile lointaine, il vous faudrait attendre très longtemps pour voir Neptune transiter devant le Soleil ne serait-ce qu'une seule fois. Les rares planètes que nous connaissons et qui se trouvent à des distances de leur étoile de l'ordre de celle de Neptune ont été directement photographiées à l'aide de coronographes – c'est-à-dire en cachant la lumière de l'étoile centrale. Cette approche présente cependant ses propres biais, car elle favorise les systèmes jeunes dont les planètes conservent encore une partie significative de la chaleur résultant de leur formation et sont dès lors suffisamment brillantes dans l'infrarouge.

Pour replacer l'architecture de notre Système solaire dans son contexte et savoir s'il est typique ou plutôt exceptionnel au sein des systèmes de la galaxie, il nous faut détecter des planètes géantes à de grandes distances de leur étoile au sein de systèmes anciens. Désormais, grâce à *Alma*, cela est réalisable en utilisant l'image résolue de la structure des disques circumstellaires. C'est là un puissant complément aux autres méthodes de détection des planètes extrasolaires.

Nous pouvons ainsi détecter des mondes comparables à Neptune, par exemple, en étudiant certains traits distincts – des grumeaux ou des asymétries particulières – de disques qui ont été sculptés par les planètes en orbite. Dans le Système solaire, la classique ceinture de Kuiper est assez étroite à cause de l'influence gravitationnelle de Neptune. On pense qu'au début de l'évolution du système, Neptune s'est initialement formée plus près du Soleil avant de migrer vers l'extérieur en repoussant les matériaux restants sur son passage, créant ainsi la ceinture de Kuiper que nous connaissons aujourd'hui. Si nous observons des structures comparables dans les disques extrasolaires de débris, il sera possible d'en déduire la présence d'analogues de Neptune quand bien même nous ne les voyons pas.

Nous pouvons également en apprendre davantage sur les planètes que nous connaissons déjà en observant les disques qu'elles habitent. Le système de l'étoile HR 8799 comprend quatre planètes géantes gazeuses que l'on a pu photographier directement et dont les orbites se trouvent entre les analogues de notre ceinture d'astéroïdes et de notre ceinture de Kuiper. L'interférométrie millimétrique nous permet de discerner la structure de la ceinture extérieure du système, son analogue de la ceinture de Kuiper, et de déterminer la position de son bord interne.

En supposant que sa planète la plus extérieure soit celle qui est responsable du creusement du disque, cette information nous donne une estimation de la masse probable de ladite planète : autour de six masses joviennes. L'exploit peut ne pas sembler impressionnant, mais c'est en fait bien plus précis que les meilleures estimations précédentes fondées sur des modèles théoriques du refroidissement et de

> la diminution de la luminosité, dans l'infrarouge, des planètes après leur formation. À partir de la structure du disque, nous fournissons donc une importante vérification indépendante de ces modèles.

Par ailleurs, l'observation par *Alma* de disques protoplanétaires plus jeunes révèle des trésors de structures très détaillées. Les anneaux et les divisions qui les séparent semblent présents dans pratiquement tous les systèmes. Si tous ces espaces évidés sont creusés par des planètes, on doit conclure à l'existence d'une vaste population de planètes de glaces géantes qui nous avait échappé jusqu'ici. Cependant, relier directement la structure des jeunes systèmes à la présence de planètes n'est pas chose aisée, parce que d'autres phénomènes compliquent les efforts de modélisation.

Les systèmes plus vieux et plus évolués sont plus faciles à interpréter, bien que jusqu'ici très peu de ces disques de débris plus anciens aient exhibé de tels anneaux multiples. Récemment, dans le disque de débris de l'étoile HD 15115, nous avons découvert un nouvel espace vide situé approximativement au niveau de l'orbite de Pluton dans notre système. Les modèles dynamiques suggèrent que cette division est le fait d'une planète de glace géante de masse légèrement inférieure à celle de Saturne. Je soupçonne qu'à mesure que s'accumuleront les images en haute résolution de ces systèmes matures, nous verrons apparaître un nombre croissant de ces structures induites par la présence de planètes.

LA COMPOSITION CHIMIQUE DES DISQUES SE DÉVOILE

Au-delà de la structure des disques circumstellaires, nous pouvons également étudier leur composition. Puisque ces disques sont à la fois les réservoirs à partir desquels se forment les planètes et les registres fossiles de ce processus, leur composition est intimement reliée à celle des planètes de ces systèmes et à l'histoire de leur formation. Beaucoup de molécules rencontrées communément dans la nature émettent un rayonnement de longueur d'onde millimétrique dû aux oscillations de leurs liaisons chimiques. Les scientifiques ont détecté des dizaines de molécules organiques (monoxyde de carbone, formaldéhyde, méthanol et ammoniac, parmi bien d'autres) dans les grands réservoirs de gaz présents au sein des disques protoplanétaires.

UNE BATTERIE D'INSTRUMENTS VARIÉS

L'Observatoire européen austral (l'ESO), qui participe aussi à *Alma*, possède d'autres instruments dédiés à l'étude des disques circumstellaires et à l'imagerie directe des jeunes exoplanètes. Les quatre grands instruments de 8 mètres de diamètre du *VLT* (*Very Large Telescope*), installé au sommet du Cerro Paranal, au Chili, peuvent eux aussi être combinés pour fonctionner comme un interféromètre ; mais, surtout, certains sont dotés d'un système d'optique adaptative (un réseau de petits vérins hydrauliques qui déforment les miroirs en temps réel pour compenser les distorsions dues à la turbulence atmosphérique), ce qui leur confère une résolution proche de celle qu'ils auraient s'ils opéraient dans le vide de l'espace.

L'instrument Naco, installé dès 2001 sur le télescope numéro 4 du *VLT*, est responsable de la photographie directe de la planète Bêta Pictoris b, en orbite autour de son étoile à la même distance que Saturne du Soleil, planète qui a ensuite été abondamment étudiée par l'instrument Sphere, installé sur le télescope numéro 3 à partir de 2014. Signalons aussi qu'une autre planète a été détectée en 2019 plus près de cette étoile par la méthode des vitesses radiales.

Ces instruments sont des coronographes – ils masquent l'étoile centrale pour mieux rendre visible son environnement. Ils peuvent aussi exploiter le fait que la lumière directe de l'étoile est essentiellement non polarisée, tandis que la lumière réfléchie l'est partiellement, afin d'augmenter le contraste des disques circumstellaires et d'éventuelles exoplanètes.

Naco et Sphere, tout comme leurs cousins principalement américains les Gemini Planet Finder (GPI), installés sur le Cerro Pachón, au Chili, ainsi qu'à Hawaii, opèrent à des longueurs d'onde plus courtes qu'*Alma*, dans le domaine optique ou du très proche infrarouge. Ces courtes longueurs d'onde donnent difficilement accès aux gros grains millimétriques étudiés ici par Meredith MacGregor. (Signalons toutefois qu'*Alma* a aussi détecté une planète dans le disque de HD 163 296, non par l'étude de ces poussières, mais par celles des mouvements du gaz.) Cependant, alliées à une optique adaptative de très haute performance, ces courtes longueurs d'onde confèrent à Sphere, par exemple, une résolution de l'ordre de 0,02 seconde d'arc, six fois supérieure à celle de *Hubble* et à la limite du mieux que puisse faire *Alma* dans sa configuration la plus étendue. Ces instruments sont aussi susceptibles de fournir des spectres des objets étudiés, donnant ainsi accès à leur composition.

GPI a obtenu l'image directe des quatre planètes (elles aussi évoquées ici par Meredith MacGregor) autour de l'étoile HR 8799. Quant à Sphere, outre l'étude de Bêta Pictoris b, on lui doit la découverte par imagerie directe des planètes géantes autour de l'étoile HIP 65426 (en 2017), PDS 70 (en 2018) ainsi que TYC 8998-760-1 (en 2020). Des dizaines de disques circumstellaires ont également été résolus par Sphere et, dans le cas du système PDS 70, le *VLT* observe actuellement une seconde planète à l'aide de l'instrument Muse (*Multi unit spectroscopic explorer*, ou « explorateur spectroscopique multiple »). Sphere vient également de découvrir de spectaculaires arches se déplaçant dans le système AU Mic et dont l'origine reste mal comprise.

Ainsi, l'étude de la formation et de l'évolution des systèmes planétaires repose sur l'exploitation d'une gamme très polyvalente d'instruments variés.

ANNE-MARIE LAGRANGE
Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble

Nos recherches ont aussi soulevé une nouvelle énigme. On pensait traditionnellement que les disques de débris étaient pauvres en gaz parce que le gaz originel devait être soufflé en à peine quelques millions d'années. Or *Alma* a montré que bien des disques de débris contiennent du dioxyde de carbone gazeux. On peut interpréter cela comme le résultat de collisions de comètes au sein du disque qui, à mesure qu'elles sont broyées en débris de plus en plus petits, libèrent de la glace carbonique, sublimée par la suite en gaz. Quelques systèmes défient cependant cette explication, parce qu'ils contiennent de telles quantités de gaz qu'il faudrait des taux de collisions cométaires invraisemblables pour les produire.

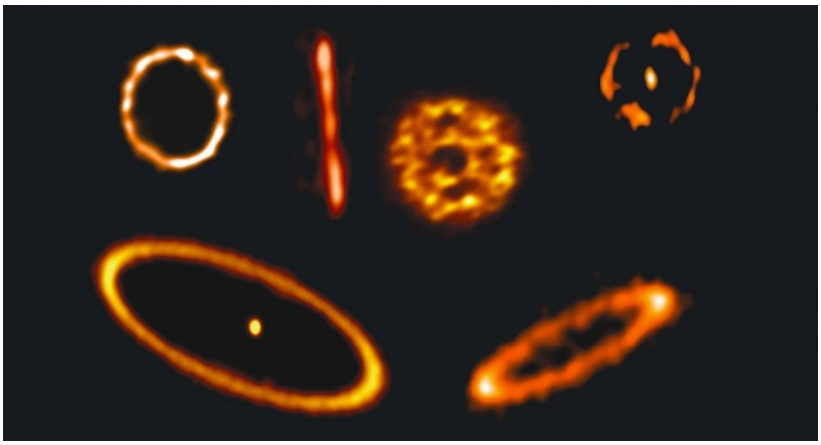
Cette découverte pose une question: est-il possible qu'une partie du gaz originel se maintienne au sein de ces disques non pas pendant quelques millions d'années mais pendant des dizaines de millions d'années? Pour le moment, nous n'avons pas de réponse.

FUTURS ÉCLAIRAGES À D'AUTRES LONGUEURS D'ONDE

J'ai démarré ma thèse au moment où *Alma* ouvrait les yeux pour la première fois sur le ciel; et je prends aujourd'hui mon premier poste universitaire alors qu'on assiste à une fascinante transition vers l'astronomie multi-longueurs d'onde. *Alma* a contribué à bouleverser notre compréhension des disques circumstellaires en révélant des complexités de structure et de composition chimique que l'on ne pouvait que deviner il y a quelques décennies. Mais *Alma* ne peut répondre à toutes les questions que nous nous posons.

Tous les disques de débris que j'ai mentionnés ici sont comparables à notre ceinture de Kuiper: de froids anneaux de poussière dans la banlieue extérieure de leurs systèmes solaires. Jusqu'ici, les astronomes ont bataillé en vain pour réaliser des images de ceintures comparables cette fois à notre ceinture d'astéroïdes: nous les décelons seulement sous la forme d'un excès d'infrarouges près de l'étoile mère, exactement comme aux jours anciens du satellite *Iras*.

Pour obtenir des images des régions internes des systèmes extrasolaires, il nous faut accéder à des longueurs d'onde plus courtes, correspondant à des grains de poussière plus chauds. Le télescope spatial *James-Webb* (*JWST*) devrait être lancé en 2021 et nous espérons qu'il prendra les premières photos de ces analogues de notre ceinture d'astéroïdes. De surcroît, le *JWST* fonctionnera à des longueurs d'onde qui correspondent aux émissions des silicates (des minéraux comme l'olivine ou les pyroxènes, que l'on retrouve également sur Terre), ce qui devrait nous renseigner directement sur la composition des grains des disques.



© ALMA (ESO, NAOJ et NRAO)

Les disques de débris, ici photographiés par *Alma*, constituent un stade plus tardif de l'évolution des disques protoplanétaires, une fois que l'étoile et ses planètes se sont formées. Ces ceintures brillantes de décombres sont comparables à la ceinture de Kuiper du Système solaire.

Plus loin dans le futur, les très grands télescopes de la prochaine génération, actuellement en construction, devraient recueillir leurs premières lumières entre le milieu et la fin des années 2020. Ces télescopes auront des diamètres supérieurs à 24 mètres, soit une surface collectrice plus de cinq fois supérieure à celle des plus grands télescopes au sol actuels, et ils pourront peut-être photographier directement les planètes dont nous ne pouvons pour le moment que déduire la présence à partir de l'observation des disques.

L'enquête décennale sur l'astronomie et l'astrophysique – une étude impliquant toute la discipline destinée à guider les futurs investissements aux États-Unis – est en cours. Quatre missions phares de la Nasa sont à l'étude dans ce cadre, dont les retombées pour les sciences planétaires pourraient être considérables dans les années 2030 et au-delà.

Le télescope spatial *Origins*, un observatoire infrarouge cryogénique, devrait déceler la façon dont l'eau contenue dans les nébuleuses où se forment les étoiles est finalement transférée au sein des disques circumstellaires, fournir un échantillon statistiquement significatif de la population de disques de faible masse (indiquant ainsi si notre système est particulier ou au contraire banal), et bien d'autres choses. D'autres candidats comme *Luvoir* (*Grand recenseur ultraviolet/optique/infrarouge*) et *Habex* (*Observatoire des exoplanètes habitables*) sont des missions destinées à produire des images directes susceptibles de caractériser de nombreuses exoplanètes, parmi lesquelles certaines pourraient être semblables à la Terre.

Quelle que soit celle de ces missions qui sera finalement choisie, il y a une chose dont je suis sûre: notre compréhension du Système solaire, de sa formation et de sa place au sein d'un univers peuplé de systèmes planétaires change tous les jours. Quant à la boule au ventre que l'on ressent à chaque fois que l'on attend de découvrir à quoi ressemblent les dernières observations, cette impression ne disparaît jamais. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Miranda et R. R. Rafikov, **On the planetary interpretation of multiple gaps and rings in protoplanetary disks seen by ALMA**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 878(1), article L9, 2019.

ALMA Partnership *et al.*, **The 2014 ALMA long baseline campaign : First results from high angular resolution observations toward the HL Tau region**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 808(1), article L3, 2015.

M. A. MacGregor *et al.*, **Millimeter emission structure in the first ALMA image of the AU Mic debris disk**, *Astrophysical Journal Letters*, vol. 762(2), article L21, 2013.

Quand les agriculteurs se sont imposés en Europe

Laura Spinney

Lorsque les premiers éleveurs-cultivateurs ont gagné l'Europe au Néolithique, ils ont forcément rencontré des populations de chasseurs-cueilleurs. Quelles ont été leurs interactions ?

Il y a 8000 ans, l'Europe était en plein «âge moyen de la pierre», c'est-à-dire en plein Mésolithique européen, qui va du X[e] au V[e] millénaire avant notre ère. Les Européens étaient alors tous des chasseurs-cueilleurs, qui nomadisaient par petits clans dans les immenses et luxuriantes forêts couvrant le continent. Les outils de silex qu'ils utilisaient pour récolter des plantes, couper du bois, pêcher du poisson ou encore chasser le cerf et l'aurochs (l'ancêtre disparu des bovidés domestiques actuels) nous sont connus par leurs habitats. Les quelques squelettes que l'on y a retrouvés évoquent des gens robustes et plutôt grands; leurs gènes indiquent qu'ils avaient souvent la peau et les cheveux bruns, et les yeux bleus.

Seulement 3000 ans plus tard, des champs de blé et de lentilles parsemaient la forêt, et la transition vers l'«âge de la pierre nouvelle», c'est-à-dire vers le Néolithique (V[e] au III[e] millénaire pour l'Europe occidentale) battait son plein. Les Mésolithiques, qui subsistaient par la chasse et la cueillette, et les Néolithiques, qui subsistaient par l'agriculture et l'élevage, ont très longtemps coexisté. Pour autant, l'introduction en Europe de l'économie de production a créé une rupture dans le registre archéologique, mise en évidence par la découverte dès le XIX[e] siècle d'os d'animaux domestiques, de poteries contenant des restes de céréales et de nécropoles. L'arrivée du nouveau système économique signifiait l'apparition de nouveaux régimes alimentaires, d'un nouvel usage des terres, de nouvelles relations avec la nature et, corrélativement, d'une nouvelle vie sociale. Cette évolution a culminé à la fin du Néolithique avec l'adoption de la métallurgie.

Les préhistoriens se sont demandé pendant plus d'un siècle si le Néolithique a été apporté en Europe par des migrations, ou s'il s'y est seulement diffusé à partir de son aire d'origine >

Dans certaines des sépultures néolithiques européennes, un défunt principal, soigneusement couché sur le côté, est entouré de défunts qui semblent avoir été sacrifiés et négligemment jetés dans la tombe. Ces derniers ont souvent une ascendance de chasseurs-cueilleurs, révèlent des analyses génétiques.

© Benoit Clarys

L'ESSENTIEL

> Il y a quelque 9 000 ans, les premiers paysans ont pénétré en Europe, puis remonté la vallée du Danube ou suivi la côte méditerranéenne à la recherche de terres à cultiver.

> Ils ont alors rencontré les chasseurs-cueilleurs qui vivaient alors dans les denses forêts du continent. Tout en continuant leur progression en Europe, ils ont échangé avec eux, donnant lieu à quelques métissages.

> Il y a environ 5 000 ans, des sociétés paysannes devenues hiérarchisées semblent avoir intégré les derniers chasseurs-cueilleurs au rang social le plus bas.

L'AUTRICE

LAURA SPINNEY
journaliste scientifique basée à Paris

> proche-orientale. Puis, au début des années 2000, des généticiens tels que Martin Richards, de l'université d'Oxford, et d'autres ont trouvé dans les gènes des Européens d'aujourd'hui la preuve incontestable que le système néolithique a bien été apporté en Europe par des paysans qui avaient traversé le Bosphore et la mer Égée. Plus tard, Svante Pääbo, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutive à Leipzig, et d'autres ont développé des techniques permettant d'extraire et de séquencer l'ADN ancien. Depuis cette grande avancée, les paléoanthropologues collaborent activement avec les paléogénéticiens, lesquels s'empressent de caractériser les génomes anciens retrouvés dans les fossiles de chasseurs-cueilleurs ou d'agriculteurs européens.

En 2014, avec des collègues, la paléogénéticienne Cristina Gamba, qui travaillait alors au Trinity College, à Dublin, a identifié un os de chasseur-cueilleur dans l'habitat d'une ancienne communauté paysanne de Hongrie. Depuis, un tableau complexe des interactions des collecteurs (chasseurs-cueilleurs) avec les producteurs (paysans) au Néolithique européen a commencé à émerger. Si, dans certaines régions, les deux types de population se sont mêlés, dans d'autres, elles sont restées séparées pendant des siècles, voire des millénaires. Nous allons voir ce que les registres fossiles et génétiques nous livrent à ce propos.

IMMIGRATION NÉOLITHIQUE

Il y a quelque 11 500 ans, l'Europe et le Moyen-Orient sortaient d'une glaciation. Plus humide et plus chaude, l'Europe était alors couverte de forêts. Le climat se réchauffant, les chasseurs-cueilleurs du Croissant fertile – une bande terrestre allant de la vallée du Nil à la haute Mésopotamie en passant par le Levant et l'Anatolie du Sud – se sont peu à peu sédentarisés. Passant moins de temps à chasser le bouquetin et le sanglier, ils en consacraient toujours plus à leurs animaux et plantes domestiqués : moutons, chèvres, blé, pois et lentilles. L'archéobotanique – en particulier l'étude du pollen ancien – et l'archéozoologie, l'étude des animaux anciens, mettent très clairement cette transition en évidence. Ce sont ces premiers agriculteurs, qui, il y a 9000 ans environ, ont abordé l'Europe à la recherche de terres à cultiver. Nous ignorons quelles langues ils parlaient, mais le basque pourrait en constituer une relique.

Comme tous les migrants, les agriculteurs ont sans doute eu besoin de temps pour s'adapter à leur nouvel environnement, mais ils ont vite appris quelles plantes et quels animaux domestiques peuvent prospérer dans les climats tempérés de l'Europe. Défrichant la forêt parcelle par parcelle, ils ont influencé son peuplement par l'emploi de ces très vieilles techniques que sont le taillis (on coupe les troncs, puis, régulièrement, les rejets de souche) et l'étêtage (on coupe seulement les branches supérieures). Leur population a vite augmenté. Lorsque la terre commençait à manquer, les jeunes générations partaient s'installer dans ce qui ressemblait d'abord à une forêt vierge. « Les nouveaux venus n'avaient peut-être pas l'impression d'empiéter sur le territoire de quelqu'un, suggère Céline Bon, paléogénéticienne au musée de l'Homme, à Paris. Mais ils le faisaient. »

En 2017, des recherches menées par l'équipe d'Amy Goldberg, de l'université de Stanford, ont suggéré que les premiers paysans d'Europe y étaient venus par familles entières. Les chercheurs ont séquencé le chromosome X de 20 Européens du Néolithique précoce. Ce chromosome sexuel s'hérite des deux parents, au contraire du chromosome Y, transmis uniquement par les hommes. Or les résultats de l'étude indiquent que ces 20 personnes ont hérité l'ADN de leurs chromosomes X en parts à peu près égales de paysannes et de paysans, et non de chasseurs-cueilleurs.

Ainsi, les premières sociétés néolithiques européennes semblent avoir été composées de femmes et d'hommes partageant une même culture d'origine. Pour la plupart des chercheurs, ces sociétés étaient patrilocales : les

épouses allaient vivre dans la famille de leur mari. Cette mobilité est indiquée notamment par les proportions de certains des isotopes du strontium dans les dents des femmes néolithiques. Ces taux sont en effet caractéristiques de l'environnement géologique où une personne a grandi, ce qui permet de le situer sur la carte des taux de strontium dans les eaux souterraines d'Europe. Le décor des céramiques fournit un autre indice de cette mobilité : puisque, dans la plupart des sociétés agricoles traditionnelles connues, ce sont les femmes qui façonnent la poterie, l'évolution constante de leurs décorations traduit, pense-t-on, l'apport artistique des épouses venues d'autres villages.

Deux flux distincts de paysans néolithiques se sont formés puis propagés à travers l'Europe. Ces « courants de néolithisation », comme disent les archéologues, sont d'une part le « courant danubien », qui remontait la vallée du Danube, et d'autre part le « courant méditerranéen », qui longeait les côtes méditerranéennes.

S'agissant du courant danubien, les datations par le radiocarbone nous apprennent qu'il y a environ 7500 ans, les paysans danubiens avaient déjà établi des villages dans le bassin des Carpates. C'est dans cette immense étendue, couvrant aujourd'hui à la fois la Slovaquie, la Hongrie et la Roumanie, qu'ils ont développé les « cultures à céramique rubanée », que l'on nomme aussi le « Rubané ». Les décors de ces céramiques, qui servaient notamment à la conservation de la nourriture, sont en effet à base de lignes ou « rubans ». Les archéologues désignent souvent les cultures à céramiques rubanées par leur sigle allemand LBK, pour *Linearbandkeramik* (« céramique à bandes linéaires »).

LA RENCONTRE DES DEUX COURANTS DE NÉOLITHISATION

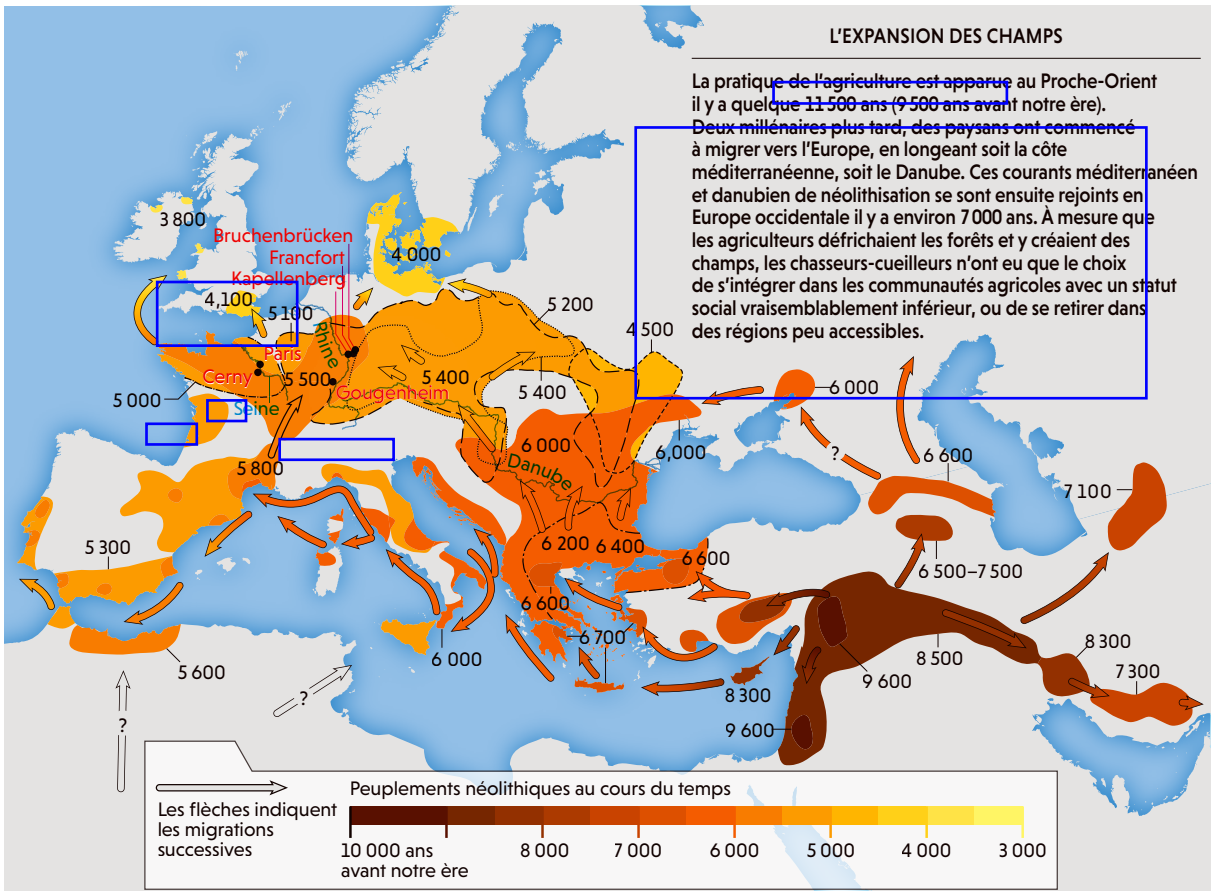
Les paysans du Rubané ont atteint le Rhin il y a quelque 7300 ans après avoir progressé à travers les fertiles plaines de la future Allemagne. L'étude des styles de leurs céramiques et les datations par le radiocarbone suggèrent qu'ils pratiquaient la colonisation par sauts, « avançant par étapes, parfois de plusieurs centaines de kilomètres, puis emplissant de villages l'espace franchi », décrit Detlef Gronenborn, du Musée central romain-germanique de Mayence. Bien plus tard, une fois la première métallurgie, celle du cuivre, introduite en Europe et maîtrisée, un commerce florissant d'outils et d'objets de valeur réalisés dans ce métal s'est développé entre toutes ces communautés paysannes.

Au sud, les paysans du courant méditerranéen de néolithisation ont progressé le long des côtes balkaniques, italiennes et françaises jusqu'à atteindre la péninsule ibérique. Ceux qui, il y a quelque 7800 ans, ont abordé le rivage sud de la future France ont ensuite remonté la vallée du Rhône en direction du Bassin parisien et y ont rencontré des populations du Rubané. Séparés depuis plus de 500 ans, les deux courants de néolithisation européens avaient eu le temps de diverger quelque peu, mais cela n'a pas empêché ces paysans de se reconnaître et de se mélanger culturellement et biologiquement.

À quel point ? Une nécropole néolithique datant de 7000 ans et située à Gurgy, près d'Auxerre, nous le suggère : le génome mitochondrial des défunts, un ADN transmis seulement par les femmes, y provient à peu près à parité des courants danubien et méditerranéen. Or les cultures mixtes du Bassin parisien ont joué un grand rôle dans la suite de la néolithisation, puisqu'elles ont ensuite diffusé leur mode de vie vers le nord de l'Europe. >

L'étude de l'ADN des squelettes de la nécropole néolithique de Gougenheim, en France, suggère que les morts *(photo du bas)* qui accompagnent un défunt principal *(ci-dessous)*, et dont les corps semblent avoir été négligemment jetés, sont davantage susceptibles que lui d'avoir des ancêtres chasseurs-cueilleurs.

© Inrap



Carte : © Mapping Specialists, d'après Gronenborn/Horejs/Börner/Ober 2019 (RGZM/OREA) ; sources : Musée central romain-germanique de Mayence et Institut pour l'archéologie orientale et européenne, Vienne, Autriche

> Tôt ou tard, les paysans n'ont pu que rencontrer les chasseurs-cueilleurs européens, ce qui a dû être un choc pour les deux populations. Seulement 40 000 ans s'étaient écoulés depuis que leurs ancêtres communs avaient quitté l'Afrique avant de se séparer, mais cela suffisait pour distinguer physiquement, culturellement et linguistiquement paysans et chasseurs-cueilleurs. La comparaison des gènes des agriculteurs du Néolithique avec ceux des Européens modernes révèle que les agriculteurs étaient en moyenne plus petits que les chasseurs-cueilleurs. Leurs cheveux et leurs yeux étaient foncés et leur peau probablement plus claire que celle des chasseurs-cueilleurs. Aucune preuve de violence lors des premières rencontres n'existe, mais le registre archéologique est trop incomplet pour tirer une conclusion ferme à cet égard. À la longue, les traces laissées par les cultures des chasseurs-cueilleurs européens ont fini par disparaître complètement des registres archéologiques et génétiques après l'arrivée des agriculteurs. Que s'est-il passé ?

Des décennies durant, les archéologues se sont demandé si, confrontés à un afflux massif, les chasseurs-cueilleurs ne s'étaient pas réfugiés dans la profondeur des forêts ou peut-être dans les hauteurs, où le sol est moins propice à la culture, bref dans des zones où les paysans ne risquaient pas de les déranger. « D'énormes poches de chasseurs-cueilleurs se sont peut-être maintenues dans ces zones, non pas une génération durant, mais plutôt pendant 1 000 ou 2 000 ans après l'arrivée des agriculteurs », suggère Ron Pinhasi, anthropologue à l'université de Vienne, en Autriche.

Quoi qu'il en soit, des chasseurs-cueilleurs ont dû subsister assez longtemps pour avoir des contacts avec les populations néolithiques, puisque les Européens modernes portent leurs gènes ! Du reste, des analyses paneuropéennes de l'ADN ancien disponible révèlent un phénomène étonnant : la résurgence de l'influence des chasseurs-cueilleurs sur le bassin génétique européen à partir d'il y a 6 500 ans ! Découverte sous la forme d'une multiplication des marqueurs génétiques typiques des chasseurs-cueilleurs dans l'ADN paysan contemporain, cette « résurgence mésolithique » atteste de la persistance tardive des collecteurs et suggère un métissage final des paysans avec eux. Elle n'a pas été que génétique : « Nous observons, à peu près à la même époque, la réémergence dans le registre

archéologique des façons de faire mésolithiques », explique l'archéologue Thomas Perrin, de l'université Jean-Jaurès, à Toulouse. À l'exception d'éventuels groupes se terrant encore au plus profond de la forêt, les chasseurs-cueilleurs avaient largement disparu, mais pas leurs gènes ni leurs techniques.

À l'époque où elles ont commencé à se répandre en Europe (surtout du Nord) depuis la plaque tournante du Bassin parisien, les cultures néolithiques avaient divergé de celles des courants danubiens et méditerranéens : désormais, elles incorporaient une part de la vieille culture européenne chasseur-cueilleur. Ce qui amène à se demander comment les interactions de gens aussi différents que les producteurs néolithiques et les collecteurs mésolithiques ont pu se dérouler.

PAS DE MÉTISSAGES DANS UN PREMIER TEMPS

La réponse est : de beaucoup de façons différentes ! Pour le courant danubien, aucun indice clair de métissage entre chasseurs-cueilleurs et paysans n'existe avant que ces derniers n'atteignent le Rhin. Et pourtant, les deux populations se sont mélangées d'une autre façon, peut-être dès leurs premiers contacts. À Tiszaszőlős-Domaháza, en Hongrie, Christina Gamba a identifié un os ayant appartenu à un chasseur-cueilleur au milieu d'un village de paysans. Pour fascinante qu'ait été cette observation, elle est d'abord restée énigmatique, car on ne savait rien de cet individu. S'agissait-il d'un habitant du village ? D'un otage ? D'un individu de passage ?

Puis d'autres indices sont apparus. Ainsi, des archéologues ont découvert qu'il y a environ 7300 ans, à Bruchenbrücken, au nord de Francfort-sur-le-Main, des paysans et des agriculteurs partageaient un site, une sorte d'établissement « multiculturel » selon les mots de Detlef Gronenborn. Il semble que des chasseurs-cueilleurs y venaient depuis l'ouest afin d'échanger avec les agriculteurs, qui appréciaient les outils qu'ils fabriquaient, notamment leurs fines pointes de flèches de silex. Il est possible que certains chasseurs-cueilleurs se soient installés sur place et aient adopté le mode de vie paysan. Les échanges qui se déroulaient à Bruchenbrücken et sur d'autres sites étaient si fructueux qu'ils auraient même retardé de plusieurs siècles la progression de l'agriculture vers l'ouest, avance Detlef Gronenborn.

Au début de leurs contacts, en règle générale, les deux populations ne se métissaient pas, mais il semble qu'il y a eu de rares exceptions. Situé dans une vallée boisée proche de Vienne, en Autriche, le site Brunn 2 du Rubané remonte à la première vague néolithique arrivée en Europe il y a environ 7600 ans. Or les restes de trois défunts quasi contemporains découverts sur place sont ceux de deux paysans et d'un individu né d'un parent agriculteur et d'un autre chasseur-cueilleur. Comme le voulait la tradition rubanée, tous trois ont été soigneusement couchés sur le côté dans leur tombe, mais six pointes de flèches ont été disposées dans la tombe du métis.

Quand, en 1990, les archéologues commencèrent à fouiller Brunn 2, ils découvrirent un site jonché de milliers de fragments de pierre, de vases de stockage, de flûtes et autres figurines en argile brisées. Ils en conclurent que des rituels se déroulaient en ce lieu, qui semble aussi avoir été un atelier de production, ou un comptoir, ou les deux. Si c'était un sanctuaire, commente Alexey Nikitin, paléogénéticien à l'université d'État de Grand Valley, dans le Michigan, qui a fouillé Brunn 2, alors les individus qui y ont été inhumés devaient tous être de haut rang. D'après lui, le site atteste d'interactions mutuellement profitables des deux cultures.

Au sein du courant méditerranéen, les interactions avec les chasseurs-cueilleurs semblent avoir, dès le début, inclus des métissages. « Pour les deux siècles qui ont suivi l'arrivée des premiers agriculteurs dans le sud de la France, nous trouvons des individus dont 55 % du génome provient des chasseurs-cueilleurs », explique Maïté Rivollat, paléogénéticienne à l'université de Bordeaux, coautrice en mai 2020 d'une analyse génétique des fossiles humains trouvés dans les nécropoles néolithiques du sud de la France. La répartition de l'ADN de chasseurs-cueilleurs dans les génomes paysans prouve en outre que le métissage durait déjà depuis cinq ou six générations, voire depuis le moment même où les pionniers ont débarqué.

Curieusement, la France n'a pas livré de sites attestant de contacts entre les deux groupes. Le site qui s'en rapproche le plus est la grotte du Gardon, dans le Jura : elle a été occupée par des paysans du Néolithique méditerranéens puis par des chasseurs-cueilleurs mésolithiques. « Compte tenu de la faible séparation temporelle entre ces occupations, nous pouvons conclure que, dans la région du moins, les deux groupes ont coexisté », estime Thomas Perrin.

Comment donner un sens à ces observations disparates ? Pour l'anthropologue Polly Wiessner, de l'université de l'Utah, qui a longtemps étudié les chasseurs-cueilleurs, de telles variations régionales ne sont pas surprenantes : l'histoire récente des relations entre chasseurs-cueilleurs et paysans à l'arrivée de ces derniers montre qu'elles dépendent des objectifs économiques respectifs des deux populations. « Si les arrivants veulent coloniser des terres ou des ressources, ils en déshumanisent les habitants, explique-t-elle. Si, en revanche, une coopération est possible, les gens réagissent plutôt en instituant la relation, par >

> exemple en qualifiant l'autre d'"ami" ou de "partenaire commercial". »

Les cas récents de colonisation de territoires de chasseurs-cueilleurs par des paysans pourraient expliquer pourquoi une résurgence mésolithique s'est déclenchée quelque 1500 ans après l'arrivée des agriculteurs en Europe et pourquoi elle a duré si longtemps. En Afrique, il y a environ 3000 ans, lorsque les agriculteurs bantous ont commencé leur expansion en Afrique australe, ils ont rencontré les Pygmées, des habitants de la forêt aussi éloignés génétiquement d'eux que les Européens. « Entre eux, il y a eu pendant très longtemps des échanges commerciaux, mais pas de métissage », explique le généticien Lluis Quintana-Murci, de l'institut Pasteur à Paris, qui a reconstitué par l'ADN ancien l'histoire commune de ces deux groupes.

Lorsque les métissages ont finalement commencé, plus de 2000 ans après la rencontre des deux groupes, ce sont des femmes pygmées qui ont intégré des communautés bantoues, où elles étaient – et sont toujours – considérées comme socialement inférieures, et même biologiquement distinctes. « Les Bantous ont une relation à double tranchant avec les Pygmées, explique Lluis Quintana-Murci. D'un côté, ils les traitent comme des serviteurs ; d'un autre, ils en ont un peu peur. Dans l'esprit des Bantous, les Pygmées sont les maîtres de la forêt, et certains d'entre eux ont des pouvoirs chamaniques. »

MÉTISSAGE AVEC LA COUCHE SOCIALE LA PLUS BASSE ?

Dès lors, se demande-t-on, pourquoi le tabou du métissage a-t-il fini par disparaître ? Personne ne le sait, répond Lluis Quintana-Murci, mais il est probable que cela s'explique par la disparition d'une barrière sociale. En se stratifiant et en s'enrichissant, la société bantoue aurait marginalisé davantage ses membres les plus inférieurs socialement, lesquels, se retrouvant presque au niveau des Pygmées, auraient développé des affinités avec eux.

De façon similaire, une réduction de la distance sociale entre les couches les plus basses des communautés paysannes et les chasseurs-cueilleurs a pu conduire à des métissages au début de la résurgence mésolithique. Il est difficile d'en être certain, mais la culture de Cerny, dans le Bassin parisien, est un indice possible de ce phénomène.

Les archéologues ont longtemps considéré que cette culture représentait un dernier avatar du Rubané, qui s'est développé au moment où le LBK a commencé à intégrer des apports extérieurs. Si cette hypothèse est correcte, les membres de la culture de Cerny devaient avoir l'agriculture dans le sang, puisque leurs ancêtres avaient couvert de champs le bassin des Carpates. Pour autant, dans les nécropoles de la culture de Cerny datant d'il y a 6700 ans, on enterrait les hommes de haut rang sur le dos et non recroquevillés sur le côté comme c'était l'usage dans la culture du Rubané, et l'on disposait autour d'eux des armes de chasse et des ornements à base de bois de cerf rouge, de défenses de sanglier et de griffes d'oiseaux de proie… « Les sites funéraires du Cerny évoquent un autre monde que le quotidien des membres de cette culture, commente l'archéologue Aline Thomas, du musée de l'Homme. Ils font référence à la nature sauvage, que l'on associe davantage aux populations mésolithiques qu'aux communautés néolithiques. »

Découvertes à Kapellenberg, en Allemagne, ces pointes de flèche en silex *(ci-dessus)* illustrent l'importance de la chasse dans la culture du Michelsberg. Non loin de Wiesbaden, en Allemagne, un site a livré des fragments de vase orné de décorations typiques de la culture du Rubané *(ci-contre une réplique du vase)*.

Ce type de rites funéraires a poussé Aline Thomas et Céline Bon à se demander qui étaient vraiment les membres de la culture de Cerny. S'agissait-il de paysans ayant adopté les coutumes mésolithiques, ou plutôt de chasseurs-cueilleurs néolithisés assez récemment pour pratiquer encore les vieilles coutumes ? Pour tenter de trancher, les deux chercheuses s'efforcent d'analyser l'ADN trouvé dans les nécropoles du Cerny. Dans l'ADN mitochondrial (hérité de la mère), elles ont identifié des séquences mésolithiques. Cela suggère que des femmes issues de clans de chasseurs-cueilleurs se sont intégrées dans les communautés paysannes du Cerny, en y laissant une descendance.

Cet apport génétique pourrait refléter ce qui devait se passer au sein d'autres communautés agricoles de l'époque, tant, il y a 6700 ans, l'émergence de gènes de chasseurs-cueilleurs au sein des génomes paysans – la résurgence du Mésolithique – était déjà avancée. Il reste donc à préciser qui étaient les membres du Cerny. Les chercheuses analysent à présent les chromosomes Y d'individus de cette culture et en séquencent des génomes entiers afin de préciser leurs origines génétiques. L'affaire est à suivre, mais les nécropoles du Cerny sont en tout cas une manifestation culturelle datée de la résurgence du Mésolithique en Europe.

© R. Müller *(flèches)*, V. Iserhardt *(vase)* Musée central romain-germanique de Mayence

Même si, parfois, les gènes et les rituels funéraires racontent une histoire plus compliquée, à l'époque de cette culture, presque toutes les populations en Europe avaient déjà adopté le mode de vie paysan.

UNE TRANSITION VERS DES SOCIÉTÉS HIÉRARCHISÉES

Il y a 6500 ans environ, un séisme social s'est produit en Europe. Auparavant, comme à Brunn 2 par exemple, même les personnages de haut rang étaient simplement déposés seuls dans le sol. Désormais, dans certaines régions d'Europe, on édifiait d'énormes tumulus avant d'y placer plusieurs défunts dans de petites chambres funéraires. Les anthropologues lisent dans ces nouveaux comportements une rupture sociale, voire la naissance des inégalités, rendues possibles par les surplus agricoles produits. Or les sociétés néolithiques de cette époque comptaient des membres d'ascendance mésolithique, dont l'aspect physique était peut-être différent de celui de la plupart des agriculteurs, et dont la vie aurait été difficile.

La culture de Michelsberg en fournit un exemple patent. Apparue il y a quelque 6400 ans, elle est probablement née dans le Bassin parisien, puis a migré vers l'est dans ce qui est aujourd'hui l'Alsace et l'Allemagne. Les membres de cette culture structuraient défensivement leur territoire. Une agglomération fortifiée abritant plusieurs milliers de personnes occupait son centre, entourée d'une ceinture de terroirs aux habitats dispersés et, plus loin, une bande d'habitats plus clairsemée encore, que Detlef Gronenborn qualifie de « zone frontalière ». Cette organisation défensive reflète probablement des tensions entre groupes voisins qui, à mesure que leurs populations augmentaient, s'affrontaient de plus en plus souvent.

Les nécropoles de la culture de Michelsberg sont typiques d'une société stratifiée. À Bruchsal-Aue, près de Karlsruhe, par exemple, et sur d'autres sites, on trouve des individus de haut rang couchés sur le côté comme le veut la tradition rubanée, mais entourés d'autres défunts manifestement jetés là sans le moindre respect. Les proportions des isotopes de strontium dans les dents suggèrent que tous les défunts d'une même tombe avaient le même régime alimentaire paysan, mais leurs génomes révèlent que les accompagnants du défunt principal ont généralement plus d'ancêtres chasseurs-cueilleurs que lui. On observe en outre que des dépouilles de personnes à forte ascendance de chasseurs-cueilleurs étaient jetées dans des fosses à ordures ou dans des fossés.

Pour Detlev Gronenborn, ces observations attestent d'une société qui discriminait sur des bases à la fois sociales et biologiques, où la vie des individus du bas de l'échelle sociale n'avait que très peu de valeur. Les malheureux négligemment jetés dans une fosse ou dans la tombe d'un personnage de haut rang étaient probablement des esclaves ou des captifs tués pour être déposés dans ces tombes, estime Detlev Gronenborn.

En outre, dans une étude publiée en 2017, l'équipe bordelaise dont fait partie Maïté Rivollat faisait état de la « pratique probable de sacrifices humains » sur un autre site de la culture du Michelsberg, à Gougenheim, en Alsace. Là, nombre des individus jetés dans les tombes de certains défunts avaient des membres sectionnés et l'un d'eux présentait des traces de brûlures, ce qui suggère qu'ils avaient été soumis à des rituels de torture. Les chercheurs ont séquencé l'ADN mitochondrial des dents de 22 individus et noté des différences entre ceux placés délibérément dans leur tombe >

> et ceux que l'on jetait à côté d'eux et qui se retrouvaient dans des positions bizarres. « Les individus en position non conventionnelle avaient des profils mitochondriaux hérités des chasseurs-cueilleurs, alors que ceux en position conventionnelle n'en avaient pas, indique Maïté Rivollat. Ces résultats ne suffisent cependant pas à lier le traitement mortuaire à l'ascendance, même si les indices disponibles pointent vers une société stratifiée interdisant le métissage entre certaines des strates de la population », avertit-elle.

La population de la culture de Michelsberg a culminé il y a 5700 ans lorsque la violence s'est intensifiée, explique Detlev Gronenborn. Les groupes voisins s'attaquaient continuellement, se massacrant réciproquement, comme en attestent leurs défenses de plus en plus élaborées, les villages abandonnés, ainsi que la découverte ponctuelle de restes humains désarticulés puis vite enterrés. « J'imagine des visages peints, des corps éparpillés dans les arbres, bref des scènes rappelant les dernières d'*Apocalypse Now* », confie-t-il. À Kapellenberg, un site de la culture de Michelsberg près de Francfort, les fortifications – encore partiellement visibles aujourd'hui – ont été relevées et renforcées à plusieurs reprises. Une palissade fut ajoutée, puis un fossé, puis, il y a 5500 ans, ce village ultraprotégé fut… abandonné.

IL Y A 4500 ANS, L'ARRIVÉE DES YAMNAYAS

Pourquoi ? À cause d'un massacre final apocalyptique, ou parce qu'une autre sorte de fléau balayait la région ? Difficile à dire mais, rappelle Detlev Gronenborn, quelque 1000 ans après l'abandon du Kapellenberg, de nouveaux venus s'y sont installés et y ont édifié deux tumulus. Ils faisaient partie des Yamnayas, des migrants entrés en Europe venus depuis la steppe eurasiatique en poussant des chars à bœufs devant eux. Leurs faibles contributions au chromosome X des Européens suggèrent une migration surtout masculine.

Kristian Kristiansen, de l'université de Göteborg, en Suède, et d'autres chercheurs ont découvert l'ADN du bacille de la peste dans les dents des Yamnayas. Cela les a amenés à proposer en 2018 que les éleveurs yamnayas ont dévasté les communautés agricoles européennes tout simplement en y semant la peste. Cette maladie a pu décimer des villages, commente Detlev Gronenborn, mais les constatations archéologiques suggèrent que les communautés agricoles d'Europe centrale étaient déjà en déclin depuis 1000 ans lorsque les Yamnayas sont arrivés au Kapellenberg. D'autres causes que la peste sont nécessaires pour expliquer ce déclin, et, pour Detlev Gronenborn, les conflits qui opposaient les groupes de paysans en font partie.

Les éleveurs yamnayas ont-ils dévasté les communautés agricoles en y semant la peste ?

Les derniers chasseurs-cueilleurs sont-ils sortis de leurs réduits forestiers avant l'arrivée des Yamnayas afin de récupérer les richesses abandonnées par les fermiers décimés ? Ils auraient alors profité de leurs animaux domestiques et de leur commerce de cuivre, jadis florissant, s'offrant ainsi une nouvelle tranche de vie en tant que collecteurs-éleveurs… C'est la théorie qui a les faveurs d'Alexey Nikitin, certains indices donnant à penser que des chasseurs-cueilleurs vivaient encore en Europe après l'arrivée des Yamnayas. En 2013, l'équipe dirigée par la paléogénéticienne Ruth Bollongino, alors à l'université Johannes-Gutenberg, à Mayence, a rapporté qu'il y a seulement 5000 ans, des chasseurs-cueilleurs et des agriculteurs ayant manifestement des cultures ancestrales différentes ont partagé une nécropole dans la grotte de Blätterhöhle, en Allemagne.

Les paléogénéticiens testent cette théorie, ainsi que bien d'autres sur ce qui a mis fin au Néolithique, en étudiant région par région les bassins génétiques de la fin de cette époque, puis croisent leurs observations avec celles des archéologues. Nous verrons ce qui en sortira, mais il est clair que ce qui ressemblait, pour les envahisseurs Yamnayas, à d'innocents villages de paysans à la population homogène, relevait en fait d'un passé complexe. L'arrivée des Yamnayas a inauguré l'âge du Bronze et la mise en place définitive des composantes génétiques de la population européenne moderne. Les populations qui vivent aujourd'hui en Europe résultent du mélange des chasseurs-cueilleurs du Mésolithique, des agriculteurs du Néolithique, des éleveurs Yamnayas de l'âge du Bronze et de nombre d'immigrés arrivés plus récemment.

L'histoire de la néolithisation de l'Europe illustre une fois de plus ce qui est aussi vrai de bien d'autres périodes de la préhistoire et de l'histoire : les gens migrent, empruntent, adaptent et usurpent. « Rien n'est statique dans l'humanité », résume Alexey Nikitin. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Rivollat *et al.*, **Ancient genome-wide DNA from France highlights the complexity of interactions between Mesolithic hunter-gatherers and Neolithic farmers,** *Science Advances*, vol. 6, article eaaz5344, 2020.

C. Cameron, **Ces esclaves qui ont façonné nos sociétés,** *Pour la Science*, n° 484, pp. 66-73, janvier 2018.

A. Beau *et al.*, **Multi-scale ancient DNA analyses confirm the Western origin of Michelsberg farmers and document probable practices of human sacrifice,** *Plos One*, vol. 12(7), article e0179742, 2017.

D. Gronenborn, **The Persistence of Hunting and Gathering : Neolithic Western Temperate and Central Europe,** dans *The Oxford Handbook of the Archaeology and Anthropology of Hunter-Gatherers,* (sous la dir. de V. Cummings *et al.*), Oxford University Press, 2014.

A. Testart *et al.*, **Les esclaves des tombes néolithiques,** *Pour la Science,* n° 396, pp. 74-80, septembre 2010.

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 :

Next2C – Service abonnements Pour La Science – 26 Bd Président Wilson - CS40032 – 67085 Strasbourg Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

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

PAG20REN

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° du magazine papier

DPV4E90

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** – 5,75€ PAR MOIS
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

PPV5E75

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

IPV7E40

2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

E-mail : ..... @ .....

(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 |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.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'ESSENTIEL

> En 1842, Christian Doppler avança que le mouvement des étoiles avait une influence sur leur couleur apparente, la fréquence des ondes lumineuses perçue par l'observateur devant être, d'après son raisonnement, modifiée.

> L'effet Doppler a été d'abord confirmé sur le son, et seulement beaucoup plus tard sur la lumière.

> Les idées de Doppler et sa carrière ont été mises à mal par un rival, Joseph Petzval.

> L'effet Doppler s'est finalement imposé et intervient aujourd'hui dans de nombreuses applications.

L'AUTEUR

DAVID NOLTE
professeur de physique et d'astronomie à l'université Purdue, dans l'Indiana, aux États-Unis

La chute et l'ascension de l'effet Doppler

L'effet d'un mouvement sur la fréquence des ondes, prédit dès 1842 par Christian Doppler, est aujourd'hui bien connu et familier. Les idées du physicien autrichien se sont pourtant heurtées à beaucoup de scepticisme et ne se sont imposées que un demi-siècle plus tard.

De toutes les découvertes éponymes issues de la physique du XIXe siècle – franges d'interférence de Young, lentille de Fresnel, cycle de Carnot, effet Faraday, équations de Maxwell, etc. –, une seule fait l'objet de mentions quasi quotidiennes : l'effet Doppler. Il s'agit du changement de fréquence de l'onde perçue par un observateur en mouvement par rapport à la source émettrice (*voir la figure page 75*). Dans sa version acoustique, c'est l'effet ressenti lorsqu'un véhicule, un train ou un avion s'approche de vous puis s'éloigne : le son passe soudainement d'un ton aigu à un ton plus grave.

Albert Einstein est peut-être le nom le plus célèbre de la physique, mais celui de Christian Doppler est probablement le plus usité. Ironie de l'histoire, ce physicien autrichien a subi les attaques d'un pompeux rival, ses idées ont été ridiculisées, son poste universitaire lui a été retiré, et il s'est vu forcé d'abandonner Vienne dans la disgrâce publique et la santé déclinante.

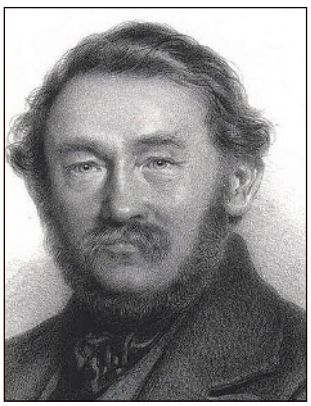
Malgré l'ignominieuse fin de vie de Doppler, l'effet qui porte son nom permet aujourd'hui aux scientifiques de connaître le mouvement de la Terre par rapport à son environnement cosmique, de refroidir les atomes dans des pièges à laser jusqu'à une fraction de degré au-dessus du zéro absolu, de détecter des planètes en orbite autour d'étoiles lointaines, de visualiser le flux sanguin dans les artères, etc. Alors pourquoi les pairs de Doppler ont-ils si longtemps rejeté son effet, et comment l'effet en question a-t-il été réhabilité et devenu à ce point familier ?

UN DÉBUT DE CARRIÈRE DIFFICILE

L'histoire commence par une carrière troublée qui a failli ne pas démarrer. Doppler est né en 1803 à Salzbourg, en Autriche, dans une vieille famille de tailleurs de pierre. À l'âge de 30 ans, son poste temporaire d'assistant en mathématiques à l'Institut polytechnique impérial et royal de Vienne (aujourd'hui >

© Marzolino/Shutterstock.com

Quand un train s'approche, son sifflement est perçu avec un ton plus aigu que lorsqu'il est immobile. Lorsqu'il s'éloigne, le ton est plus grave. Cet effet Doppler acoustique a été mis en évidence pour la première fois en 1845, lors d'une expérience où des musiciens embarqués sur un wagon ouvert ont joué une note précise le long du trajet entre Utrecht et Maarssen, aux Pays-Bas.



À gauche : Christian Doppler, probablement aux alentours de 1840. Au milieu et ci-dessus : trois des scientifiques qui ont joué un rôle important dans l'histoire de l'effet Doppler. Le Néerlandais Christoph Buys Ballot *(au milieu en haut)* a mis en évidence pour la première fois l'effet Doppler pour le son, en 1853. Le Hongrois Joseph Petzval *(ci-dessus)* s'est obstinément opposé à Doppler et à l'effet éponyme. L'Allemand Hermann Vogel *(ci-contre)* a publié en 1872 des travaux de spectroscopie du Soleil qui constituaient la première démonstration convaincante de l'effet Doppler pour la lumière.

> TU Wien) prenait fin ; mais il ne parvint pas à retrouver un poste et dut se contenter d'un emploi de comptable dans une usine de coton.

Au début du XIXe siècle, l'Empire autrichien était un État bureaucratique tentaculaire qui empilait les couches de réglementations et où il y avait pléthore de candidats compétents pour n'importe quel poste. En dépit de ses études supérieures, Doppler s'est perdu dans cet univers. Ses candidatures à des postes permanents n'ont pas été retenues et, dans le désespoir de ne jamais trouver une situation convenable, il décida d'émigrer aux États-Unis. Il vendit la plupart de ses biens pour payer son voyage et se rendit au consulat américain de Munich afin d'obtenir les documents nécessaires. Mais à son retour en Autriche, à la veille de quitter l'Europe pour un avenir incertain, il reçut une offre pour un poste d'enseignant dans un lycée de Prague, poste qu'il occupa à partir de 1835.

Doppler commença à publier des articles scientifiques et, en 1837, il fut nommé professeur supplémentaire de mathématiques supérieures et de géométrie à l'Institut polytechnique de Prague (aujourd'hui université technique tchèque) ; en 1841, il fut promu professeur titulaire de géométrie appliquée. Il y rencontra Bernard Bolzano, agitateur politique et mathématicien qui a travaillé sur des définitions rigoureuses de la notion de limite, aujourd'hui célèbre pour sa contribution au « théorème de Bolzano-Weierstrass », en topologie, qui donne une caractérisation des espaces compacts. Bolzano présidait une réunion de la Société royale des sciences de Bohême le 25 mai 1842, le jour où Doppler lut un document faisant date sur la couleur des étoiles devant une maigre assemblée constituée de seulement cinq membres de la société.

Doppler s'était passionné pour l'astronomie et pour le phénomène de l'aberration stellaire. Celui-ci a été découvert par le Britannique James Bradley en 1727 et pouvait s'expliquer par le mouvement de la Terre autour du Soleil combiné à la vitesse finie de la lumière, qui fait que la position apparente d'une étoile distante change légèrement au cours de l'année.

CHANGEMENT DE COULEUR POUR UNE ÉTOILE EN MOUVEMENT ?

En étudiant les travaux de Bradley, Doppler s'est demandé comment le mouvement relatif de la Terre influerait sur la couleur de l'étoile. En faisant une analogie simple avec un navire se déplaçant dans le même sens que les vagues ou en sens contraire, il parvint à la conclusion que la fréquence des ondes lumineuses frappant l'œil se comportait de la même façon que celle des vagues frappant la proue du navire. Il en déduisit que la couleur de la lumière serait légèrement décalée vers le bleu (augmentation

Article traduit et adapté de « The fall and rise of the Doppler effect », paru dans *Physics Today* (mars 2020, pp. 30-35), avec l'autorisation de l'American Institute of Physics.

Domaine public

de la fréquence) si l'œil se rapprochait de la source lumineuse, et vers le rouge (diminution de la fréquence) s'il s'en éloignait.

L'intérêt que Doppler portait à l'astronomie l'avait familiarisé avec les étoiles binaires, où le mouvement relatif de la source lumineuse pourrait être suffisamment important pour induire des changements de couleur. En fait, les catalogues d'étoiles comprenaient des exemples de binaires ayant des couleurs rouge et bleue complémentaires. C'est pourquoi son article, publié dans les comptes rendus de la Société royale des sciences de Bohème quelques mois après sa lecture à la société, était intitulé « Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels » (« Sur la lumière colorée des étoiles doubles et de quelques autres étoiles du ciel »). Bien que Doppler se soit trompé en supposant que le mouvement stellaire provoquerait un changement de la couleur globale d'une étoile, sa dérivation des décalages de fréquence était correcte.

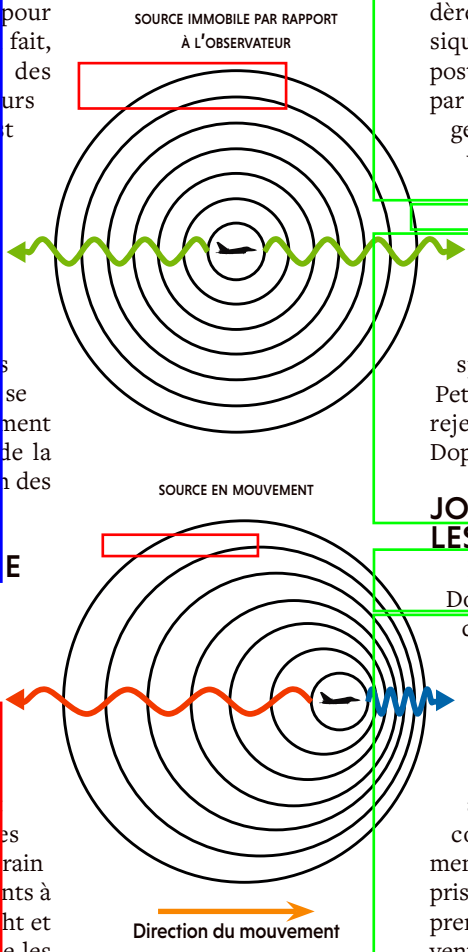
L'EFFET DOPPLER ACOUSTIQUE TESTÉ AVEC DES MUSICIENS SUR UN TRAIN

Beaucoup de ceux qui avaient entendu parler de la théorie de Doppler n'y croyaient pas. Cependant, par une froide matinée de février 1845, le scientifique néerlandais Christoph Buys Ballot, qui venait de recevoir son doctorat de l'université d'Utrecht, demanda à des musiciens d'embarquer sur un wagon de train ouvert et de souffler dans leurs instruments à vent le long de la voie ferrée entre Utrecht et Maarssen. Buys Ballot ne pensait pas que les étoiles changeraient de couleur en raison de leur mouvement, mais, n'ayant aucun moyen de tester l'effet sur la lumière, il avait décidé de le tester sur le son.

Malheureusement, les musiciens furent importunés par la grêle et la neige, ce qui les empêcha de souffler correctement dans leurs instruments. L'expérience fut donc reconduite au mois de juin, plus clément. Cette fois, les trompettistes du wagon réussirent à jouer une note stable, et les musiciens stationnés à côté des rails purent entendre une note plus haute d'un demi-ton quand le wagon s'approchait et plus basse d'un demi-ton quand il s'éloignait. L'expérience valida la théorie de Doppler pour le son. Buys Ballot publia un article décrivant l'expérience, mais il refusa tout de même d'admettre que la lumière pouvait changer de couleur, malgré l'étroite analogie entre le son et la lumière.

La prolifique production scientifique de Doppler, associée à des partisans influents qui appréciaient l'importance de son travail, attira l'attention de l'empereur d'Autriche, François-Joseph, nouvellement couronné après que son oncle eut été contraint d'abdiquer pendant les révolutions de 1848. Réformer les enseignements était une haute priorité pour certains des conseillers de l'empereur, qui le persuadèrent de fonder le premier institut de physique d'Autriche et de nommer Doppler au poste de son premier directeur. Enthousiasmé par les perspectives qui s'offraient et regorgeant d'idées, Doppler se lança dans sa nouvelle fonction.

En tant que membre de l'Académie autrichienne des sciences, il proposa un prix pour le développement de la photographie afin de faire progresser la recherche scientifique. Malheureusement, les objectifs photographiques étaient la spécialité d'un autre membre, Joseph Petzval. Ses partisans au sein de l'académie rejetèrent la proposition de prix faite par Doppler, peut-être à l'instigation de Petzval.



On considère une source qui émet une onde sinusoïdale (acoustique, lumineuse ou autre) se propageant à la même vitesse dans toutes les directions. Lorsque la source est immobile, les fronts d'onde sont (en deux dimensions) des cercles centrés sur la source et régulièrement espacés, l'espacement étant inversement proportionnel à la fréquence de l'onde. Quand la source est en mouvement, les cercles des fronts d'onde se décalent dans la direction du mouvement (car chacun est centré sur le point d'émission correspondant, lequel se déplace). On voit ainsi qu'un observateur percevra une fréquence supérieure (un décalage vers le bleu pour une onde lumineuse) s'il est situé à l'avant, c'est-à-dire si lui et la source se rapprochent, et une fréquence inférieure (un décalage vers le rouge) s'il est situé à l'arrière, c'est-à-dire si lui et la source s'éloignent. Tel est le principe de l'effet Doppler.

JOSEPH PETZVAL DÉNIGRE LES IDÉES DE DOPPLER

D'autres ennuis dus à Petzval attendaient Doppler et son effet. Le 22 janvier 1852, lors d'une réunion de l'académie, Petzval lut un texte critiquant la théorie de Doppler. Lors d'une réunion ultérieure, le 21 mai 1852, une soixantaine de membres et d'invités étaient présents afin d'entendre les arguments des deux camps. La large assistance à ce simili-procès de l'effet Doppler contraste ironiquement avec les cinq membres de la Société de Bohème qui avaient pris connaissance des idées de Doppler pour la première fois dix ans plus tôt. Dans son intervention, qui fut publiée plus tard, Petzval attaquait la théorie de Doppler tant à propos du son que de la lumière.

Petzval était d'avis qu'aucune grande science ne pouvait émerger de quelques simples lignes d'algèbre : selon lui, tous les phénomènes naturels étaient les manifestations d'équations différentielles sous-jacentes. Partant de ce principe, il proposa un principe de conservation de la période d'oscillation dans les phénomènes ondulatoires. Bien qu'ayant quelque talent en tant que mathématicien, Petzval était un piètre philosophe de la nature. Il confondit une source et un récepteur en mouvement relatif avec une source et un récepteur immobiles dans un milieu en mouvement. Selon lui, les notes jouées par un orchestre bien accordé seraient tout aussi harmonieuses pour le public lors d'une journée agitée que lors d'une journée sans vent : les notes entendues ne seraient pas modifiées. Le philosophe et physicien autrichien Ernst Mach déclara plus tard que Doppler serait d'accord avec lui sur ce point, mais il ajouta que si >

© Pour la Science, d'après www.alevelphysicsnotes.com

> l'orchestre tombait d'une grande hauteur, le public entendrait la pièce en *fa* majeur plutôt qu'en *mi* majeur.

L'attaque de Petzval déconcerta Doppler. Le principe de l'effet Doppler avait déjà été vérifié pour les ondes acoustiques par Buys Ballot et par John Scott Russell, un ingénieur des chemins de fer et de la marine britannique, qui sera le découvreur des solitons, ou ondes solitaires, se propageant dans un canal. En outre, en France, Hippolyte Fizeau avait proposé la même théorie pour la lumière en 1848. N'étant pas au courant des travaux de Doppler, il avait correctement prédit que l'effet serait observable dans les décalages de fréquence des étroites raies spectrales d'émission des étoiles en mouvement, et non dans leur changement global de couleur. Fizeau présenta ses résultats lors d'une conférence à la Société philomathique de Paris le 29 décembre 1848. C'est pourquoi on parle aussi d'« effet Doppler-Fizeau ».

PETZVAL GAGNE LA PARTIE

Doppler répliqua à l'attaque de Petzval en demandant simplement à son adversaire si un phénomène observé doit être considéré comme inexistant s'il ne peut être déduit d'équations différentielles. Aussi raisonnable que soit cet argument, une majorité de membres de l'académie se rangea du côté de Petzval, et seuls quelques autres, dont Andreas von Ettingshausen, prirent la défense de Doppler.

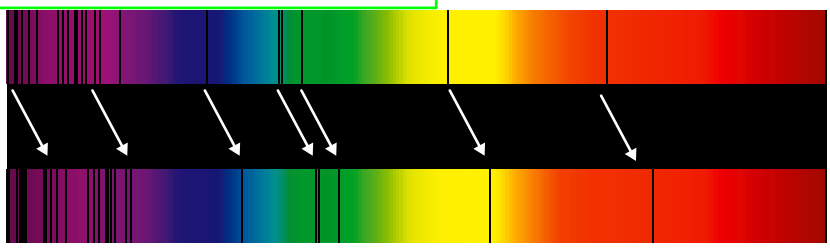
La décision finale de l'académie devait être prise lors d'une réunion le 21 octobre 1852. Une fois de plus, Petzval fut autorisé à présenter ses arguments. Mais Doppler ne put y assister : le stress et la déception causés par l'affaire eurent des conséquences négatives sur sa santé, qui s'effondra après des années de lutte contre la tuberculose. Lorsque les membres de l'académie apprirent qu'il préparait un voyage à Venise en vue d'améliorer sa santé, certains considérèrent à tort que Doppler se retirait de la mêlée et qu'il concédait sa défaite. Les membres se prononcèrent en faveur de Petzval et déclarèrent que la théorie de Doppler devait être « abandonnée, puisqu'elle est fausse, comme cela a été démontré ».

Dix jours plus tard, Doppler fut officiellement démis de ses fonctions de directeur de l'Institut de physique de Vienne et remplacé par Ettingshausen. Mais Doppler était déjà en route pour Venise, où il mourut de sa maladie quatre mois plus tard seulement.

ERNST MACH CONFIRME L'EFFET DOPPLER ACOUSTIQUE

C'était peut-être la fin de l'affaire à l'Institut de physique de Vienne, mais Ettingshausen n'était pas prêt à abandonner l'effet Doppler simplement parce qu'un comité avait déclaré qu'il n'existait pas. Plusieurs années plus tard, il proposa à son étudiant Ernst Mach de construire un dispositif de laboratoire destiné à démontrer directement l'effet Doppler acoustique. Mach construisit et testa un système à anche tournante où des tubes acheminaient de l'air à celle-ci et la faisaient vibrer à sa fréquence naturelle, tout en dirigeant le son produit vers un observateur immobile. Pendant que le dispositif tournait, l'anche s'approchait et s'éloignait alternativement de l'observateur, qui pouvait entendre les tonalités qui montaient et descendaient rapidement.

Petzval continua cependant à nier l'effet et reprocha à Mach une stupidité liée à son jeune âge et de gâcher ses chances de carrière en s'accrochant à une théorie abandonnée. En réponse, Mach conçut un appareil encore plus ingénieux, qui permettait d'entendre dans une direction les tons montants et descendants du son et dans une direction orthogonale, dans laquelle l'anche et l'observateur sont relativement stationnaires, un son de hauteur constante. Cette configuration démontrait même le principe de conservation des fréquences cher à Petzval. Malgré ces démonstrations, Petzval n'était jamais satisfait et, au cours des années suivantes, Mach dut subir la confusion et l'incrédulité persistantes de beaucoup d'autres, jusqu'à ce qu'il refuse finalement de discuter plus avant de l'effet.



Décalage vers le rouge des raies d'absorption dans le spectre visible du superamas de galaxies BAS11, comparé au spectre du Soleil. Ce décalage est très important, la vitesse de récession du superamas, due à l'expansion de l'Univers, étant très grande.

L'ÉMERGENCE DE L'EFFET DOPPLER OPTIQUE

Bien que les indices expérimentaux en faveur de l'effet Doppler acoustique se soient régulièrement accumulés, les démonstrations correspondantes de l'effet Doppler optique ont tardé à émerger. La percée eut lieu en 1868 grâce à William Huggins. Ce Britannique était l'un des pionniers de la spectroscopie appliquée à l'astronomie et était célèbre pour avoir découvert que certaines nébuleuses étaient constituées de gaz atomiques, tandis que d'autres étaient formées d'étoiles. Huggins correspondit avec James Clerk Maxwell pour confirmer le bien-fondé des arguments de Doppler, que Maxwell corrobora en utilisant sa nouvelle théorie électromagnétique. En mai 1868, Huggins lut un article à la Société

© Georg Wiora/Kes47 (CC BY-SA 3.0)

royale de Londres faisant état des décalages observés dans les raies spectrales des étoiles, en particulier Sirius.

Le rapport de Huggins sur l'effet Doppler pour Sirius n'était pas tout à fait scientifiquement exact, mais il convainquit la communauté scientifique de l'existence de l'effet Doppler optique. Un an plus tard seulement, l'Anglais Joseph Norman Lockyer, codécouvreur de l'hélium, observa un décalage des raies spectrales des protubérances solaires – des masses de gaz lumineuses éjectées du Soleil à grande vitesse. Lockyer ne mentionna pas l'effet Doppler associé, et comme il n'y avait pas de méthode pour confirmer la vitesse des protubérances, ses observations n'ont pas constitué une preuve décisive de l'effet Doppler optique.

Un astronome allemand, Hermann Vogel, commença à travailler avec un nouveau spectrographe qui projetait le spectre lumineux d'un point du côté gauche du Soleil à proximité du spectre d'un point situé sur le côté droit de l'astre. Cela permettait de doubler l'effet visible du décalage Doppler sur les fines raies spectrales, et Vogel put calculer une vitesse de rotation équatoriale du Soleil qui correspondait étroitement à la valeur déduite du mouvement des taches solaires. Ces résultats furent publiés en 1872 et constituèrent la première preuve concluante de l'effet Doppler optique.

LA PREUVE PAR LA SPECTROSCOPIE

Vogel s'efforçait également d'améliorer les mesures de la vitesse radiale des étoiles – leur vitesse le long de la ligne de visée – et était parfaitement conscient que les nombreuses valeurs citées par Huggins et d'autres pour les vitesses stellaires étaient du même ordre que les incertitudes de mesure. L'observation des raies spectrales simplement au moyen des yeux était le principal problème. Or les astronomes avaient commencé à utiliser des plaques photographiques sur les télescopes, et Vogel adapta cette nouvelle technique au problème des vitesses radiales. En 1887, il installa des dispositifs photographiques sur le télescope et le spectrographe de l'Observatoire de Potsdam et fit des observations sur les décalages Doppler des raies spectrales des étoiles jusqu'en 1890. Vogel publia un premier rapport d'étape en 1891, et son article définitif de 1892 livra les premières valeurs précises des vitesses radiales stellaires.

Cinquante ans après la lecture par Doppler de son article à la Société royale des sciences de Bohême, l'effet Doppler était devenu un ingrédient clé de l'astrophysique quantitative. En 1901, Aristarkh Bélopolsky, un astronome russe, parvint finalement à démontrer le phénomène en laboratoire, grâce à un dispositif comportant des miroirs en rotation rapide.

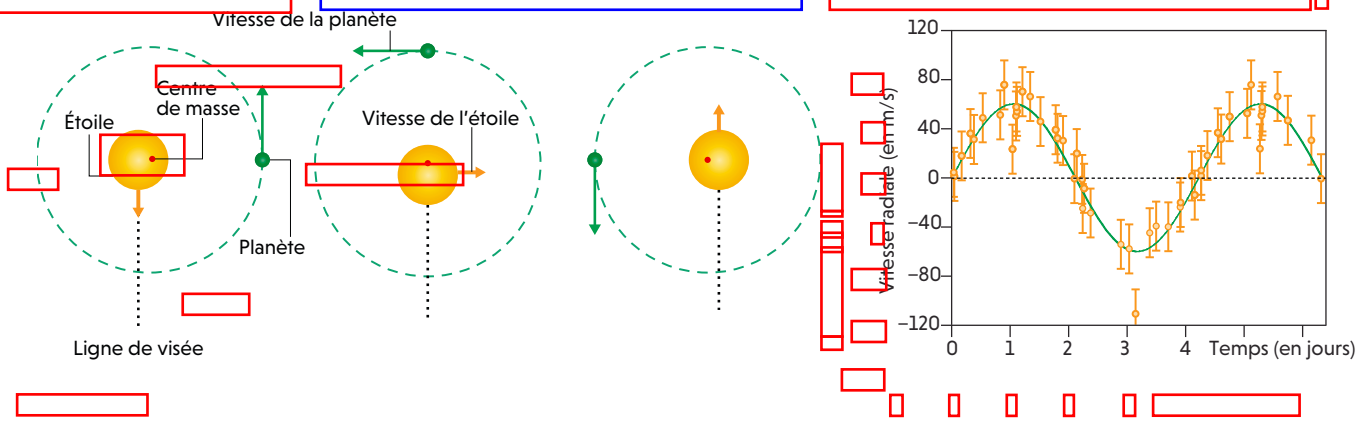
LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ S'IMMISCE

Lors de la réunion de janvier 1887 de la Société royale des sciences à Göttingen, en Allemagne, Woldemar Voigt présenta un article où il obtenait l'expression de l'effet Doppler optique longitudinal dans un milieu incompressible. C'était une réaction aux résultats publiés en 1886 par les physiciens américains Albert Michelson et Edward Morley de leurs mesures du coefficient d'entraînement de Fresnel (censé caractériser l'entraînement de l'« éther », support supposé de la propagation de la lumière, par un milieu matériel en mouvement) en utilisant une version améliorée de l'expérience de Fizeau de 1851, où de la lumière se propageait à travers de l'eau en mouvement.

Voigt fit remarquer que l'équation régissant la propagation des ondes lumineuses était invariante sous certaines transformations des coordonnées dans lesquelles les physiciens d'aujourd'hui reconnaissent immédiatement, à un facteur d'échelle près, la transformation de Lorentz de la théorie de la relativité restreinte (qui décrit la transformation des coordonnées d'espace et de temps entre deux référentiels animés l'un par rapport à l'autre d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme).

Ainsi, Voigt obtint l'expression de l'effet Doppler longitudinal en tenant compte sans le savoir d'effets relativistes, et cela quelques >

La première détection d'une planète hors du Système solaire a été réalisée en 1995 en mettant en évidence, grâce à l'effet Doppler sur les raies d'absorption dans le spectre de la lumière, des variations périodiques de la vitesse radiale de l'étoile 51 Pegasi. Ces variations, qui sont d'environ ± 60 mètres par seconde d'après les mesures, sont dues au mouvement orbital de l'étoile autour du centre de masse du système constitué de l'étoile et d'une planète ayant à peu près la masse de Jupiter. Le schéma ci-dessous montre quelques étapes successives de ce mouvement.



© Pour la Science, d'après schéma de David Nolte, graphique adapté de M. Mayor et D. Queloz, Nature, vol. 378, pp. 355-359, 1995

> mois avant la célèbre expérience de Michelson et Morley de 1887 qui était censée mettre en évidence le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, et deux ans avant que l'Irlandais George FitzGerald ne propose, pour expliquer le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley, la contraction de la longueur des objets dans le sens de leur déplacement. L'approche de Voigt pour obtenir l'expression de l'effet Doppler est encore utilisée dans les manuels d'aujourd'hui.

Vingt ans plus tard, Einstein compléta la description relativiste de l'effet Doppler en prédisant l'effet transversal, relatif à une source se déplaçant perpendiculairement à la ligne de visée d'un observateur. Cet effet n'avait été prédit ni par Doppler ni par Voigt.

UNE PLÉTHORE D'APPLICATIONS EN PHYSIQUE, ASTRONOMIE, MÉDECINE…

Près de deux siècles se sont écoulés depuis que Doppler a publié son idée simple fondée sur l'analogie avec un navire qui rencontre une série de vagues océaniques, et l'effet Doppler est aujourd'hui à la base des dispositifs les plus sensibles de mesure optique des systèmes dynamiques. Bien au-delà du radar Doppler des météorologistes, ses applications s'étendent des très petites échelles, avec le refroidissement Doppler des atomes en laboratoire, aux très grandes, avec les mesures par effet Doppler du mouvement d'oscillation des étoiles dans la recherche d'exoplanètes.

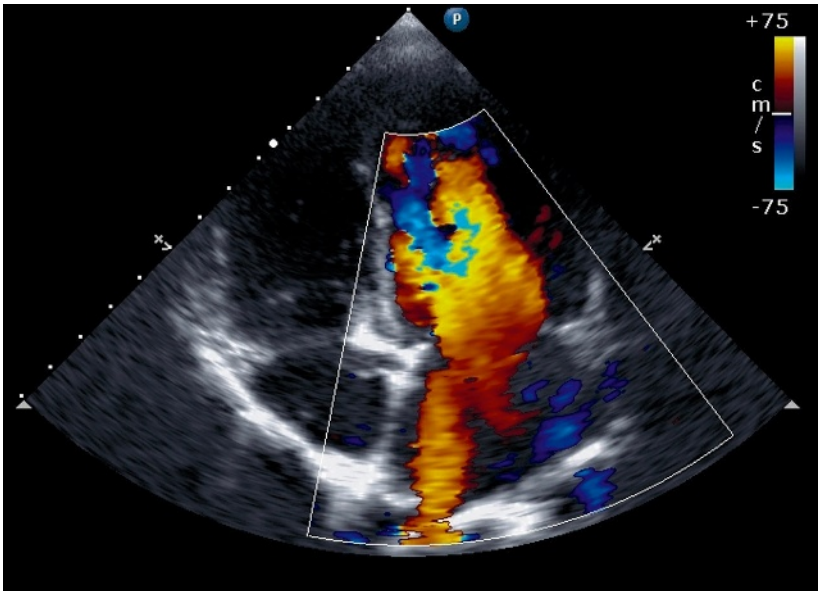
Jusqu'au lancement du satellite *Kepler* en 2008, la plupart des exoplanètes avaient été découvertes en détectant les décalages par effet Doppler dus à de petites variations de vitesse radiale lorsqu'une étoile et une exoplanète gravitent autour de leur centre de masse (*voir la figure page 77*). C'est de cette façon que Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, mirent en évidence en 1995 la première exoplanète, en orbite autour de l'étoile 51 Pegasi, ce qui leur a valu le prix Nobel de physique en 2019. On peut ainsi détecter des vitesses radiales aussi faibles que 3 mètres par seconde si on les mesure pendant de nombreuses années.

À plus grande échelle, les courbes donnant la vitesse des étoiles en fonction de leur distance au centre de leur galaxie fournissent parmi les preuves les plus convaincantes de l'existence de la matière noire, et on les obtient par spectroscopie Doppler. On détermine également les vitesses relatives des galaxies elles-mêmes grâce à l'effet Doppler. À une échelle encore plus grande, l'« effet Hubble » est un décalage vers le rouge de nature cosmologique, dû à l'expansion de l'espace plutôt qu'à un véritable effet Doppler. Mais la détermination de la vitesse de la Terre par rapport au rayonnement du fond diffus cosmologique présent localement, soit 370 kilomètres par seconde, repose sur l'effet Doppler. Par ailleurs, les mouvements locaux dans l'Univers primitif ont conduit, par effet Doppler, à des fluctuations de petite échelle visibles dans le rayonnement du fond diffus cosmologique, anisotropie qui aide à caractériser la distribution de masse dans l'Univers primordial et la fraction qu'y représente la matière noire.

En biologie et en médecine, l'effet Doppler acoustique est utilisé en imagerie par ultrasons (l'échographie), la première démonstration ayant été faite dans les années 1960 pour la mesure du débit sanguin. L'imagerie Doppler des mouvements à l'intérieur du corps, notamment pour le contrôle de la santé cardiaque du fœtus dans le cadre des soins prénataux, est aujourd'hui une technique de routine. Quant à l'effet Doppler optique, il permet en tomographie optique de détecter les directions dans lesquelles le sang circule.

Par ailleurs, les mouvements à l'intérieur des cellules dans les tissus vivants produisent de faibles décalages Doppler, atteignant la dizaine de millihertz pour des vitesses de plusieurs nanomètres par seconde. Or la détection de subtils changements dans les vitesses intracellulaires pourrait aider les médecins à choisir les meilleurs traitements pour les patients atteints de cancer.

Ainsi, l'effet Doppler a permis à son découvreur d'atteindre une forme d'immortalité qu'il n'aurait jamais pu imaginer au moment où il quittait Vienne pour son dernier voyage en Italie – pendant qu'il regardait probablement le clocher de la cathédrale de Saint-Étienne s'éloigner avec un imperceptible décalage vers le rouge de quelques mégahertz. ■



L'échographie Doppler est aujourd'hui une technique d'imagerie médicale répandue, par exemple pour des examens cardiaques *(comme sur cette image)* ou pour visualiser la circulation sanguine dans les vaisseaux.

BIBLIOGRAPHIE

Z. Li *et al.*, **Doppler fluctuation spectroscopy of intracellular dynamics in living tissue**, *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 36 (4), pp. 665-677, 2019.

H. Choi *et al.*, **Biodynamic digital holography of chemoresistance in a pre-clinical trial of canine B-cell lymphoma**, *Biomed. Opt. Express*, vol. 9(5), pp. 2214-2228, 2018.

J. B. Hearnshaw, **The Analysis of Starlight : Two Centuries of Astronomical Spectroscopy**, Cambridge University Press, 2014.

P. M. Schuster, **Moving the Stars : Christian Doppler, His Life, His Works and Principle, and the World After**, Living Edition, 2005.

A. Eden, **The Search for Christian Doppler**, Springer, 1992.

© kalewa / shutterstock.com

AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

En cette année du 150e anniversaire de la naissance de Jean Perrin, prix Nobel de physique, à l'origine de la création du Palais de la Découverte, le prix Jean Perrin 2019 sera décerné à Hélène Fischer, enseignante-chercheuse au sein de l'Institut Jean-Lamour, unité mixte de recherches Université de Lorraine/CNRS à Nancy.

Hélène Fischer est l'auteure de l'exposition *Magnétique* présentée au Palais de la découverte jusque fin 2020. La remise de prix sera suivie de la conférence « Le magnétisme à l'épreuve de la médiation scientifique », par Hélène Fischer.

ORGANISÉ PAR

AVEC LE SOUTIEN DE POUR LA SCIENCE

remise du prix Jean Perrin

accès gratuit sur réservation

— 9 octobre à 19h

Palais DÉCOUVERTE

Palais DÉCOUVERTE

magnétisme : large champ de recherches

conférences

accès gratuit sur réservation

— 10 octobre à 14h

©123RF

AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

La spintronique succède à l'électronique en utilisant une propriété quantique de l'électron, le spin. Quels retours espérer de ces recherches dans le domaine du stockage des données ?

Stockage des données : l'ère de la spintronique
Hélène Fischer, enseignante chercheuse à l'institut Jean-Lamour, CNRS, université de Lorraine.

Stocker plus, plus vite et plus sobre
Stéphane Mangin, enseignant chercheur à l'institut Jean-Lamour, CNRS, université de Lorraine.

AVEC LE SOUTIEN DE POUR LA SCIENCE

Accès gratuit sur réservation

Informations palais-decouverte.fr

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*

DU FLOU ET DU FAUX EN MATHÉMATIQUES

Les mathématiques sont la plus précise et la plus exacte des sciences… Leur histoire nous montre pourtant de nombreux exemples d'erreurs importantes. Comment limiter les risques d'en produire d'autres?

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)

En voulant aller vite et aussi loin que possible, les mathématiciens prennent des risques qu'ils ne dominent pas toujours et qui les conduisent parfois à énoncer des théorèmes faux, ou des théorèmes vrais s'appuyant sur des démonstrations fausses. Avec la complexité croissante des domaines abordés, de nouvelles méthodes deviennent nécessaires pour traquer les erreurs.

UNE CRISE DE LA REPRODUCTIBILITÉ

Depuis une quinzaine d'années, divers journaux scientifiques de premier rang ont alerté sur le problème de la reproductibilité en science. En mai 2016, la revue britannique *Nature* publiait une étude où il apparaissait que 70 % des chercheurs qu'elle avait interrogés déclaraient avoir au moins une fois échoué en tentant de reproduire un résultat publié qui les intéressait.

Les mathématiques ne semblaient pas concernées; pourtant, vérifier une démonstration publiée est une forme de « reproduction ». Quand un chercheur propose un résultat et indique sa démonstration, il prétend disposer d'une argumentation le conduisant de manière certaine à la conclusion; lire et contrôler ses affirmations, c'est reproduire cette expérience mentale. Le problème de la reproductibilité concerne donc les mathématiques et on va voir qu'il y est particulièrement délicat.

On pourrait croire que tout mathématicien compétent peut lire tout article de mathématiques et vérifier les démonstrations qui y sont présentées. C'est faux pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la lecture d'un article mathématique exige souvent une bonne connaissance des concepts, définitions, résultats antérieurs et méthodes du sujet auquel il se rattache. Depuis que l'étendue des domaines mathématiques s'est considérablement accrue au XX^e siècle, chaque chercheur n'est compétent que pour une faible proportion des milliers d'articles de mathématiques publiés chaque année.

Il y a cependant une raison plus profonde qui rend difficile la vérification même pour un spécialiste: une démonstration n'est que l'indication plus ou moins détaillée d'un cheminement argumentatif, avec parfois des passages importants omis ou des raccourcis dangereux.

Pour lire étape par étape une démonstration, il faut ainsi: être très bien informé du domaine; être prêt à travailler longuement sur certains pas du raisonnement qui exigent des calculs non explicités ou le traitement de cas non détaillés; parfois aussi, programmer des vérifications par ordinateur car c'est inconcevable autrement; enfin, dans certains cas, être aussi génial que l'auteur, et en mathématiques il y a d'exceptionnels chercheurs aux capacités au-dessus de la moyenne qui n'ont pas conscience qu'il faut expliquer des points qui leur semblent évidents… et qui ne le sont que pour eux.

De cette situation, il résulte que de nombreuses erreurs sont commises, publiées et ignorées parfois assez longtemps. Plusieurs livres ont été consacrés aux erreurs en mathématiques, mais on réalise aussi des progrès sensibles pour contrôler et corriger les résultats les plus importants.

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

LE PARCOURS DU CAVALIER

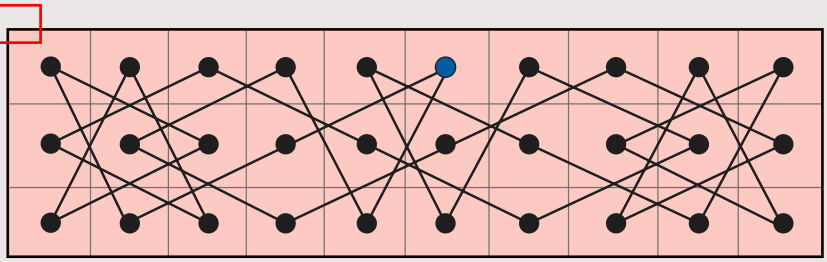
1

Rechercher si un cavalier du jeu d'échecs peut parcourir toutes les cases d'un damier $m \times n$ sans passer deux fois par la même case et en revenant à son point de départ (parcours fermé) peut sembler un problème de moindre intérêt. Pourtant, on s'y est intéressé depuis le xe siècle en Inde et Leonhard Euler y consacra un article assez long (« Solution d'une question curieuse qui ne paraît soumise à aucune analyse », *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres*, vol. 15, pp. 310-337, année 1759, Berlin 1766, http://eulerarchive.maa.org/docs/originals/E309.pdf).

Parmi les questions les plus simples qui se posent, il y a celle des échiquiers de taille $3 \times n$. Lorsque n est impair, il n'y a pas de solution car, plus généralement, il n'y a pas de solution si n et m sont impairs (trouverez-vous pourquoi ?). En revanche, pour tous les nombres pairs n à partir de 10, il y a des solutions (*voir la figure ci-dessus*) contrairement à ce qu'affirme Euler.

Son erreur ne fut corrigée qu'un siècle et demi plus tard, en 1917, par Ernest Bergholt. Pour ceux que ce type de problèmes intéresse, le site très complet www.mayhematics.com/t/t.htm est à consulter.

Il est remarquable que le problème suscite encore des travaux mathématiques, par exemple la thèse de master d'Alfred Brown, « Knight's tour and Zeta function », soutenue en 2017 à l'université de l'État de San José, aux États-Unis.



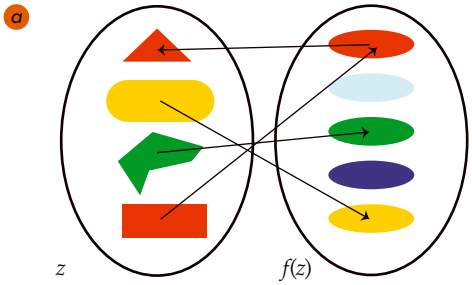
MÉCANIQUEMENT VÉRIFIABLES : LES PREUVES FORMELLES

Il existe plusieurs notions de « preuve formelle » qui, quand elles sont écrites, sont vérifiables mécaniquement, c'est-à-dire par un programme informatique. Malheureusement, ce ne sont pas ces preuves formelles qu'écrivent les mathématiciens dans leurs articles, car elles seraient trop longues et masqueraient les idées importantes dans un fouillis d'arguments logiques et de microcalculs.

Pour David Ruelle, physicien-mathématicien à l'IHES, près de Paris, « les mathématiques humaines consistent en fait à parler de preuves formelles, et non à les écrire réellement. Le mathématicien affirme de manière assez convaincante qu'il existe un certain texte formel aboutissant aux résultats qu'il propose, et qu'il serait possible de l'expliciter totalement, mais il ne le fait pas car ce serait un travail difficile inadapté au cerveau humain, qui n'est pas doué pour vérifier qu'un long texte formel est exempt d'erreurs. Les mathématiques humaines sont une sorte de danse autour d'un texte formel non écrit, qui, s'il était écrit, serait illisible. »

Le problème des erreurs mathématiques n'est pas nouveau, d'autant que les notions de preuve formelle qui permettent de mettre tout le monde d'accord – nous allons y revenir – n'existent que depuis le début du xxe siècle. Tout au long de son histoire, les mathématiques ont été confrontées aux croyances en des résultats inexacts, ou à l'illusion de tenir une démonstration pour un énoncé vrai, mais qui en réalité n'est pas démontré du fait d'éléments manquants ou faux dans le raisonnement, ou parfois à cause >

2



LA NOTION DE FONCTION CHEZ EULER

Plus ennuyeuse que la question du cavalier, où Euler a commis une erreur ponctuelle, la façon dont il a traité le concept de fonction était le centre d'une ambiguïté et même d'une contradiction puisqu'il souhaitait à la fois disposer d'un concept proche de celui de polynôme et énoncer des résultats valables pour une large classe de fonctions, sans réussir à les définir précisément. Ou plutôt en proposant une définition manquant de clarté : « Une fonction est une expression analytique composée d'une manière quelconque de cette quantité variable et de nombres ou de quantités constantes » (*Introductio in analysin infinitorum*, Marcum-Michaelem Bousquet & socios, 1748).

Aujourd'hui, une fonction est définie comme une relation – notion ensembliste précise – qui, à tout point d'un ensemble de départ, en associe un dans l'ensemble d'arrivée *(a)*, sans aucune contrainte particulière. Or les théorèmes de l'analyse qu'Euler s'est appliqué à préciser ne concernent que des classes réduites de fonctions, comme celles développables en série entière *(b)*. On a là un exemple de manque de rigueur apparemment grave qui cependant n'empêche pas les progrès d'un domaine mathématique qui ne devient logiquement parfait que plus tard (voir J. Dhombres, « Les présupposés d'Euler dans l'emploi de la méthode fonctionnelle », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 40(2), pp. 179-202, 1987).

> de concepts mal éclaircis comme celui de nombre ou de fonction.

Voici rapidement quelques exemples pris chez les plus grands mathématiciens et qui montrent que personne n'atteint la perfection en mathématiques.

En Grèce, au VI^e siècle avant notre ère, le mystérieux Pythagore soutenait que le rapport de deux grandeurs est toujours équivalent au rapport de deux nombres entiers. Les démonstrations découvertes à son époque de l'incommensurabilité de la diagonale d'un carré avec son côté, ou en langage moderne de l'irrationalité de $\sqrt{2}$, ont semble-t-il troublé les membres de son école. Notons cependant que les historiens sont unanimes pour considérer que la correction de l'erreur de Pythagore a été l'une des étapes les plus importantes du progrès des mathématiques.

TOUT EST PRESQUE PARFAIT CHEZ EUCLIDE

Deux siècles plus tard environ, Euclide nous a laissé un traité, les *Éléments*, d'une étonnante maturité et d'une rigueur telle qu'aujourd'hui encore nous pouvons lire, comprendre et approuver l'essentiel de ses démonstrations. Pourtant, les lecteurs attentifs d'Euclide ont repéré une série d'omissions, par exemple dans sa formulation des axiomes de la géométrie, ou d'imprécisions rendant fausses ou incomplètes certaines de ses démonstrations. L'utilisation de figures le conduit à des arguments qui ne sont valides que pour une disposition particulière des éléments en présence. Parfois aussi, il considère comme évidentes des propriétés qu'aujourd'hui nous nous imposons de démontrer, comme l'existence d'un point commun à deux courbes (droites, cercles, etc.) qui se croisent. Ce problème lié à la continuité se pose dès la proposition 1 du livre 1 des *Éléments*, quand Euclide construit avec un compas un triangle équilatéral sur un segment AB donné.

EULER, «NOTRE MAÎTRE À TOUS»

Sautons deux millénaires pour évoquer quelques-uns des génies de l'époque moderne. Le mathématicien et physicien suisse Leonhard Euler (1707-1783) est peut-être le plus grand: il a écrit un nombre considérable de mémoires mathématiques réunis aujourd'hui dans les soixante-dix tomes de ses œuvres complètes (http://eulerarchive.maa.org). Il a fait considérablement progresser l'analyse et Pierre-Simon de Laplace conseillait: «Lisez Euler, lisez Euler, c'est notre maître à tous.» Pourtant, ce prodigieux mathématicien s'est parfois trompé en indiquant par exemple qu'il n'existait jamais de cheminement fermé d'un cavalier sur un échiquier rectangulaire $3\times n$ alors qu'il en existe par exemple pour les échiquiers 3×10 (*voir l'encadré 1*).

La rigueur des raisonnements d'Euler est parfois insuffisante et l'on considère aujourd'hui comme incomplète sa démonstration de 1749 du «théorème fondamental de l'algèbre» sur les racines d'un polynôme. La façon dont il utilise la notion de fonction, qu'il assimile plus ou moins à des polynômes de degré fini ou infini, manque de rigueur et même de clarté (*voir l'encadré 2*) ; c'est seulement au

3 LES CAUSES DES ERREURS

Aujourd'hui, les raisons de la présence d'erreurs parfois persistantes dans les travaux publiés par les mathématiciens sont multiples et peuvent être classées de la façon suivante.

1) Les procédures de contrôle avant publication sont très imparfaites. Certaines revues cherchent à publier le plus possible et n'exercent pas de filtre sérieux avant d'accepter les articles qu'elles publient. Même quand elles sont très rigoureuses, les revues confient l'expertise à des mathématiciens qui ne sont pas rémunérés pour leur travail et restent anonymes, ce qui n'est peut-être pas la meilleure façon d'inciter ces experts à un travail approfondi de vérification.

2) Certains domaines sont très spécialisés et les travaux publiés ne sont connus que de très peu de chercheurs et donc très peu contrôlés ou pas du tout après leur publication. Une erreur présente dans un article pourra donc rester ignorée longtemps.

3) Certains domaines donnent lieu à des démonstrations extrêmement longues et terriblement difficiles, qui nécessitent un travail considérable de contrôle. Cet examen ne peut être fait sérieusement qu'avec l'aide d'assistants informatiques de preuve, ce qui, pour certaines démonstrations, est encore difficile. Ainsi, il a fallu plusieurs années pour formaliser et valider la preuve par Thomas Hales de la démonstration de la conjecture de Kepler sur l'empilement le plus compact des sphères dans l'espace.

XIXe siècle que l'on saura reprendre son précieux travail sur ces sujets et les mettre parfaitement en ordre.

Nous ne reviendrons pas sur le cas d'Augustin Cauchy et de son célèbre énoncé affirmant à tort qu'une limite de fonctions continues est aussi une fonction continue (http://fredrickey.info/hm/CalcNotes/CauchyWrgPr.pdf), ni sur Henri Poincaré et son mémoire faux qui lui valut le prix en l'honneur du roi Oscar de Suède (https://journals.openedition.org/lettre-cdf/1103) et qu'il fit réimprimer à ses frais après correction.

David Hilbert, lui aussi considéré comme l'un des plus grands mathématiciens et logiciens, a laissé un grand nombre de petites erreurs dans ses articles. Lorsqu'on décida, pour publier ses œuvres complètes, de les nettoyer de tout ce qui devait être remis sur pied, trois ans furent nécessaires à Olga Taussky-Todd pour réaliser le travail. Hilbert se trompa aussi une fois gravement en proposant une démonstration erronée de l'« hypothèse du continu », selon laquelle il n'y a pas d'infini intermédiaire entre celui des entiers et celui des nombres réels.

ÉCRIRE LES DÉMONSTRATIONS DANS LE LANGAGE DE LA LOGIQUE

Le développement de la logique a abouti au début du XXe siècle à l'idée qu'une démonstration mathématique correcte peut être contrôlée mécaniquement, à condition de l'écrire dans un langage dont les premières esquisses furent proposées par Alfred Whitehead et Bertrand Russell dans les trois volumes des *Principia Mathematica* (1910-1913). En complétant légèrement la méthode des *Principia* dont la syntaxe de base n'est pas totalement fixée, on aboutit à la notion de « système formel » aujourd'hui au cœur de la logique mathématique. C'est elle qui donne son sens plein aux célèbres théorèmes d'incomplétude de Kurt Gödel, affirmant qu'aucun système formel ne sera jamais assez puissant pour toutes les mathématiques et qu'il sera donc toujours nécessaire de rechercher de nouveaux axiomes.

La précision absolue rendue possible par les systèmes formels aurait dû mettre fin aux erreurs en mathématiques. Ce n'était qu'illusion, car il est très difficile en pratique d'écrire ces textes mécaniquement vérifiables et qui fournissent d'absolues certitudes. Aujourd'hui, on a conçu des programmes informatiques, des « assistants de preuve », qui mettent au point ces preuves. Ces systèmes ne trouvent pas seuls de nouvelles démonstrations, mais aident les mathématiciens à écrire des démonstrations incontestables.

Grâce à eux, on a formalisé une part importante des mathématiques de base, ce qui >

© Manuel Eberl

4

LES ASSISTANTS DE PREUVE CORRIGENT LES ERREURS

Les systèmes informatiques dénommés « assistants de preuve » permettent aux mathématiciens d'écrire des démonstrations formelles, donc parfaitement complètes sans qu'aucune erreur ne puisse subsister. Ces logiciels ont-ils permis de corriger des erreurs passées inaperçues ? Dans certains cas oui (voir le cas de la preuve ontologique de Gödel dans le texte de l'article). Manuel Eberl est un expert qui travaille depuis des années à écrire des démonstrations en utilisant l'assistant de preuves Isabelle/HOL. Il témoigne de son travail :

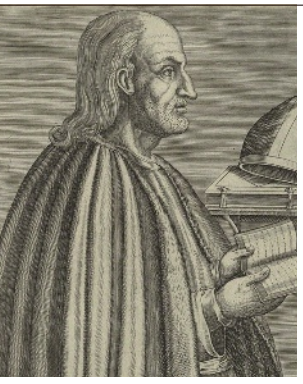
« Normalement, il faut une compréhension très approfondie d'une preuve sur papier pour la formaliser et il faut réfléchir à la façon de s'y prendre pour la formaliser. [...] Si vous formalisez une démonstration particulière comme celle du théorème des nombres premiers [...], vous ne découvrirez probablement pas que tout est faux et que tout s'effondre, mais vous rencontrerez des petits problèmes.

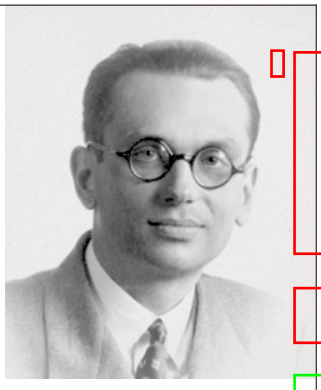
J'ai trouvé des "erreurs" dans de nombreuses démonstrations, y compris quand elles étaient publiées dans des manuels scolaires ou des articles. La plupart de ces erreurs sont faciles à corriger et la plupart des mathématiciens les considéreraient probablement comme sans gravité. Certaines sont identifiées en quelques jours, d'autres nécessitent en fait de changer les définitions, d'ajouter des hypothèses ou de modifier l'énoncé du théorème. La plupart des "erreurs" entrent dans les catégories suivantes.
- Des arguments étonnamment non triviaux sont déclarés faciles et sans importance. [...]
- Des cas sont omis.
- Des erreurs arithmétiques sont commises, comme multiplier les deux côtés d'une inégalité par une constante dont on ne vérifie pas qu'elle est positive.
- Des hypothèses non indiquées sont utilisées subrepticement.

Je suis conscient que les mathématiciens ont souvent un point de vue indulgent. [...] Les types d'erreurs que je mentionne sont en général jugés insignifiants, et on pense que quelqu'un les aurait corrigées même en l'absence d'un système informatique, et donc que finalement les théorèmes et démonstrations incriminés sont corrects en un sens, puisque les problèmes identifiés sont mineurs.

Cependant, je ne suis pas d'accord avec cela. Je veux que mes démonstrations soient aussi rigoureuses que possible. Je veux être certain de n'avoir manqué aucune hypothèse. »
(Pour le texte complet de Manuel Eberl, voir : https://mathoverflow.net/questions/291158/proofs assistant/312661)

Manuel Eberl est chercheur à l'université technique de Munich, en Allemagne.





5 LA PREUVE ONTOLOGIQUE

Saint Anselme de Cantorbéry (1033-1109) *(ci-dessus à gauche)*, puis Gottfried Leibniz (1646-1716) *(au milieu)*, puis le logicien autrichien Kurt Gödel (1906-1978) *(à droite)* ont chacun à leur tour proposé des raisonnements utilisant uniquement des considérations logiques pour conclure que Dieu existe.

Le raisonnement ontologique d'Anselme dans sa version grossière est : « Dieu possède toutes les qualités, donc la qualité d'existence, donc Dieu existe. » Un peu plus précisément : « Dieu, par définition, est ce dont on ne peut rien concevoir de plus grand. Dieu existe dans l'entendement humain. Si Dieu existe dans l'entendement humain, nous pouvons l'imaginer plus grand, considérant qu'il existe aussi dans la réalité. Par conséquent, Dieu existe. »

Une version plus élaborée a été donnée par Leibniz et c'est elle que Gödel a tenté encore de perfectionner. Ces versions sont plus complexes et utilisent des notions de logique modale (comme « il est nécessaire », « il est possible », etc.), logiques dont des versions formelles ont été proposées et étudiées dès 1918 par Clarence Lewis, puis approfondies tout au long du XX^{e} siècle.

La validité de ces raisonnements repose sur l'acceptation individuelle des axiomes et définitions de départ qu'on peut discuter à l'infini. Elle dépend aussi de la validité des raisonnements quand on a admis les axiomes et définitions. Cette validité est contrôlable grâce aux outils informatiques dont on dispose aujourd'hui. Cependant, même si on accepte individuellement les axiomes et que le raisonnement est jugé correct, il se peut encore que les axiomes soient globalement insatisfaisants parce que conduisant à des absurdités manifestes. C'est ce qui s'est produit pour le raisonnement proposé par Gödel.

En février 1970, pensant qu'il était mourant, Gödel a autorisé le mathématicien Dana Scott (né en 1932) à copier la dernière version de son raisonnement. Un peu plus tard, Gödel a affirmé à son ami le mathématicien et économiste Oskar Morgenstern (1902-1977) qu'il était satisfait de sa preuve, en précisant qu'il ne voulait pas la publier parce qu'il avait peur qu'on en déduise qu'il croyait en Dieu, alors qu'il était seulement engagé dans une exploration logique.

Récemment, Christoph Benzmüller, de l'université libre de Berlin, et Bruno Woltzenlogel Paleo, de l'université nationale australienne, ont montré, en utilisant des assistants de preuve, que le système utilisé par Gödel était absurde *(voir leur article cité dans la bibliographie)*.

> confirme que nous ne devons avoir aucune inquiétude concernant la partie centrale des mathématiques. Pour les théorèmes les plus difficiles, dont les démonstrations sont très longues ou mettent en œuvre des concepts abstraits et délicats, on ne dispose pas encore de ces versions formalisées.

DES ÉNONCÉS PROUVÉS FORMELLEMENT…

Parmi les énoncés dont les preuves ont été contrôlées ainsi, on a par exemple :

- Il existe exactement cinq solides platoniciens (polyèdres réguliers convexes).
- Impossibilité de la trisection d'un angle à la règle et au compas.
- Indépendance du postulat des parallèles vis-à-vis des autres axiomes de la géométrie de base du plan.
- Théorème fondamental de l'algèbre sur les racines des polynômes.
- Théorème des valeurs intermédiaires concernant les fonctions continues de l'ensemble des nombres réels dans lui-même.
- Théorème des deux carrés : un entier est somme de deux carrés si et seulement si chacun de ses facteurs premiers, de la forme $4k+3$, intervient avec un exposant pair.
- Théorème fondamental de l'analyse : la dérivée par rapport à x de l'intégrale de la fonction f, prise entre une constante a et x, est égale à $f(x)$.
- Théorème de Liouville : le nombre $1/10^{1!}+1/10^{2!}+1/10^{3!}+\ldots$ est transcendant.
- Les nombres e et π sont transcendants.
- Théorème des nombres premiers : la densité des nombres premiers autour de n est $1/\log(n)$.
- Procédé diagonal de Cantor : les nombres réels ne peuvent se mettre en bijection avec les nombres entiers.
- Premier théorème d'incomplétude de Gödel.
- Théorème des quatre couleurs : toute carte géographique dessinée sur un plan peut être coloriée avec quatre couleurs de façon que deux pays voisins soient de couleurs différentes.
- Conjecture de Kepler sur l'empilement le plus dense de sphères dans l'espace.

… ET D'AUTRES NON

Les résultats suivants n'ont pas été contrôlés par des assistants de preuve, mais pour les deux premiers, les spécialistes sont d'accord pour considérer que la démonstration informelle disponible est satisfaisante.

- Le théorème de Fermat qui indique que l'équation $a^n+b^n=c^n$ n'a pas de solutions en nombres entiers positifs si $n>2$.
- Le théorème géant concernant la classification des groupes finis simples, dont la démonstration actuelle occupe des dizaines de milliers de pages dispersées dans plus de cinq cents articles. On tente d'écrire une

© Wikimedia Commons

démonstration plus courte (non formalisée) qui aura environ cinq mille pages.

- Le théorème prouvant la conjecture ABC (elle porte sur les diviseurs des nombres vérifiant $a+b=c$), qui reste l'objet d'une controverse entre mathématiciens: certains prétendent disposer d'une démonstration, d'autres considèrent qu'elle n'est pas satisfaisante.

Des domaines comme la géométrie algébrique présentent des difficultés considérables et il a semblé nécessaire à plusieurs mathématiciens, dont le médaillé Fields Vladimir Voevodski (1966-2017), de travailler à ce que les travaux de ce champ soient tous formalisés pour éviter les trop fréquentes démonstrations fausses, que même les meilleurs spécialistes avaient des difficultés à éliminer (voir dans cette rubrique « Les mathématiques au péril de la contradiction », *Pour la Science*, avril 2019).

APPLICATION À LA PREUVE ONTOLOGIQUE DE L'EXISTENCE DE DIEU

Un cas récent assez étrange et amusant a mis en évidence l'intérêt des assistants de preuve, qui servent maintenant à repérer et corriger des erreurs même dans des raisonnements philosophiques controversés.

Il est arrivé à Gödel, considéré comme le plus grand logicien ayant existé, de se tromper: en 1970, il soumit à Alfred Tarski, pour publication dans *Proceedings of The National Academy of Sciences*, une démonstration s'appuyant sur des axiomes nouveaux que l'hypothèse du continu était fausse. La preuve, erronée, ne fut jamais publiée.

Mais le cas le plus intéressant d'erreur de Gödel concerne un travail philosophico-logique portant sur la question de savoir si un pur raisonnement logique est susceptible de démontrer l'existence de Dieu. Anselme de Cantorbéry, au XIe siècle, puis Gottfried Leibniz, au XVIIe siècle, avaient proposé de tels raisonnements utilisant les idées de perfection, de nécessité et d'existence combinées aussi rigoureusement que possible (*voir l'encadré 5*). Il s'agit là de jeux logiques qui présentent l'intérêt de permettre des analyses de concepts, surtout quand on les rend précis en les axiomatisant complètement, ce que Gödel a tenté de faire. Que l'on arrive à la conclusion que Dieu existe, ou que l'on arrive à la conclusion que les modes de raisonnements qu'on veut mettre en œuvre pour le prouver produisent des contradictions ou des énoncés inacceptables, est intéressant sur un plan logique.

Les travaux de Christoph Benzmüller et David Fuenmayor et de quelques chercheurs autour d'eux ont répondu aux questions qu'on pouvait se poser. En utilisant des systèmes de démonstration et de vérification automatique de preuve, ils ont d'une part établi que le système d'axiomes utilisé par Gödel dans sa preuve ontologique était contradictoire, ce qui bien sûr retire toute valeur à son raisonnement. Cependant, en étudiant certaines variantes proposées par exemple par Dana Scott ou Melvin Fitting, ils ont pu valider ces variantes du raisonnement – qui, cette fois, s'appuient sur des systèmes ne produisant pas d'absurdités manifestes et aboutissent sans commettre de faute de raisonnement à la conclusion que Dieu existe, du moins un dieu tel que les axiomes adoptés l'envisagent. On dispose donc de systèmes d'axiomes passés dans la moulinette informatique dont on est certain qu'ils ne sont pas idiots, et qui laissent la place à des raisonnements sur l'existence de Dieu!

Ces exemples d'utilisation de la logique formelle et de systèmes informatiques de validation pour avancer sur des questions de nature philosophique doivent encourager les philosophes à rendre aussi précis que possible leurs hypothèses et le déroulement de leurs raisonnements. Selon Christoph Benzmüller, ces travaux ouvrent «de nouvelles perspectives pour une philosophie théorique assistée par ordinateur. La discussion critique des concepts, définitions et axiomes sous-jacents reste de la responsabilité des humains, mais l'ordinateur peut aider à construire et à vérifier que les arguments logiques sont rigoureusement corrects. En cas de conflit, l'ordinateur tranchera entre les arguments contradictoires et satisfera la recommandation de Leibniz *Calculemus* ("Calculons!")." Le rêve d'une langue parfaite, la *Characteristica Universalis*, que Leibniz voulait créer, où le vrai et le faux seraient identifiables par un simple calcul, est donc en partie réalisé.

PAS DE PROGRÈS SANS RISQUE...

C'est parce que les mathématiques progressent et qu'elles entrent dans des domaines d'une complexité bien supérieure à tout ce qu'on a connu aux siècles précédents qu'elles prennent des risques. La volonté d'aller le plus loin possible crée un danger qu'il faut accepter, à la condition de mettre en œuvre tout ce qui peut le limiter.

Sur la frontière entre le vrai et le faux, le terrain devient incertain; les mathématiques doivent donc inventer et perfectionner leurs outils de contrôle et, dans certains domaines, les utiliser systématiquement. Les erreurs qui se produisent sont non pas la preuve d'un risque général et croissant auquel les mathématiques seraient soumises, car les garanties se renforcent dans la partie centrale qui s'étend, mais la manifestation de la vitalité d'une science curieuse et assoiffée, et qui depuis toujours explore et défriche sans répit des terres nouvelles. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Benzmüller et D. Fuenmayor, **Computer-supported analysis of positive properties, ultrafilters and modal collapse in variants of Gödel's ontological argument**, *Bulletin of the Section of Logic*, 2020 (https://arxiv.org/pdf/1910.08955).

D. Fuenmayor et C. Benzmüller, **Automating emendations of the ontological argument in intensional higher-order modal logic**, *Joint German/Austrian Conference on Artificial Intelligence*, Springer, 2017 (https://bit.ly/33tso5Z).

C. Benzmüller et B. Woltzenlogel Paleo, **The inconsistency in Gödel's ontological argument : A success story for AI in metaphysics**, *Proceedings of the 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2016 (https://bit.ly/3gszT0N).

J.-P. Delahaye, **Comment vérifier les longues démonstrations**, *Pour la Science*, n° 452, juin 2015.

A. Posamentier et I. Lehmann, **Magnificent Mistakes in Mathematics**, Prometheus Books, 2013.

M. Lecat, **Erreurs de mathématiciens, des origines à nos jours**, Castaigne, 1935.

L'AUTEUR

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

Le clip *Fuchsia*, de 1968, en platine, or jaune «serti mystérieux» rubis et diamants.

L'EXPRESSION DES GEMMES

De leur formation il y a plusieurs millions d'années jusqu'à leur mise en majesté sur des bijoux, une exposition qui brille de mille feux retrace l'histoire des pierres précieuses.

« La légende assure qu'aux temps immémoriaux un aigle géant, survolant le monde, trouva une pierre énorme, qu'il prit d'abord pour un quartier de chair vive tant elle avait la couleur du sang le plus généreux, le plus pur. C'était une sorte de soleil empourpré. L'aigle emporta le premier rubis de l'univers sur la cime la plus aiguë de la vallée. Ainsi naquit Mogok. » Et ainsi parle Joseph Kessel, dans *La Vallée des rubis*, paru en 1955. Située à près de 1200 mètres d'altitude, la Mogok en question est une cité à 200 kilomètres au nord de Mandalay, ancienne capitale du Myanmar. Et c'est en effet un des hauts lieux de la gemmologie en ce qu'il livre, depuis des siècles, de nombreux rubis de très grande qualité.

On peut en voir quelques beaux échantillons à l'exposition «Pierres précieuses», organisée en collaboration entre le Muséum à Paris et le célèbre bijoutier Van Cleef & Arpels. Le visiteur est invité à plonger au cœur de la planète, à la découverte des cycles géodynamiques et des phénomènes naturels qui président à la formation des gemmes jusqu'à leur mise en valeur sur des bagues, des colliers, des boucles d'oreille…

Attardons-nous sur les rubis de Mogok. Tout commence il y a plus de 250 millions d'années, alors que la région de l'actuel Myanmar n'était que lagons et deltas riches en sels, où les sédiments se sont accumulés au fond et sont mêlés aux dépôts calcaires d'origine marine. Lorsque la plaque de l'Inde a heurté l'Asie, et donné naissance à l'Himalaya il y a quelque 50 millions d'années (le processus se poursuit toujours), les empilements ont été chauffés par le métamorphisme local. Conséquence, les calcaires sont devenus du marbre (composé de calcite, $CaCO_3$), tandis que, soumis à de fortes pressions et températures, les sels ont fondu et ont réagi avec le marbre environnant, qui contenait notamment de l'aluminium et du chrome. Ils se sont alors transformés en rubis parmi les plus beaux du monde, car de couleur homogène. Un tel rubis brut est présenté dans l'exposition, prisonnier de sa gangue de marbre «bleu» de Mogok (*voir la photo en haut*).

Minéralogiquement parlant, un rubis est un corindon, c'est-à-dire un oxyde d'aluminium (Al_2O_3) dans lequel certains

© Collection Van Cleef & Arpels/E. Sauvage

Un rubis brut dans sa gangue de marbre, extrait des mines de Mogok, au Myanmar.

© MNHN/F. Farges

Le clip *Pivoine*, de 1937, en platine, or jaune, « serti mystérieux » rubis et diamants.

© Van Cleef & Arpels SA/P. Gries

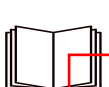
ions aluminium sont remplacés par d'autres éléments, faisant du minéral des gemmes colorées. Dans le cas du rubis, c'est le chrome, ce même élément donnant à l'émeraude sa couleur… verte ! La différence résulterait de champs électriques créés autour des atomes de chrome par les atomes d'oxygène dans le rubis, ce phénomène n'ayant pas lieu dans l'émeraude. Ce faisant, les deux minéraux n'absorbent pas la lumière de la même façon.

Récoltées à Mogok dans des graviers alluvionnaires issus des calcaires métamorphisés, les gemmes sont ensuite taillées et confiées aux mains expertes des joailliers. Ils peuvent en faire par exemple le clip *Fuchsia* de 1968 ou le clip *Pivoine* de 1937 (*voir les photos ci-dessus*). C'est une autre science qui se déploie ici, notamment celle du « serti mystérieux ». De quoi s'agit-il ?

Ce procédé, breveté en 1933 par Van Cleef & Arpels, permet de fixer les pierres facettées, principalement les rubis, sur une fine résille d'or de 200 micromètres d'épaisseur, sans monture ni griffe apparente. Depuis, cette pratique a été améliorée et déclinée en deux nouvelles techniques : le serti mystérieux Navette, qui accentue le volume grâce au bombé des pierres polies en navette, et le serti mystérieux Vitrail, qui joue de la transparence et des reflets des gemmes sans que la monture soit visible.

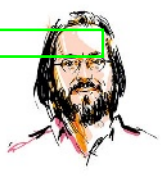
Entre émerveillement face aux plus belles créations présentées, comme la « table de Mazarin », en marqueterie de pierres représentant fleurs et animaux, *L'Arbre aux tourmalines*, créé par Jean Vendome, ou le collier commandé par la reine Nazli d'Égypte pour le mariage de sa fille en 1939, et découverte des plus récents travaux en minéralogie et des trésors français, en particulier les deux gros saphirs mis au jour dans le Puy-de-Dôme en 2018, le visiteur ne peut qu'adhérer aux propos de Bruno David, président du Muséum national d'histoire naturelle, selon qui « le dialogue science-esthétique prend avec cette exposition une coloration exceptionnelle ». Entre autres, celle du rubis !

Exposition « Pierres précieuses », à la grande galerie de l'Évolution, au Jardin des plantes, à Paris, jusqu'au 14 juin 2021. http://bit.ly/MNHN-Rubis



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

L'HORLOGE QUI MARCHE AU CHAUD ET FROID

Profiter des variations de température de l'air ambiant, telle est l'idée à la base de l'horloge Atmos, qui se remonte d'elle-même et indéfiniment.

Utiliser la nature comme source d'énergie est une préoccupation très actuelle. Mais elle était aussi depuis le XVIIIe siècle au cœur des réflexions d'horlogers et de savants qui cherchaient à fabriquer une horloge au mouvement perpétuel. Ce rêve est devenu une réalité commerciale en 1930 avec l'horloge Atmos, inventée par l'ingénieur suisse Jean-Léon Reutter puis développée et produite par la compagnie Jaeger-LeCoultre. Quels sont les principes physiques qui se cachent derrière la conception de cette horloge? Découvrons-les dans la déclinaison actuelle de celle-ci, l'Atmos 2, créée en 1937.

Dès 1740, le Suisse Pierre de Rivaz avait pointé les obstacles à surmonter pour réaliser une horloge perpétuelle ou presque. Outre la dilatation thermique, qui réduit la précision, et l'usure des pièces, qui produit une limaille susceptible de bloquer les mécanismes, l'énergie reste un point clé. L'horloge doit en effet consommer très peu et être dotée d'un dispositif qui capte l'énergie du milieu ambiant et la stocke.

L'ÉNERGIE ET SA DISSIPATION, UN POINT CLÉ

Comment Atmos 2 s'affranchit-elle de ces difficultés? Commençons par la consommation énergétique. Plus que le mécanisme de l'horloge lui-même, c'est l'amortissement de son oscillateur (pour une comtoise, par exemple, il s'agit d'un pendule pesant) qui est à l'origine des principales pertes d'énergie. La puissance moyenne dissipée par cet oscillateur est déterminée par trois paramètres: l'énergie stockée, la période des oscillations et le «facteur de qualité», un nombre proportionnel au rapport entre l'énergie stockée et l'énergie perdue à chaque oscillation.

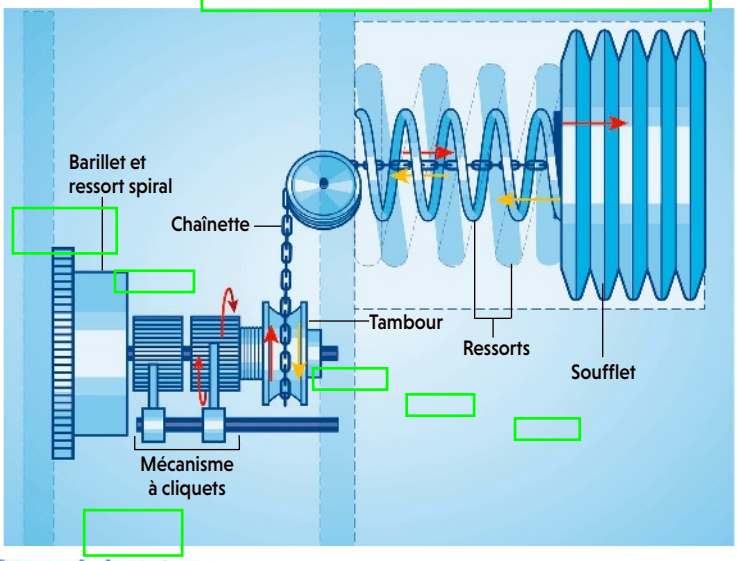
Il est difficile de jouer sur le facteur de qualité, qui est de l'ordre de quelques centaines pour des systèmes mécaniques oscillants. En revanche, on peut réduire la puissance dissipée en diminuant le rythme des oscillations.

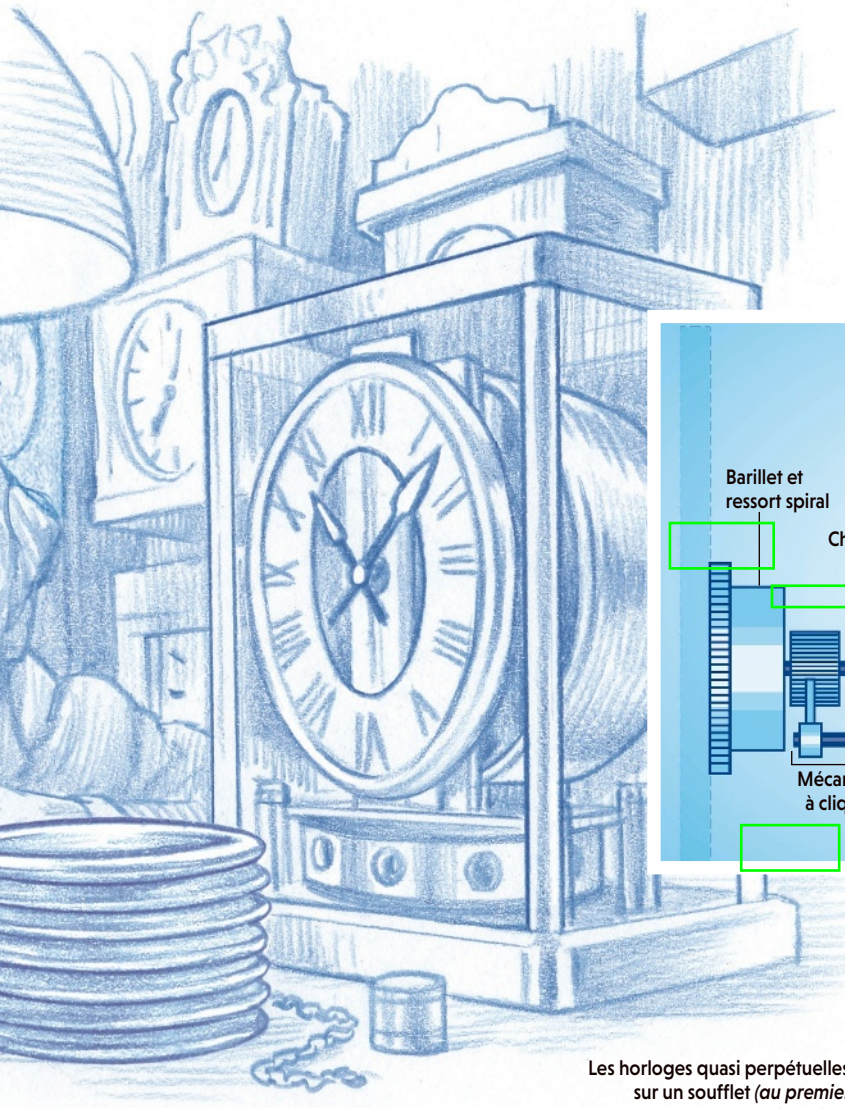
Pour ce faire, plutôt qu'un pendule pesant dont la période est, pour une raison de taille, difficilement supérieure à quelques secondes, on utilise un pendule de torsion. Celui d'Atmos 2 est ainsi une

© Illustrations de Bruno Vacaro

DU SOUFFLET AU CADRAN

Lorsque la température diminue, le soufflet se contracte *(flèche rouge)* et tire ainsi la chaînette qui lui est fixée. Celle-ci s'enroule alors sur un tambour qui, par l'intermédiaire d'un dispositif à cliquets, tend le ressort spiral (lequel actionne les aiguilles du cadran de l'horloge *via* un mécanisme à engrenages non représenté ici). Lorsque la température augmente, le soufflet se dilate *(flèche orange)* et la chaînette se relâche, mais un ressort de rappel fait tourner le tambour de façon à maintenir la tension de la chaînette, le mécanisme à cliquets empêchant dans cette phase que le ressort spiral se détende.





Les horloges quasi perpétuelles Atmos reposent sur un soufflet *(au premier plan)* contenant du chlorure d'éthyle, qui se dilate ou se contracte avec les variations de la température ambiante.

couronne de 200 grammes et de 8,5 centimètres de diamètre suspendue à un ruban. L'amplitude de son oscillation est de 225 degrés et sa période est de 1 minute, ce qui permet d'avancer l'aiguille des minutes d'un demi-cran à chaque demi-oscillation. L'énergie mécanique qu'il stocke est de 14 microjoules. Avec un facteur de qualité de l'ordre de 300, la perte d'énergie par oscillation est de 2%, soit 0,3 microjoule par minute.

Autrement dit, la puissance dissipée est de 5 nanowatts, ce qui est 10 fois moins que pour une montre mécanique. La lenteur des oscillations compense largement le fait que l'énergie stockée dans le pendule est bien plus importante que celle emmagasinée dans les oscillateurs de nos montres mécaniques.

Pour compenser ces pertes, pas d'astuce particulière pour Atmos: cette horloge utilise un ressort spiral. À chaque mouvement de balancier, la roue à échappement avance d'un cran. Lors de cette avance, le ressort se détend et libère ainsi une quantité fixe d'énergie, qui doit suffire pour entraîner l'ensemble des rouages et mécanismes de l'horloge et entretenir les oscillations du pendule.

C'est bien ce que permet le ressort d'Atmos 2. Lorsqu'il est remonté complètement, le couple qu'il exerce sur l'axe moteur de l'horloge est de 1,33 newton centimètre. Si on le relâche d'un tour, l'énergie qu'il fournit est alors de 0,084 joule. Or les divers engrenages sont conçus pour qu'à chaque oscillation du pendule de torsion (toutes les minutes), le ressort spiralé se détende de seulement $1/42524^{e}$ de tour. Le ressort fournit donc une puissance de 33 nanowatts, bien au-delà des 5 nanowatts dissipés par le pendule de torsion.

UN RESSORT REMONTÉ GRÂCE À LA TEMPÉRATURE

Évidemment, petit à petit, ce «ressort moteur» se détend jusqu'à ne plus pouvoir entretenir le mouvement du pendule: l'horloge s'arrête! Comment alors la remonter sans la toucher? Très tôt, les horlogers ont eu l'idée de mettre >

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

> à profit les variations de température de l'air ambiant. Mais s'il paraissait pertinent d'exploiter un effet de dilatation thermique (qu'ils combattaient par ailleurs pour garantir la précision de l'horloge), encore fallait-il déterminer le matériau à utiliser.

On a envisagé et testé de nombreuses possibilités : déformation d'un bilame formé de deux solides se dilatant différemment, dilatation d'un gaz, d'un liquide… C'est finalement l'évaporation/condensation d'un liquide, le chlorure d'éthyle (C_2H_5Cl), qui a été retenue pour l'Atmos 2.

Cette horloge comporte un soufflet de 10 centimètres de diamètre contenant du chlorure d'éthyle en équilibre permanent avec sa vapeur. Le maintien de cet équilibre liquide-vapeur autorise des variations de pression bien plus importantes que pour un gaz à pression et température ambiantes : alors que, dans ce dernier cas, l'augmentation de pression sous l'effet de l'élévation de température est d'environ 1/300e d'atmosphère par degré Celsius, soit 3,4 hectopascals par degré, elle est de l'ordre de 46 hectopascals par degré (soit 13 fois plus) au voisinage de 20 °C pour le chlorure d'éthyle.

Ainsi, la force exercée par la vapeur sur les couvercles de ce soufflet (produit de la pression par la superficie) varie de 36 newtons par degré. En pratique, l'un de ces couvercles est mobile : le soufflet se dilate lorsque la température augmente, et se contracte quand celle-ci diminue. Un ressort modérateur limite les déplacements du couvercle à environ 1,63 millimètre par degré.

Reste à relier mécaniquement ce couvercle mobile au ressort moteur de l'horloge, ce qui est plus facile à dire qu'à faire (*voir l'encadré page 89*). Il appuie sur un disque métallique repoussé par des ressorts et au centre duquel est fixée une chaînette. Celle-ci, après être passée par une poulie, vient s'enrouler sur un tambour qui remonte le ressort moteur spiral par l'intermédiaire d'un mécanisme à cliquets (*voir l'encadré ci-dessus*).

Quand le soufflet se contracte, le disque suit le couvercle mobile du soufflet, tire la chaînette du tambour enrouleur et remonte l'horloge par l'intermédiaire du cliquet engagé sur une dent de la roue entraînant le tambour, auquel est fixée la partie extérieure du ressort spiral. Quand le soufflet se dilate, le disque métallique donne du mou à la chaînette ; un petit ressort de rappel ramène le tambour pour maintenir la tension de la chaîne, tandis qu'un autre cliquet maintient le ressort spiral tendu.

Comme le diamètre du cylindre sur lequel s'enroule la chaînette est de 1,4 centimètre et que le couple nécessaire pour tendre le ressort spiral est, comme mentionné plus haut, de 1,33 newton centimètre, la force nécessaire pour remonter le ressort moteur est d'environ 2 newtons. Une variation de température de 0,05 °C suffit donc pour l'engendrer !

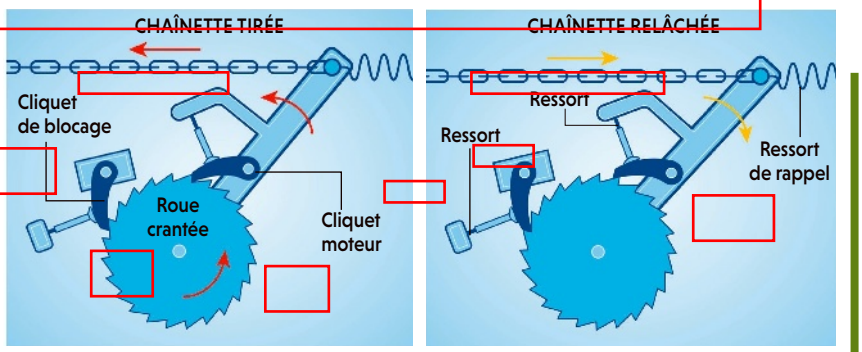
DEUX CLICS PAR JOUR SUFFISENT

Reste à déterminer quelles variations de température (amplitude et rythme) suffisent à assurer le bon fonctionnement de l'horloge. Pour que l'action de rechargement en énergie soit efficace, il faut que le mouvement du soufflet permette d'actionner au moins un cran du cliquet fixé sur le tambour de la chaîne, c'est-à-dire d'engager une dent sur le cliquet qui recharge le ressort moteur.

Étant donné le nombre de dents par tour (180) et l'amplitude du mouvement du couvercle du soufflet, on calcule qu'il suffit d'une variation de température de 0,12 °C pour provoquer ce clic. Et comme la dissipation énergétique de l'horloge nécessite un rechargement de 2 clics par jour, on voit qu'une variation de 1 °C permet de faire fonctionner l'horloge pendant 4 jours ! Les variations journalières de température sont donc plus que largement suffisantes, y compris dans une pièce climatisée… sauf à avoir une régulation de température digne d'un laboratoire de recherche ! ■

LE MÉCANISME À CLIQUETS

Dans les horloges Atmos, la chaînette tirée ou relâchée par le soufflet est reliée à un mécanisme à cliquets. Lorsque la chaînette est tirée *(flèche rouge)*, le cliquet moteur pousse la roue crantée et la fait tourner (ce qui permet de tendre le ressort spiral de l'horloge) ; dans cette situation, le cliquet de blocage n'intervient pas. Lorsque la chaînette est relâchée et se déplace donc dans l'autre sens *(flèche orange)*, la roue crantée reste immobile grâce à l'action du cliquet de blocage (et maintient ainsi la tension du ressort spiral).



BIBLIOGRAPHIE

D. Moline et J. Wagner, **Operating principles, common questions, and performance data for an atmospheric driven Atmos clock,** *Watch & Clock Bulletin,* vol. 57(1), n° 413, janvier-février 2015 (téléchargeable sur https://bit.ly/2EzvSti).

J. Lebet, **Living on Air : History of the Atmos Clock,** Jaeger-LeCoultre, 1997.

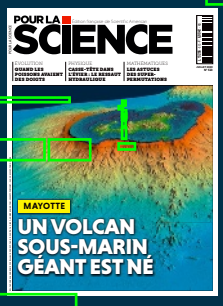
POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

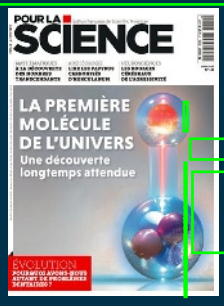
COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 515 (sept. 20)
réf. PL515

N° 514 (août 20)
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512

N° 511 (mai 20)
réf. PL511

N° 510 (avril 20)
réf. PL510

N° 509 (mars 20)
réf. PL509

N° 508 (fév. 20)
réf. PL508

N° 507 (jan 20)
réf. PL507

N° 506 (déc. 19)
réf. PL506

N° 505 (nov. 19)
réf. PL505

N° 504 (oct. 19)
réf. PL504

À retourner accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour La Science – 26 BD Président Wilson CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr

☑ **OUI, je commande des numéros de Pour la Science, au tarif unitaire de 9,90 €.**

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

1re réf. 01 x 9,90 € = 9,90 €
2e réf. ..... x 9,90 € = ... €
3e réf. ..... x 9,90 € = ... €
4e réf. ..... x 9,90 € = ... €
5e réf. ..... x 9,90 € = ... €
6e réf. ..... x 9,90 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

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*
☐ **Carte bancaire**
N° .....
Date d'expiration .....
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

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

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. 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.

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR

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

COMMENT LE MOUSTIQUE VOUS REPÈRE

Contrairement à ce que l'on pensait, quand les moustiques femelles partent en quête d'une proie à sang chaud, ce n'est pas la chaleur du corps qui les attire…

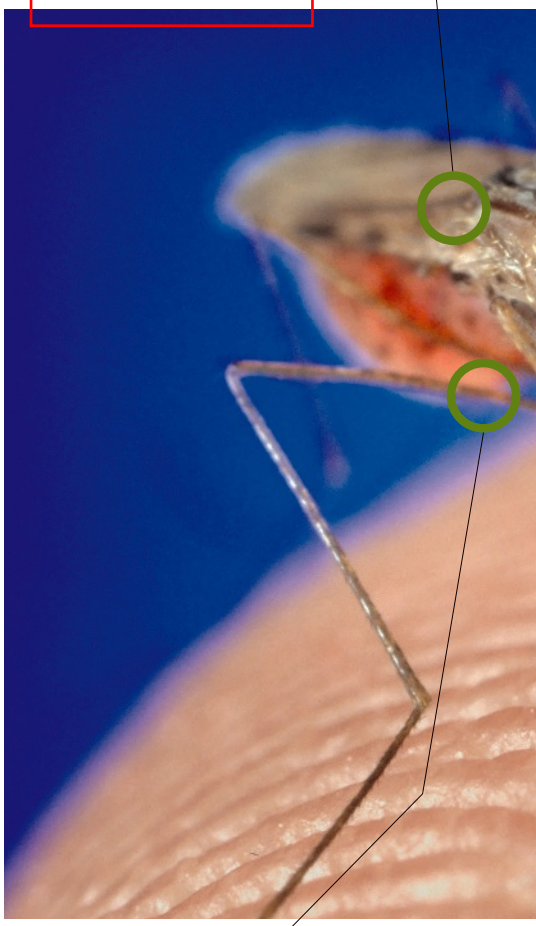
Le principal vecteur du paludisme, l'anophèle (*Anopheles gambiae*), est l'un des moustiques les plus étudiés: génome, génétique et dynamique des populations, comportement, reproduction… On sait depuis longtemps que la femelle a besoin d'un repas de sang afin d'obtenir les protéines indispensables à la maturation de ses ovules. Mais comment cet insecte détecte-t-il sa proie? Il utilise plusieurs critères conjointement: molécules odoriférantes, dioxyde de carbone (CO_2), chaleur du corps.

Les récepteurs du CO_2 et des odeurs sont connus: à l'aide de techniques classiques de biologie moléculaire, les équipes de Leslie Vosshall, de l'université Rockefeller, et de John Carlson, de l'université Yale, aux États-Unis, les ont décrits respectivement en 2007 et 2010. En revanche, le ou les récepteurs sensibles à la chaleur restaient inaccessibles par ces techniques. C'est pourquoi l'équipe de Paul Garrity, à l'université Brandeis, aux États-Unis, a récemment opté pour une approche différente en se rappelant que les moustiques descendent d'insectes qui n'étaient pas hématophages. Cette idée conduit à deux hypothèses: soit l'émergence de la recherche de sang chaud s'est accompagnée de la construction de nouveaux thermorécepteurs, soit les ancêtres des moustiques arboraient déjà des thermorécepteurs, dont la fonction aurait alors évolué avec l'apparition de l'hématophagie. C'est cette dernière hypothèse que Paul Garrity a suivie en priorité, et bien lui en a pris…

DE LA DROSOPHILE AU MOUSTIQUE

Tout comme les mouches, les moustiques appartiennent à l'ordre des diptères. Paul Garrity s'est donc penché sur la drosophile, certainement l'insecte le

Les femelles adultes sont actives la nuit, surtout entre minuit et 4 h, de préférence en intérieur, et les humains sont leurs proies de prédilection.



Localisés en Afrique subsaharienne tropicale et à Madagascar, les moustiques de cette espèce sont le principal vecteur du paludisme.

Quand une femelle aspire le sang d'un humain atteint de paludisme, elle ingère le parasite responsable de la maladie, un protozoaire du genre *Plasmodium*. Après une période de développement dans le moustique, le parasite devient transmissible lors d'un repas de la femelle.

© Jim Gathany/CDC

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

EN CHIFFRES

228 millions

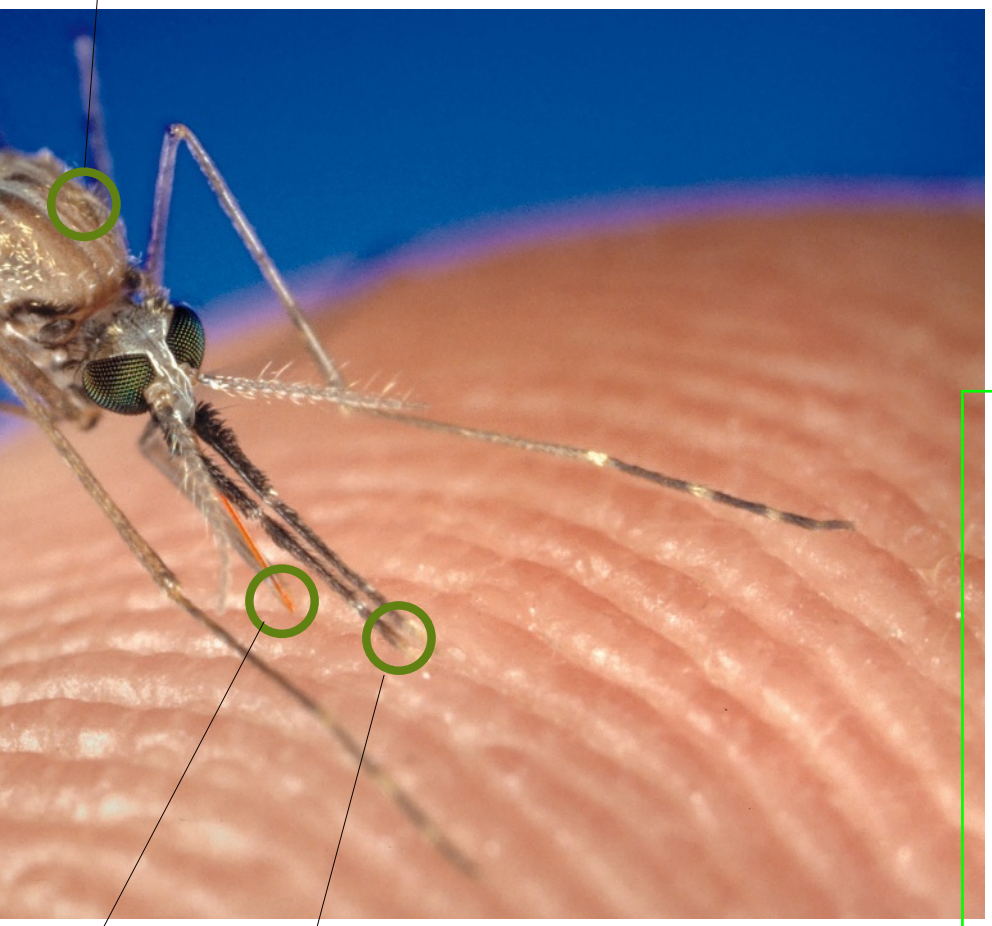
On estime qu'en 2018, 228 millions de personnes étaient atteintes de paludisme, maladie transmise par les moustiques du genre *Anopheles* (surtout *A. gambiae*), et 405 000 en sont mortes.

0,2 seconde

Il suffit de 0,2 à 0,7 seconde à l'anophèle femelle pour que ses neurones sensitifs répondent après la diminution de la température.

250 millions

L'ancêtre le plus récent de l'anophèle et de la drosophile vivait il y a 250 millions d'années.



Cette femelle *Anopheles gambiae* est sur le point d'obtenir son repas de sang sur le doigt d'un humain.

Les femelles adultes du genre *Anopheles* sont reconnaissables à la taille de leurs palpes maxillaires, aussi longs que leur trompe.

Anopheles gambiae
Taille : de 2,8 à 4,4 mm

plus étudié. Or, il y a une petite dizaine d'années, deux récepteurs de la chaleur avaient été examinés. La drosophile les utilise non pour rechercher des sources de chaleur, mais pour les éviter. C'est ce point qui a mis Paul Garrity sur la voie. Les efforts ont jusqu'à présent porté, sans résultat, sur la recherche de récepteurs de la chaleur. Pourquoi ne pas s'intéresser à ceux du froid, étant donné que, logiquement, une source de chaleur peut être trouvée par l'évitement du froid?

Ces dernières années, on a repéré chez la drosophile trois récepteurs qui lui servent à éviter les températures extrêmes, dans le chaud comme dans le froid. Il s'agit de trois membres de la famille des récepteurs ionotropes, des protéines membranaires qui forment un canal ionique sensible à un messager chimique (neurotransmetteur), et ils sont par ailleurs largement répandus chez les insectes, dont les moustiques. De plus, ils sont sensibles non pas à une température seuil donnée, mais aux variations de température, dans un sens ou dans l'autre. Aideraient-ils aussi l'anophèle à éviter le froid, voire rechercher le chaud?

De ces trois candidats, nommés IR21a, IR25a et IR93a, le premier est celui le plus spécifiquement utilisé pour la détection du refroidissement chez la drosophile, les deux autres étant aussi sensibles à d'autres éléments, comme la sécheresse. L'équipe de Paul Garrity a donc voulu savoir si IR21a était indispensable à la détection du froid chez l'anophèle. À cette fin, elle a construit deux mutants différents du gène *Ir21a*, qui code le récepteur. Dans l'un, elle a inséré une séquence qui entraîne la synthèse d'un récepteur non fonctionnel. Dans l'autre, une séquence codant une protéine fluorescente jaune. Le produit du gène est également non fonctionnel et sa fluorescence permet de repérer les cellules qui l'expriment. Enfin, l'équipe a produit des anticorps contre la protéine IR21a.

Grâce à ces outils moléculaires, elle a montré que chez l'anophèle femelle, le récepteur IR21a est localisé dans le dernier segment des antennes, là où trois sensilles reçoivent chacune un neurone sensitif (*voir l'encadré page 94*). Très précisément, les protéines IR21a sont situées à l'extrémité sensitive de ces trois neurones. >

> L'équipe de Paul Garrity a alors mis au point un système d'enregistrement permettant de détecter quand et pourquoi ces neurones sont activés. Ils répondent à un abaissement de la température – d'où leur nom de « cellules de refroidissement ». Une diminution de 0,5 °C à partir de 30 °C augmente l'activité neuronale de 40 %; la même diminution à partir de 37 °C l'augmente de 80 %. De plus, une élévation de la température inhibe l'activité nerveuse. Enfin, l'équipe a constaté que l'activité de base est la même quelle que soit la température. Ainsi, comme chez la drosophile et d'autres diptères, ou des insectes non diptères comme les termites, les cellules de refroidissement ne sont pas des thermomètres qui détectent la valeur absolue de la température, mais des détecteurs de variation de température. Comme prévu, les neurones des deux mutants ne présentent aucune de ces activités. Paul Garrity et ses collègues ont donc démontré que la fonction moléculaire du récepteur IR21a est bien conservée chez l'anophèle, comparativement aux autres insectes, et en particulier la drosophile.

SUIVRE LA CHALEUR… EN ÉVITANT LE FROID

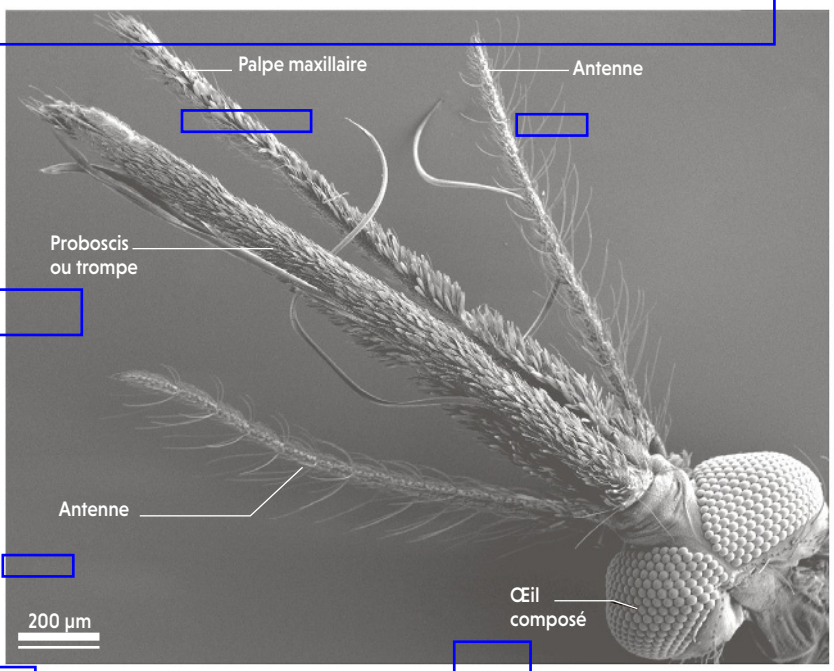
Par des expériences comportementales utilisant les deux mutants, l'équipe est ensuite parvenue à fournir l'ultime démonstration: ce récepteur sensible au refroidissement mène effectivement l'animal vers le chaud. Elle savait que l'approche de l'hôte dépend de plusieurs autres facteurs (odeurs, CO_2), mais qu'à partir de 15 centimètres, la température est le paramètre essentiel. Aussi a-t-elle décidé d'envoyer aux anophèles femelles une bouffée de 4 % de CO_2 pendant 20 secondes avant de les exposer à deux cibles, l'une à la température ambiante (26 °C), l'autre à une température supérieure (37 °C). Parmi les moustiques sauvages, 43 % ont choisi la cible chaude, contre seulement 14 % des mutants; la cible à température ambiante était ignorée dans tous les cas. Ainsi la détection de la cible chaude n'est pas complètement éliminée chez les mutants, ce qui suggère que d'autres récepteurs agissent sans doute. Néanmoins, la diminution drastique observée prouve que le produit du gène *Ir21a* est essentiel pour cette fonction.

Le récepteur IR21a est donc le médiateur clé du comportement de recherche de la chaleur chez l'anophèle. Trouver qu'un récepteur activé par le refroidissement permet la recherche du chaud semble contre-intuitif. Pourtant une répulsion au froid mène au même résultat qu'une attirance au chaud. Et n'oublions pas que les neurones sensitifs du refroidissement sont non seulement activés par une baisse de température, mais aussi inhibés par une augmentation de celle-ci, ce qui facilite probablement l'orientation du moustique vers la chaleur.

L'ancêtre commun à l'anophèle et à la drosophile est très ancien, ce qui suggère que la fonction du gène *Ir21a* est ancestrale, en tout cas bien antérieure à l'époque où des insectes sont devenus hématophages. Ainsi, si les récepteurs ont été conservés, c'est le traitement du signal au niveau central qui a changé. Alors que la majorité des insectes se contentent d'éviter le froid, le moustique femelle *Anopheles gambiae*, lui, se sert de sa capacité à éviter le froid pour rechercher le chaud en remontant un gradient de température. Quant au mâle? Il porte aussi des récepteurs IR21a dans ses antennes, ce qui suggère que ces récepteurs continuent par ailleurs à jouer, chez les moustiques, leur fonction ancestrale… ■

AU BOUT DES ANTENNES

Les moustiques *Anopheles gambiae* femelles arborent sur leurs antennes et leurs palpes maxillaires *(sur cette vue en microscopie électronique à balayage de la tête d'une telle femelle, un des deux palpes est caché sous la trompe)* de multiples structures sensorielles nommées « sensilles », sensibles à différents stimuli extérieurs (odeur, goût, humidité, température, contrainte mécanique…) selon leurs caractéristiques. À l'extrémité des antennes, trois sensilles contiennent chacune un neurone sensitif qui s'active lors d'un refroidissement.



BIBLIOGRAPHIE

C. Greppi *et al.*, **Mosquito heat seeking is driven by an ancestral cooling receptor,** *Science*, vol. 367, pp. 681-684, 2020.

C. J. McMeniman *et al.*, **Multimodal integration of carbon dioxide and other sensory cues drives mosquito attraction to humans,** *Cell*, vol. 156(5), pp. 1060-1071, 2014.

A. F. Carey *et al.*, **Odorant reception in the malaria mosquito *Anopheles gambiae*,** *Nature*, vol. 464, pp. 66-71, 2010.

© R. J. Pitts et L. J. Zwiebel, Malaria Journal, vol. 5, article 26, 2006 (CC BY 2.0)

La revue des sciences de la vie et de la Terre

Botanique, zoologie, évolution… *Espèces* c'est toute l'actualité de la recherche proposée par les scientifiques eux-mêmes.

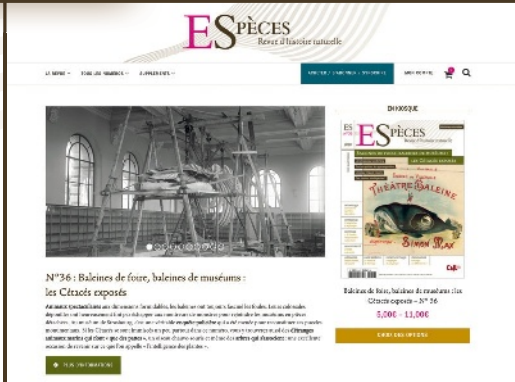
n° 37 en kiosque de septembre à novembre et par correspondance

100 p.
8,50 €

especes.org

Pour vous abonner ou commander au numéro, version papier ou numérique.

Vous y trouverez aussi des articles en accès libre, les éditoriaux, les sources et toutes les actualités de la revue… un concentré d'histoires naturelles !



DES MOUSSES AU GOÛT MAÎTRISÉ

Avec de la poudre de blanc d'œuf plutôt que du blanc d'œuf liquide, on a le choix de la phase aqueuse qui va donner du goût à la mousse.

L'AUTEUR

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

Assiette de cuisine note à note où la mousse est à l'honneur, servie dans le restaurant d'Andrea Camastra à Varsovie.

Combien de blanc d'œuf en neige peut-on faire avec un seul blanc d'œuf? La question est mal posée, car cela dépend de la taille des bulles dans la mousse produite. Si l'on imagine qu'un blanc en neige peut, à l'extrême limite, se réduire à une seule bulle, avec une couche monomoléculaire d'eau dans le film limitant la bulle, alors on calcule un rayon de la bulle de 90 mètres. En revanche, avec la pratique culinaire classique, pour laquelle les bulles ont entre 0,01 et 1 millimètre de diamètre, on a environ un tiers de litre seulement, ce que l'on peut augmenter considérablement si l'on ajoute de l'eau: avec des élèves d'un lycée hôtelier parisien, nous avons réussi à faire plus de 20 litres en fouettant un blanc auquel on ajoutait régulièrement de l'eau et du sucre (il a quand même fallu plus de deux heures)!

Mais le blanc d'œuf est sans goût, et le blanc en neige aussi. Comment faire plus gourmand? En utilisant de la poudre de blanc d'œuf, d'une part, et une solution aqueuse ayant du goût, d'autre part, ce qui conduit à des systèmes que l'on pourrait nommer des «geoffroys», du nom d'une famille de chimistes français de l'époque de la Révolution française.

Mais attention: il y a poudre de blanc d'œuf et poudre de blanc d'œuf, tout comme il y a farine et farine, gélatine et gélatine... Pour la farine, les variations tiennent notamment à la quantité de «gluten» (des protéines), mais aussi à la proportion d'amylopectines et d'amyloses (les deux polymères du glucose, respectivement ramifiés et linéaires). Pour les poudres de blanc d'œuf (que l'on se procure en ligne ou chez un boulanger), leur production détermine leurs propriétés. Par exemple, additionnées d'eau, certaines coagulent et d'autres pas. Et les propriétés moussantes sont à l'envi.

En tout cas, ces matières sont de mieux en mieux connues: Yi Sun et ses collègues, de l'université de Wuhan, viennent d'identifier 158 protéines différentes dans le blanc d'œuf, dont 96 sont

> **Un frisson d'eau sur de la mousse!**
> Paul Verlaine

phosphorylées. Ces liaisons de groupes phosphate, surtout sur les résidus d'acides aminés que sont la sérine, la thréonine et la tyrosine, changent la moussabilité; car lors du battage, les protéines sont partiellement déroulées, de sorte que leurs parties hydrophobes se mettent en contact avec l'air des bulles, tandis que les parties hydrophiles sont dans la phase aqueuse.

La phase aqueuse? Dans un blanc d'œuf liquide classique, c'est celle de l'œuf. En revanche, si l'on dispose de blanc d'œuf en poudre, nous pouvons le dissoudre dans la solution de notre choix – un jus de légume ou de fruit, du thé, du vin, du café, pour rester un peu classique, ou bien une solution entièrement composée.

Les travaux scientifiques nous donnent une autre possibilité de donner du goût aux mousses: Serhat Cicek et ses collègues, de la faculté de pharmacie de Kiel, viennent d'identifier dans les fruits du moine (*Siraitia grosvenorii*), par spectroscopie de résonance magnétique nucléaire, onze composés édulcorants (des mogrosides) dont l'effet est environ 500 fois supérieur à celui du saccharose, le sucre de table.

Ainsi, il nous restera à ajouter quelques acides (citrique, malique, succinique, tartrique), des colorants (alimentaires, évidemment) et un soupçon de composés odorants pour obtenir des mousses au goût entièrement maîtrisé, et en quantité considérable. ■

RECETTE

1 Ajouter à 50 g d'eau des mogrosides du fruit des moines, de l'acide citrique, un colorant alimentaire et quelques gouttes d'une solution de propionate d'éthyle (qui donne un merveilleux goût fruité, tendant vers le rhum). Combien de chaque ? *Quantum satis*, comme disent les pharmaciens.
2 Y dissoudre quelques grammes de poudre de blanc d'œuf.
3 Fouetter, au fouet de cuisine classique pour avoir de petites bulles, ou faire foisonner un immergeant le tuyau de sortie d'une petite pompe d'aquarium (qui ne pompera que de l'air) pour avoir des bulles plus grosses.
4 Déguster directement, ou mettre la mousse dans un verre que l'on passe quelques secondes au four à microondes.

© Andrea Camastra, Senses, Varsovie

POUR LA SCIENCE
THEMA

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €

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

Dans la collection *Thema* découvrez aussi

Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client

boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

P.10

844 MÈTRES

Telle est la circonférence de l'anneau du synchrotron ESRF, à Grenoble. Cette installation mise à jour, dite « de quatrième génération », produit des faisceaux de rayons X cent fois plus brillants que la précédente configuration. Le nombre d'aimants (1000) qui guident les électrons circulant dans l'anneau a quant à lui doublé.

P.22

50 MILLIONS

C'est l'estimation du nombre de personnes atteintes de démence dans le monde. La maladie d'Alzheimer représenterait à elle seule près de 60 à 70 % des cas.

P.18

« Le développement de l'informatique induit des mouvements individualistes et collectivistes contradictoires qui transforment la notion d'individu »

GILLES DOWEK
Chercheur à l'Inria

P.42

435

On comptabilise, sur les cinq continents, du Canada à la Colombie et de la Norvège à Bornéo, 435 espèces de chênes. Près de 60 % de ces espèces vivent en Amérique du Nord. Une trentaine seulement en Europe.

P.80

CONJECTURE ABC

Cette conjecture porte sur les diviseurs premiers des nombres entiers vérifiant la relation $a + b = c$. En août 2012, le mathématicien japonais Shinichi Mochizuki a annoncé l'avoir démontrée. Mais les outils qu'il a utilisés sont si complexes que d'autres chercheurs doutent de sa preuve. Un assistant de preuve permettra – peut-être un jour – de mettre d'accord les spécialistes.

P.92

PALUDISME

Maladie transmise par les moustiques du genre *Anopheles*, le paludisme a frappé 228 millions de personnes en 2018, vivant majoritairement (à plus de 90 %) en Afrique. 405 000 en sont mortes, dont 67 % d'enfants de moins de 5 ans.

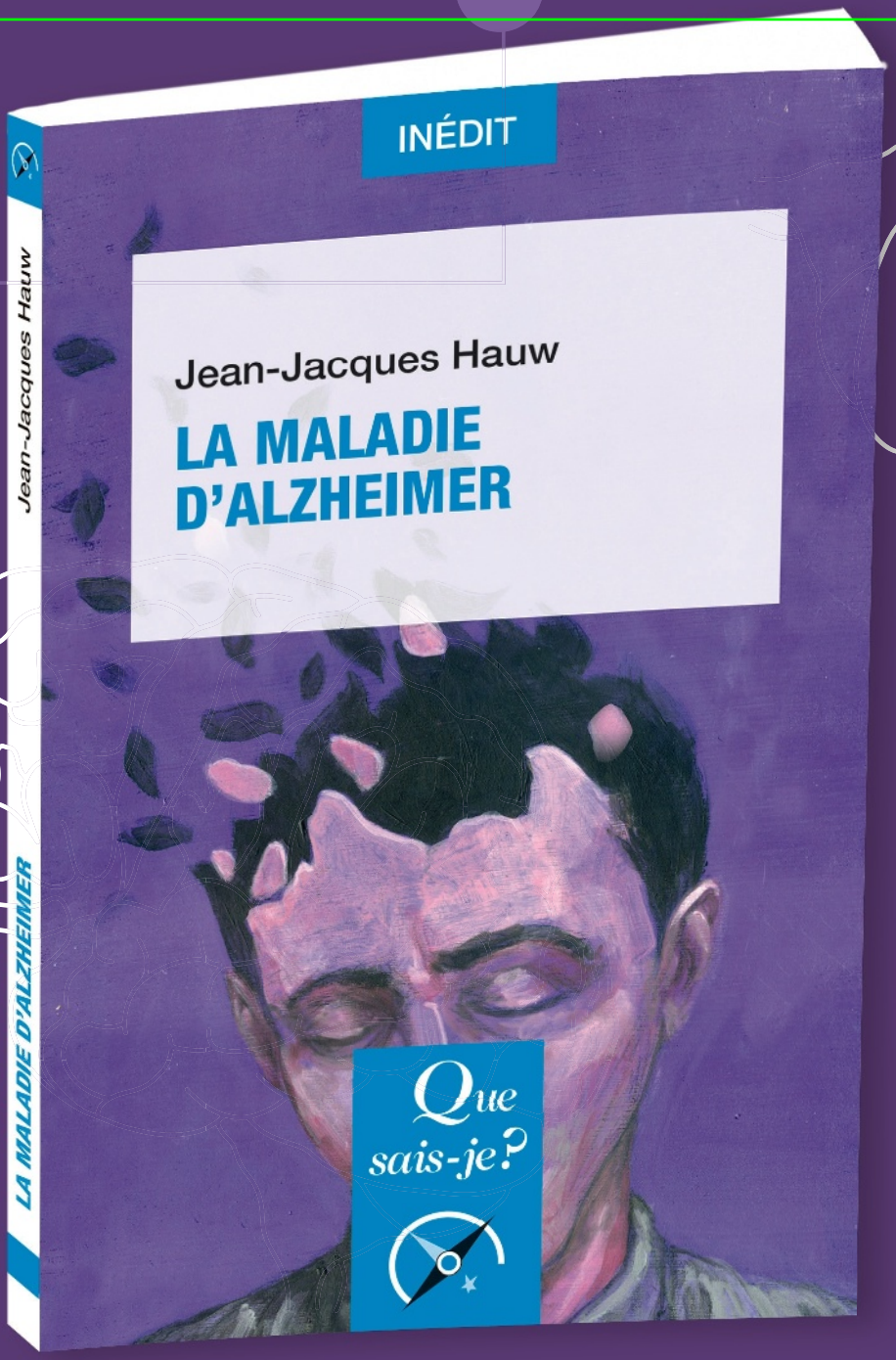
P.54

GRUMEAUX

Les images de disques circumstellaires de gaz et de poussière présentent parfois des espaces évidés, des grumeaux ou des torsions qui indiquent la présence d'exoplanètes indétectables par ailleurs.

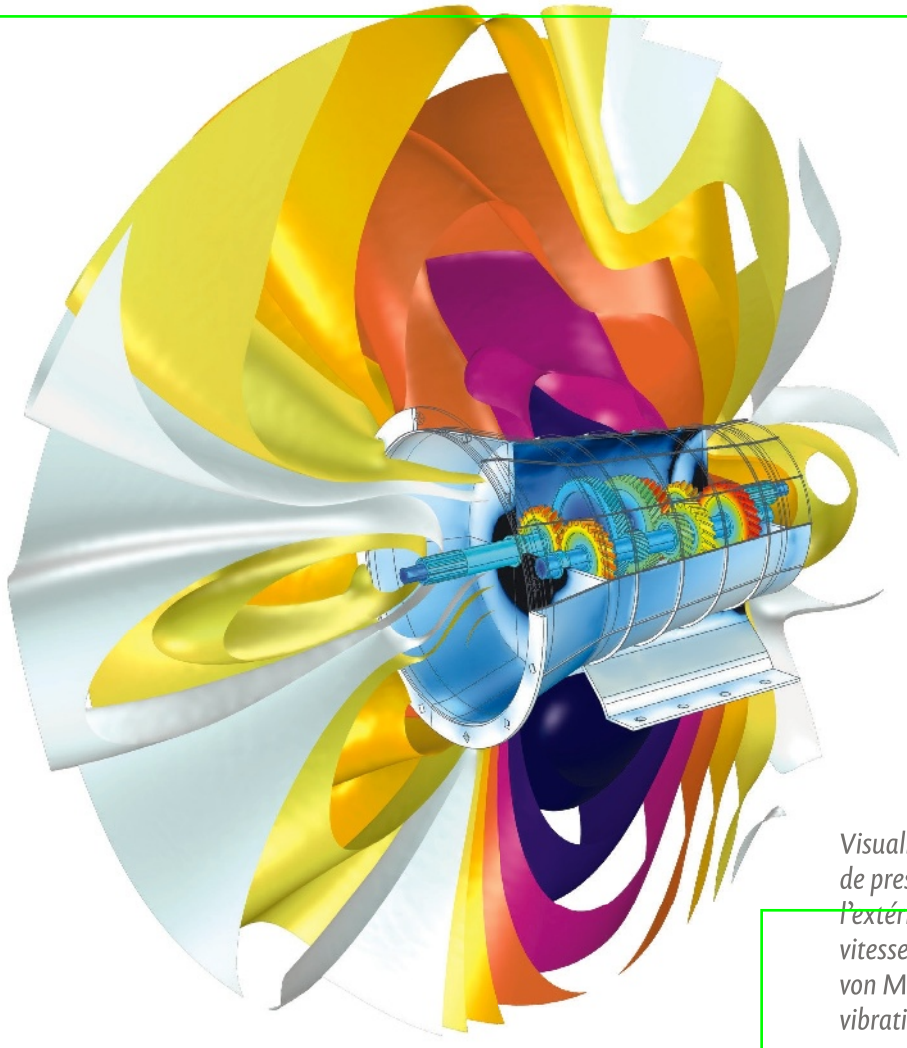
Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Octobre 2020 – N° d'édition M0770516-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 247744 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

LES ESPOIRS DE LA RECHERCHE



Que sais-je?

Des simulations de tests de bruit et vibrations que vous pouvez voir et entendre !



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'extérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation

COMSOL