



Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Astronomie

**LES NAINES BRUNES,
ENTRE PLANÈTES
ET ÉTOILES**

■ Mathématiques

**DES SUITES
FRACTALES DE
NOMBRES ENTIERS**

■ Écologie

**DES POISSONS
QUI N'ONT PAS
LA VIE DOUCE**

01/22

DIABÈTE • LUPUS • SCLÉROSE EN PLAQUES • POLYARTHRITE

MALADIES AUTO-IMMUNES

**Pourquoi le système
immunitaire déraile**

3 NOUVELLES PISTES

- Génétique
- Microbiote
- Hormones sexuelles

L 13256 - 531 - F - 6,90 € - RD





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

*Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves
des enfants gravement malades.*

*Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie,
nous avons besoin de vous.*



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

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédacteurs en chef adjoints: Loïc Mangin,

Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Hailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager et partenariats: Aëla Keryhuel

aëla.keryhuel@pourlascience.fr

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, Ingrid Lhande

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Assistante administrative: Doaa Mohamed

Marketing & diffusion: Stéphane Chobert

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:

Agathe Bernier-Monod, Maud Bruguère, Vincent Debat,

Nadine Dragin, Peggy Gerardin, Natacha Gillet, Capucine

Jahan, Violaine Llaurens, Gérard Lods, Bruno Malakizé,

Roberto Mallone, Nicolas Parisot et Rita Rebollo

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

www.boutique.groupepourlascience.fr

Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr

Tél.: 01 86 70 01 76

Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h

Adresse postale:

Service abonnement

Groupe Pour la Science

235 avenue Le Jour se Lève

92100 Boulogne-Billancourt

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres; Alicia Abadie

Tél. 04 88 15 12 47

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Laura Helmut

President: Stephen Pincock

Executive vice president: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français

ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus

dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American»

dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit

à «Pour la Science S.A.R.L.», 160 rue du Faubourg Saint-Denis, 75014 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).

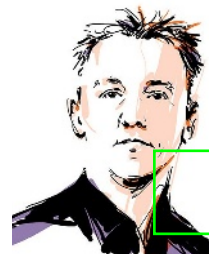
Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30%

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P_{tot} 0,007 kg/tonne

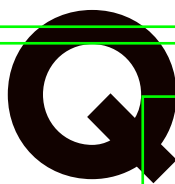
DITO



Loïc Mangin

Rédacteur
en chef adjoint

LA VIE DEVANT SOI... ET LE NON-SOI



Qui sommes-nous? Cette grande question

de l'identité traverse le champ de l'actualité, surtout en cette période de campagne électorale.

Mais aussi celui de la médecine lorsqu'il s'agit de s'intéresser aux maladies auto-immunes, ces pathologies où le système immunitaire

se retourne contre l'organisme, qu'il est censé protéger: en attaquant certains de ses constituants. La grande question posée est alors celle du soi et du non-soi et de la façon de les distinguer.

Enfin, c'était la question, car aujourd'hui, les immunologues découvrent que la frontière est floue. Ainsi, notre système

immunitaire certes reconnaît les agents infectieux comme des intrus potentiellement dangereux et nous en débarrasse, mais, dans une certaine mesure, il a également appris à réagir à des composants caractéristiques de notre propre corps pour, par exemple, éviter l'emballement immunitaire. C'est ce délicat équilibre qui serait rompu lors d'une maladie auto-immune: celle-ci ne serait donc pas un problème de reconnaissance du soi, mais d'un excès de celle-ci, ce dérèglement pouvant avoir de nombreuses causes, que développe notre dossier consacré à ce sujet (voir pages 24 à 45).

Si notre immunité se retourne parfois contre notre organisme pour notre bien, il lui arrive également de tolérer des éléments venus de l'extérieur, à commencer par les bactéries de nos microbiotes et, pour les femmes (les plus touchées par les maladies auto-immunes), le fœtus lors de la grossesse. Le système immunitaire n'est donc pas le gardien intraitable d'une forteresse imprenable et hermétique, mais plutôt un ensemble de mécanismes dynamiques où le soi et le non-soi sont bien plus mêlés qu'on ne le pensait. Une leçon peut-être?

Et puisqu'il est question de soi, de nous, il est un des nôtres que nous tenons à saluer. Maurice Mashaal, rédacteur en chef

de votre Pour la Science depuis onze ans, vient de faire valoir ses droits à la retraite. Nous lui souhaitons une heureuse et riche seconde vie, ça va de... soi. ■

SOMMAIRE

N° 531 / Janvier 2022

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Des retraits sécurisés grâce à la relativité restreinte
- Des nanofibres mobiles pour guérir les paralysés?
- Un éclat de Lune en orbite
- Le vol adapté des papillons morphos
- Au Gabon, des outils vieux de 650 000 ans au moins
- L'inattendu triple effet Leidenfrost
- Quand les cycles glaciaires se sont allongés
- Le bon sel de la vie à l'ARN
- Des cellules digestives à l'origine des neurones?

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

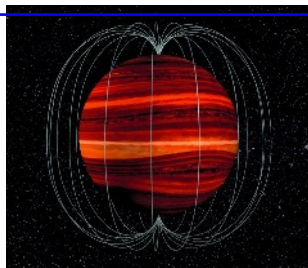
Pacha Mama contre Big Brother
Catherine Aubertin

P. 22

LES SCIENCES À LA LOUPE

L'art subtil de nommer les concepts
Yves Gingras

GRANDS FORMATS



P. 46

ASTRONOMIE

NAINES BRUNES : ENTRE PLANÈTES ET ÉTOILES

Katelyn Allers

Trop sombres et trop froides, les naines brunes sont longtemps restées impossibles à observer. Depuis une vingtaine d'années, ces objets à la frontière entre les étoiles et les planètes commencent à révéler leurs secrets.



P. 64

GÉOSCIENCES

SEQUESTRATION DU CO₂ : LA PISTE D'OMAN

Douglas Fox

Depuis trente ans, le géologue Peter Kelemen arpente les monts Hajar du sultanat d'Oman, pour y étudier les ophiolites, un type de formation rocheuse qui capte et stocke naturellement du dioxyde de carbone. Son espoir aujourd'hui? Intensifier le processus pour lutter contre le réchauffement climatique.



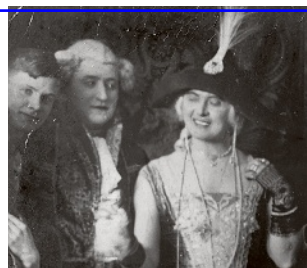
P. 56

ÉCOLOGIE

DES POISSONS QUI N'ONT PAS LA VIE DOUCE

Nicolas Poulet

On recense aujourd'hui en France métropolitaine environ 25% d'espèces de poissons d'eau douce de plus qu'en 2000. Un chiffre encourageant? Non: en réalité, cette augmentation résulte surtout d'une amélioration des connaissances et ne reflète pas l'état inquiétant des populations.



P. 74

HISTOIRE DES SCIENCES

MAGNUS HIRSCHFELD ET SON INSTITUT PIONNIER POUR LES TRANSGENRES

Brandy Schillace

La première clinique proposant une chirurgie de réattribution sexuelle aurait un siècle si elle n'avait pas été détruite par les nazis.

Pour la Science.fr

LETTRÉ 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 :
© Shutterstock.com/krusto

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

P. 24

MÉDECINE

UNE NOUVELLE VISION DE L'AUTO-IMMUNITÉ

Stephani Sutherland

À propos des maladies auto-immunes, le coupable a longtemps été tout désigné : un système immunitaire détraqué. On s'aperçoit qu'il ne constitue qu'une partie de l'équation.

P. 34

MÉDECINE

LES FEMMES SUREXPOSÉES?

Melinda Wenner Moyer

Près de quatre personnes sur cinq atteintes de troubles auto-immuns sont des femmes. Pourquoi une telle disproportion? Une explication serait à chercher du côté de l'histoire évolutive de la grossesse.

P. 40

IMMUNOLOGIE

« IL Y A UN FORT PARALLÈLE ENTRE AUTO-IMMUNITÉ ET CANCER »

Entretien avec Frédéric Rieux-Laucat

Malgré la complexité et la multiplicité des maladies auto-immunes, on commence à percevoir certains points communs entre ces pathologies, voire avec d'autres comme le cancer et le Covid-19.

P. 80

LOGIQUE & CALCUL
DES SUITES FRACTALES D'ENTIERS

Jean-Paul Delahaye

Une suite numérique fractale est une suite de nombres dont une partie la reproduit entièrement. La construction de tels objets stimule la créativité de nombreux passionnés.

P. 86

ART & SCIENCE
Un climat photogénique

Loïc Mangin

P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Oxygène à gogo

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION

A la recherche
de la fleur ancestrale

Hervé Le Guyader



P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE
Comment faire briller
le chocolat

Hervé This

P. 98

APICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Disputes environnementales

P.22 Les sciences à la loupe

DES RETRAITS SÉCURISÉS GRÂCE À LA RELATIVITÉ RESTREINTE



Quand, lors d'un retrait d'argent au distributeur, on entre son code secret, il y a un risque de se le faire voler. Mais grâce à un protocole sécurisé, il est possible de s'authentifier sans dévoiler d'information exploitable par un fraudeur.

Comment confirmer votre identité à un distributeur de billets sans taper votre code secret ? Un protocole sécurisé, reposant sur la relativité restreinte, a été mis en œuvre.

Quand vous retirez de l'argent à un distributeur, vous devez taper un code secret pour confirmer votre identité. Cette opération est un point faible du système. De toute évidence, vous devez entrer votre code à l'abri de regards indiscrets. Mais plus difficiles à détecter, certains escrocs équipent des distributeurs de faux claviers ou de faux lecteurs de cartes qui enregistrent toutes vos informations. Existe-t-il une solution pour sécuriser cette étape d'identification ? En 1985, Shafi Goldwasser, du MIT, et ses collègues ont introduit le concept de preuve à divulgation nulle de connaissance. Dans

le cas du distributeur, ce protocole permet de confirmer votre identité sans révéler d'informations (votre code secret) qu'un tiers mal intentionné pourrait exploiter, mais, pour des raisons techniques, il était difficile de le mettre en œuvre. Cependant, Sébastien Designolle, avec ses collègues de l'université de Genève et de l'université McGill à Montréal, vient d'en faire une démonstration concrète en s'appuyant sur la relativité restreinte.

En quoi consiste une preuve à divulgation nulle de connaissance ? Imaginez que vous ayez inventé une machine révolutionnaire et que vous craigniez qu'on vous vole vos idées. Comment prouver à autrui que vous avez bien construit l'objet

sans en révéler les détails ? C'est là qu'intervient la preuve à divulgation nulle de connaissance. Elle consiste en un « fournisseur de preuve » et un « vérificateur ». Ce dernier, grâce à un jeu de questions-réponses, s'assure que le fournisseur de preuve a bien en sa possession ce qu'il affirme. Mais à la fin, le vérificateur n'a aucun détail sur la machine à part la garantie qu'elle existe.

La plupart des protocoles conventionnels de preuve à divulgation nulle d'information impliquent de résoudre des problèmes mathématiques difficiles telle la décomposition de grands nombres en leurs facteurs premiers. La robustesse du système dépend donc de la puissance des ordinateurs utilisés pour élucider le problème mathématique. Or les progrès techniques peuvent mettre en péril ces approches. En 1988, Avi Wigderson, à l'institut des études avancées de Princeton, et ses collègues ont montré

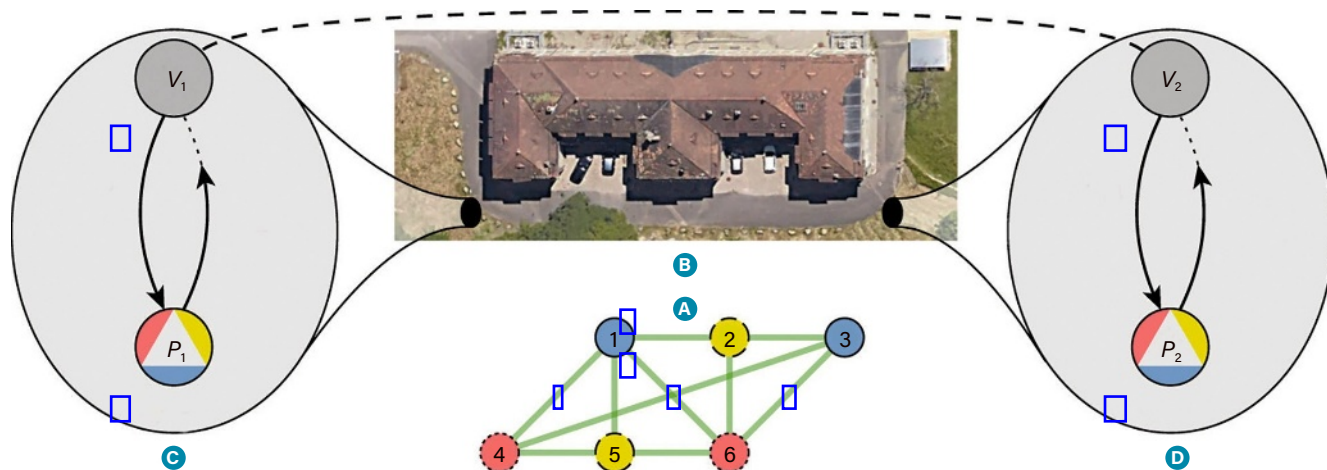


Schéma symétrique du protocole mis en place par Sébastien Designolle et ses collègues. Le graphe colorié (A) est partagé entre les deux dispositifs du fournisseur de preuve. Dans l'expérience, les deux dispositifs sont situés à 60 mètres l'un de l'autre (B). Le vérificateur choisit au hasard une paire

de sommets connectés par une arête, puis interroge simultanément les deux fournisseurs et demande à chacun d'annoncer la couleur d'un des deux sommets (C, D). En répétant la procédure un grand nombre de fois, il est possible de s'assurer de l'identité du fournisseur de preuve.

qu'il était possible d'implémenter le protocole de preuve à divulgation nulle d'information tout en contournant le problème des capacités de calcul pour casser le code. L'idée consiste à avoir plusieurs fournisseurs de preuve qui essayent de convaincre le vérificateur. Le principe est le même que celui qui revient à interroger deux suspects d'un braquage dans deux cellules différentes pour voir si leurs réponses concordent ou s'ils sont en train de mentir et d'inventer des alibis.

Dans leur expérience, Sébastien Designolle et ses collègues ne cherchent pas à factoriser des grands nombres, mais à analyser un graphe colorié avec trois couleurs. Un graphe est constitué de sommets reliés par des arêtes. Pour un graphe donné, il est très difficile de montrer s'il est possible de le colorier avec seulement trois couleurs de sorte que toutes les paires de sommets reliés par une arête soient de couleurs différentes. Pour le cas qui intéresse les chercheurs, cela garantit qu'un espion ne pourrait pas facilement déterminer le coloriage d'un graphe.

Ici, deux fournisseurs de preuve partagent un graphe dont ils connaissent le coloriage. Le vérificateur choisit au hasard une paire de sommets connectés par une arête, puis interroge simultanément les fournisseurs et demande à chacun d'annoncer la couleur d'un des deux sommets. Le vérificateur itère de nombreuses fois cette opération pour s'assurer de la cohérence des réponses des deux fournisseurs de preuve. Dans l'expérience, le graphe contient 588 sommets

et 1097 arêtes. Le vérificateur reproduit le test environ 500000 fois pour garantir la sécurité du protocole. Il peut ainsi confirmer l'identité des fournisseurs de preuve, sans pour autant connaître le coloriage du graphe (pour être précis, les fournisseurs de preuve partagent une série de coloriages qu'ils changent de la même façon à chaque question).

3,3 nanosecondes! Ce qui semblait techniquement infaisable.

Néanmoins, avec un protocole optimisé, les chercheurs s'en approchent. Dans une expérience, les deux fournisseurs de preuve sont distants de 400 mètres et les questions sont synchronisées grâce à une horloge GPS, dans une autre la distance est de seulement 60 mètres et la synchronisation se fait avec une fibre optique. Chaque test est effectué assez vite de sorte que les fournisseurs de preuve ne puissent pas communiquer entre eux, contraints par la relativité restreinte. Ces résultats montrent que le protocole d'identification sans divulgation d'information peut être implémenté sur des distances assez courtes. Et qu'il serait même encore possible de les réduire.

« Cette approche est vraiment intéressante, souligne Nicolas Brunner, physicien à l'université de Genève et coauteur des travaux, car la sécurité du système repose sur les lois de la physique, de la relativité restreinte, et non plus sur une hypothèse limitant le pouvoir de calcul ou le niveau de technologie de l'espion. » ■

Sean Bailly

P. Alikhani et al., *Nature*, vol. 599, pp. 47-50, 2021

La sécurité du système repose sur les lois de la physique

Comme pour les suspects d'un braquage, les deux fournisseurs de preuve ne doivent pas pouvoir communiquer pour synchroniser leurs réponses. Il faut que le système de question-réponse opère plus rapidement que le temps nécessaire à un signal pour transiter d'un fournisseur de preuve à l'autre. Rappelons que la lumière se déplace dans le vide à la vitesse de 300000 kilomètres par seconde, une vitesse qui ne peut être dépassée d'après la relativité restreinte. Avec un distributeur de billets large de 1 mètre, la personne qui veut s'identifier utiliserait deux dispositifs servant de fournisseurs de preuve qu'elle insérerait aux deux extrémités de la machine. Le système devrait alors réaliser chaque test en moins de

Retrouvez tous nos articles sur le Covid-19 en accès libre sur www.pourlascience.fr

MÉDECINE

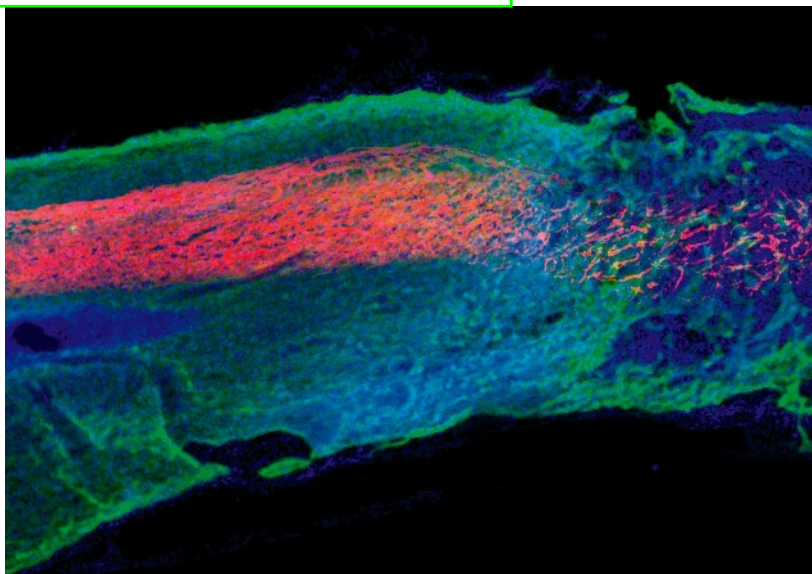
DES NANOFIBRES MOBILES POUR GUÉRIR LES PARALYSÉS ?

Grâce à un traitement à base de nanofibres, des souris atteintes de lésions de la moelle épinière ont marché à nouveau.

Aujourd'hui, les lésions traumatiques de la moelle épinière restent sans traitement alors qu'elles entraînent parfois une paralysie motrice et amoindrissent considérablement la qualité de vie des personnes touchées. En effet, les neurones du système nerveux central (SNC), qui comprend le cerveau et la moelle épinière, ne disposent que d'une capacité limitée d'autoréparation, insuffisante pour pallier une section accidentelle. Zaida Alvarez, de l'université Northwestern, à Chicago, et ses collègues viennent de mettre au point un traitement injectable et biodégradable constitué de nanofibres qui stimule la régénération des fibres nerveuses endommagées et la récupération fonctionnelle motrice dans un modèle de souris atteintes de telles lésions.

« Les capacités de réparation du SNC après un trauma sont inhibées par l'environnement lésionnel. Beaucoup d'équipes travaillent à développer des stratégies pour lever cette inhibition, notamment par l'emploi de biomatériaux qui miment la matrice extracellulaire des neurones », explique Fatiha Nothias-Chahir, qui dirige l'équipe Régénération et croissance de l'axone à Sorbonne Université. Zaida Alvarez et ses collègues ont utilisé des polymères qui ont la capacité de s'autoassembler en réseaux de nanofibres. Ces matériaux, nommés « peptides amphiphiles », comprennent trois segments : une queue hydrophobe, une zone intermédiaire qui donne à la protéine sa conformation et une extrémité chargée et hydrophile, sur laquelle il est possible de greffer un peptide d'intérêt. Ici en l'occurrence, les chercheurs ont sélectionné deux peptides. L'un, noté IKVAV, est un dérivé de la laminine, un composant de la matrice extracellulaire qui favorise la repousse des axones. L'autre, qui imite le facteur de croissance FGF2, a été choisi pour ses effets sur la prolifération et la survie cellulaire.

Des travaux précédents avaient déjà montré que le peptide IKVAV, intégré à des biomatériaux d'échafaudage, stimule la réparation du tissu nerveux et une récupération fonctionnelle après une lésion de la moelle épinière. Ici, l'équipe est allée plus loin en montrant que la



Coupe longitudinale de la moelle épinière sectionnée et traitée avec un assemblage de nanofibres. On constate une croissance d'axones (en rouge) dans la lésion (à droite).

combinaison de peptides amphiphiles porteurs d'IKVAV ou du peptide FGF2 renforce cet effet. Les résultats obtenus sur la souris ont montré en effet une repousse axonale des neurones lésés, une meilleure survie des neurones moteurs, une revascularisation et encore d'autres effets bénéfiques.

Les chercheurs ont par ailleurs observé une corrélation entre la dynamique spatiale de ces nanofibres autoorganisées et l'effet biologique obtenu. En introduisant des mutations dans la zone intermédiaire, ils ont montré que les réseaux de nanofibres étaient plus ou moins mobiles. De façon inattendue, l'effet *in vivo* est plus important lorsque les mutations des peptides amphiphiles porteurs d'IKVAV et FGF2 ne sont pas les mêmes. Selon ces chercheurs, cette discordance empêcherait la formation de certaines liaisons physiques, ce qui rendrait la structure moins rigide et donc plus mobile. Cette meilleure mobilité favoriserait une interaction fructueuse avec les récepteurs cellulaires ciblés, eux-mêmes mobiles sur la membrane des neurones. ■

Noëlle Guillon

Z. Alvarez et al., *Science*, vol. 374, pp. 848-856, 2021

Manier un outil, une aide au langage

En 2019, des chercheurs ont montré une corrélation entre le fait d'être habile à manier des outils et de bonnes capacités à comprendre la syntaxe de certaines phrases complexes. Maintenant, Claude Brozzoli, du Centre de recherche en neurosciences de Lyon, et ses collègues ont découvert que ces deux habiletés font appel à des ressources situées dans la même zone du cerveau. Ces résultats aideront à améliorer les méthodes de rééducation de personnes ayant perdu une partie de leurs compétences langagières. *Science*, 11 novembre 2021

La pluie plus tôt que prévu

D'après les modèles climatiques les plus récents (CMIP6), la pluie pourrait être plus fréquente que la neige en Arctique durant l'été et l'automne dès les années 2060 ou 2070, soit plusieurs décennies plus tôt que prévu par les estimations précédentes. Michelle McCrystall, de l'université du Manitoba, au Canada, et ses collègues ont analysé plus en détail les simulations. Et de fait, l'Arctique se réchaufferait plus vite et serait plus sensible à la hausse des températures qu'attendu.

Nature Comm., 30 novembre 2021

Une collision « imminente »

Au cœur de la galaxie NGC 7727, à 89 millions d'années-lumière de la Terre, Karina Voggel, de l'observatoire de Strasbourg, et ses collègues ont découvert la paire de trous noirs supermassifs la plus rapprochée connue à ce jour. Grâce au télescope VLT, au Chili, ils ont montré que les deux objets sont à seulement 1 600 années-lumière l'un de l'autre. Dotés de masses de 154 millions et 6,3 millions de fois celle du Soleil, ils devraient fusionner dans... 250 millions d'années !

A & A, 30 novembre 2021

LE SECRET DE L'ÉTONNANTE RÉSISTANCE DU CHARANÇON DU RIZ

Parmi les ravageurs des stocks de céréales, le charançon du riz, *Sitophilus oryzae*, est des plus redoutables. Pour s'en débarrasser, on utilise en général la fumigation de phosphine, un gaz toxique qui attaque le système nerveux et est réputé pour ne pas laisser de résidus sur les grains. Toutefois, depuis les années 1970, on observe une résistance croissante de l'insecte à ce traitement. Aussi, depuis plus de vingt ans, Abdelaziz Heddi, à l'Insa de Lyon et à l'Inrae, et ses collègues étudient le charançon dans l'espoir de trouver d'autres moyens de lutte. Ils ont ainsi décrit la biologie de ce coléoptère dans ses moindres détails et viennent d'apporter une pierre cruciale à l'édifice : le séquençage de son génome.

Sitophilus oryzae commence sa vie au cœur même d'un grain que sa mère a creusé avant de déposer l'œuf et de sceller l'orifice à l'aide de sécrétions. En une trentaine de jours, la larve s'y développe et s'y métamorphose en un insecte adulte qui s'en extirpe alors. Comme nombre d'insectes croissant dans un milieu limité, le charançon du riz vit en symbiose avec une bactérie qui lui fournit des nutriments indisponibles dans les grains (des vitamines et des acides aminés). Ces dernières années, en étudiant cette symbiose, l'équipe a montré que celle-ci est récente (moins de 30 000 ans), et pourtant fort bien huilée.



Chaque femelle du charançon *Sitophilus oryzae* peut pondre jusqu'à 300 œufs, chacun dans un grain de riz ou d'autres céréales (ici du blé). L'insecte ne sort du grain qu'au stade adulte.

D'une part, la bactérie continue d'alimenter l'insecte au stade adulte et s'adapte à ses exigences physiologiques, malgré une métamorphose totale de l'animal, en colonisant son intestin. D'autre part, le charançon fournit aussi des nutriments à la bactérie et la protège en empêchant son système immunitaire de s'emballer. Le séquençage de son génome aide à comprendre comment cette symbiose s'est mise en place. En effet, environ 74% de ce génome est constitué de séquences répétées, dont la plupart sont des éléments dits « transposables », susceptibles de se déplacer dans le génome et de s'y multiplier. De tels éléments sont connus pour favoriser une adaptation rapide à des stress environnementaux. Autant de nouvelles pistes pour lutter contre le ravageur. ■

Marie-Neige Cordonnier

N. Parisot et al., *BMC Biology*, vol. 19, article 241, 2021

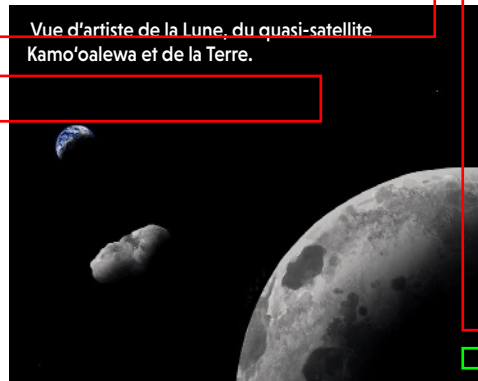
UN ÉCLAT DE LUNE EN ORBITE

La Lune est le satellite naturel de la Terre, mais saviez-vous que la planète a aussi des quasi-satellites? Ces objets suivent une orbite très proche de celle de la Terre. Ainsi, du point de vue de cette dernière, on a l'impression qu'ils évoluent autour de la planète alors qu'ils

tournent autour du Soleil. L'un d'eux, Kamo'oalewa, a été découvert en 2016. Mais, comme tous ces objets, il est de petite taille, sombre et difficile à étudier. Par ailleurs, du fait de son orbite, il n'est visible que quelques semaines en avril chaque année. En 2021, pour en savoir plus sur cet objet, Benjamin Sharkey, de l'université d'Arizona, et ses collègues ont réalisé une analyse spectroscopique de la lumière réfléchie par Kamo'oalewa. Ils ont comparé les données à divers échantillons. Les caractéristiques spectrales de Kamo'oalewa suggèrent qu'il est constitué de silicates typiques de la Lune. Quelle est donc l'origine de cet objet? La piste la plus probable est qu'il s'agit d'une roche lunaire éjectée lors d'un impact. ■

S. B.

B. N. L. Sharkey et al., *Communications Earth & Environment*, vol. 2, n° 231, 2021



Vue d'artiste de la Lune, du quasi-satellite Kamo'oalewa et de la Terre.

BIOPHYSIQUE

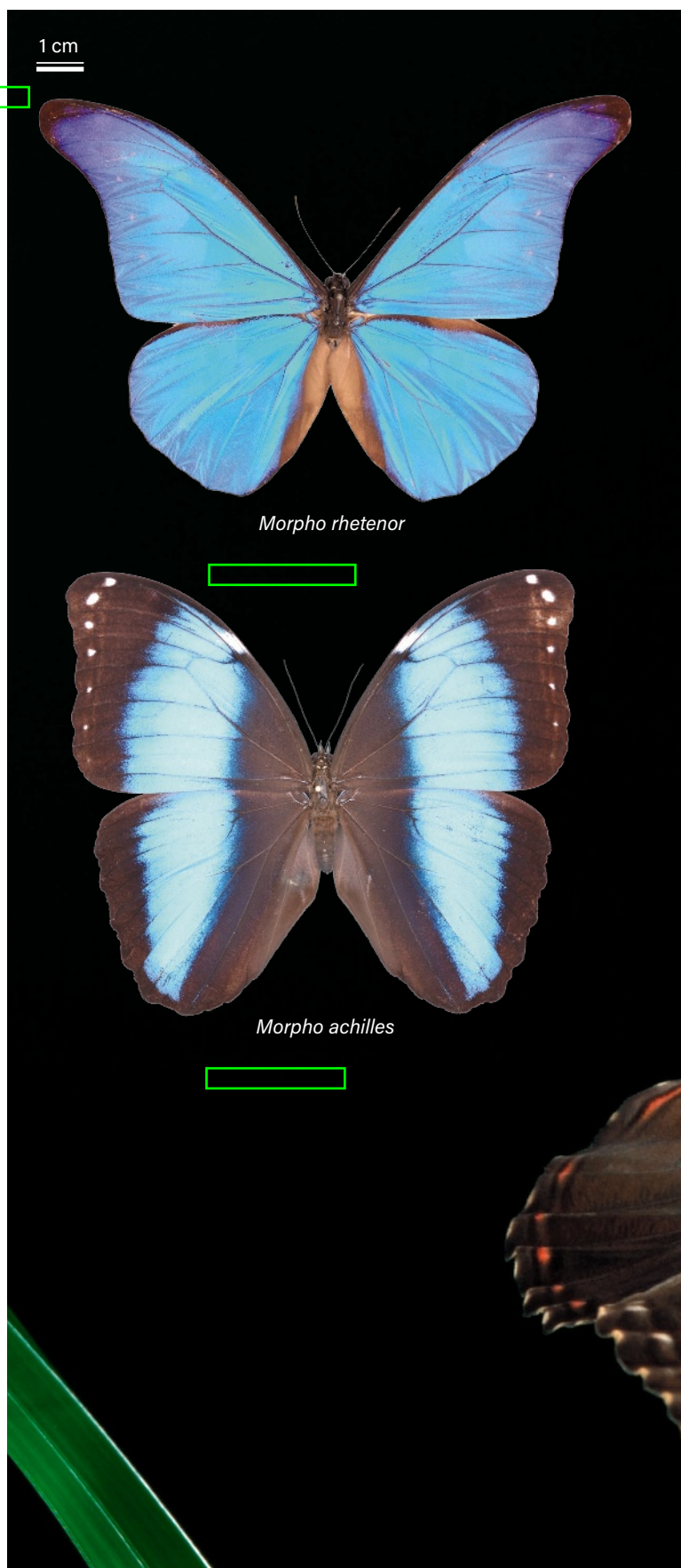
LE VOL ADAPTÉ DES PAPILLONS MORPHOS

Au cœur de la forêt Amazonienne, les papillons du genre *Morpho* offrent un spectacle sublime. En regardant ce ballet de plus près, on constate que toutes les espèces ne volent ni de la même façon ni dans les mêmes strates de la forêt. La plupart de ces espèces de lépidoptères habitent les sous-bois denses et fermés, mais certaines ont investi le milieu plus ouvert de la canopée. Par ailleurs, les papillons de sous-bois volent plus rapidement avec des battements d'ailes plus puissants. Chez les espèces de la canopée, le vol battu est réduit au profit d'une plus grande utilisation du vol plané, permettant de parcourir de plus longues distances en réduisant les dépenses énergétiques. Cette évolution du vol est-elle due à des changements morphologiques des ailes des morphos ou à une simple différence de comportement ? Pour répondre à cette question, Camille Le Roy, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et ses collègues ont comparé les vols des différentes espèces de morphos et les performances aérodynamiques liées à la forme de leurs ailes.

Les chercheurs ont constaté que les espèces de la canopée présentaient en général des ailes plus triangulaires et allongées (en médaillon, les espèces *Morpho rhetenor*, qui habite dans la canopée, et *Morpho achilles*, qui vit dans les sous-bois), leur conférant une plus grande portance (force perpendiculaire à la direction du mouvement) par rapport à la traînée (force qui s'oppose au mouvement du corps). Ainsi, l'efficacité aérodynamique du vol plané chez les espèces de la canopée serait supérieure grâce aux propriétés morphologiques de leurs ailes. Chez les espèces des sous-bois, les papillons privilégient un vol battu qui leur permet des changements rapides de direction dans un milieu dense. ■

Élisa Doré

C. Le Roy et al., *Science*, vol. 374, pp. 1158-1162, 2021





Un papillon *Morpho peleides*,
parfois considéré comme une
sous-espèce de *Morpho helenor*,
un papillon des sous-bois.

PRÉHISTOIRE

AU GABON, DES OUTILS VIEUX DE 650 000 ANS AU MOINS

Des pierres taillées dans le quartzite attestent la présence d'humains à la marge de la forêt tropicale humide africaine il y a 650 000 ans, voire plus.

Quel âge ont-elles? Les pierres taillées d'Elarmékora, au Gabon, découvertes dans une très ancienne terrasse fluviale du fleuve Ogooué, ne sont pas datables directement. Alors, autour de Régis Braucher, du Cerege, à Aix-en-Provence, des chercheurs ont déduit la durée de leur enfouissement de la mesure des concentrations de nucléides cosmogéniques. Le nombre de ces atomes radioactifs produits par les rayons cosmiques dans les minéraux du sol décroît avec le temps passé sous terre, ce qui permet de l'évaluer. Les chercheurs ont mesuré les concentrations de deux nucléides cosmogéniques – l'aluminium 26 et le béryllium 10 – dans une série d'échantillons de sols prélevés depuis la surface du sol jusque sous la strate archéologique et en ont déduit leurs âges: il en ressort que les artefacts sont sous terre depuis 650 000 ans au moins.

Ainsi, dans le bassin du Congo, des mains taillaient des galets dès cette époque ancienne voire bien avant. L'existence d'industries lithiques «à galets aménagés» spécifiques à



Cet outil du site d'Elarmékora servait probablement à casser des os ou couper du bois.

L'Afrique centrale, adaptées sans doute aux conditions de vie dans la forêt tropicale humide, était déjà connue, mais seulement par des travaux dépourvus de datations et publiés il y a longtemps en français, de sorte que les préhistoriens actuels ne la prenaient pas en compte. Cela peut changer, puisque la datation de ce site du Paléolithique inférieur dans le bassin du Congo prouve non seulement que la forêt tropicale humide africaine était déjà investie par des humains en ces temps lointains, mais que ces tailleurs de pierre utilisaient bien des techniques originales différentes de celles pratiquées dans le reste du monde à l'époque. ■

François Savatier

Régis Braucher et al., *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.*, 2021.

BIOPHYSIQUE

LES PANDAS CAMOUFLÉS

Quand des collègues de l'Académie chinoise des sciences lui ont envoyé des photos rares de pandas géants évoluant dans des sous-bois, Tim Caro, de l'université de Bristol, a constaté avec surprise que ces animaux n'étaient pas faciles à repérer. En général, ils sont photographiés de près dans les zoos et se détachent bien de l'arrière-plan. Pour se convaincre que le pelage du panda géant est un bon camouflage, Tim Caro et ses collègues ont utilisé des techniques de traitement d'image simulant les visions humaine, féline et canine. Ils ont ainsi noté que les couleurs blanc et noir sont en accord avec l'environnement naturel des pandas: le noir correspond aux tons des troncs d'arbres et aux zones ombragées, tandis que le blanc se confond volontiers avec le feuillage, qui, dans les forêts de montagne de Chine, réfléchit beaucoup de lumière. Le blanc permet aussi un camouflage dans la



Le panda est rarement photographié dans son habitat naturel. Les clichés comme celui-ci montrent que le pelage noir et blanc de l'animal lui permet de se fondre efficacement dans les sous-bois, la neige, etc.

neige, caractéristique de leur habitat en hiver. Enfin, les limites marquées entre les zones blanches et noires rendent la silhouette du panda difficile à cerner. ■

Gaia Jouanna

O. Nokelainen et al., *Scientific Reports*, vol. 11, n° 21287, 2021

EN BREF

En un claquement de doigts

Depuis des milliers d'années, l'humanité pratique les claquements de doigts pour communiquer et faire de la musique. Saad Bhamla, de l'institut de technologie de Géorgie, aux États-Unis, et ses collègues ont étudié le mouvement des doigts lors d'un claquement. Ils ont caractérisé le rôle crucial des frottements de la peau et ont aussi montré que ce geste correspond à l'une des plus grandes accélérations angulaires réalisées par le corps humain.

J. R. Soc. Interface, 17 novembre 2021

Du microbiote à la mémoire de l'abeille

Pour comprendre l'influence du microbiote intestinal sur les performances cognitives, l'équipe de Wei Zhao, de l'université de Jiangnan, en Chine, s'est intéressée au cas des bourdons terrestres. Elle a montré que ces insectes réussissaient mieux des tests de mémoire lorsque leur microbiote était riche en bactéries *Lactobacillus apis*. En agrémentant l'alimentation des bourdons avec ces bactéries, les performances augmentaient aussi.

Nature Comm., 25 novembre 2021

La foule face au danger

La dynamique des foules face à un danger réel est difficile à étudier expérimentalement. Daniel Parisi, de l'institut technologique de Buenos Aires, et son équipe ont analysé des vidéos prises lors d'une course de taureaux à Pampelune, en Espagne. De façon contre-intuitive, la vitesse moyenne des coureurs croît avec la densité de la foule, notamment parce que les gens en grand danger veulent aller le plus vite possible, au mépris de la densité. Elle atteint néanmoins une limite, quand le risque de chute augmente trop.

PNAS, 6 décembre 2021

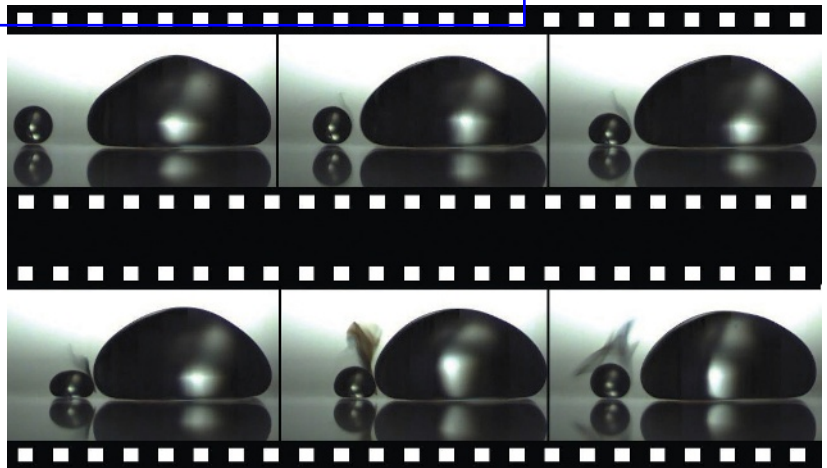
UNE COMÈTE A VITRIFIÉ L'ATACAMA IL Y A 12 000 ANS

Au sud de la ville de Pica, au Chili, dans le désert de l'Atacama, se trouve un vaste couloir de 75 kilomètres rempli de blocs de verre. D'où viennent-ils? Autour de Peter Schulz de l'université Brown, dans l'État de Rhode Island, une équipe de géologues vient enfin d'identifier la cause du phénomène. Les centaines d'échantillons prélevés par les chercheurs contiennent des traces de minéraux: troïlites, buchwaldites et chlorapatites. Un assemblage qui ressemble fort à la composition des poussières de la comète Wild 2, rapportées sur Terre par la mission *Stardust*, de la Nasa. D'où l'idée qu'une comète semblable a explosé à basse altitude au Pléistocène, engendrant une immense source de chaleur... qui a vitrifié les sables du désert. ■

F. S.

P. H. Schultz et al., *Geology*, 2021

L'INATTENDU TRIPLE EFFET LEIDENFROST



Séquence vue de côté du triple effet Leidenfrost montrant la formation d'une couche de gaz entre les gouttes quand elles s'approchent l'une de l'autre.

LES BONS GESTES DES ABEILLES

Lorsqu'elles sont infectées par un parasite (l'acarien *Varroa destructor*), les abeilles adoptent un comportement qui protège le couvain, lequel rassemble œufs, larves et nymphes (les trois stades de croissances des abeilles avant l'âge adulte). Grâce à des caméras placées à l'intérieur des ruches, Michela Pusceddu, de l'université de Sassari, en Italie, et ses collègues ont constaté qu'en cas d'infection, les insectes pratiquent davantage le toilettage réciproque, qui débarrasse les congénères des corps étrangers. Et ce geste est encore plus fréquent près du couvain. Par ailleurs, les butineuses réalisent leurs danses plus loin de la ruche. «Ainsi cantonnées, elles se mélangent moins avec les ouvrières», note Aurore Avarguès-Weber, chercheuse au Centre de recherches sur la cognition animale, à Toulouse. Cette distanciation sociale permettrait d'assurer la survie de la colonie, en particulier de ses plus jeunes éléments. ■

G. J.

M. Pusceddu et al., *Science Advances*, vol. 7, n° 44, 2021

Le phénomène est bien connu en cuisine. Laissez tomber quelques gouttes d'eau sur une poêle très chaude, elles se mettent à danser en tous sens. Au contact du métal, une partie de la goutte se transforme en vapeur et crée un coussin sur lequel lévite la goutte. C'est l'effet Leidenfrost. On l'observe pour des gouttes d'eau lorsque la température de la plaque atteint de l'ordre de 160-200°C. Et quand deux gouttes se rencontrent, elles fusionnent... si elles ont la même composition. Dans le cas contraire, elles peuvent parfois rebondir l'une sur l'autre. C'est ce qu'ont observé Felipe Pacheco-Vázquez, de l'université autonome de Puebla, au Mexique, et ses collègues.

«Cette observation a été une surprise pour nous. Initialement, nous voulions étudier l'effet Leidenfrost pour des gouttes d'eau avec différentes concentrations d'éthanol», raconte Florian Moreau, du laboratoire PPrime, à Poitiers. Par hasard, nous avons mis en présence une goutte d'eau pure avec une goutte d'éthanol et nous avons constaté ce phénomène inattendu de rebond.» Les chercheurs ont chauffé une plaque d'aluminium concave à 250°C. Ils y ont déposé une goutte d'eau qui s'est mise à léviter au centre de la plaque. Ils ont ensuite lâché une goutte d'éthanol, qui a glissé vers le centre de la plaque et a rebondi plusieurs fois sur la goutte d'eau avant de fusionner avec elle.

L'équipe a montré que les rebonds sont le résultat d'un effet Leidenfrost à l'interface des deux gouttes. En effet, chaque goutte, chauffée par la plaque métallique, est quasiment à sa température de fusion, 100°C pour l'eau et 79°C pour l'éthanol. Or le seuil de température pour le régime Leidenfrost de l'éthanol se situe à peine au-dessus de la température de fusion. L'effet se déclenche donc même au contact de la goutte d'eau. Ainsi, trois effets Leidenfrost opèrent en même temps. Et quand la goutte d'éthanol devient trop petite pour former assez de vapeur, elle fusionne avec la goutte d'eau. ■

S. B.

F. Pacheco-Vázquez et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 127, 204 501, 2021

GÉOSCIENCES

QUAND LES CYCLES GLACIAIRES SE SONT ALLONGÉS

Il y a 1 million d'années, la périodicité des épisodes glaciaires est passée de 41 000 ans à 100 000 ans. Ce changement serait lié à l'altération des courants marins.

Depuis plusieurs millions d'années, le climat terrestre est caractérisé par une alternance de périodes glaciaires (pendant lesquelles une partie importante des continents est englacée) et de périodes interglaciaires où la température est plus élevée. Il y a environ 1 million d'années, la période des cycles glaciaire-interglaciaire est passée de 41 000 ans à 100 000 ans. Maayan Yehudai, de l'université Columbia, à New York, et ses collègues apportent des indices qui renforcent et présentent un des scénarios proposés pour expliquer cette transition.

Selon «l'hypothèse régolithe», d'importants épisodes d'érosion continentale entre 1,4 et 1 million d'années auraient dégradé la couche de roches sédimentaires meubles (les régolithes) autour de l'Atlantique nord, exposant à la surface le socle cristallin composé de roches magmatiques et métamorphiques. Sur ce sol plus rugueux, durant les périodes glaciaires qui ont suivi, des calottes plus épaisses et plus étendues se seraient formées. Maayan Yehudai et ses collègues ont voulu tester la validité de l'hypothèse régolithe en retraçant l'évolution, dans l'océan Atlantique, de la circulation thermohaline. Cet ensemble de grands courants océaniques superficiels et profonds répartissent la chaleur à la surface du globe et jouent donc un rôle important dans le climat terrestre.

Pour ce faire, les chercheurs ont étudié les isotopes du néodyme (Nd) dans des sédiments océaniques datant de 1,25 million d'années à 600 000 ans, c'est-à-dire avant, pendant et après la période de transition, à plusieurs latitudes le long de l'océan Atlantique. Le rapport isotopique $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ constitue une signature spécifique des roches continentales qui reflète à la fois leur âge et leur composition chimique. En analysant la composition isotopique des sédiments, il est ainsi possible de remonter aux roches qui les ont produits sous l'effet de l'érosion et donc d'en déduire les courants marins qui les ont transportés et leur intensité. Et en effectuant cette analyse sur des carottes sédimentaires, les chercheurs déduisent les modifications des grands courants océaniques au cours du temps.



Il y a 1 million d'années, les calottes glaciaires glissaient probablement moins sur la croûte continentale et auraient accumulé plus de glace. La fonte de ces calottes épaisses aurait perturbé les courants marins et conduit à un allongement des cycles glaciaires. Ici, vue du glacier islandais Breiðamerkurjökull, qui apporte de l'eau douce dans l'océan Atlantique.

D'après les données des chercheurs, dans la couche sédimentaire entre 980 000 et 950 000 ans (en pleine période glaciaire), la valeur du rapport isotopique est si faible qu'elle ne peut s'expliquer par les seules variations de courants océaniques. Comme prévu par l'hypothèse régolithe, des calottes glaciaires épaisses, sur les continents autour de l'Atlantique nord, auraient apporté de grandes quantités de sédiments dans l'océan. Ce grand apport d'eau douce aurait perturbé et ralenti la circulation thermohaline à partir de 950 000 ans. Ce que confirme une hausse du rapport isotopique à cette période. Ce ralentissement des courants aurait conduit au premier cycle glaciaire de 100 000 ans.

La modification des courants océaniques et la fertilisation des océans causée par l'érosion auraient, en plus, augmenté la capacité des océans à stocker le dioxyde de carbone, l'un des principaux gaz à effet de serre de l'atmosphère, accentuant l'intensité des épisodes glaciaires. ■

Nicolas Butor

M. Yehudai et al., PNAS, vol. 118, n° 46, 2021

Grand prix Inserm 2021

Ce prix récompense Marion Leboyer, spécialiste des maladies mentales et directrice du laboratoire Neuropsychiatrie translationnelle, à Créteil. Elle a notamment contribué à améliorer le traitement des personnes qui souffrent de schizophrénie, de dépression, de troubles bipolaires ou encore de troubles du spectre de l'autisme. Durant l'épidémie de Covid-19, son équipe a mis en place les plateformes CovidÉcoute et Écoute Étudiants Île-de-France, dédiées au soutien psychologique.

www.inserm.fr

L'exoplanète au grand cœur

Comme l'exoplanète GJ 367 b se trouve à seulement 31 années-lumière de la Terre, Kristine Lam, de l'université technique de Berlin, et ses collègues ont pu préciser ses caractéristiques : son rayon correspond à 72 % de celui de la Terre, sa masse représente 55 % de celle de la Terre. On parle alors de « sous-Terre ». Cependant, sa densité est très élevée, proche de celle du fer. Les chercheurs estiment que son noyau de fer occupe 86 % de son rayon – une structure interne qui ressemble à Mercure.

Science, 3 décembre 2021

Le cap des 100 qubits franchi

Dans la course à l'ordinateur quantique, IBM vient de franchir une étape avec la puce Eagle, qui comporte 127 qubits, réalisés à partir de circuits supraconducteurs. Certains spécialistes pensent que cette future génération d'ordinateurs commencera à effectuer des opérations utiles à partir de 1 000 qubits. Mais ce nombre seul ne suffit pas. Les qubits doivent aussi pouvoir être manipulés assez vite et être robustes aux erreurs. Le chemin est encore long...

IBM, 15 novembre 2021

LE BON SEL DE LA VIE À ARN

Les premières formes de vie ont-elles utilisé l'ARN comme support de leur code génétique? Les brins d'ARN ont la capacité de se combiner et de se replier sur eux-mêmes. Ils forment alors des ribozymes, des structures tridimensionnelles complexes capables de s'autorépliquer ou d'effectuer les opérations nécessaires à la vie. Cependant, cette hypothèse se heurtait à des conditions chimiques défavorables: les milieux prébiotiques où sont nées les premières formes de vie auraient été très riches en ions sodium Na^+ et pauvres en ions magnésium Mg^{2+} . Or les premiers, en se liant aux brins d'ARN chargés négativement, les auraient maintenus dans une configuration dépliée, tandis que les ions Mg^{2+} , grâce à leurs deux charges positives, auraient relié deux brins ou deux sites du même brin, et ainsi favorisé la formation des ribozymes.

Mais Thomas Matreux, de l'université Ludwig-Maximilians, à Munich, et ses collègues ont identifié un milieu qui aurait offert les bonnes conditions. Ils se sont intéressés à la diffusion de ces ions lorsque le milieu aqueux riche en sels circule par convection thermique dans des microfissures présentes dans du verre basaltique, une roche volcanique commune.



La Chaussée des géants, en Irlande du Nord, est une formation volcanique constituée de roche basaltique. Au sein de ce type de roche, dans des microfissures, les conditions ont pu être favorables au développement d'une forme de vie fondée sur l'ARN.

Dans ces conditions, le phénomène de thermophorèse se produit: en fonction de leur taille et de leur charge, les ions ne migrent pas tous de la même façon. Les chercheurs ont ainsi mis en évidence que dans des conditions prébiotiques plausibles soumises à un gradient de température, les zones les plus froides se trouvent fortement enrichies en ions Mg^{2+} . La formation et l'activité des ribozymes y seraient alors possibles. ■

Martin Tiano

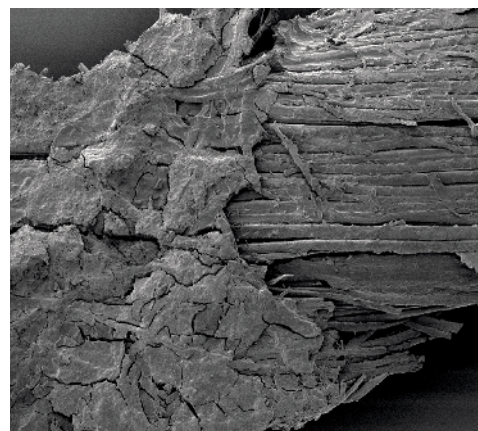
T. Matreux et al., *Nature Chemistry*, vol. 13, pp. 1038-1045, 2021

PHYSIQUE DES MATÉRIAUX

LA LONGÉVITÉ DU LIN

Pour étudier le vieillissement du lin dans l'idée de développer des écomatériaux, Johnny Beaugrand, de l'Inrae (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement), et ses collègues avaient étudié des fibres prélevées sur un linge mortuaire tiré d'un sarcophage égyptien vieux de 4 000 ans. Ils ont réalisé la même analyse avec des échantillons de toiles de peintres des XVII^e et XVIII^e siècles. La comparaison de ces matériaux de différentes origines offre des perspectives intéressantes sur l'évolution des caractéristiques du lin au cours du temps.

Étonnamment, les fibres de lin du linge mortuaire sont mieux préservées que celles issues des toiles. Leurs performances mécaniques sont même très peu altérées: elles sont comparables à celles du lin moderne, car la cellulose y est quasi intacte. Les chercheurs ont attribué cette bonne conservation aux faibles variations hydriques subies par le sarcophage



Fibres de lin prélevées sur un tableau, recouvertes des couches de différents matériaux (colle, plâtre, peinture...), vues au microscope électronique à balayage.

égyptien. À l'inverse, les traitements chimiques appliqués sur les toiles pour préserver les couleurs ont beaucoup abîmé les fibres. ■

Isabelle Bellin

A. Melelli et al., *Nature Plants*, vol. 7, pp. 1200-1206, 2021; *Journal of Cultural Heritage*, vol. 52, pp. 202-214, 2021

NEUROSCIENCES

DES CELLULES DIGESTIVES À L'ORIGINE DES NEURONES ?

Certaines cellules digestives d'une éponge d'eau douce communiquent entre elles comme le font les neurones à travers les synapses.

Quand en 2010, Mansi Srivastava, alors à l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont séquencé le génome d'*Amphimedon queenslandica*, une éponge de la Grande Barrière de corail, leur surprise a été grande. L'animal était doté, entre autres, de gènes impliqués dans le fonctionnement des synapses, les zones de communication entre neurones... alors que les éponges n'ont pas de système nerveux. Ces animaux recelaient-ils des indices sur l'origine du type de cellules qui composent le système nerveux ? Pour le savoir, Jacob Musser, du Laboratoire européen de biologie moléculaire, à Heidelberg, en Allemagne, et ses collègues ont examiné les cellules des spongilles, des éponges d'eau douce. Ils ont ainsi trouvé des cellules dont les caractéristiques ne sont pas sans évoquer celles des neurones, mais de fonction bien différente...

Les spongiaires forment l'un des groupes d'animaux les plus anciens, puisqu'ils sont apparus il y a environ 600 millions d'années. Ces organismes relativement simples sont des microphages suspensivores, c'est-à-dire qu'ils se nourrissent d'organismes ou de particules alimentaires microscopiques en filtrant l'eau qui les contient, jusqu'à plusieurs centaines de litres par jour. Ils sont dépourvus de système nerveux et ne présentent pas le moindre neurone. Chez les animaux qui en ont, ces cellules communiquent entre elles grâce à des signaux électriques ou chimiques qui passent par des connexions, les synapses.

L'équipe de Jacob Musser a donc voulu découvrir quelles cellules des éponges exprimaient les gènes connus pour être impliqués dans le fonctionnement des synapses. Pour cela, elle a séquencé l'ARN d'une éponge d'eau douce (*Spongilla lacustris*) à l'échelle de cellules uniques, ce qui permet de repérer les gènes exprimés dans chaque cellule. Curieusement, les cellules qui exprimaient les gènes « synaptiques » étaient concentrées autour des chambres digestives de l'éponge. Les chercheurs ont alors examiné ces cellules « neuroïdes » par microscopie électronique et imagerie aux rayons X. Les images étaient



Ces éponges d'eau douce (*Spongilla lacustris*) présentent des cellules du système digestif qui communiquent comme des neurones.

évocatrices; elles ont révélé que ces neuroïdes tendent de longs « bras » vers d'autres cellules, des choanocytes, qui sont elles-mêmes équipées de protrusions et ont la charge du système de filtrage de l'éponge, ainsi que de la capture de sa nourriture. Ces protubérances ne sont pas sans rappeler, visuellement, les « bras » des neurones – les dendrites et les axones – qui se terminent justement par des synapses.

Pour les biologistes, une sorte de communication aurait lieu entre ces cellules. Ils estiment que les neuroïdes se serviraient de leurs bras pour indiquer aux choanocytes d'interrompre le filtrage, afin de nettoyer les chambres digestives des débris et microbes indésirables qui s'y seraient accumulés. Cette interaction montre que les neurones ont donc peut-être évolué à partir de... cellules digestives. Mais certains chercheurs restent prudents; il faudra mener plus de recherches avant de pouvoir compléter la célèbre locution de Descartes. Je mange, donc je pense, donc je suis! ■

William Rowe-Pirra

J. Musser et al. *Science*, vol. 374, pp. 717-723, 2021

cité

sciences
et industrie

conférences

les récits

cycles thématiques,
tables rondes, projections

jusqu'à janvier 2022



accès gratuit
cite-sciences.fr
M > Porte de la Villette

en partenariat avec



avec le soutien de



Les conférences vous donnent rendez-vous, les mardis et jeudis, à l'auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie et sur YouTube. En janvier, ne manquez pas :

cycle *science-fiction : imaginez d'autres possibles*

jeudi 13 janvier à 19h

Changer l'histoire : bienvenue en uchronie !

L'uchronie est une fiction, une histoire alternative, une façon de raconter ce qui aurait pu se passer si un élément historique avait été différent ou si certaines découvertes n'avaient pas eu lieu. Que nous racontent ces récits ? Nous rassurent-ils sur nos choix ? Nous permettent-ils de mieux les comprendre ?

Avec **Natacha Vas Deyres**, chercheuse associée au Laboratoire pluridisciplinaire de recherches sur l'imaginaire appliquées à la littérature.

jeudi 20 janvier à 19h

Se faire peur pour éviter le pire : le pouvoir des dystopies

En nous projetant dans des futurs sombres ou radieux, les récits d'anticipation redessinent les contours du possible et du souhaitable. Plus que jamais, l'imagination du futur semble tiraillée entre promesses et menaces. Le pouvoir du récit ne devrait-il pas également susciter la méfiance ? Quel rôle les dystopies peuvent-elles jouer dans notre appréhension de l'avenir ?

Avec **Frédéric Claisse**, sociologue, attaché scientifique à l'Institut Wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique, et à l'Université de Liège.

jeudi 27 janvier à 19h

Au pays des merveilles : quand l'impossible fait rêver

Au début du 20^e siècle, parallèlement à la découverte de la radioactivité ou des rayons X, une nouvelle école littéraire voit le jour : le merveilleux-scientifique. Se démarquant de Jules Verne, les auteurs souhaitent faire de leurs récits un laboratoire censé aider à mieux penser le présent. Que nous dit ce mouvement de la science et des pseudosciences de cette époque ?

Avec **Fleur Hopkins-Loféron**, postdoctorante au CNRS.



GÉOMORPHOLOGIE

LES FORCES DE LA NATURE EN FRANCE

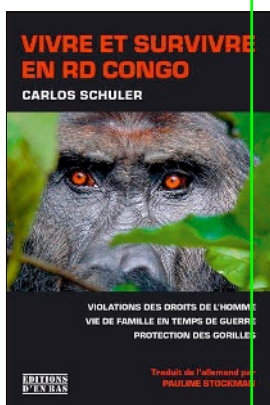
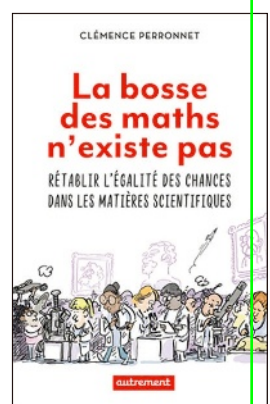
Georges Fetermann
Delachaux et Niestlé, 2021
240 pages, 29,90 euros



ÉTHOLOGIE/ÉCOLOGIE

LE LOUP, CE MAL-AIMÉ QUI NOUS RESSEMBLE

Pierre Jouventin
HumenSciences, 2021
256 pages, 18 euros



Cet ouvrage dédié aux paysages naturels tourmentés par des processus géologiques de long cours ou par des événements brutaux est précieux à plus d'un titre. On chemine du très ancien (formation des massifs montagneux) au subactuel (cas de l'écroulement du mont Granier en 1248) et à l'actuel (l'érosion des côtes en lien avec la hausse du niveau marin). Georges Fetermann, auteur de nombreux livres sur les arbres et les paysages, nous invite à un tour de France en 180 photographies légendées, souvent en double page. Sa connaissance intime des phénomènes illustrés lui a permis de sélectionner des sites magnifiques et très variés, du Mercantour au Finistère, des Hautes-Pyrénées au Bas-Rhin. À la faveur de huit parties, le lecteur aura plaisir à : 1) «soulever des montagnes» et apprécier quelques résultats de la tectonique des plaques et d'orogénèses; 2) percevoir la «souffrance des roches» lors de phases de métamorphisme ou de diagenèse; 3) ressentir les «colères de la Terre» que sont le volcanisme et la mise en place de failles; 4) observer l'«all... chimie» karstique et les effets des circulations hydrothermales en profondeur; 5) comprendre l'érosion à travers des «histoires d'eau» sous forme liquide et solide; 6) dont celle des côtes par «le travail incessant de la mer»; 7) observer les effets du «vent violent et des tornades» et 8) de «forces cosmiques, magnétiques, électriques», plus insaisissables encore. Le lecteur le plus exigeant regrettera le compromis fait sur la qualité des images et la longueur de leurs légendes, mais la formule trouvée permet à l'ouvrage d'être accessible et à sa mise en page d'être efficace. Puisse-t-il trouver place dans de nombreuses bibliothèques d'amoureux de la nature!

LUDOVIC RAVANEL
CNRS

Voici un livre original sur le loup. L'auteur livre un plaidoyer argumenté en sa faveur. Même si ses recherches n'ont jamais porté sur le loup, cet ancien éthologue au CNRS a un rapport personnel particulier avec *Canis lupus lupus*, car les circonstances de la vie l'ont amené à élever une louve en appartement (*Kamala. Une louve dans ma famille*, Flammarion, 2012). Son bagage d'éthologue lui avait alors permis de tirer des enseignements passionnants de l'intimité quotidienne vécue avec cette louve, mais aussi de celle avec ses chiens, c'est-à-dire avec *Canis lupus familiaris*. Il narre ici une histoire de la domestication du loup fondée sur l'hypothèse qu'humains et loups se sont rapprochés par convergence écologique: ces deux prédateurs pratiquaient une chasse collective coordonnée. La thèse est parfois audacieuse: ainsi l'existence d'un altruisme chez le loup est admirablement mise en évidence. Sa belle formule, reprise de La Fontaine, «le chien, un loup rempli d'humanité», montre les paradoxes de la relation de l'humain avec le loup – prétendument son pire ennemi – et avec le chien – prétendument son meilleur ami. Il explique pourquoi la domestication du loup a donné un avantage à *Homo sapiens* sur les autres espèces d'hominidés. Puis il aborde les persécutions passées et actuelles du loup par les humains et pose de justes questions sur la gestion politique française de l'espèce. Au final, le livre est un ouvrage citoyen critique du comportement humain. Pour Pierre Jouventin, l'humain est un «animal raté». Soulignant que les loups, dans la nature, savent garder un parfait équilibre avec leur milieu, il se demande même si les humains ne devraient pas, dans le contexte de la sixième extinction, les prendre comme... modèle de survie.

FARID BENHAMMOU
Laboratoire Ruralités, université de Poitiers

MATHÉMATIQUES

LA BOSSE DES MATHS N'EXISTE PAS

Clémence Perronnet
Autrement, 2021
272 pages, 19 euros

Ce livre est essentiel pour toutes celles et ceux qui cherchent tout à la fois à comprendre « comment les sciences excluent », en particulier « les femmes, les classes populaires et les groupes ethno-racisés », et quoi faire pour les rendre plus égalitaires et inclusives. Pour répondre à la première question, l'autrice a mené entre 2013 et 2017 une vaste enquête empirique sur une cohorte d'une cinquantaine de filles et de garçons d'un quartier populaire sensible, scolarisés dans deux écoles puis un collège en REP+, qu'elle a interrogés lors d'entretiens approfondis – dont de larges extraits sont présentés dans le livre. Dans un style clair, didactique et passionnant, elle nous expose avec une grande finesse les cheminements de son analyse sociologique qui s'attache à élucider le rôle des médias et des loisirs scientifiques, de la famille et de l'école dans la formation des pratiques et des goûts ou dégoûts en matière de sciences. Elle montre, entre autres, comment le rapport des enfants aux sciences se transforme entre le CM2 et la cinquième avec un désamour progressif. Les sciences, dont elle explique en explorant les représentations que les enfants en ont qu'elles leur sont devenues hors d'atteinte au collège : « Les scientifiques ce sont les autres ». Dépassant les explications en termes d'autocensure ou de manque de confiance en soi, elle démontre que les sciences, telles qu'elles sont présentées, apparaissent aux enfants pratiquées par des hommes, blancs, dominants socialement, et donc de fait excluantes. L'autrice montre qu'agir pour l'égalité en sciences doit aller au-delà du dépassement de stéréotypes, qui font trop souvent peser sur les individus la responsabilité des inégalités. Cela demande donc contre des inégalités sociales, qui sont structurelles, un travail de fond.

HÉLÈNE GISPERT
Université Paris-Saclay (émér.)

ÉCOLOGIE/SOCIOLOGIE

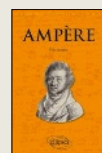
VIVRE ET SURVIVRE EN RD CONGO

Carlos Schuler
Éditions d'en bas, 2021
272 pages, 20 euros

Ce qui débute comme une autobiographie d'un soixante-huitard baroudeur se poursuit par le récit d'une vie sédentarisée pendant trente-trois ans en République démocratique du Congo, sur les rives du lac Kivu, à la frontière avec le Rwanda, sous les affres des révolutions et contre-révolutions. C'est par le prisme de ses relations intimes avec les gorilles, que Carlos Schuler reconnaît grâce à leur nez et appelle par leurs prénoms – Chimanuka, Mugaruka, Mishebere, etc. –, et de sa vie d'activiste « à dos d'argent » que ce Suisse allemand, défenseur de l'environnement et de la nature autodidacte, raconte les exactions auxquelles il a assisté et les luttes qu'il a menées pour la justice. Si les civils sont en permanence victimes de vols, de viols et de massacres, les gorilles, eux, sont tirés à vue par des militaires déshumanisés. Faut-il vraiment que le gorille pleure pour que l'on prenne conscience de la tragédie de l'histoire mouvementée de l'Afrique ? Loin des mémoires brumeuses d'un vieux blanc revenu de tout, ce témoignage précieux raconte la guerre, les crises politiques, la protection de la nature et la défense des grands primates. Les gorilles font en effet partie des 200 espèces animales aujourd'hui menacées d'extinction de manière critique à cause des conflits. Un triste exemple : le massacre de 90 % des grands mammifères du parc national de l'Akagera, dommage collatéral du génocide des Tutsis, au Rwanda en 1994. Ce livre, abondamment illustré en couleur, est un appel pressant à nos consciences. Il est publié alors que le parc national des Virunga dans l'est de la République démocratique du Congo, la plus ancienne réserve naturelle d'Afrique inaugurée en 1925, annonçait en août dernier la naissance d'un bébé gorille de montagne dans ce foyer de groupes armés belliqueux depuis plus de vingt-cinq ans. Guérilla contre *Gorilla*. On aimerait que le deuxième l'emporte.

STEPHEN ROSTAIN
CNRS

ET AUSSI



LE PEUPLE DES HUMAINS

Lluís Quintana-Murci
Odile Jacob, 2021
336 pages, 23,90 euros

Le détenteur de la chaire de Génétique humaine au Collège de France nous décrypte la génétique humaine. Nous comprenons ainsi pourquoi il n'y a qu'une espèce humaine, qui plus est venue d'Afrique il y a très peu de temps à l'échelle de l'évolution, mais aussi à quelles expressions du phénotype (nos traits apparents) les conditions de vie rencontrées par nos ancêtres ont conduit ou encore quelles sélections elles ont entraîné dans le génotype (nos traits génétiques) dans le cadre de la coévolution incessante entre nos cultures et notre biologie. Ne manquez pas ce livre extrêmement clair d'un grand chercheur.

AMPÈRE

Éric Jacques
Ellipses, 2021
368 pages, 26 euros

L'éditeur résume ainsi le livre : « Plonger dans la vie d'Ampère, c'est suivre les aventures ordinaires d'un homme extraordinaire. » Rien n'est plus vrai : André-Marie Ampère, le génial théoricien de l'électrodynamique, cet homme de vers, de mots et d'équations connut le veuvage, le divorce, les dettes... en plus de la reconnaissance des grands scientifiques de son temps. L'auteur narre comment le petit bonhomme Ampère affronta les affres de la Révolution, l'angoisse de la pauvreté sous l'Empire puis la Restauration, les difficultés liées au romantisme de son fils tout en produisant des mémoires sur l'intégration des équations aux dérivées partielles et autres inventions géniales.

CÉSAR ET LA GUERRE

Yann Le Bohec
CNRS éditions, 2021
448 pages, 25 euros

L'auteur est un spécialiste très apprécié de l'histoire militaire romaine. En trois parties – « Guerre des Gaules », « Guerre civile », puis « Thèmes » reliés à la guerre romaine, il approfondit ici ce que l'on peut dire des activités militaires de Jules César. Le style est alerte ; les points de vue divergents des confrères de l'auteur évoqués et discutés ; l'archéologie convoquée ; tout est exprimé avec la remarquable efficacité qui est la marque de l'auteur.

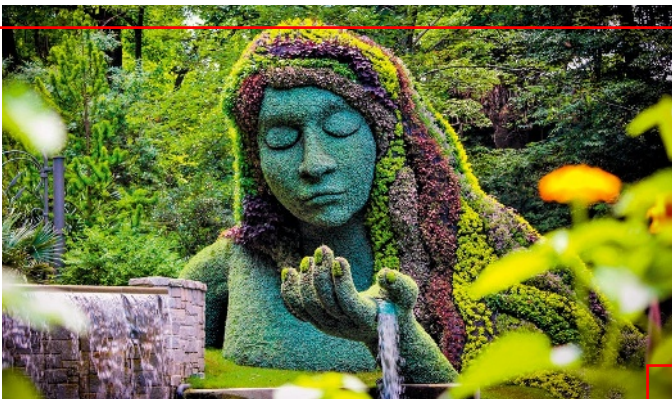


La chronique de
CATHERINE AUBERTIN

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

PACHA MAMA CONTRE BIG BROTHER

Il y a plusieurs façons de se réconcilier avec la nature,
mais selon quelle vision du monde : la Terre Mère
des peuples andins ou la Civilisation écologique chinoise ?



La Terre Mère,
dans le jardin
botanique d'Atlanta,
aux États-Unis

Repoussée pour cause de Covid-19, la 15^e Conférence des parties (COP) de la Convention des Nations unies sur la diversité biologique se tiendra en présentiel au printemps 2022, à Kunming, en Chine. Le thème choisi – « Civilisation écologique, construire un avenir partagé pour tous les êtres vivants sur la Terre » – interroge.

Mesurons d'abord à quel point la diversité biologique s'est arrachée de sa définition scientifique de variabilité et d'interrelations au sein des écosystèmes des espèces et des gènes. Désormais, sous le nom de « biodiversité », de « sociobiodiversité », puis de « patrimoine bioculturel », expressions plus aptes à rencontrer l'adhésion du public, elle s'est ouverte aux dimensions sociales et culturelles.

Les récents rapports de l'IPBES, de l'IUCN, des ONG, mais aussi du monde des affaires donnent le ton : les humains tissent des relations de solidarité avec les « autres vivants » qui ont permis l'évolution de l'humanité. Ils ont, comme elle, le

pouvoir d'agir sur le devenir de la biosphère. Il faut faire la paix avec la nature.

Pour cela, les « changements transformateurs » promus par l'IPBES ne se contentent pas d'appeler à « une réorganisation en profondeur, à l'échelle du

**Les peuples autochtones
et les écoféministes
revendiquent une
proximité à la nature**

système et de l'ensemble des facteurs technologiques, économiques et sociaux », mais insistent : « y compris les paradigmes, les objectifs et les valeurs ».

Les valeurs morales et spirituelles guident ainsi de nombreux textes et mouvements. Les exemples les plus frappants sont sans doute l'encyclique *Laudato si'* du pape François et l'accord de Paris sur le climat qui évoque « la protection de la

biodiversité, reconnue par certaines cultures comme la Terre nourricière, et note l'importance pour certains de la notion de « justice climatique ».

Les combats des peuples autochtones (et des écoféministes) revendiquent également une proximité à la nature. De fait, la Déclaration universelle des droits de la Terre-Mère appelle à respecter les équilibres des écosystèmes et encourage à faire des animaux, des fleuves, de tous les êtres des sujets de droit. Rédigé à l'initiative des peuples amérindiens, le texte se réfère à la Pachamama, la Terre. On ne peut que se réjouir de ce retour des valeurs morales et spirituelles, mais sont-elles bien celles de la civilisation écologique ?

Ce slogan porte une tout autre cosmovision que celle des peuples autochtones. La civilisation écologique est un principe constitutionnel en Chine qui implique le respect absolu des lois environnementales. Cependant, comme le gouvernement se confond avec le parti communiste qui contrôle l'économie, le modèle capitaliste prédateur responsable des dégâts portés à l'environnement ne peut être incriminé. Aussi, la politique environnementale de la Chine s'appuie-t-elle sur la surveillance centralisée de l'empreinte écologique de chacun de ses citoyens. Le développement des outils numériques, le recueil des données de masse, l'intelligence artificielle sont mis au service de l'utilisation des ressources définie pour chaque citoyen.

À l'heure où les militants écologistes prêchent l'ancrage dans les territoires, les conférences de citoyens, la participation, le gouvernement chinois utilise l'écologie pour renforcer son pouvoir par des mesures coercitives. On imagine mal à grande échelle une société acéphale comme celle des Indiens d'Amazonie pour gérer nos relations à la nature. Mais un monde de citoyens connectés, sous l'emprise d'une seule autorité, serait-il plus à même de répondre aux défis environnementaux ?

« Gouverner la nature, c'est d'abord gouverner les hommes », écrivait Michel Foucault... C'est bien le défi auquel sont confrontés nos régimes démocratiques. ■

La revue des sciences de la vie et de la Terre



Nouvelle
formule

ES

42

2021

ESPÈCES

Revue d'histoire naturelle

CPPAP

L 15519 - 42 - F - 9,50 € - RD



DÉCEMBRE 2021 à FÉVRIER 2022

BELUX: 9,90 € - DOMS: 9,90 € - NLALUS: 19,50 XPF - POLS: 14,00 XPF - CAN: 14,99 SCAD

Le guillemot de Brünnich Vivre en COLONIE

Dune, F. Herbert
et l'écologie

L'okapi au cœur
de rivalités
coloniales

Premières plongées
en terre Adélie

Ruchers et
transhumances
antiques

Le calao: mythes
et menaces

■ BOTANIQUE: Le caféier ■ ENTOMOLOGIE: La mégère et le satyre ■ ÉPISTÉMOLOGIE: le concept de biodiversité est-il utile? ■ ENTR'ESPÈCES: Le "coucou aquatique" du lac Tanganyika
■ BIOLOGIE MARINE: Les perles ■ HISTOIRE: Le baron immobile ■ GÉOLOGIE: Une mer entre Jurassique et Crétacé

BOTANIQUE,
ZOOLOGIE,
ÉVOLUTION,
HERPÉTOLOGIE,
ORNITHOLOGIE,
ÉCOLOGIE...

**ESPÈCES, C'EST
L'ACTUALITÉ DE
LA RECHERCHE
ACCESSIBLE À
TOUS, PROPOSÉE
PAR LES
SCIENTIFIQUES
EUX-MÊMES.**

Le Guillemot de Brünnich,
vivre en colonie
n° 42: Décembre 2021
100 pages - 9,50 €

CNL

Trimestriel disponible
en kiosque, par abonnement
et par correspondance

especies.org



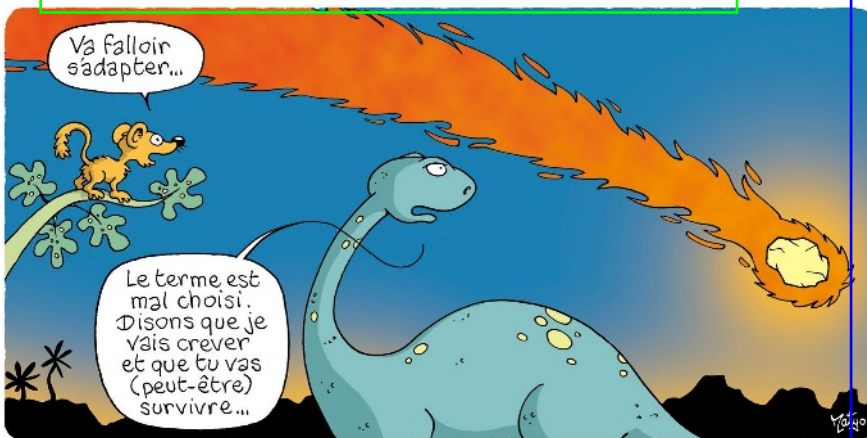


La chronique de
YVES GINGRAS

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

L'ART SUBTIL DE NOMMER LES CONCEPTS

Mal nommer un concept scientifique contribue
~~au malheur pédagogique des étudiants...~~



On cite souvent le mot d'Albert Camus: «Mal nommer un objet, c'est ajouter au malheur de ce monde.» Il me semble que cela est également vrai pour certains concepts scientifiques. Dans son ouvrage *La Formation de l'esprit scientifique*, Gaston Bachelard a bien montré que certaines images et analogies engendrent des obstacles épistémologiques – qui sont autant d'obstacles pédagogiques – à la production de connaissances valides. On doit, à mon avis, ajouter à cela le choix des mots, car ils peuvent aussi, par les images qu'ils suggèrent, entraver la bonne compréhension d'un concept scientifique.

Laissons de côté les cas les moins problématiques, même s'ils peuvent irriter, comme le fait de nommer une particule «étrange», produisant ainsi un sentiment de mystère mal placé, ou de parler de la «couleur» des quarks, forçant ainsi à rappeler aux plus naïfs que les particules n'ont, bien sûr, pas de couleur. Beaucoup plus

problématique est le choix, très mal avisé, de parler de «téléportation quantique» pour décrire les interactions quantiques de particules éloignées. Le mot référant à la série de films de science-fiction *Star Trek*, il donne alors immédiatement l'impression

**Les images que suggèrent
les mots peuvent entraver
la compréhension
d'un concept scientifique**

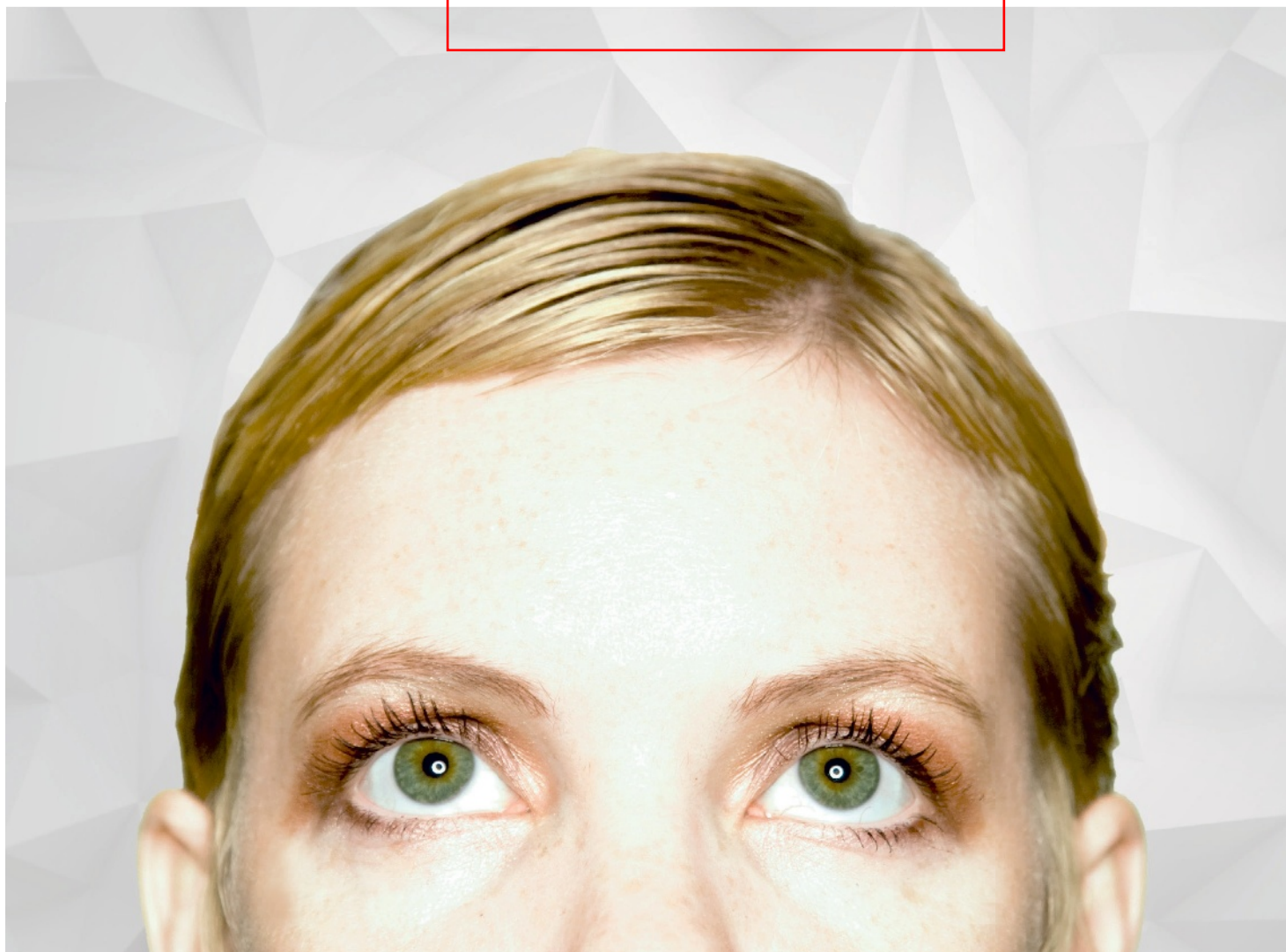
que c'est bien – comme dans le film – la matière elle-même qui est transportée de manière instantanée dans l'espace, alors qu'il s'agit plutôt des «états quantiques» qui sont «intriqués». Il s'agit ici d'un phénomène très contre-intuitif lié à la «non-localité» des liens entre objets quantiques, et l'on rend sa compréhension encore plus difficile en l'affublant d'un terme dont il

faut aussitôt dire qu'il ne signifie pas qu'il y ait vraiment transport de matière!

D'autres cas problématiques sont plutôt le fait d'un changement d'interprétation d'un phénomène d'abord bien nommé et dont le nom, pour diverses raisons, n'a pas été modifié. La fameuse «contraction de Lorentz-Fitzgerald» en relativité restreinte fournit un bel exemple de cela. Cette idée, proposée par ces deux physiciens à la fin du XIX^e siècle, avait un sens dans le cadre d'un éther qui servait de repère absolu par rapport auquel le changement de longueur des objets en mouvement était considéré comme une contraction réelle due à la dynamique des forces électromagnétiques en jeu. Cette interprétation change toutefois radicalement quand Einstein propose plutôt une interprétation cinématique du phénomène dans laquelle l'éther ne joue plus aucun rôle. Dans ce cadre, il n'est alors plus question de contraction mécanique, mais simplement de longueurs différentes, aucune absolue, selon l'état de mouvement des observateurs. Malgré cette réinterprétation, le mot «contraction» suggère de lui-même qu'une force agit pour contracter l'objet dans le sens du mouvement, ce qui fait obstacle à l'interprétation relativiste.

En biologie, on peut penser à l'usage fréquent du terme «adaptation» pour expliquer l'évolution des espèces. Ce terme suggère une action consciente de l'organisme alors qu'il ne s'agit que de sa survie, car il a justement les propriétés requises pour s'épanouir dans la niche qu'il occupe, tandis que les autres, «inadaptés» à cet environnement, meurent et laissent ainsi la place libre au survivant qui peut dès lors se multiplier à l'envi. Aucun «effort» d'adaptation des survivants dans tout cela, mais le terme a une forte connotation finaliste et téléologique qui fait obstacle à la juste compréhension de l'idée darwinienne d'évolution.

En somme, l'acte de nommer, en science comme ailleurs, n'est pas banal; le défi est de choisir des noms qui suscitent des images appropriées au concept que l'on veut faire comprendre. ■



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

L'ESSENTIEL

> Une maladie auto-immune consiste en une attaque des tissus de l'organisme par les propres cellules immunitaires de ce dernier.

> Une vision simplifiée a longtemps fait des tissus cibles les victimes et des cellules immunitaires déréglées les coupables.

> Les torts seraient en fait plus partagés, car on découvre, notamment grâce à des études du diabète de type 1, comment les tissus cibles activent et attirent les cellules immunitaires.

> Parmi les acteurs clés de ce nouveau scénario, on trouve les signaux chimiques (cytokines, chimiokines...) avec lesquels les cellules alertent le système immunitaire.

> Les composés chimiques de l'environnement, toujours plus nombreux, et les modifications du microbiote expliqueraient, en partie, la recrudescence observée des maladies auto-immunes.

L'AUTRICE



STEPHANI SUTHERLAND
neuroscientifique et journaliste scientifique basée en Californie du Sud

Une nouvelle vision de l'auto-immunité

À propos des maladies auto-immunes, le coupable a longtemps été tout désigné : un système immunitaire détraqué.

On s'aperçoit qu'il ne constitue qu'une partie de l'équation.

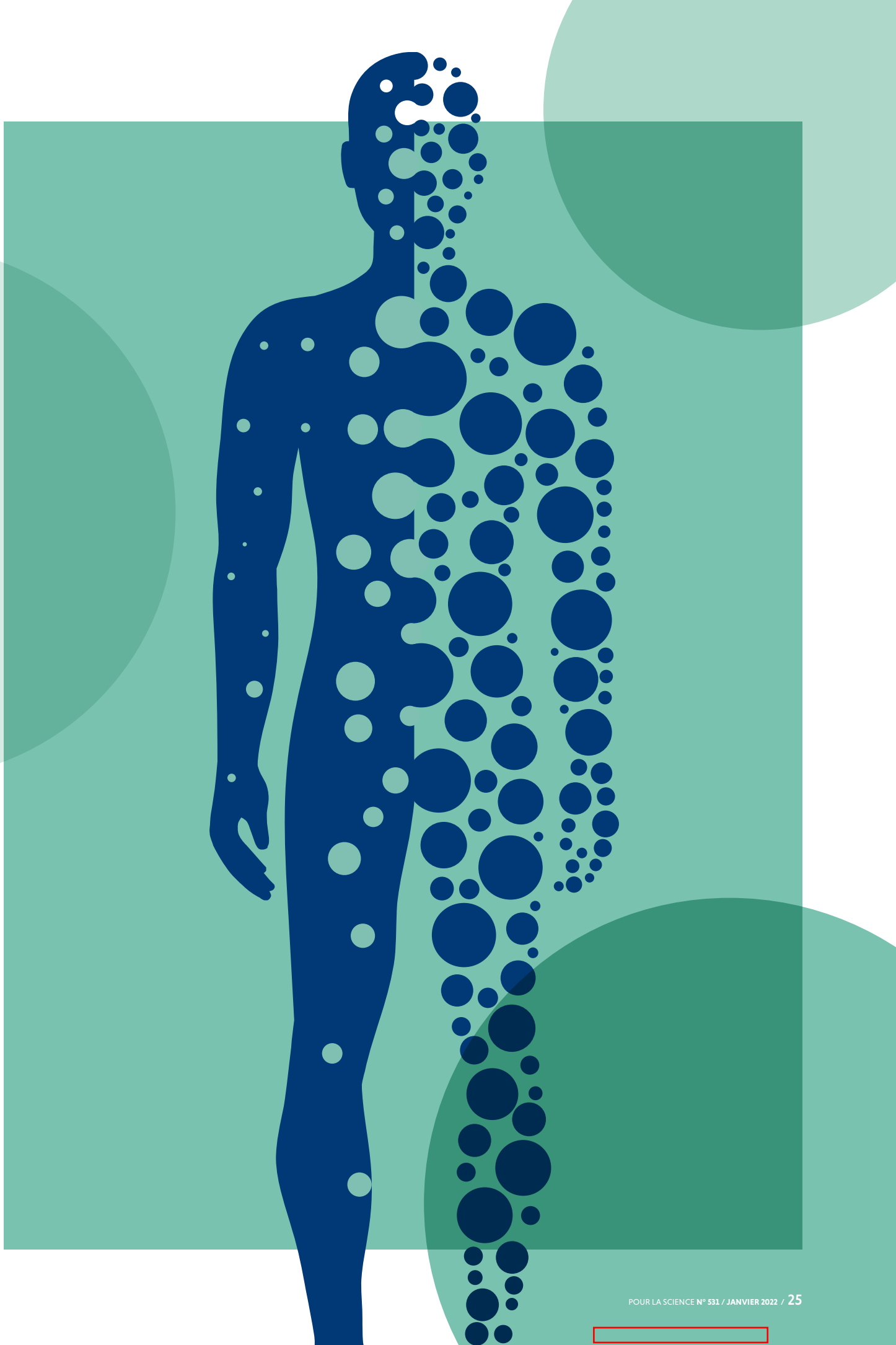
Quand Décio Eizirik a commencé à traiter des patients atteints de diabète de type 1 dans les années 1980, il était pratiquement sûr de l'origine de la pathologie : un système immunitaire détraqué. Les malades manquaient d'insuline parce que les cellules productrices de cette hormone (les cellules bêta du pancréas) étaient attaquées et détruites par celles du système immunitaire. «À l'époque, l'idée était que l'on préviendrait le diabète en contrôlant le système immunitaire», explique l'endocrinologue du centre de recherche Biosciences de l'Indiana, à Indianapolis, aux États-Unis. C'était le modèle classique d'une maladie auto-immune : des cellules protectrices qui se retournent contre celles de l'organisme qu'elles sont censées défendre. Seule était incriminée l'attaque immunitaire, tandis que les cellules bêta avaient le statut de victimes.

Aujourd'hui, la vision est moins manichéenne et les torts semblent en partie partagés. En effet, ces dernières décennies, Décio

Eizirik, avec d'autres, a acquis la conviction que les cellules bêta sont aussi en cause. À la fin des années 1990, des expériences ont montré que, dans certaines circonstances, les cellules bêta du pancréas produisent, par bouffées, des substances pro-inflammatoires, qui attirent et activent le système immunitaire.

Infection virale? Stress? On ignore encore précisément le déclencheur de ces flambées, mais ces travaux et d'autres plus récents suggèrent fortement que les cellules bêta ne sont pas aussi «innocentes» qu'on le pensait. «Nous savons maintenant que le tissu cible n'est pas un simple spectateur», explique Sonia Sharma, de l'institut d'immunologie de La Jolla, en Californie. «Il prend une part active à l'inflammation préjudiciable.»

Le diabète de type 1 n'est qu'une maladie auto-immune parmi d'autres, et plusieurs indices suggèrent que, dans des pathologies du même ordre, les cellules cibles participent à leur propre destruction. Des études récentes indiquent ainsi que les cellules endommagées dans la polyarthrite rhumatoïde et la sclérose en plaques surexpriment des gènes qui codent



des protéines ciblées par les cellules immunitaires. Supposons qu'il y ait dix étapes entre un événement déclencheur et l'attaque finale d'un tissu cible par les cellules du système immunitaire. «Nous nous sommes seulement intéressés à l'étape 10 en négligeant les premières, constate Sonia Sharma. C'est comme si nous avions travaillé à l'envers!» Pourtant, ce n'est qu'en comprenant les premières étapes que l'on peut imaginer de meilleurs traitements, voire des mesures de prévention.

Difficile toutefois de reprocher aux chercheurs de s'être au départ concentrés sur le système immunitaire. En effet, les maladies auto-immunes ressemblent à des trahisons de la part d'un système de défense particulièrement élaboré dont l'évolution l'a conduit non seulement à nous protéger des agents pathogènes extérieurs, mais aussi à surveiller les cellules menaçant de devenir cancéreuses et à nettoyer les séquelles cellulaires d'une blessure. C'est la sentinelle qui préserve notre corps du chaos. Par ailleurs, des éléments clés du système immunitaire, en particulier les lymphocytes B et T, sont bel et bien des acteurs essentiels des maladies auto-immunes. Selon Décio Eizirik, les traitements nécessiteront une double approche visant à la fois ces cellules immunitaires et leurs cibles. «Le système immunitaire a une mémoire d'éléphant, explique-t-il. Une fois que les lymphocytes T ont appris à reconnaître des cellules cibles, ils ne les oublieront pas de sitôt.»

LES CLÉS DE L'AUTODESTRUCTION

De nombreuses recherches menées ces cinquante dernières années se sont concentrées sur une caractéristique classique des maladies auto-immunes : les autoanticorps. De quoi s'agit-il ? Les anticorps, ces protéines produites par les lymphocytes B, reconnaissent et se fixent sur des motifs, des antigènes, caractéristiques par exemple d'agents pathogènes ou de cellules infectées, cette association conduisant ensuite à l'élimination de ces intrus. Les autoanticorps, quant à eux, se lient à des composants de nos propres cellules en qui ils voient des antigènes, des éléments étrangers. Là, anticorps et autoanticorps agissent comme des balises attirant des lymphocytes T cytotoxiques, ou tueurs, qui détruisent les entités ainsi marquées, les agents pathogènes et les cellules infectées dans le premier cas, les propres cellules de l'organisme dans le second. Compte tenu de leur importance, les scientifiques qui étudient l'auto-immunité traquent ces paires lymphocyte T/autoanticorps.

Ces chercheurs ont récemment compris que la localisation des lymphocytes T tueurs et des autoanticorps serait plus importante que le simple fait de leur existence. Ainsi, en 2018,

Roberto Mallone, de l'institut Cochin, à Paris, et ses collègues ont comparé des individus sains à d'autres atteints de diabète soit de type 1, soit de type 2, cette version de la maladie n'étant pas auto-immune (ici, l'insuline est bien produite, mais fonctionne mal). Les quantités de lymphocytes T cytotoxiques dans le sang étaient remarquablement similaires dans les trois groupes, y compris chez les personnes non diabétiques.



Nous savons désormais que le tissu cible n'est pas un simple spectateur de la maladie auto-immune: c'est un participant actif

Il en va autrement dans le pancréas. Les lymphocytes T cytotoxiques dits «autoréactifs», c'est-à-dire visant les cellules saines de l'organisme, étaient notablement plus abondants dans cet organe chez les personnes atteintes du type 1 de la maladie. Roberto Mallone, à la suite de Décio Eizirik, soupçonne qu'ils ne sont pas là par hasard, mais en raison d'un problème lié au tissu cible, les cellules bêta.

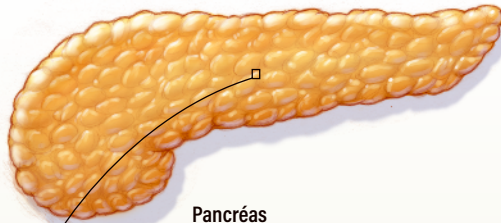
Une autre raison plaçant pour un rôle majeur des cellules cibles dans des maladies auto-immunes est venue d'études génétiques ayant montré que les gènes influençant ces maladies sont exprimés non seulement par les cellules immunitaires, mais aussi par les cellules cibles. Au début des années 2000, après le séquençage complet du génome humain, des études d'association pangénomique (en anglais GWAS pour *genome-wide association study*), c'est-à-dire visant à repérer les mutations liées, par exemple, à des pathologies, ont révélé de nombreux gènes qui, modifiés, sont associés à un risque plus élevé de pathologies auto-immunes. Et ces gènes étaient présents dans les lymphocytes B ou T, mais aussi dans des cellules qui ne font pas partie du système immunitaire, explique Sonia Sharma. Ainsi, les cellules non immunitaires ont des gènes qui, lorsqu'ils

UNE VICTIME PAS SI INNOCENTE

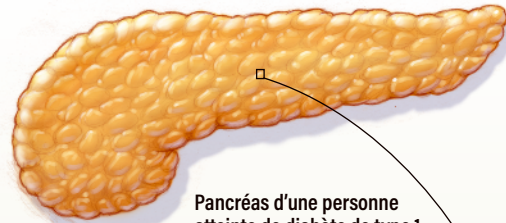
Lorsque l'organisme ne produit plus suffisamment d'insuline, une hormone vitale pour contrôler la concentration de glucose dans le sang, il en résulte un diabète de type 1. La raison de cette pathologie est la mort des cellules bêta du pancréas, qui

normalement produisent l'insuline. Elles meurent après avoir été attaquées par des lymphocytes T tueurs, des cellules du système immunitaire. Pendant des années, les scientifiques ont pensé que chez les diabétiques, ces cellules avaient un défaut qui les poussait à s'attaquer

aux cellules bêta. Pourtant, les non diabétiques ont aussi des lymphocytes T tueurs (en rose) et en même quantité, sans pour autant qu'ils s'en prennent aux cellules bêta. Les chercheurs en ont déduit que ces dernières attirent elles-mêmes les lymphocytes T.



Pancréas



Pancréas d'une personne atteinte de diabète de type 1

Un bon équilibre

Les cellules bêta sont situées dans des régions du pancréas nommées « îlots de Langerhans ». Chez les personnes non diabétiques, des lymphocytes T tueurs (ou CD8⁺) susceptibles d'endommager les cellules bêta apparaissent dans la circulation sanguine ainsi que dans le pancréas. Mais ils n'attaquent pas les cellules bêta, ce qui permet à ces cellules de continuer à produire de l'insuline.

Lymphocytes T CD8⁺ tueurs

Dans la circulation sanguine

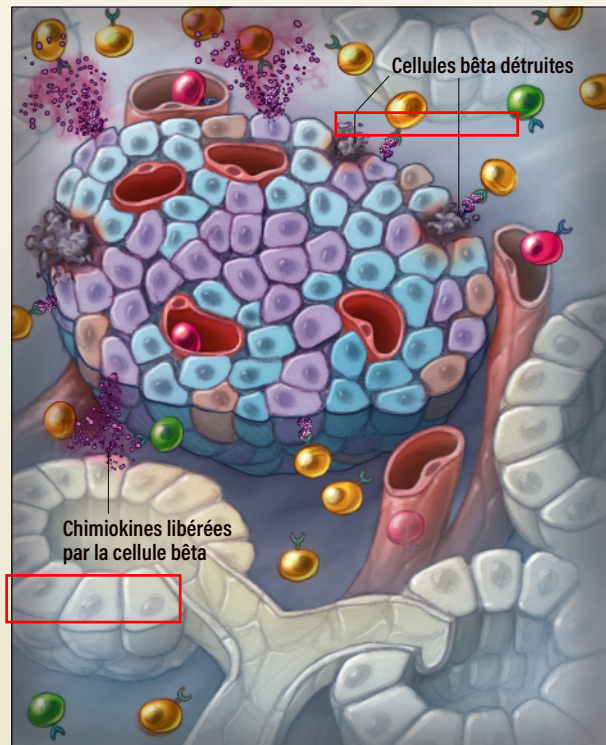
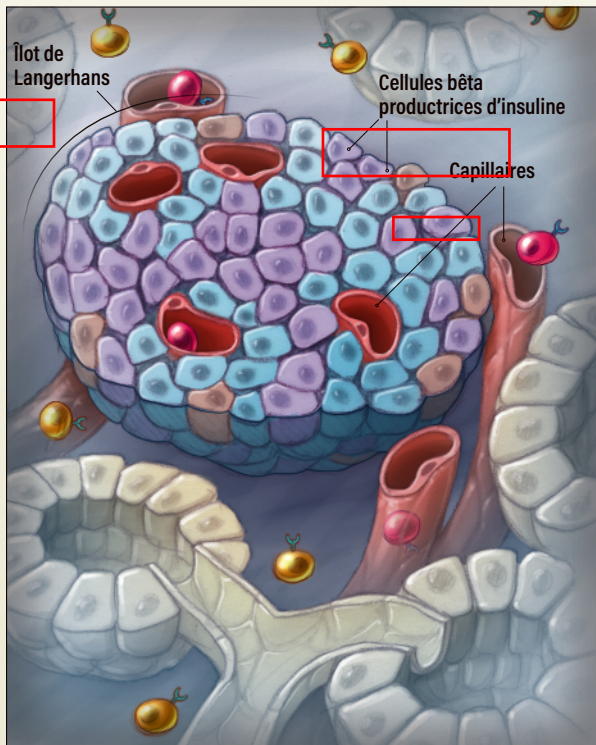
Associés à un îlot pancréatique

Diabète de type 1

Dans cette maladie, les lymphocytes T tueurs se rassemblent dans le pancréas et attaquent les cellules bêta, car elles produisent des quantités accrues de molécules qui les désignent comme cible. Parmi ces molécules figurent la préproinsuline (PPI), un précurseur de l'insuline, et une protéine du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) de classe I, un édifice complexe qui présente les antigènes aux cellules immunitaires. En cas de stress, les cellules bêta émettent des chimiokines, qui attirent les cellules immunitaires.

Lymphocytes T CD8⁺ ciblant la PPI

Protéines du CMH de classe I



s'expriment, conduisent à la production de cytokines et de chimiokines, des messagers chimiques qui déclenchent une réponse immunitaire. Cette activité est essentielle, car toutes les cellules sont susceptibles de se transformer en cancers ou d'être infectées. Dans ce cas, le système immunitaire doit être alerté et c'est le rôle de ces gènes de médiateurs immunitaires. Toutefois, mutés, ces mêmes gènes envoient des signaux de détresse alors que les cellules ne sont pas endommagées : le système immunitaire réagit comme si elles l'étaient et intervient.

LES SIGNES DE LA VULNÉRABILITÉ

Début 2021, Décio Elzirik et ses collègues ont fourni des exemples de cellules cibles trompeuses dans plusieurs maladies auto-immunes. En analysant la littérature et des bases de données créées à partir de biopsies, ils ont constaté que plus de 80% des variants génétiques liés à des maladies auto-immunes étaient exprimés par des cellules cibles dans le diabète de type 1 et trois autres maladies auto-immunes (la sclérose en plaques, le lupus et la polyarthrite rhumatoïde). Non seulement les cellules cibles contiennent des variants associés à la maladie, mais elles fabriquent aussi davantage les protéines codées par ces variants chez les personnes malades que leur équivalent non muté chez celles en bonne santé.

Que de nombreux gènes candidats soient exceptionnellement actifs dans les tissus ciblés dans plusieurs maladies a permis de relever de nombreux points communs. Parmi ces gènes figurent ceux liés aux interférons, une catégorie de cytokines pro-inflammatoires que les cellules libèrent pour attirer les cellules immunitaires en cas de problème, comme une infection virale.

De nombreuses cellules cibles des maladies auto-immunes présentent également des caractéristiques non génétiques qui les rendent vulnérables aux agressions. « Ces cellules présentent au moins trois faiblesses intrinsèques, résume Roberto Mallone. D'abord, beaucoup d'entre elles résident dans des glandes, comme la thyroïde et le pancréas, qui produisent des hormones à un rythme élevé. » Avec de telles contraintes fortes, un petit stress supplémentaire suffirait à faire pencher la balance vers un dysfonctionnement et la pathologie, et ainsi à alerter le système immunitaire. Ensuite, les cellules sécrètent des hormones et d'autres substances directement dans la circulation sanguine. Ces molécules parcourent tout l'organisme et sont capables de sensibiliser le système immunitaire à distance. Une troisième faiblesse est que de nombreux vaisseaux sanguins traversent le tissu cible, ce qui rend ses cellules facilement accessibles aux cellules immunitaires dès lors qu'elles sont sensibilisées.

Outre ces vulnérabilités, les cellules cibles réagissent parfois à une menace extérieure – un virus, par exemple – et déclenchent alors une forte réponse immunitaire. Certaines s'autodétruisent lorsqu'elles sont infectées, empêchant ainsi la propagation de la menace et l'éventuelle intervention du système immunitaire. Mais d'autres concernées par les maladies auto-immunes, comme les neurones et les cellules bêta, sont en nombre limité et se renouvellent peu : leur disparition mettrait en danger l'organisme entier. Elles restent donc en place, et le système immunitaire commence à interpréter les molécules qu'elles libèrent comme des signes que toutes les cellules de cette catégorie sont en difficulté. Une attaque auto-immune s'ensuit.



De nombreuses cellules cibles dans l'auto-immunité partagent des caractéristiques qui les rendent exceptionnellement vulnérables



La vascularite, qui se traduit par une inflammation des parois des vaisseaux sanguins, est une illustration de ces faiblesses des cellules cibles. Cette affection n'est pas une maladie auto-immune classique, car elle n'implique pas d'autoanticorps. Il s'agit plutôt d'un exemple de maladie auto-inflammatoire où une classe de cellules immunitaires dites « myéloïdes » (ce terme renvoie à leur lieu de production dans l'organisme, en l'occurrence la moelle osseuse), comme les macrophages, s'attaque aux cellules qui constituent les artères, les veines et les capillaires. Une forme rare et agressive chez les enfants résulte d'une mutation du gène d'une enzyme métabolique, l'adénosine désaminase 2. Dans une étude publiée en 2020, Sonia Sharma

a montré que cette enzyme régule l'activité aussi bien des cellules qui attaquent que de celles qui sont attaquées. «Les cellules cibles sont bien à l'origine du problème, car elles commencent à produire des cytokines qui activent ensuite les cellules myéloïdes», résume l'immunologiste.

PERTURBATIONS EXTERIEURES

Cependant, même les cellules présentant des faiblesses inhérentes ne se mettent pas seules en difficulté sur le plan auto-immun. Nous l'avons vu, chez des personnes non diabétiques, des lymphocytes T seraient en mesure d'attaquer les cellules bêta, mais s'en abstiennent. Qu'est-ce qui fait pencher la balance vers l'attaque auto-immune? Selon de nombreux scientifiques, le déclencheur est souvent une infection virale passagère ou une exposition à des produits chimiques toxiques, et plusieurs années peuvent passer avant qu'un trouble auto-immun ne devienne suffisamment évident pour être détecté.

Les Coxsackievirus sont une famille soupçonnée depuis longtemps de déclencher le diabète de type 1: certains provoquent des éruptions cutanées et des lésions buccales bénignes et passagères, mais d'autres visent le pancréas. «Ces virus infectent les cellules bêta et en tuent quand la charge virale est suffisante», raconte Roberto Mallone. Il en résulterait une inflammation attirant davantage de cellules immunitaires à l'endroit où les cellules bêta sont en train de mourir. Ce faisant, ces dernières libéreraient des auto-antigènes qui sensibiliseraient les cellules immunitaires voisines, les incitant à s'attaquer à d'autres cellules bêta aux signatures antigéniques similaires.

Et le diabétologue de résumer: «Trois éléments sont nécessaires (un auto-antigène, un environnement inflammatoire et une prédisposition auto-immune) au même endroit et au même moment. C'est probablement l'une des raisons pour lesquelles il est si difficile d'identifier les déclencheurs environnementaux: nous sommes tous exposés, mais la maladie dépend de conditions spécifiques.»

Ce schéma rend caduque une idée ancienne stipulant que les virus déclenchent des réactions auto-immunes lorsque les protéines virales ressemblent, sur le plan moléculaire, à des auto-antigènes. Cette hypothèse, dite «du mimétisme viral», a été battue en brèche à mesure que les chercheurs découvraient que de tels sosies moléculaires sont assez courants, mais qu'ils provoquent très rarement des maladies. Plusieurs molécules humaines ressemblent à celles d'agents infectieux, on dit qu'elles ont une «réactivité croisée». Une propriété «extrêmement fréquente», note DeLisa Fairweather, de la clinique Mayo, à Jacksonville, en Floride. Si elle était source de maladies, celles-ci devraient



être plus répandues. La réactivité croisée n'est donc pas en cause. Ainsi, un nouveau scénario s'est imposé: un virus tue des cellules cibles et déclenche une inflammation au milieu de laquelle des cellules immunitaires se sensibilisent aux protéines des cellules mourantes.

UNE VAGUE À VENIR

D'autres composés externes à l'organisme, comme des médicaments et d'autres produits chimiques, créent un contexte inflammatoire, multipliant les occasions où les rencontres avec les sentinelles du système immunitaire peuvent mal tourner. Selon certains, ce phénomène explique le pic de fréquence des maladies auto-immunes observé ces dernières décennies. En 2020, Frederick Miller, de l'Institut américain des sciences de la santé environnementale, et ses collègues ont publié une étude sur la prévalence des anticorps antinucléaires, un sous-ensemble d'autoanticorps visant les protéines du noyau d'une cellule. Ils ont suivi plus de 14 000 participants durant vingt-cinq ans. Entre 1988 et 1991, 11% des personnes testées étaient porteuses de ces anticorps. Ce chiffre est resté à peu près stable jusqu'en 2004, avec une légère augmentation à la fin de cette période. Mais en 2012, le nombre de personnes porteuses de ces anticorps avait atteint près de 16%! L'augmentation

Ces deux sœurs sont atteintes de lupus. Cette maladie auto-immune est caractérisée par de multiples symptômes: fièvre, fatigue, douleurs articulaires, maux de tête, troubles de la mémoire, éruptions cutanées et dysfonctionnement de divers organes.

PANORAMA DE L'AUTO-IMMUNITÉ

Des maladies auto-immunes affectent jusqu'à 5 % de la population mondiale. Cette liste de 76 pathologies est l'œuvre d'une analyse publiée en 2012 par les immunologues Scott Hayer et Matthew Cook, alors à l'université nationale d'Australie. Elle a été mise à jour grâce à d'autres spécialistes et à l'Association américaine des maladies auto-immunes (AARDA).

Les maladies présentées ici se répartissent en trois catégories, en fonction du degré de certitude qu'elles constituent une réponse auto-immune et la production d'autoanticorps. Dans les cas les plus évidents, comme la maladie de Basedow, la pathologie implique dans aucun doute des autoanticorps qui conduisent à une attaque du système immunitaire contre les cellules de l'organisme, à une inflammation et à des symptômes invalidants. Dans de nombreux autres cas, dont le syndrome de Guillain-Barré, les autoanticorps sont toujours présents, mais les symptômes n'ont pas été en mesure de les relier systématiquement à la pathologie.

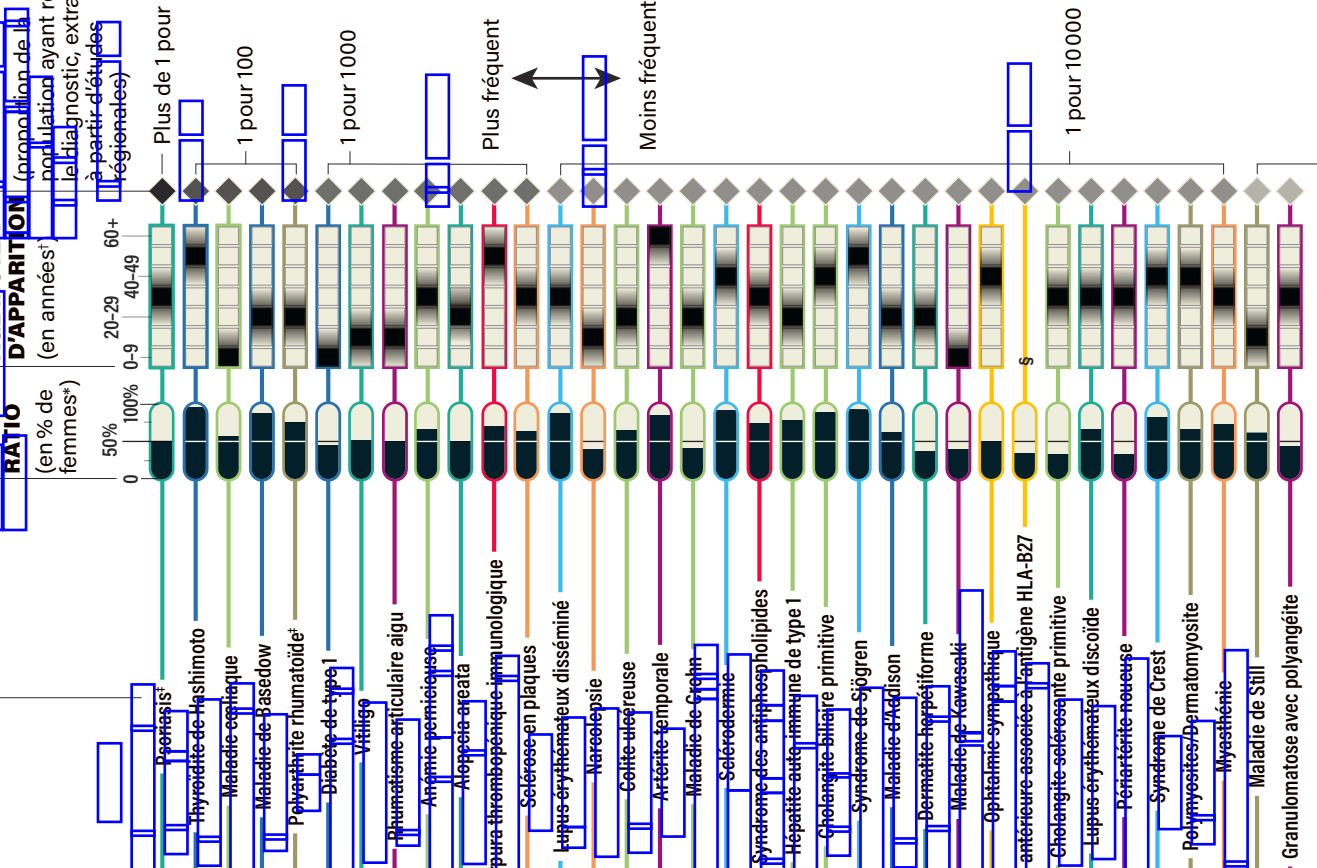
Enfin, certaines maladies, comme la colite ulcéreuse et le psoriasis, ne sont pas toujours associées à la présence d'autoanticorps, bien qu'elles répondent aux traitements qui ciblent le système immunitaire, suggérant qu'elles ont une composante auto-immune. Des maladies au statut discutable ont été écartées. Parmi elles, la myocardite, la neuromyélite optique, le purpura thrombotique thrombocytopénique...

MALADIE

SEX-RATIO (en % de femmes*)

AGE MOYEN D'APPARITION (en années)

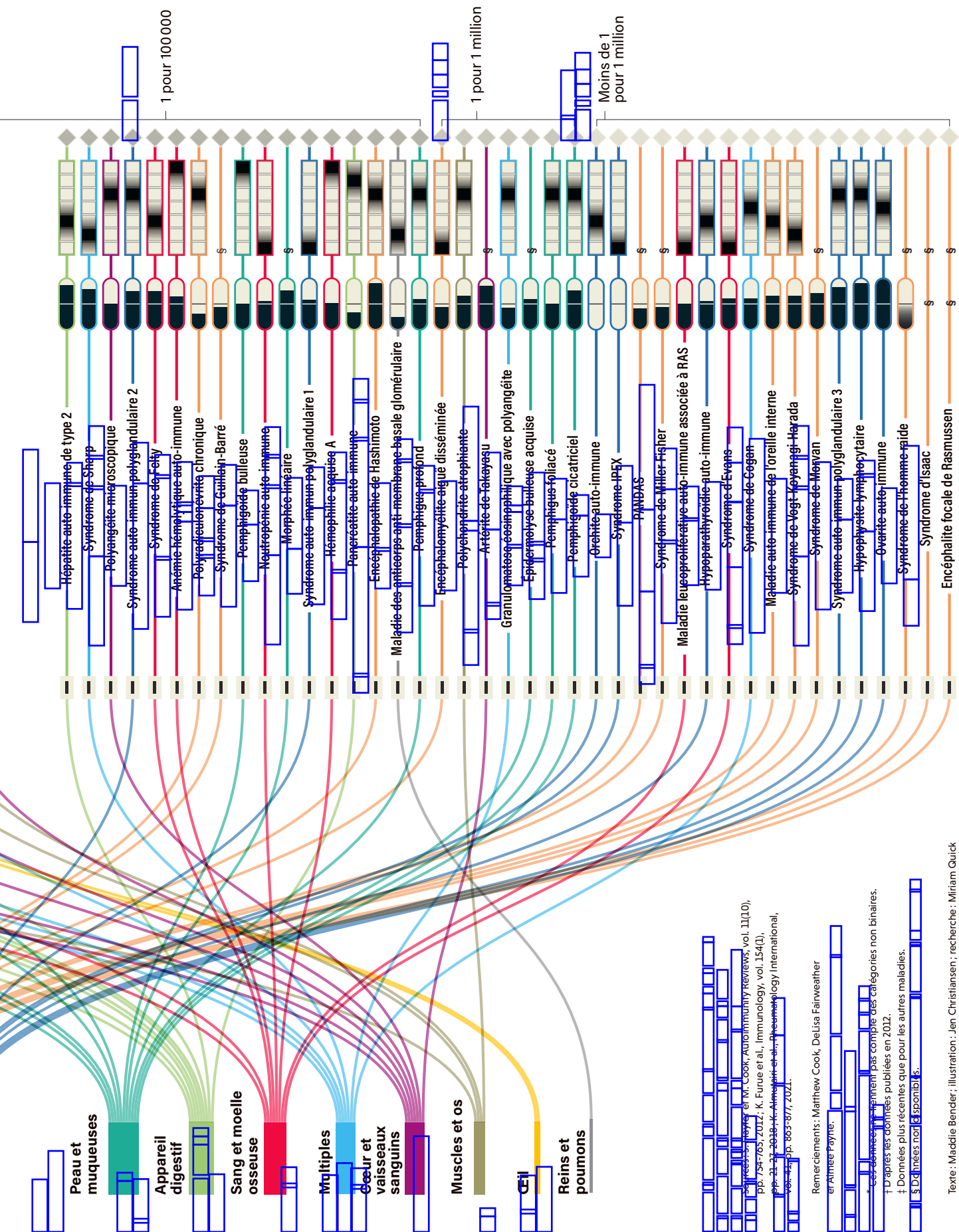
PREVALENCE (proportion de la population ayant reçu le diagnostic; extrapolé à partir d'études régionales)



Principales cibles

Nerfs et cerveau

Système Endocrinien



Sources : Jones et al., *Autoimmunity reviews*, vol. 11(10), pp. 734-763, 2012 ; K. Furue et al., *Immunology*, vol. 154(1), pp. 21-37, 2018 ; K. Amadori et al., *Pneumology International*, vol. 25, pp. 863-877, 2021.

Remerciements : Matthew Cook, DeLisa Fairweather et Annee Payne.

* Ces données ne prennent pas compte des catégories non binaires.

† D'après les données publiées en 2012.

‡ Données plus récentes que pour les autres maladies.

\$ Données non disponibles.

Texte : Maddie Bender ; illustration : Jen Christiansen ; recherche : Miriam Quick

était particulièrement frappante chez les adolescents, constate le spécialiste qui s'en émeut : «Cela indique peut-être une vague à venir de maladies auto-immunes.»

Comment expliquer cette augmentation ? «Nous l'ignorons», avoue Frederick Miller avant de citer un certain nombre de facteurs environnementaux et comportementaux possibles. Au cours de la période couverte par l'étude, de 80000 à 90000 nouveaux produits chimiques ont été mis sur le marché. «Notre régime alimentaire est complètement différent, poursuit-il. Nos appareils électroniques nuisent à notre sommeil. La pollution de l'air, de l'eau et des aliments a augmenté... En quelques décennies, nos modes de vie ont été bouleversés.»

Une autre idée, quelque peu paradoxale, est que nos systèmes immunitaires sont aujourd'hui trop peu exposés au monde extérieur et qu'ils réagissent donc de façon excessive face à des antigènes inconnus normalement bénins. Cette théorie est fondée sur l'«hypothèse hygiéniste», avancée au début des années 2000 sur la base de l'évolution des conditions sanitaires. Elle est plus étroitement liée aux modifications de nos bactéries intestinales, notre microbiote, qui reflètent notre société moderne.

Une bizarrerie de la géopolitique a offert une occasion unique d'étudier cet effet. Après la Seconde Guerre mondiale, le territoire de la Carélie, au nord-est de l'Europe, a été divisé entre la Finlande et la Russie. Les populations sont génétiquement proches, mais la Carélie finlandaise s'est rapidement modernisée après la guerre, tandis que les conditions de vie dans la Carélie russe rurale n'ont guère changé. L'amélioration des conditions de vie a-t-elle réduit la morbidité ? Non, au contraire, en ce qui concerne les maladies auto-immunes. Par exemple, l'incidence du diabète de type 1 en Finlande est la plus élevée au monde et environ six fois supérieure à celle de la Carélie russe. Les fréquences d'autres maladies auto-immunes comme la maladie coeliaque sont également six à dix fois plus élevées en Finlande qu'en Russie.

LE RÔLE DU MICROBIOTE

Mikael Knip, de l'université d'Helsinki, et ses collègues pensent que ces écarts s'expliquent en partie par des modifications du microbiote des populations caréliennes. Cet écosystème bactérien s'établit pendant la petite enfance sous l'influence, forte, de notre environnement. Pour une étude publiée en 2016, l'équipe de Mikael Knip a recueilli des échantillons de selles de nourrissons des deux côtés de la frontière finno-russe pendant les trois premières années de leur vie. L'analyse a effectivement révélé une nette différence entre les nourrissons des deux Carélies.

Les microbes des enfants russes étaient dominés par une forme non pathogène

L'exposition à divers microbes est utile à la formation du système immunitaire

d'*Escherichia coli* plutôt immunogènes. Les enfants finlandais présentaient, quant à eux, une abondance de bactéries du genre *Bacteroides*, qui ne provoquent généralement pas de réactions immunitaires fortes. «L'exposition à divers microbes est utile à la formation du système immunitaire, en particulier au cours de la première année de vie», rappelle Mikael Knip, mais les différences dans les compositions des microbiotes suggèrent que les petits Finlandais étudiés semblent ne pas subir un entraînement de ce type très rigoureux. Les microbiotes finlandais sont également moins diversifiés que leurs homologues russes. Même s'il est trop tôt pour évoquer une relation de cause à effet entre cette observation et l'augmentation des problèmes auto-immuns, Mikael Knip pense que ce lien est réel et propose de «renommer l'hypothèse hygiéniste en hypothèse de la biodiversité».

Sonia Sharma confirme que la biodiversité intestinale est importante et que l'exposition à une grande variété de molécules, par exemple en mangeant des aliments le moins transformé possible, est essentielle pour entraîner le système immunitaire. «Cela améliore notre flore intestinale, dit-elle. Et cela donne à notre système immunitaire l'opportunité de s'habituer à des molécules qui ne sont pas intrinsèquement dangereuses, afin qu'il ne réagisse pas de façon excessive lorsqu'il les rencontre.»

Une meilleure compréhension des maladies auto-immunes, et l'amélioration consécutive de leurs traitements, passera par un changement de focale dans les études. Il ne s'agit plus de se concentrer sur tel ou tel aspect, cellules immunitaires, tissus cibles, microbiote..., explique Frederick Miller, mais d'adopter une vision plus holistique. Comme dans la vieille parabole indienne où des aveugles se font une idée différente de ce qu'est un éléphant en n'inspectant qu'une partie de l'animal. Pour saisir l'ensemble du tableau immunologique, prédit l'immunologiste, «nous devons en embrasser la complexité». ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Szymczak et al., **Gene expression signatures of target tissues in type 1 diabetes, lupus erythematosus, multiple sclerosis, and rheumatoid arthritis**, *Science Advances*, vol. 7(2), 2021.

R. Mallone et D. Eizirik, **Presumption of innocence for beta cells: why are they vulnerable autoimmune targets in type 1 diabetes ?**, *Diabetologia*, vol. 63 (10), pp. 1999-2006, 2020.

R. Dhanwani et al., **Cellular sensing of extracellular purine nucleosides triggers an innate IFN- β response**, *Science Advances*, vol. 6(30), 2020.

G. Dinse et al., **Increasing prevalence of antinuclear antibodies in the United States**, *Arthritis Rheumatol.*, vol. 72(6), pp. 1026-1035, 2020.

O. Laitinen et al., **Coxsackievirus B1 is associated with induction of β -cell autoimmunity that portends type 1 diabetes**, *Diabetes*, vol. 63(2), pp. 446-455, 2014.

ON A MENÉ

L'ENQUÊTE

TOUS LES PAPIERS
SE RECYCLENT.

JOURNAUX, MAGAZINES, PAPIERS MÊME AVEC
AGRAFES, ENVELOPPES MÊME SANS FENÊTRE,
CAHIERS MÊME AVEC SPIRALES...
TOUS LES PAPIERS SE RECYCLENT.
EN LES DÉPOSANT DANS LE BAC DE TRI,
VOUS LEUR OFFREZ UNE NOUVELLE VIE.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

L'ESSENTIEL

- Globalement, les femmes sont quatre fois plus touchées par les maladies auto-immunes que les hommes.
- Une première piste pour l'expliquer concerne les hormones sexuelles : œstrogènes, progestérone, testostérone... Toutes influent sur le système immunitaire.
- Une mauvaise extinction de l'un des deux chromosomes X dans les cellules des femmes est une autre cause possible.

- Le microbiote intestinal interviendrait également, notamment via la testostérone, sans que l'on sache lequel des deux facteurs est l'élément déclencheur.
- Ces hypothèses sont toutes compatibles avec l'idée que la fréquence plus élevée des maladies auto-immunes chez les femmes est un « dommage collatéral » d'une adaptation évolutive à une grossesse sans encombre.

L'AUTRICE



MELINDA WENNER MOYER
journaliste scientifique à New York

Les femmes surexposées?

Près de quatre personnes sur cinq atteintes de troubles auto-immuns sont des femmes. Pourquoi une telle disproportion? Une explication serait à chercher du côté de l'histoire évolutive de la grossesse.

Pour Melanie See, 45 ans à l'époque, l'année 2005 a été un tournant. Elle s'est soudainement mise à beaucoup transpirer et a vite perdu cinq kilos. Elle a aussi eu des vertiges et même des montées de lait... sans allaiter. Une série d'examens a révélé une maladie de Basedow, une maladie auto-immune qui fait monter en flèche la production d'hormones thyroïdiennes. Ce diagnostic posé, des médicaments efficaces ont été prescrits.

Trois ans plus tard, alors que les symptômes de la maladie étaient contrôlés, la santé de Melanie See s'est de nouveau dégradée avec une perte de poids supplémentaire et une fatigue extrême. Ses médecins ont identifié une maladie cœliaque... une autre maladie auto-immune déclenchée par la consommation d'aliments contenant du gluten.

Puis vint 2015. Melanie See a commencé à ressentir de terribles symptômes digestifs et des douleurs musculaires. Cette fois, le corps médical est resté dépourvu. «Les hypothèses portaient dans tous les sens – vascularite, lupus, je ne sais plus quoi encore, se souvient la malade. Mes analyses sanguines montraient bien que quelque chose n'allait pas, tout comme la biopsie musculaire subie en juin 2016, mais je ne rentrais dans aucune case.»

Après d'autres tests, une troisième maladie auto-immune a été diagnostiquée: le syndrome de Sharp, ou connectivite mixte, une affection rare qui se traduit par les caractéristiques de plusieurs autres pathologies (lupus érythémateux, sclérodémie systémique, polyarthrite rhumatoïde...) sans toutefois remplir tous les critères de l'une d'elles. Si Melanie See fait figure d'exception quant à son tableau clinique complexe et changeant, elle l'est moins lorsque l'on parle de maladies auto-immunes en général. Pourquoi? Parce qu'elle est une femme.

En effet, les femmes représentent environ 78% des personnes atteintes de ces pathologies (8% de la population mondiale) où le système immunitaire attaque les cellules et tissus de l'organisme qu'il est censé défendre. Les maladies auto-immunes sont actuellement la cinquième cause de décès chez les femmes de moins de 65 ans.

La raison de cet écart entre hommes et femmes est longtemps restée un mystère, mais les chercheurs commencent à en cerner les causes: les hormones sexuelles, les deux chromosomes X des femmes (les hommes n'en ayant qu'un) et même le microbiote, différent d'un sexe à l'autre. Selon certains, l'évolution serait aussi en cause...



«Il importe de comprendre les dessous de ces différences entre sexes», déclare Shannon Dunn, de l'université de Toronto. «Car alors, non seulement nous saurons mieux comment les maladies auto-immunes se déclenchent, un préalable à de nouveaux moyens d'intervention, mais nous ferons également la lumière sur les différences entre sexes dans d'autres contextes, comme la réaction aux infections, aux vaccins, aux blessures et au cancer.»

La répartition inégale des maladies auto-immunes n'est pas une découverte récente. Il y a plus d'un siècle, lorsque les médecins ont commencé à diagnostiquer ces affections, ils ont remarqué que les femmes étaient beaucoup plus susceptibles de développer de telles maladies que les hommes. Mais à l'époque, ces spécialistes individualisaient les maladies auto-immunes en entités distinctes ayant leurs propres causes et n'imaginaient guère qu'elles puissent être reliées par des mécanismes fondamentaux communs.

UNE POUR TOUTES...

Tout a changé au début des années 1990, lorsque les scientifiques ont découvert que des cellules immunitaires – les lymphocytes T auxiliaires CD4 – étaient impliquées dans la polyarthrite rhumatoïde, la sclérose en plaques et le diabète de type 1. En 1991, Virginia Ladd,

atteinte de lupus, a fondé l'American Autoimmune Related Diseases Association (l'Association américaine des maladies auto-immunes apparentées) après avoir découvert que diverses maladies auto-immunes touchaient plusieurs membres de sa famille, suggérant un héritage génétique partagé.

En considérant les maladies auto-immunes dans leur ensemble, les chercheurs ont fait des observations intéressantes. Ainsi, certaines de ces maladies apparaissent chez les femmes après des transitions importantes de la vie. Le lupus et la sclérose en plaques, par exemple, ont tendance à se déclencher pendant les années de procréation. D'autres maladies, comme la polyarthrite rhumatoïde, se déclarent le plus souvent après la ménopause. D'importants changements auto-immuns se produisent aussi parfois pendant la grossesse: les symptômes de la polyarthrite rhumatoïde, de la sclérose en plaques et de la maladie de Basedow s'atténuent souvent, tandis que ceux du lupus s'aggravent plutôt.

BOULEVERSEMENTS HORMONAUX EN CAUSE

Qu'ont en commun ces transitions (puberté, grossesse et ménopause)? Elles impliquent toutes des changements majeurs dans la production d'hormones comme les œstrogènes, la progestérone et la testostérone. Les niveaux d'œstrogènes augmentent, par exemple, pendant la puberté et la grossesse. Il est désormais clair que, même s'il existe des exceptions, de nombreuses maladies auto-immunes «sont induites par les œstrogènes», explique DeLisa Fairweather, de la clinique Mayo, à Jacksonville, en Floride. En effet, l'utilisation de contraceptifs oraux et de traitements hormonaux substitutifs, qui ajoutent tous deux des œstrogènes à l'organisme, a été associée à un risque accru de lupus.

Les œstrogènes, comme les autres hormones sexuelles, influencent directement l'expression d'un certain nombre de gènes impliqués dans l'immunité. Ainsi, ces composés activent le gène de l'interféron gamma, une substance qui orchestre les réponses immunitaires contre les agents pathogènes, mais qui peut aussi intensifier les réponses auto-immunes. Les œstrogènes activent également les lymphocytes B, qui produisent des anticorps, mais aussi, le cas échéant, des autoanticorps ciblant les cellules de l'organisme.

Les hormones qui jouent un rôle clé dans la grossesse, comme la progestérone, ont aussi des effets spectaculaires sur le système immunitaire. De nombreuses cellules immunitaires essentielles, notamment les lymphocytes T et les macrophages, portent des récepteurs de la progestérone à leur surface. Activés, ces récepteurs orientent l'organisme vers un type de réponse immunitaire qui favorise, entre autres, la production d'anticorps et d'autoanticorps. Cette réaction est connue sous le nom de «réponse

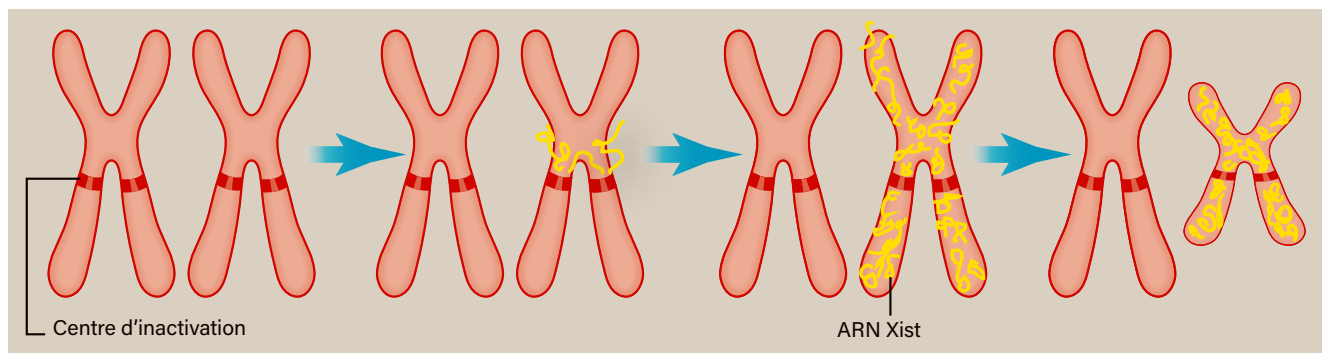
immunitaire Th2» (pour lymphocytes T auxiliaires de type 2). Elle contraste avec la réponse immunitaire Th1, qui privilégie l'activation de cellules attaquant directement d'autres cellules.

L'augmentation de la production de progestérone pendant la grossesse expliquerait donc pourquoi les symptômes de la polyarthrite rhumatoïde et de la sclérose en plaques s'atténuent souvent lorsque les femmes attendent un enfant: ces maladies résultent de réponses immunitaires de type Th1, et non Th2, de sorte que le changement induit par la progestérone allège leur charge immunitaire. Mais «les femmes atteintes de sclérose en plaques ont un risque beaucoup plus élevé de faire une rechute peu après l'accouchement, quand les quantités d'hormones sexuelles diminuent drastiquement», explique Tanuja Chitnis, du Brigham and Women's Hospital, à Boston.



L'auto-immunité peut être un sous-produit malheureux de la réponse immunitaire complexe dont les femmes ont besoin pour porter des enfants

La testostérone, que les femmes produisent, mais dans une moindre mesure que les hommes, est une autre hormone importante en matière d'auto-immunité. Les récepteurs de la testostérone se trouvent à la surface des lymphocytes B et T, et l'hormone est largement immunosuppressive. Elle diminue les réponses des cellules immunitaires, y compris les neutrophiles, les cellules tueuses naturelles et les macrophages, ce qui serait une des raisons pour lesquelles les hommes ont moins de maladies auto-immunes. De fait, des études ont montré que les hommes atteints de sclérose en plaques ont souvent des taux de testostérone inférieurs à la normale. En outre, ceux ayant un faible taux de testostérone en raison d'une affection connue sous le nom d'hypogonadisme ont un risque accru de lupus et de polyarthrite rhumatoïde.



Toutes les hormones sexuelles influent également sur l'expression de gènes immunitaires clés. En 1997, un consortium de scientifiques finlandais et allemands a découvert un gène qui joue un rôle crucial dans l'auto-immunité. Ce gène *Aire* (pour *autoimmune regulator*) est exprimé par les cellules du thymus, un organe où sont produits les lymphocytes T. La protéine *Aire* codée induit la production, dans les cellules du thymus, des antigènes du soi, spécifiques de l'ensemble des tissus de l'organisme, afin qu'ils soient présentés aux lymphocytes T en développement: ceux présentant une affinité importante pour ces antigènes, et, donc, qui cibleront des tissus de l'organisme, sont ensuite éliminés (on parle de «sélection négative»), les autres poursuivent leur maturation (voir la figure page suivante).

UN MANQUE D'AIRES

Il n'est alors pas surprenant qu'un gène *Aire* anormal entraîne le développement de maladies auto-immunes, notamment le syndrome APS1 (pour *auto-immune polyglandular syndrome 1*), qui se traduit par une destruction auto-immune des glandes endocrines (hypothyroïdie), une candidose, du vitiligo... Dans les faits, les lymphocytes T qui reconnaissent les antigènes du soi ne sont plus éliminés au niveau du thymus: ils passent dans la circulation et «finissent par se répandre dans l'organisme et provoquent une maladie auto-immune», explique Shannon Dunn.

Or l'activité du gène *Aire* et d'autres gènes similaires est partiellement contrôlée par les hormones sexuelles. En 2016, l'équipe de Sonia Berrih-Aknin, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris, a montré que, chez les souris, les œstrogènes et la progestérone réduisent l'expression du gène *Aire*, tandis que la testostérone a un effet inverse. Elle a aussi observé qu'après la puberté, les femmes fabriquent moins de protéines *Aire* que les hommes, peut-être à cause des hormones sexuelles. Or moins d'*Aire* signifie que davantage de lymphocytes T reconnaissant les antigènes du soi s'échappent du thymus.

Pourtant, les hormones sexuelles n'expliquent pas tout. Les maladies auto-immunes,

dont le lupus et la sclérose en plaques, se développent parfois dès l'enfance, avant la puberté. D'autres processus sont donc impliqués. Pour les trouver, certains étudient la différence fondamentale entre les hommes et les femmes: un ou deux chromosomes X.

LE FACTEUR X

Selon le modèle en vigueur, les femmes ont deux chromosomes X, mais l'une des copies est désactivée dans chaque cellule très tôt au cours du développement embryonnaire lors d'un processus connu sous le nom d'«inactivation du chromosome X» (voir la figure ci-dessus). Ainsi, l'organisme n'exprime pas plus de gènes liés au X qu'il ne le devrait (il y a égalité entre hommes et femmes). Cependant, ce scénario a été récemment révisé en partie, car des études ont montré que chez certaines femmes au moins 15% des gènes du chromosome X supposé inactivé s'expriment encore. Les protéines codées sont alors jusqu'à deux fois plus nombreuses que chez les hommes. C'est notamment le cas chez des femmes atteintes de lupus. Plus encore, le niveau de cette activité inopportune est corrélé à la gravité de la maladie.

En fait, de nombreux gènes liés à l'X ont été directement associés aux maladies auto-immunes. L'un d'eux est le gène du récepteur TLR-7, une protéine impliquée dans des maladies auto-immunes telles que le lupus, la polymyosite, la sclérodermie et le syndrome de Sjögren. Son rôle est de reconnaître les agents pathogènes et d'alerter le système immunitaire de leur présence; il augmente également la production de molécules inflammatoires, les interférons, qui peuvent accélérer la réponse auto-immune. Un autre gène souvent activé sur les chromosomes X supposés inactivés chez les femmes est *Tasl*, qui augmente lui aussi la production d'interférons.

Récemment, les scientifiques ont découvert un phénomène étrange concernant l'inactivation du chromosome X. Chez certaines femmes, ce chromosome X est maintenu silencieux d'une curieuse façon dans les lymphocytes T et B, impliqués dans les réponses immunitaires. En 2019, Montserrat Anguera, de l'université de

L'inactivation de l'un des deux chromosomes X des cellules femelles est sous le contrôle d'une région nommée «centre d'inactivation du chromosome X» (en rouge). Cette région produit de nombreux longs ARN non codants, dont *Xist* (en jaune) qui recouvre le chromosome X et le réduit au silence. Simultanément, des changements dans la structure du chromosome conduisent à sa condensation.

Pennsylvanie, et ses collègues ont en effet observé que lorsque les jeunes cellules immunitaires de souris femelles arrivent à maturité, les mécanismes cellulaires mis en place pour couvrir et inactiver le deuxième chromosome X subissent des changements dynamiques importants qui faciliteraient l'activation des gènes liés au X dans ces cellules alors qu'ils devraient être désactivés.

Ainsi, en ce qui concerne l'inactivation du X, les cellules immunitaires féminines ne se comportent pas comme les autres cellules, et cette différence influencerait directement sur le risque d'auto-immunité. En 2021, le groupe de Montserrat Anguera a révélé que les lymphocytes B des filles et des femmes atteintes de lupus échappent aux mécanismes cellulaires normaux d'inactivation du X, ce qui conduit probablement les cellules à fabriquer plus de protéines liées au X qu'elles ne le devraient.

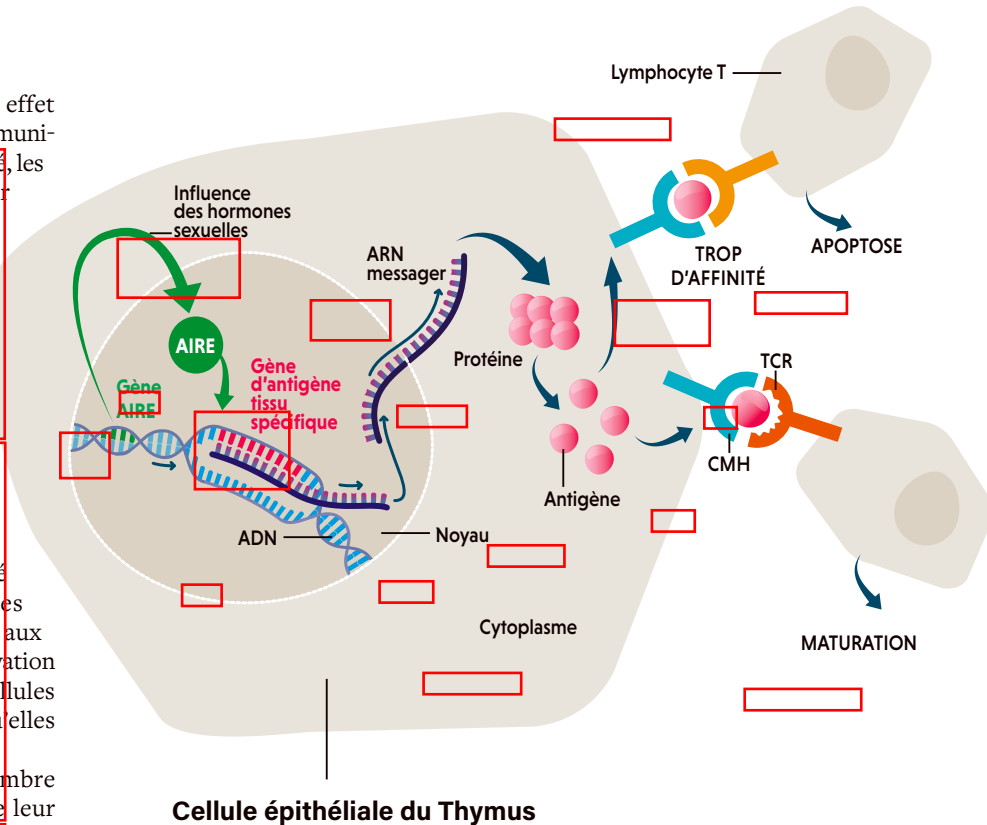
L'étude des individus ayant un nombre inhabituel de chromosomes X confirme leur rôle important dans l'auto-immunité. Ainsi, les hommes atteints du syndrome de Klinefelter, par exemple, qui ont deux chromosomes X en plus d'un chromosome Y, sont 14 fois plus susceptibles que les autres hommes de développer un lupus. De même, les femmes atteintes de trisomie X (elles ont trois chromosomes X) sont 2,5 et 2,9 fois plus susceptibles que les autres femmes de développer respectivement un lupus et un syndrome de Sjögren, ce dernier étant caractérisé par une atteinte des glandes, notamment lacrymales et salivaires.

Pourquoi le corps des femmes se distingue-t-il de celui des hommes par ces mécanismes étranges qui augmentent le risque de maladie ? En général, au fil du temps, l'évolution élimine les processus qui empêchent les espèces de se reproduire et de prospérer, et l'auto-immunité liée au chromosome X entrave manifestement ce succès. Ce phénomène conférerait-il paradoxalement un avantage évolutif ?

LA COMPENSATION DE LA GROSSESSE

En 2019, Melissa Wilson, de l'université d'État de l'Arizona, et ses collègues ont proposé l'hypothèse de compensation de la grossesse. L'évolution du placenta, qui fournit oxygène et nutriments au fœtus durant la grossesse, a accompagné celle des chromosomes sexuels chez les mammifères, et a également coïncidé avec l'ajout soudain de beaucoup plus de gènes au chromosome X. Ces trois évolutions sont peut-être reliées.

Pendant la grossesse, le système immunitaire de la mère doit tolérer, d'une part, les cellules du fœtus en croissance – dont la moitié



Dans les cellules épithéliales du thymus, la testostérone favorise l'expression du gène *Aire* (pour *Autoimmune regulator*). La protéine codée est un facteur de transcription qui facilite la production d'antigènes spécifiques des tissus périphériques de l'organisme. Ces antigènes sont présentés à la surface des cellules par le complexe majeur d'histocompatibilité (CMH) à des lymphocytes T immatures. Quand l'affinité avec les récepteurs de ces cellules (TCR) est trop forte, c'est-à-dire quand la cellule immunitaire risque de cibler des cellules de l'organisme, les lymphocytes sont éliminés. Les autres poursuivent leur maturation.

de l'ADN est étranger, car provenant du père – et, d'autre part, le placenta, une production de l'embryon. Selon Melissa Wilson, les gènes liés aux chromosomes X et l'inactivation incomplète de l'un d'eux auraient évolué de sorte que l'organisme de la mère s'adapte avec souplesse aux nouvelles exigences immunitaires de la grossesse. Pendant cette période, l'immunité fluctue. Au début, certaines réponses immunitaires saines augmentent, ce qui aide le placenta à développer de nouveaux vaisseaux sanguins, car l'inflammation favorise l'angiogenèse. Au milieu de la grossesse, l'immunité « s'est tue » avant d'augmenter à nouveau en prévision de l'accouchement.

D'autres observations valident l'hypothèse de compensation de la grossesse. Par exemple, aujourd'hui, les femmes font beaucoup moins d'enfants qu'auparavant : en conséquence, leur système immunitaire n'est pas bridé aussi souvent qu'avant. Ce serait une des raisons de l'augmentation de la fréquence des maladies auto-immunes observée actuellement. Bien que ce lien soit à confirmer par des études plus poussées, Melissa Wilson estime plausible « le rôle essentiel de la placentation et de la grossesse dans la formation du système immunitaire maternel, ce qui expliquerait, au moins en partie, les différences entre les sexes en matière de maladies auto-immunes ». En d'autres termes, l'auto-immunité serait un sous-produit évolutif malheureux de la réponse immunitaire complexe dont les femmes ont besoin pour porter des enfants.

Tout ce qui se passe dans l'organisme n'est pas déterminé par la génétique, tant s'en faut.

Ainsi, chez des jumeaux, un seul des deux peut développer une maladie auto-immune, signe que l'environnement est une pièce importante du puzzle. On ignore encore quelles expositions extérieures sont les plus problématiques, mais les spécialistes commencent à pointer du doigt les infections microbiennes, les produits chimiques comme les perturbateurs endocriniens, le tabagisme, l'alimentation, le stress, et... la composition en bactéries de la flore intestinale. Des travaux menés sur des animaux montrent que ces bactéries – le microbiote intestinal – sont associées à un risque accru de maladie auto-immune.

Jayne Danska, de l'université de Toronto, a longtemps essayé de comprendre la relation entre le sexe et les gènes dans les maladies auto-immunes, mais en 2012, une découverte fortuite l'a conduite dans une nouvelle direction surprenante. Avec son équipe, elle traquait des gènes de prédisposition pour le diabète de type 1, une maladie auto-immune dans laquelle le corps attaque les cellules bêta productrices d'insuline dans le pancréas (voir l'article pages 24 à 32). Pour ce faire, les chercheurs travaillaient avec des souris dites « diabétiques non obèses » (NOD), de bons modèles pour la maladie humaine, à une exception près : alors que chez les humains, hommes et femmes ont la même probabilité de développer le diabète de type 1 (c'est l'une des rares maladies à faire exception à la règle explorée dans cet article), chez les rongeurs, les femelles sont deux fois plus concernées.

LE MICROBIOTE EN EMBUSCADE

Pour expliquer cette anomalie, le groupe de Jayne Danska s'est intéressé aux bactéries intestinales et a élevé un sous-ensemble de souris NOD dans un environnement stérile : les rongeurs étaient axéniques, c'est-à-dire dépourvus de microorganismes, y compris dans leurs intestins. Surprise, « la différence entre les sexes a complètement disparu », se souvient l'immunologiste. Les mâles étaient soudain tout aussi susceptibles de développer un diabète que les femelles.

La répétition de l'expérience a confirmé les premières observations. D'autres travaux ont conduit à des résultats tout aussi étonnants. Les chercheurs ont prélevé les bactéries de souris NOD mâles adultes et les ont introduites dans de jeunes souris NOD femelles qui n'avaient pas encore développé de diabète. Résultat ? Les souris femelles sont devenues des adultes en bonne santé, sans maladie. Ces résultats constituent la première preuve que « les microorganismes de l'intestin influent sur l'auto-immunité des femelles », explique Martin Kriegel, de l'université de Münster, en Allemagne. Selon lui, c'est une découverte importante... que les scientifiques s'efforcent de comprendre.

Pourquoi les microbes intestinaux des hommes seraient-ils protecteurs ? Personne ne le sait, mais l'équipe de Jayne Danska a d'ores et déjà montré que la testostérone est cruciale. En prélevant du sang de souris NOD axéniques, elle a constaté que les mâles sujets au diabète présentaient une concentration de testostérone circulante inférieure à celle des mâles non malades, ainsi qu'une composition du microbiote différente. Et lorsque les souris femelles étaient colonisées par des microbiotes issus de mâles non malades et semblaient protégées de la maladie, leur concentration de testostérone dans le sang était supérieure à celle de femelles hébergeant les microbes habituels.

MICROBES SOUS TESTOSTÉRONE

Ainsi, dans le microbiote mâle, un élément augmenterait la production de testostérone protectrice. Des souris femelles chez qui l'équipe a, d'une part, remplacé les bactéries intestinales par celles prélevées chez un mâle et, d'autre part, bloqué la testostérone présentent un risque accru de diabète de type 1. Mais qui des microbes ou de la testostérone influe sur l'autre ? Les travaux de Jayne Danska suggèrent que la composition du microbiote diverge chez les souris mâles et femelles autour de la puberté. Cela expliquerait pourquoi il n'y a pas beaucoup de différence entre les sexes dans la prévalence du diabète de type 1 chez les humains, puisque cette maladie se développe généralement durant l'enfance. La flore intestinale est peut-être affectée par l'afflux soudain d'hormones sexuelles au moment de la puberté, mais il s'agit presque certainement d'une « voie à double sens », selon Martin Kriegel : les microbes réagissent aux hormones sexuelles, et vice versa.

Bien sûr, les souris ne sont que des modèles animaux, mais ces découvertes aideront vraisemblablement à comprendre les maladies auto-immunes, qui touchent surtout les femmes. Peut-être que certaines bactéries intestinales des femmes jouent un rôle dans le développement de l'auto-immunité. Si tel est le cas, une modification du microbiote intestinal limiterait la maladie. C'est ce qu'espèrent tester Jayne Danska et Martin Kriegel afin de renforcer la protection conférée par le microbiote chez les femmes présentant un risque élevé de maladies auto-immunes. D'autres chercheurs s'intéressent aux moyens de changer la signalisation des hormones sexuelles pour tempérer le risque.

Les chromosomes X, les hormones sexuelles et les bactéries intestinales semblent tous augmenter le risque d'auto-immunité chez les femmes. De là à penser que la biologie conspire contre le sexe féminin, il n'y a qu'un pas. Mais ce fardeau auto-immun peut aussi être vu comme un reflet de l'importance des femmes pour la survie de notre espèce, un fardeau que la science cherche toutefois à alléger. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Pyfrom *et al.*, **The dynamic epigenetic regulation of the inactive X chromosome in healthy human B cells is dysregulated in lupus patients**, *PNAS*, vol. 118 (24), e2024624118, 2021.

B. Johnson *et al.*, **Gut microbiota differently contributes to intestinal immune phenotype and systemic autoimmune progression in female and male lupus-prone mice**, *J. of Autoimmunity*, vol. 108, 102420, 2020.

H. Natri *et al.*, **The pregnancy pickle : Evolved immune compensation due to pregnancy underlies sex differences in human diseases**, *Trends Genet.*, vol. 35 (7), 478-488, 2019.

C. Syrett *et al.*, **Altered X-chromosome inactivation in T cells may promote sex-biased autoimmune diseases**, *JCI Insight*, vol. 4 (7), e126751, 2019.

A. Erlebacher et S. Fisher, **Le placenta, cet inconnu**, *Pour la Science*, n° 487, pp. 46, mai 2018.

N. Dragin *et al.*, **Estrogen-mediated downregulation of AIRE influences sexual dimorphism in autoimmune diseases**, *J. Clin. Invest.*, vol. 126 (4), pp. 1525-1537, 2016.

FRÉDÉRIC RIEUX-LAUCAT
dirige l'équipe Immunogénétique
des maladies auto-immunes
pédiatriques, à l'institut Imagine,
à Paris, où il coordonne
le programme ATRACtion.



Il y a un fort parallèle entre auto-immunité et cancer

Malgré la complexité et la multiplicité des maladies auto-immunes, on commence à percevoir certains points communs entre ces pathologies, voire avec d'autres comme le cancer et le Covid-19.

Peut-on rappeler ce qu'est une maladie auto-immune ?

Il s'agit d'une réponse immunitaire anormale dirigée contre des constituants de l'organisme, quels qu'ils soient. On parle de « spécificité autoréactive » des acteurs du système immunitaire. Ces acteurs, notamment des cellules – des lymphocytes T – et des anticorps, patrouillent partout. Quand les composants du soi qu'ils reconnaissent sont circonscrits, par exemple, à un tissu, la maladie reste limitée à un organe. Au contraire, lorsque les déterminants de l'auto-immunité sont disséminés, la pathologie est systémique.

Un exemple ?

Prenons le cas du lupus. Une des grandes caractéristiques de la maladie consiste en des anticorps anti-ADN. Lorsque ces protéines rencontrent de l'ADN, ils s'assemblent en de gros complexes moléculaires qui se déposent dans les vaisseaux sanguins, créant des vascularites, ou dans les reins, conduisant à une néphrite lupique.

D'où vient cet ADN ?

Beaucoup de cellules meurent et libèrent ainsi de l'ADN dans le sang ou les tissus. C'est là que les anticorps les reconnaissent. Normalement, quand une cellule s'autodétruit par apoptose, les fragments qui en résultent sont pris en charge par des cellules phagocytaires et disparaissent. Mais dans le lupus, parmi les mécanismes impliqués figure un défaut de phagocytose de ces corps apoptotiques qui entraîne une accumulation de matériel, lequel devient alors accessible à la réponse immunitaire et, en particulier, aux anticorps anti-ADN.

La présence d'anticorps autoréactifs (ou autoanticorps) est-elle systématique dans les maladies auto-immunes ?

Elle est souvent utilisée comme marqueur, mais n'est pas forcément associée au développement de la pathologie. Paradoxalement, nous fabriquons tous des anticorps ou des lymphocytes T autoréactifs, et dans une proportion non négligeable. Ainsi, on estime que la moitié des lymphocytes T qui sortent du thymus sont dotés d'une autoréactivité plus ou moins importante, et cela vaut autant pour les jeunes que pour les adultes, chez qui cet organe conserve une activité résiduelle. Tout le monde vit avec des lymphocytes T à autoréactivité intermédiaire ! Puisque les maladies auto-immunes affectent environ 5 % de la population, on en déduit que des mécanismes particuliers, réunis sous le nom de « tolérance périphérique », régulent ces lymphocytes autoréactifs, ainsi que les autoanticorps, d'ailleurs.

L'auto-immunité se traduit plus par une susceptibilité aux infections que par l'attaque de nos tissus

Quel serait le rôle de cette autoréactivité modérée ?

On peut y voir un mécanisme de régulation de la réponse immunitaire. Par exemple, au moment d'une infection, l'organisme produit beaucoup d'interféron pour mettre en branle le système de défense, mais son emballement pourrait être maîtrisé par des anticorps anti-interféron. Tout est affaire d'équilibre, et, dans ce cadre, un taux trop important de ces anticorps anti-interféron neutraliserait la réponse antivirale. Ainsi, l'auto-immunité se traduirait plus par une susceptibilité aux infections que par l'attaque de nos tissus.

Un bon exemple est donné par le syndrome d'immunodérégulation, de polyendocrinopathie et d'entéropathie lié au chromosome X (le syndrome IPEX). Parmi les lymphocytes T, ceux dits « régulateurs » contrôlent l'activité de ceux dits « effecteurs », c'est-à-dire qui ont une fonction immunitaire directe (mémoire, cytotoxique...). La reconnaissance entre les deux types de lymphocytes T est essentiellement autoréactive : les régulateurs qui reconnaissent des déterminants du soi pourront inhiber l'activation des effecteurs autoréactifs reconnaissant les mêmes déterminants.

Le syndrome IPEX, une pathologie auto-immune extrêmement sévère, est lié à des déficits de production des lymphocytes T régulateurs, à la suite notamment des mutations d'un gène de facteur de transcription, le gène *FOXP3*. La maladie se déclare dès la première année de vie, voire dès la naissance, parfois même *in utero*. Elle se traduit par un diabète et surtout une attaque des cellules du système digestif ayant pour conséquence des diarrhées dramatiques parfois fatales. Ainsi, une absence de lymphocytes T régulateurs qui reconnaissent les déterminants du soi conduit à une auto-immunité précoce, presque généralisée.

Un autre exemple est à chercher dans les maladies endocrines, le diabète, l'attaque des surrénales, la thyroïdite... cette dernière étant probablement chez la femme adulte une des pathologies auto-immunes les plus fréquentes. Parmi les différentes hypothèses expliquant pourquoi les organes qui produisent des hormones sont particulièrement touchés, l'une stipule que la fonction physiologique de ces molécules, notamment la stimulation du système immunitaire, est équilibrée par une réponse autoréactive. On peut tout à fait imaginer que des autoanticorps ou des lymphocytes T autoréactifs permettent de contrôler le niveau de production de ces hormones.

Le lupus, le syndrome IPEX et ces maladies endocrines sont des pathologies assurément auto-immunes. Mais pour d'autres, on ne fait que le soupçonner.

Une définition des maladies auto-immunes est liée à la présence d'autoanticorps connus

qui sont soit des marqueurs, soit des acteurs de la pathologie. En l'absence de tels anticorps, c'est la réponse des patients aux immunosuppresseurs qui est prise en compte. Dans des pathologies comme la polyarthrite rhumatoïde ou la sclérose en plaques, la diminution des symptômes par des corticoïdes, les immunosuppresseurs les plus courants, plaide pour une base auto-immune sans que l'on connaisse précisément les mécanismes en jeu. Ainsi, dans la sclérose en plaques, on ignore s'il s'agit d'un problème lié à des lymphocytes, à des anticorps, voire aux cellules immunitaires propres au système nerveux.

La sclérose en plaques est caractérisée par une progression par poussées.

Est-ce typique des maladies auto-immunes ?

Oui, c'est aussi vrai dans le lupus, dans la polyarthrite rhumatoïde, dans les cytopénies auto-immunes (des attaques des globules rouges et des plaquettes)... Durant les phases aiguës, l'altération des tissus cibles conduit aux symptômes cliniques et biologiques de la maladie. Les patients sont alors traités par des immunosuppresseurs, ciblés ou non, jusqu'à la rémission des signes pathologiques, rémission qui va être plus ou moins importante. Elle est même parfois complète, avec la disparition totale des symptômes et le retour à la normale des valeurs biologiques. Et puis, après un temps indéterminé, on peut avoir une remontée progressive de ces marqueurs et la réapparition des symptômes. Dans la sclérose en plaques, effectivement, on observe ces phases assez caractéristiques de rémission et de réactivation de la maladie. Mais on ignore pourquoi.

Plus largement, que sait-on du déclenchement de ces maladies auto-immunes ?

Au laboratoire, nous développons l'hypothèse que, au moins chez les enfants, chaque maladie s'appuie sur une prédisposition génétique. Cette dernière ne suffit pas à elle seule, mais elle explique en partie le déclenchement de la pathologie. D'autres événements sont ensuite nécessaires, les plus connus étant les infections virales ou bactériennes. Plusieurs pistes sont suivies pour l'expliquer. La première est celle du mimétisme moléculaire : certains microorganismes produiraient des peptides qui ressembleraient à ceux élaborés par l'organisme ; l'auto-immunité serait alors la conséquence d'une immunité croisée.

Une autre idée implique des mécanismes de régulation de la réponse immunitaire. Une fois un agent infectieux éliminé, le système immunitaire retourne normalement à un état basal par le biais de nombreux mécanismes. Il suffit que l'un d'eux dysfonctionne, par exemple après une mutation, pour qu'une réponse postinfectieuse exagérée se traduise

par une auto-immunité. Enfin, selon certains, des molécules chimiques de l'environnement, comme des polluants ou des perturbateurs endocriniens, faciliteraient l'auto-immunité.

Les prédispositions génétiques et le déclenchement de la maladie sont justement au cœur du programme ATRACtion que vous coordonnez au sein de l'institut Imagine. En quoi consiste-t-il ?

Le point de départ est l'identification, en particulier chez les enfants ou dans les formes familiales, des causes impliquant un seul gène (monogéniques) de prédisposition. En les étudiant, nous nous sommes rendu compte de deux choses. D'abord, des individus porteurs d'une prédisposition, même dominante, ne seront pas nécessairement malades. Il y a donc d'autres facteurs.

Le second constat est lié à une pathologie monogénique que nous avons récemment décrite et dans laquelle les patients subissent des poussées de leur maladie après une stimulation importante de leur système immunitaire, notamment par des agents infectieux. Quelle maladie ? En fait, avec un seul et même gène muté (*SOCS1*), certains développent un lupus ou un psoriasis, d'autres une prolifération non contrôlée des lymphocytes, d'autres encore une cytopénie auto-immune... En tout, cinq maladies différentes, voire aucune, pour une même cause génétique ! Cela confirme le rôle crucial de facteurs additionnels pour l'émergence de ces maladies auto-immunes.

Ces facteurs sont-ils génétiques ? Épigénétiques ? Environnementaux ? C'est la question. Dans certains cas, on l'a montré pour plusieurs pathologies, dites mutations dites « somatiques » s'ajoutent au cours de la vie à la mutation de prédisposition, « germinale », qui a été héritée. Ce processus est semblable à celui de la cancérogenèse. L'épigénétique, c'est-à-dire l'ensemble des mécanismes de régulation de l'expression des gènes indépendamment de leurs séquences, joue aussi vraisemblablement un rôle. Parmi les facteurs environnementaux, de nombreux travaux ont par ailleurs révélé que nos microbiotes, les bactéries qui peuplent l'intestin et les muqueuses, participent activement à l'équilibre de notre système immunitaire.

C'est tout l'objet du programme ATRACtion : aller au-delà du gène. Avec de nombreux partenaires (Sanofi, Ariana Pharmaceuticals, AP-HP, Inrae, CEA, institut Pasteur, institut Curie...), nous allons mener des études « multiomiques » chez 250 patients et 250 individus sains, tous d'âge pédiatrique. Concrètement, cellule immunitaire par cellule immunitaire (prélevée dans le sang), nous analyserons l'expression des gènes (c'est de la transcriptomique) et l'accessibilité de l'ADN (épigénomique). Nous identifierons également les protéines présentes dans

le sang (protéomique)... En parallèle, à partir d'échantillons de selles et d'urines, nous déterminerons les espèces bactériennes du microbiote intestinal et les métabolites qu'elles produisent, les lipides notamment.

D'ici à cinq ans, l'un des objectifs est d'établir des atlas moléculaires des différents types cellulaires aussi bien pathologiques que physiologiques: quelles sont les proportions des différentes sous-populations de lymphocytes T? Quels gènes sont préférentiellement exprimés? Quelles molécules interagissent?

Avec un objectif de thérapeutique?

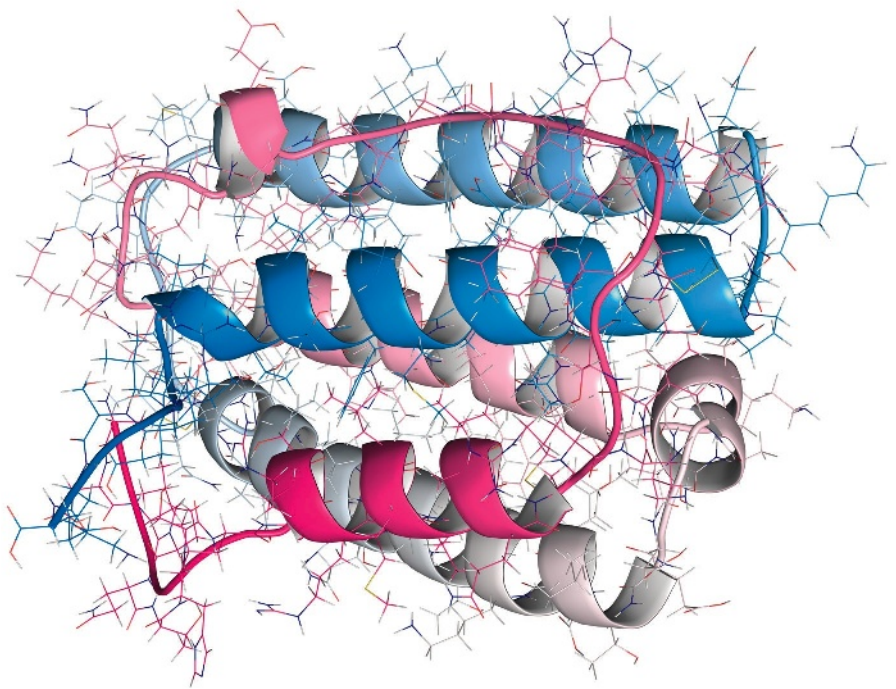
Oui. L'idée est de prédire l'évolution d'une pathologie, de repérer les voies moléculaires défaillantes sur lesquelles on peut intervenir. Nous espérons développer des outils bio-informatiques fondés sur ces études moléculaires afin, d'une part, d'aider au diagnostic et, d'autre part, de guider la décision thérapeutique dans le choix des médicaments. De la sorte, on s'affranchira de la cause génétique et du nom de la maladie. Par exemple, à l'aide de ces outils, on pourrait montrer qu'un patient atteint d'un lupus est éligible à un autre traitement que les médicaments couramment utilisés parce qu'on a repéré après analyse de ses cellules immunitaires une dérégulation spécifique d'une voie moléculaire.

À quoi ressemble aujourd'hui le paysage thérapeutique?

Outre les corticoïdes, nous disposons de nombreuses drogues cytotoxiques qui freinent la réponse immunitaire et, en particulier, celle des lymphocytes T et B. Mais le problème de ces traitements est qu'ils sont non spécifiques: ils éliminent au moins une grande proportion des lymphocytes. S'ensuivent des effets indésirables, des infections, par exemple, même si on adapte les dosages de façon à contrôler la réponse auto-immune tout en préservant au maximum la réponse anti-infectieuse.

Après, tout un arsenal de molécules spécifiques cible certaines voies moléculaires ou fonctionnelles du système immunitaire. Les plus connues sont les anti-TNF (le TNF étant une importante cytokine – un messenger entre cellules – impliquée dans l'inflammation). La polyarthrite rhumatoïde a été la première à bénéficier de ces anticorps qui ont ensuite été utilisés dans d'autres pathologies avec plus ou moins de succès, notamment les maladies auto-immunes ou inflammatoires du système digestif, dont les rectocolites hémorragiques.

D'autres molécules ciblant des cytokines et développées plus récemment, comme les anti-interleukine 1 et les antirécepteurs de l'interleukine 6, bloquent des pans de la réponse immunitaire en préservant les autres. Citons aussi le rituximab, qui vise spécifiquement les lymphocytes B (les cellules qui produisent les



La structure tridimensionnelle d'un interféron de type 1, en l'occurrence l'interféron alpha 2a.

anticorps) en épargnant les T. Ce type de médicament est utilisé pour des pathologies auto-immunes dans lesquelles on pense que les anticorps ont un rôle principal. Ainsi, il n'est pas prescrit contre le diabète de type 1 où ce sont plutôt les lymphocytes T qui infiltrent les tissus, en l'occurrence du pancréas.

Aujourd'hui, les molécules qui ont le vent en poupe sont les «JAKinibs»: ruxolitinib, baricitinib, tofacitinib... Ces inhibiteurs de voies de signalisation bloquent des enzymes (des kinases nommées «JAK») associées à l'intérieur des cellules à tous les récepteurs de cytokines exposés à l'extérieur. En conséquence, le message de ces dernières est bloqué et n'est pas transmis dans les cellules dotées de ces récepteurs. La réponse immunitaire est freinée.

Les JAKinibs ont été utilisés initialement pour bloquer la réponse aux interférons de type 1, une voie moléculaire importante de détection des ADN bactériens et de lutte contre l'infection. Cependant, une mutation du gène *Sting* se traduit par l'activation permanente de cette voie moléculaire. Chez les enfants porteurs de cette mutation, la production excessive d'interféron de type 1 conduit à des vasculopathies, des maladies vasculaires des extrémités parfois très graves lorsqu'elles dégénèrent en gangrène. Autre conséquence, l'infiltration de lymphocytes B et de monocytes dans les poumons entraîne une fibrose et un déficit d'oxygénation important.

Pour lutter contre cette pathologie, on ne dispose d'aucune molécule qui ralentisse la production d'interféron, mais il existait sur le marché un JAKinib qui a été repositionné. En brouillant le message des interférons, il minimise les conséquences de cette surproduction.

Ce faisant, il a grandement amélioré le sort des patients qui étaient résistants aux corticoïdes et à tous les immunosuppresseurs et anti-inflammatoires connus.

Quels sont les effets secondaires de ces JAKinibs ?

Ils sont beaucoup moins importants que ceux des corticoïdes, puisqu'ils sont plus ciblés. Cependant, les kinases JAK sont associées à de nombreux récepteurs, en particulier ceux de l'hormone de croissance. Chez les enfants, c'est donc problématique.

Par ailleurs, les JAKinibs n'étant pas spécifiques d'une seule kinase JAK (on en connaît 4), on observe parfois des effets indésirables de type infectieux quand certains récepteurs de cytokines sont bloqués. Cependant, puisque ces malades produisent beaucoup d'interféron, on constate qu'ils ont peu d'infections par rapport à l'état de leur système immunitaire.

Revenons au programme ATRACtion, qui porte sur des enfants. Aura-t-il aussi des répercussions pour les adultes ?

Il est difficile de se prononcer, mais nous l'espérons. Nous l'avons dit, notre hypothèse est qu'une maladie auto-immune qui débute chez un enfant a une très forte probabilité d'être le résultat d'une prédisposition génétique. Chez les adultes, c'est moins clair. Il peut s'agir d'une prédisposition finalement beaucoup plus fréquente dans la population, et pour laquelle le lien causal est difficile à mettre en évidence. Elle contribuerait éventuellement à la déclaration de la maladie auto-immune seulement après un épisode infectieux important ou bien sous l'influence d'hormones diverses et variées qui agissent sur le système immunitaire.

Toutefois, comprendre les formes monogéniques des enfants permettra de mieux définir les mécanismes physiopathologiques en jeu. Les atlas que nous souhaitons établir aideront à définir un certain nombre de paramètres d'anormalité, ou de normalité, de différentes voies moléculaires pour obtenir en quelque sorte des cartes d'identité cellulaires et moléculaires de pathologies. Ainsi, face à un adulte se présentant avec un trouble donné, on ne réfléchira plus en termes de nom de maladie ou de cause génétique, mais on analysera ses cellules et l'on confrontera les résultats aux atlas grâce à des outils de l'intelligence artificielle. De la sorte, un patient chez qui on suspecte une polyarthrite rhumatoïde pourra se voir prescrire une molécule d'ordinaire associée aux cytopénies auto-immunes sur la base du profil moléculaire de ses cellules immunitaires. En dernier ressort, n'oublions pas que la décision appartiendra toujours aux cliniciens, mais ils disposeront alors d'un outil d'aide à la décision thérapeutique.

Ces avancées fondées sur une meilleure compréhension des mécanismes moléculaires en jeu dans les maladies auto-immunes amélioreront notablement la prise en charge et la rendront plus rationnelle. On dispose aujourd'hui d'un arsenal thérapeutique particulièrement important pour traiter des maladies inflammatoires ou auto-immunes : il ne me semble pas nécessaire de courir après de nouveaux traitements. Rien qu'en définissant mieux les cohortes de patients, il sera possible de les adapter davantage à un malade donné et de combiner différentes approches.



La question se pose de savoir si les formes sévères du Covid-19 sont des maladies auto-immunes qui s'ignorent

C'est à nouveau un point commun avec la cancérologie, où l'on associe, par exemple, immunothérapie, chimiothérapie...

Je crois en effet qu'il y a un très fort parallèle entre auto-immunité et cancer. Dans les deux cas, on a probablement une accumulation de défauts génétiques, acquis et héréditaires, qui conduit au déclenchement de la pathologie. En outre, on ne soignera ni cancer ni maladie auto-immune avec une seule molécule, mais plutôt avec des protocoles thérapeutiques impliquant, par exemple, différents composés administrés séquentiellement dans le temps.

Jusqu'où peut-on pousser ce parallèle, puisqu'en cancérologie, les immunothérapies cherchent à lever les freins du système immunitaire alors que, pour les maladies auto-immunes, on essaie d'appuyer sur les freins ?

Le premier parallèle est dans l'âge de survenue, puisque les pathologies auto-immunes ou cancéreuses sont plus fréquentes chez le sujet âgé, suggérant une accumulation de mutations somatiques dans le temps. Les effets de ces mutations sont en effet parfois opposés, mais les acteurs sont dans certains cas les mêmes. Ainsi en est-il de CTLA4, un récepteur situé sur la membrane des lymphocytes T et

modérant l'action de ces cellules. Les cellules tumorales activent ce frein – on parle de «checkpoint» – pour mieux se faire accepter par l'organisme et éviter d'être la cible du système immunitaire. Des immunothérapies utilisant des anti-CTLA4 visent justement à «réarmer» les défenses en levant l'inhibition induite par CTLA4. Cependant, plusieurs effets secondaires des anti-CTLA4 utilisés dans des immunothérapies anticancéreuses relèvent de l'auto-immunité, avec des symptômes liés au diabète, à des entéropathies auto-immunes, des maladies cutanées...

Or des mutations du gène de ce récepteur sont incriminées dans diverses pathologies auto-immunes, comme les entéropathies auto-immunes, le diabète de type 1 ou la polyarthrite rhumatoïde. Pour y remédier, un médicament chimère a été élaboré par Bristol-Myers Squibb au début des années 2000, l'abatacept, qui associe anticorps et CTLA4: il réduit l'activité des lymphocytes T en inhibant deux signaux nécessaires exposés à la surface des cellules présentatrices d'antigène (l'antigène lié au CMH et la protéine membranaire CD80 ou CD86).

La compréhension des mécanismes mis en jeu dans ces maladies génétiques pourrait donc contribuer à mieux maîtriser les maladies auto-immunes liées aux immunothérapies anticancéreuses, et donc à mieux tolérer ces traitements.

Pour finir, la pandémie de Covid-19

a-t-elle eu des répercussions dans l'étude de l'auto-immunité?

Oui, à plusieurs égards. Ainsi, Benjamin Terrier, avec qui nous collaborons à l'hôpital Cochin, à Paris, a attiré notre attention sur des patients atteints des formes les plus sévères, le plus souvent intubés: en imagerie, leurs poumons ressemblaient beaucoup à ceux des malades produisant trop d'interféron de type 1 à la suite d'une mutation du gène *Sting* dont nous avons parlé. Nous avons alors formulé l'hypothèse que les formes graves résultaient d'un excès d'interféron, avec l'idée de peut-être leur prescrire un JAKinib.

Nous avons donc étudié pendant cinq semaines près de 50 patients atteints à des degrés divers d'un Covid-19. Surprise, les patients intubés étaient ceux qui avaient le moins d'interféron! Un résultat à l'opposé de notre hypothèse initiale. L'interprétation était tout autre: chez les individus qui, pour une raison ou une autre, produisent moins d'interféron, le virus se réplique mieux, entraînant une réaction extrêmement importante du système immunitaire contre lui, qui nourrit l'inflammation de façon systématique. Le système immunitaire s'emballe, mais reste sans efficacité contre le SARS-CoV-2. C'est comme si l'on appuyait sur l'accélérateur d'une voiture tout en débrayant; le moteur s'emballe, mais on n'avance pas.

En fin de compte, avec d'autres équipes, nous avons publié une étude montrant que les interférons de type 1 sont vraiment centraux dans le contrôle des infections virales respiratoires. C'est vrai du Covid-19, mais aussi sans doute de la grippe et d'autres virus respiratoires. L'organisme dispose d'une fenêtre temporelle durant laquelle une production suffisante d'interféron bloque, évidemment en partie, la répllication virale pendant que toute la réponse immunitaire s'organise afin d'éliminer le virus.

Autre lien entre Covid-19 et auto-immunité: des équipes ont mis en évidence des anticorps anti-interféron dans quelque 20% des formes les plus graves. Ces patients les avaient visiblement avant l'infection, ce qui a permis au virus de proliférer, puisque ces anticorps anti-interféron bloquaient la réponse antivirale. D'où venaient ces anticorps? On l'ignore, mais on peut imaginer que soit les patients souffraient d'une auto-immunité sous-jacente, soit ces anticorps ont été produits à l'occasion d'une infection virale précédente, une grippe par exemple: durant cet épisode, la réponse antivirale de l'interféron a fonctionné, et les anticorps participaient à un retour à la normale du système immunitaire, comme nous l'avons évoqué. Mais le SARS-CoV-2 a été contracté à ce moment: l'organisme n'était plus en mesure de réagir correctement avec efficacité faute d'interféron. Le coronavirus étant beaucoup plus pathogène qu'un virus respiratoire syncytial (celui des bronchiolites) ou qu'un virus de la grippe, l'infection a explosé.

Les formes sévères du Covid-19 sont-elles des pathologies auto-immunes qui s'ignorent?

En tout cas, on peut se poser la question, car outre les anticorps anti-interféron, des équipes ont identifié chez des malades des anticorps dirigés contre un peu tous les types cellulaires du système immunitaire. Les liens entre l'infection et l'auto-immunité existent donc bel et bien, mais ils n'expliquent pas à eux seuls les formes sévères. Ainsi, nous suivons des enfants atteints de maladies auto-immunes qui ont été infectés par le coronavirus de façon totalement invisible.

Une autre observation plaide pour un rôle des réponses anti-infectieuses contre les virus dans l'émergence des maladies auto-immunes. Plus les individus sont âgés, plus ils sont sensibles aux infections et plus ils développent de l'auto-immunité. Nous devons encore déterminer les causes et les effets de cette tendance, mais l'élucidation des mécanismes sous-jacents aidera vraisemblablement à comprendre les maladies auto-immunes.

PROPOS RECUEILLIS
PAR LOÏC MANGIN

BIBLIOGRAPHIE

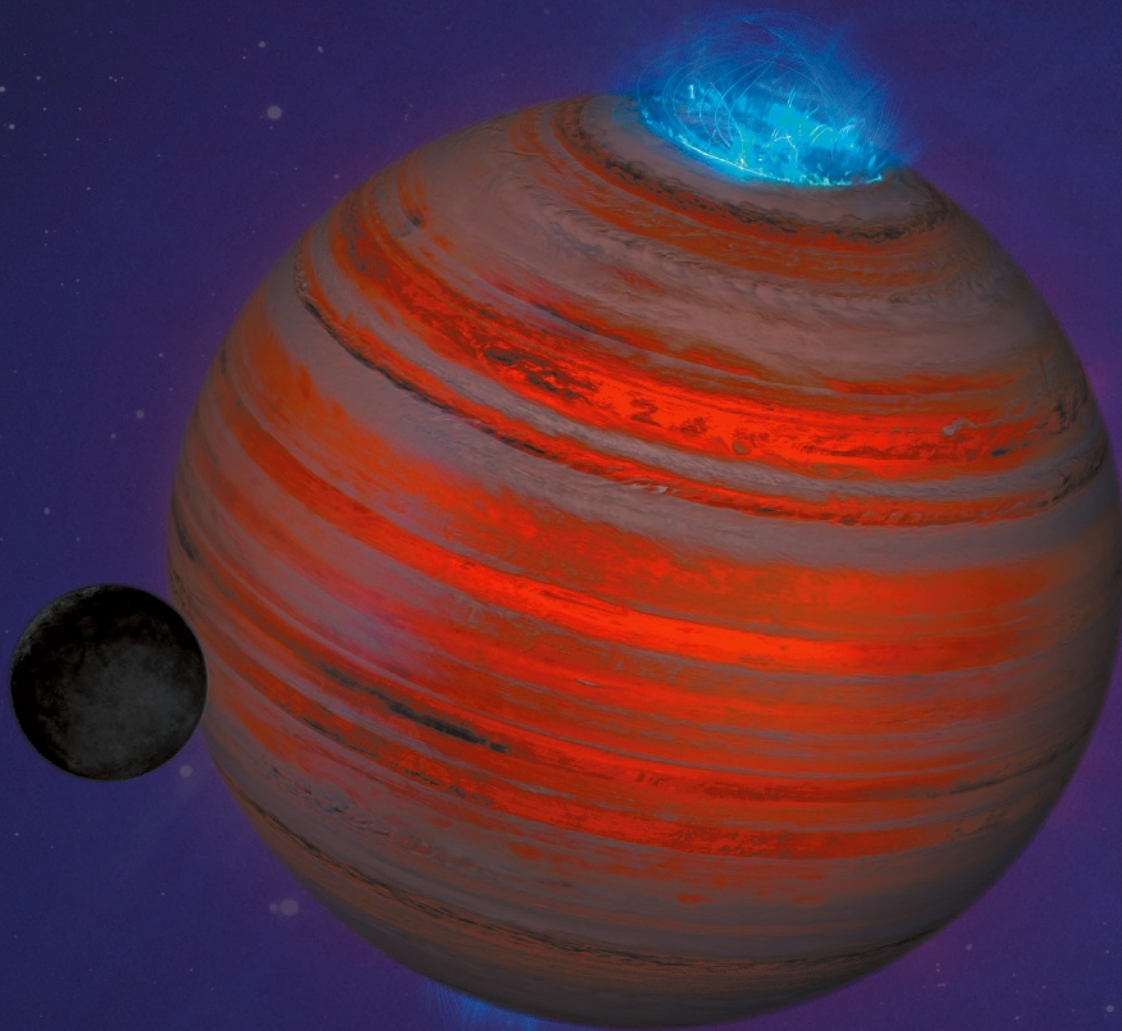
A. Magerus et al., **The genetic landscape of the FAS pathway deficiencies**, *Biomed. J.*, vol. 44(4), pp. 388-399, 2021.

J. Hadjadj et al., **Early-onset autoimmunity associated with SOCS1 haploinsufficiency**, *Nat. Commun.*, vol. 11(1), 5341, 2020.

J. Hadjadj et al., **Pediatric Evans syndrome is associated with a high frequency of potentially damaging variants in immune genes**, *Blood*, vol. 134(1), pp. 9-21, 2019.

M. L. Frémond et al., **Efficacy of the Janus kinase 1/2 inhibitor ruxolitinib in the treatment of vasculopathy associated with TME6173-activating mutations in 3 children**, *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 138(6), pp. 1752-1755, 2016.

N. Jeremiah et al., **Inherited STING-activating mutation underlies a familial inflammatory syndrome with lupus-like manifestations**, *J. Clin. Invest.*, vol. 124(12), pp. 5516-5520, 2014.



Les naines brunes se formeraient comme des étoiles, mais auraient des bandes de nuages et des taches similaires à celles des géantes gazeuses. Comme ces dernières, elles seraient dotées d'un champ magnétique très fort à l'origine d'aurores polaires.

L'ESSENTIEL

> Les naines brunes présentent une masse comprise entre 13 et 80 fois celle de Jupiter.

> Elles n'offrent pas les conditions suffisantes pour produire la fusion de l'hydrogène en leur cœur comme les étoiles, mais la plupart seraient pourtant nées au sein de grands nuages de gaz en effondrement.

> Elles partagent aussi des caractéristiques avec les planètes géantes gazeuses : une dynamique atmosphérique similaire, la présence d'un fort champ magnétique et des aurores polaires.

> Certaines pourraient être entourées de planètes.

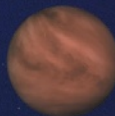
L'AUTRICE



KATELYN ALLERS
astronome, spécialiste des étoiles de faible masse et des naines brunes. Elle a mené ses travaux à l'université Bucknell, en Pennsylvanie

Naines brunes Entre planètes et étoiles

Trop sombres et trop froides, les naines brunes sont longtemps restées impossibles à observer. Depuis une vingtaine d'années, ces objets à la frontière entre les étoiles et les planètes commencent à révéler leurs secrets.



Respire, respire. Je me répète ces mots comme un mantra. À 5600 mètres d'altitude, au sommet du Cerro Toco, mon corps peine à trouver assez d'oxygène, et je dois me concentrer pour faire entrer assez d'air dans mes poumons. Ce stratovolcan surplombe le plateau de Chajnantor, au Chili, où est installé *Alma* (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), l'un des plus grands réseaux de radiotélescopes du monde. Entre l'atmosphère ténue et la terre rouge et dénuée de végétation de la montagne, j'ai l'impression d'être sur Mars. Mes collègues et moi avons entrepris cette ascension pour tester les conditions atmosphériques sur le Cerro Toco. L'objectif est de s'assurer que les conditions y sont assez bonnes pour y construire un télescope infrarouge et réaliser des découvertes passionnantes.

L'astronomie infrarouge offre une vision fascinante de l'Univers. C'est dans cette gamme du spectre électromagnétique, trop rouge pour que l'œil humain puisse la voir, que se cachent les naines brunes, les objets que j'étudie depuis vingt ans. Quand j'étais à l'université, au début des années 2000, les naines brunes n'avaient été découvertes que depuis peu et de nombreuses questions fascinantes se posaient sur leur origine et leurs caractéristiques. Ces étranges objets, à la frontière entre étoiles et planètes d'après leurs gammes de températures et de masses, ont fini par me captiver. En plus d'être intéressantes pour elles-mêmes, les naines brunes offrent des passerelles pour mieux comprendre certains aspects des étoiles et des planètes.

Je suis arrivée à une époque qui marque un tournant dans ce domaine. Nous commençons à avoir un peu de recul sur ces objets pour saisir les processus physiques qui y sont à l'œuvre. Et en même temps, de nouveaux outils d'observation très puissants sont à notre disposition pour enrichir notre catalogue de naines brunes, explorer leur atmosphère (par exemple pour y estimer la vitesse des vents), ou essayer de déterminer si des planètes gravitent autour de ces objets.

DES OBJETS INTERMÉDIAIRES

La plupart des étoiles sont alimentées par la fusion de l'hydrogène en hélium, un processus très stable qui permet à ces astres de brûler à température constante et à la même luminosité pendant des milliards d'années. Mais si la masse d'une étoile en devenir est inférieure à 8% de celle du Soleil (soit 80 fois la masse de Jupiter), l'astre n'atteint pas les conditions de température ou de pression assez élevées pour soutenir la fusion de l'hydrogène. On obtient alors une naine brune.

En 2017, Koraljka Mužić, de l'université de Lisbonne, et ses collègues ont indiqué que les

naines brunes sont presque aussi communes que les étoiles et qu'on les trouve à peu près dans tous les environnements. Des naines brunes ont été détectées dans des pouponnières stellaires, aux côtés de jeunes protoétoiles. Elles ont également été observées dans des systèmes binaires, appariées à des naines blanches. Ces naines brunes ont donc survécu à l'engloutissement par leur partenaire lors de la phase de géante rouge volumineuse qui a précédé le stade de naine blanche (le Soleil est une naine jaune, qui gonflera en géante rouge dans cinq milliards d'années jusqu'à environ l'orbite de la Terre, avant de devenir une petite naine blanche). Même certains des systèmes les plus proches du Soleil contiennent des naines brunes. C'est le cas du troisième système le plus proche, Luhman-16, et du quatrième, WISE 0855-0714, situés respectivement à 6,5 et 7,3 années-lumière (les deux premiers systèmes les plus proches de nous sont Alpha du Centaure et l'étoile de Barnard). Et pourtant, malgré leur omniprésence, la plupart des gens n'ont jamais entendu parler de ces objets.

Bien qu'elles ne réalisent pas la fusion de l'hydrogène, les naines brunes présentent une émission thermique due à la chaleur accumulée lors de leur formation. Après leur naissance, leur

COMMENT CLASSER LES NAINES BRUNES

Les naines brunes sont des objets avec une masse comprise entre celle des planètes et des étoiles. Pour définir cette famille intermédiaire, les astrophysiciens s'appuient sur les conditions nécessaires pour obtenir la fusion de différents éléments.

La fusion de l'hydrogène est possible dans des objets d'une masse supérieure à 80 fois la masse de Jupiter. Ce seuil définit la limite entre les naines brunes et les étoiles. Les objets plus massifs, les étoiles, sont assez chauds pour produire cette réaction, et ceux en dessous de cette limite n'atteignent pas les températures nécessaires pour l'amorcer.

Au-dessus de 13 fois la masse de Jupiter, la fusion du deutérium est possible. Cette limite a été choisie pour fixer la frontière entre les planètes et les naines brunes, par symétrie avec la limite supérieure entre naines brunes et étoiles. Ainsi, par définition, toutes les naines brunes (excepté les naines brunes de masse planétaire qui remettent en question cette définition) brûlent du deutérium.

Ces deux limites ne sont pas strictes en termes de masse : un objet juste au-dessus de 13 fois la masse de Jupiter brûlera une grande part de son deutérium, mais deviendra au bout d'un certain temps trop froid pour brûler l'intégralité de ses réserves. Et un objet juste en dessous de la limite brûlera une petite partie du deutérium au début de sa vie. Par ailleurs, ce seuil et celui entre les naines brunes et les étoiles peut aussi varier avec différents facteurs, telle la métallicité de l'objet (sa composition en éléments plus lourds que l'hélium).

La limite pour la fusion du lithium, quant à elle, se situe à environ 65 fois la masse de Jupiter. Les étoiles et les naines brunes les plus massives sont capables de brûler leur lithium (typiquement en quelques centaines de millions d'années pour une naine brune juste à cette frontière), mais les naines brunes en dessous de cette masse critique conservent leurs réserves de lithium. Le fameux « test du lithium », qui repose sur la détection de cet élément pour confirmer la nature sous-stellaire de candidates naines brunes, ne fonctionne donc que pour les naines brunes de moins de 65 fois la masse de Jupiter, et au-delà d'un certain âge (car une naine brune plus massive mais encore jeune n'aura pas encore épuisé ses réserves).

CLÉMENCE FONTANIVE
Université de Berne

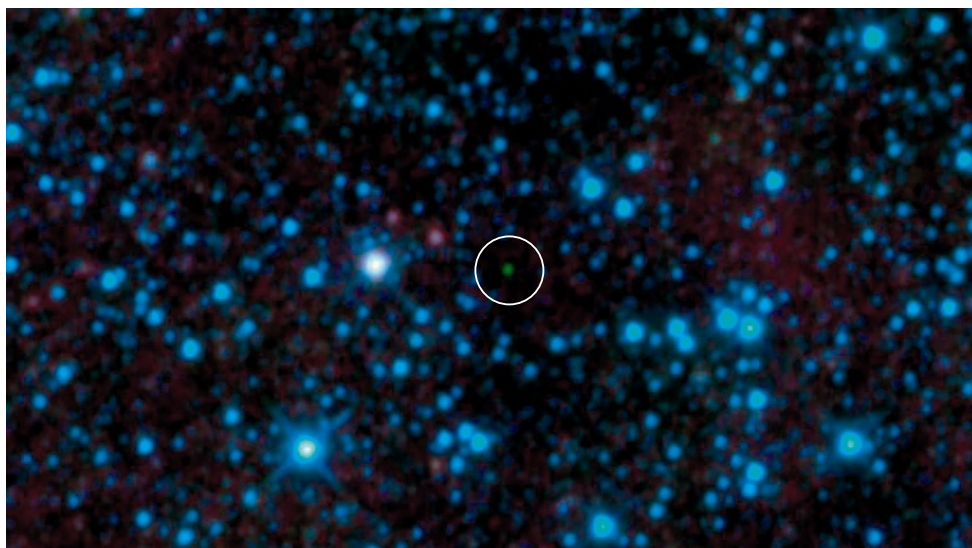
température est assez élevée, de l'ordre de 2800°C. Au cours des milliards d'années suivantes, les naines brunes se refroidissent et émettent de moins en moins de rayonnement. Elles ne meurent jamais vraiment : elles passent l'éternité à se refroidir et à s'assombrir. La naine brune la plus froide connue à ce jour présente une température inférieure au point de congélation de l'eau. Parce qu'elles sont si froides, la plupart de la lumière qu'elles émettent est dans l'infrarouge. Elles sont beaucoup trop pâles pour être vues par l'œil humain dans le ciel nocturne, mais si nous pouvions les observer de près, elles auraient probablement une couleur terne rouge orange ou magenta.

Nous avons aujourd'hui une bonne idée de leurs caractéristiques principales. Comme le Soleil, les naines brunes sont essentiellement composées d'hydrogène. Mais la température dans leur atmosphère supérieure est assez basse pour que diverses molécules s'y forment sans être aussitôt détruites. Par exemple, des traces de vapeur d'eau ont été observées dans presque toutes les naines brunes.

Quand ces astres se refroidissent davantage, leur chimie atmosphérique change. Différentes molécules et nuages deviennent prédominants. L'évolution d'une naine brune dépend de sa masse et de son âge. Pendant ses 100 premiers millions d'années, une naine brune 40 fois plus massive que Jupiter, par exemple, aura une composition atmosphérique similaire à celle d'une naine rouge (une classe d'étoiles de masse inférieure au Soleil), avec de l'oxyde de titane et du monoxyde de carbone. Ensuite, entre 100 millions et 500 millions d'années, des nuages de poussière riches en silicates (enstatite, quartz, etc.) se forment. Environ 1 milliard d'années après cela, les nuages se disloquent et s'enfoncent dans les profondeurs de la naine brune. Le méthane devient l'espèce moléculaire dominante dans la haute atmosphère. La naine brune la plus froide connue montre des signes de la présence de nuages de glace d'eau, ainsi que de vapeur d'eau et de méthane. Nous nous attendons à ce que son atmosphère contienne des quantités importantes d'ammoniac, comme observé sur Jupiter.

Au-delà de ces grandes lignes, de nombreux aspects des naines brunes restent encore mal compris. Le caractère mystérieux de ces objets a inspiré des hypothèses étonnantes. Par exemple, les naines brunes ont été proposées comme candidates à la matière noire (cette composante de l'Univers cinq fois plus abondante que la matière ordinaire, mais de nature inconnue). Une idée vite abandonnée quand il est devenu clair que la contribution des naines brunes à la masse totale de la Voie lactée est bien trop faible.

Les scientifiques ont prédit l'existence des naines brunes dans les années 1960 en se fondant sur leurs connaissances de la formation



des étoiles et des planètes. Mais à l'époque, cette catégorie intermédiaire échappait à toute détection. Les techniques d'observation dans l'infrarouge, balbutiantes, n'étaient pas encore assez sensibles. Puis, en 1995, la première naine brune, Teide 1, a finalement été identifiée dans le célèbre amas d'étoiles des Pléiades. Les astronomes Rafael Rebolo López, María Rosa Zapatero-Osorio et Eduardo Martín l'ont repérée sur des images dans le visible du télescope de 80 centimètres de l'observatoire de Teide, aux Canaries. L'objet était jeune et brillait encore assez fort grâce à la chaleur accumulée lors de sa formation. L'équipe a détecté la signature de plusieurs éléments dans son atmosphère, dont le lithium. Or la température dans le cœur des étoiles est assez élevée pour détruire le lithium présent. Cette étonnante découverte prouvait que la fusion nucléaire du lithium ne se produisait pas dans Teide 1.

Les naines brunes se refroidissent progressivement. Sur cette image du télescope spatial WISE en fausses couleurs (le spectre infrarouge est décalé vers les couleurs du visible), la naine brune WISE 1828+2650 apparaît en vert (dans le cercle) car sa température est exceptionnellement basse, entre - 20 °C et 120 °C.

LES PREMIÈRES NAINES BRUNES

Deux mois plus tard, grâce à des observations dans l'infrarouge à l'observatoire du mont Palomar, Tadashi Nakajima, de Caltech (l'institut de technologie de Californie), et ses collègues ont annoncé la détection d'une deuxième naine brune, Gliese 229B, la partenaire d'une étoile. En analysant leurs données, ils ont immédiatement compris que cet objet était étrange. Il avait une couleur inhabituelle et semblait contenir du méthane dans son atmosphère. Cette molécule très réactive se transforme en monoxyde de carbone si la température est élevée. L'objet devait donc être froid. Des observations complémentaires ont révélé que Gliese 229B est de la même taille environ que Jupiter, avec un diamètre de près de 129 000 kilomètres, mais beaucoup plus dense : elle est en effet environ 70 fois plus massive.

En 2000, quand j'ai commencé mes études supérieures, le catalogue de naines brunes s'était

AU PAYS DES NAINES BRUNES

Très nombreuses dans l'Univers, les naines brunes sont de petits objets sombres et compacts qui partagent certaines similarités avec les étoiles et les planètes. Avec une masse comprise entre 13 et 80 fois celle de Jupiter, elles constituent une famille à part entière. Des découvertes récentes ont précisé les processus de leur formation ou encore la composition de leur atmosphère.

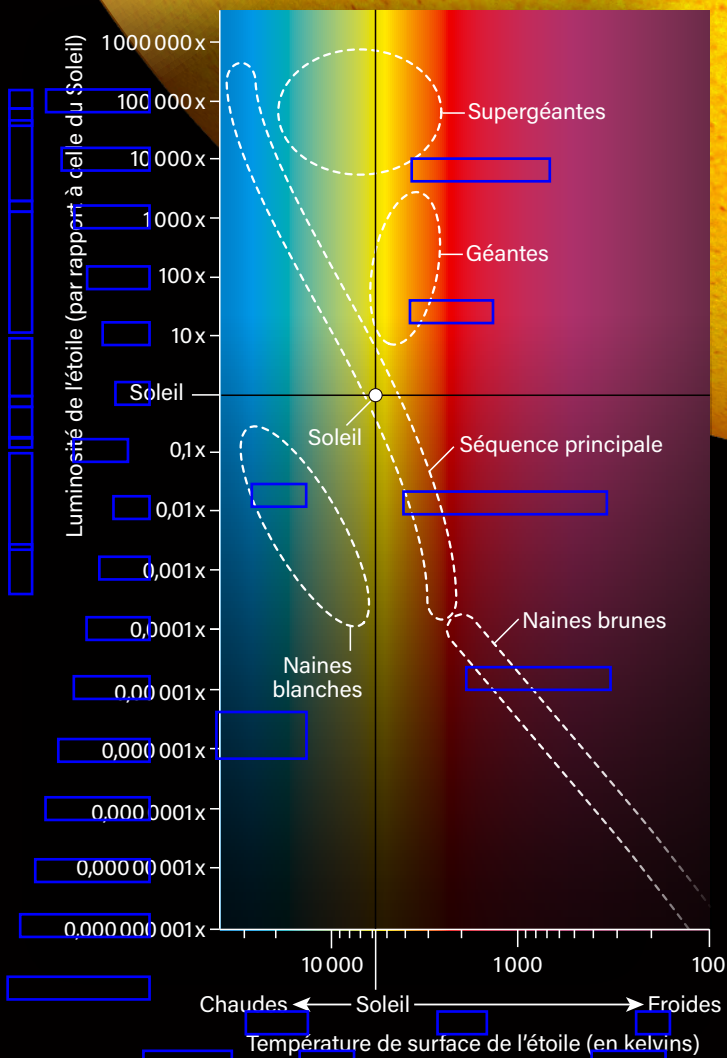


Diagramme H-R

Cette figure représente la température des étoiles en fonction de leur luminosité. Elle est connue sous le nom de « diagramme de Hertzsprung-Russell » (H-R). Les astronomes l'utilisent pour classer les étoiles. Les naines brunes se retrouvent en bas à droite, des objets plus froids et plus sombres que toutes les autres étoiles.

Soleil Naine jaune

Rayon : 696 000 kilomètres
Masse : 1050 fois la masse de Jupiter

Proxima du Centaure Naine rouge

Rayon : 107 000 kilomètres
Masse : 130 fois la masse de Jupiter

PSO J318.5-22 Naine brune

(classe spectrale L)
Rayon : 105 000 kilomètres
Masse : 8,3 fois la masse de Jupiter

WISE 0855 Naine brune

(classe spectrale Y)
Rayon : 72 000 kilomètres
Masse : 3 à 10 fois la masse de Jupiter

Jupiter Planète géante gazeuse

Rayon : 71 500 kilomètres

Machine interne

Les étoiles puisent leur énergie dans la fusion de l'hydrogène. Les naines brunes sont trop petites pour maintenir ces réactions. Elles brillent grâce à l'énergie accumulée lors de leur formation. Les planètes comme Jupiter reflètent la lumière qu'elles reçoivent de leur étoile en plus de la chaleur issue de leur formation.

Atmosphère

Les étoiles, les planètes et les naines brunes ont toutes des atmosphères. Les naines brunes traversent différents stades : au début, l'atmosphère ressemble à celle d'une étoile naine rouge. Puis, avec le temps, la température baisse. Des nuages constitués de minéraux se forment. Enfin, ces nuages finissent par couler dans les profondeurs, et l'atmosphère supérieure ressemble à celle des planètes géantes gazeuses.

Fusion de l'hydrogène

Pas de nuages dans l'atmosphère

Nuages de titanate de calcium (CaTiO_3) et d'aluminate de calcium (CaAl_2O_4)

Nuages de silicate de magnésium (Mg_2SiO_4) et de fer

Faible

Chaleur et densité

Élevée

Pas de fusion de l'hydrogène

Gaz de monoxyde de carbone (en rouge)

Nuages de glace d'eau

Nuages de sels

Nuages de soufre

Pas de fusion de l'hydrogène

Gaz de méthane et d'ammoniac (en bleu)

Pas de fusion de l'hydrogène

Les coupes ne sont pas présentées à l'échelle

Étoiles naines jaunes

Le Soleil est un exemple de naine jaune. Ces étoiles brûlent l'hydrogène et produisent de l'hélium pendant 10 milliards d'années, jusqu'à épuiser presque tout l'hydrogène. Elles enflent alors pour devenir des géantes rouges, qui transforment l'hélium en carbone et d'autres éléments lourds. Quand ce carburant vient à disparaître, ces étoiles expulsent leurs couches externes qui deviennent des nébuleuses planétaires, et leur cœur s'effondre pour former des naines blanches denses et chaudes.

Évolution

Géante rouge

10 milliards d'années

Nébuleuse planétaire

Naine blanche

Étoiles naines rouges

Ce type d'étoiles est de loin le plus fréquent dans la Voie lactée. Ces astres sont plus froids et plus sombres que le Soleil. Ils transforment aussi l'hydrogène en hélium, mais leur évolution est encore plus lente que celle des naines jaunes. Ils pourraient vivre mille milliards d'années avant de manquer d'hydrogène. Quand cela sera le cas, ils deviendront également des naines blanches.

Évolution

Mille milliards d'années

Naine blanche à hélium

Naines brunes

Ces corps ne sont pas des étoiles, car leur masse est trop faible pour produire une pression suffisante à initier les réactions de fusion de l'hydrogène. Elles brillent grâce à la chaleur emmagasinée pendant leur formation. Elles ne meurent pas ni ne se transforment en un autre type d'astre. Elles deviennent juste plus sombres et plus froides.

Évolution

100 millions d'années

Planètes géantes gazeuses

Au lieu de se former lors de la condensation de vastes nuages de gaz comme les étoiles et les naines brunes, les planètes géantes gazeuses naissent dans le disque protoplanétaire entourant des étoiles jeunes. Jupiter et Saturne sont les plus grandes planètes du Système solaire et sont composées principalement d'hydrogène et d'hélium. Comme les naines brunes, elles n'offrent pas les conditions nécessaires à la fusion thermonucléaire.

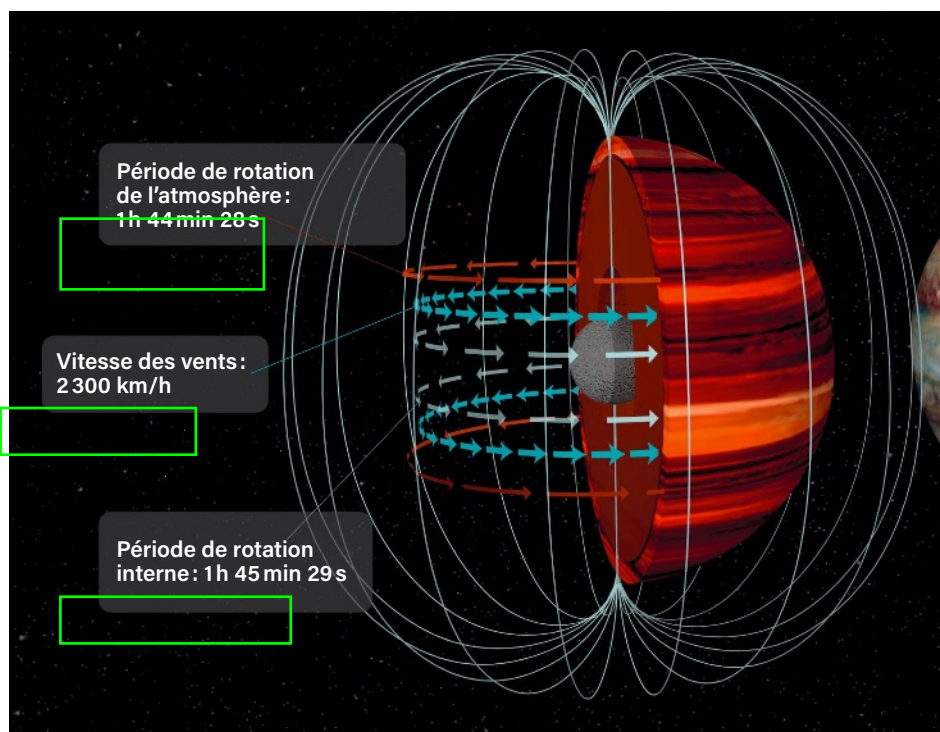
un peu étoffé sans être encore très riche. Comme mon directeur de thèse travaillait sur la formation des étoiles, j'ai décidé de chercher des naines brunes dans les régions où naissent les étoiles. J'en ai découvert certaines dont la masse les rapproche des planètes. À cette époque, nous n'avions aucune idée de la façon dont ces objets se forment. Nous ne savions pas s'il y avait une limite de masse inférieure, mais nous trouvions des naines brunes toujours plus petites.

Mon travail de thèse a conduit à la découverte d'une vingtaine de ces astres, qui ont contribué à leur compréhension. Depuis, le *2-Micron All Sky Survey* (2MASS), un programme d'observation infrarouge mené au début des années 2000, et le *Wide-Field Infrared Survey* (WISE), un télescope spatial lancé en 2009, en ont découvert bien d'autres. Le nombre actuel de naines brunes s'élève à environ 3000. Mais il en reste encore beaucoup d'autres à localiser. Les estimations suggèrent que la Voie lactée en contiendrait entre 25 milliards et 100 milliards.

NÉES COMME DES ÉTOILES OU COMME DES PLANÈTES?

En tant que limite inférieure pour la masse nécessaire à la formation des étoiles, les naines brunes offrent aux astronomes une chance unique d'approfondir leur compréhension des étapes fondamentales de la naissance des étoiles, mais aussi de celle des planètes. Les étoiles se forment dans des nuages moléculaires, de vastes régions riches en gaz (principalement de l'hydrogène moléculaire) et en poussière. Si la masse d'un nuage moléculaire est suffisamment grande, la gravité peut y vaincre la pression du gaz soutenant le nuage et le faire s'effondrer sur lui-même. Il forme alors une ou plusieurs étoiles. Pendant l'effondrement, tout mouvement de rotation dans le nuage, même infime, est amplifié, de la même façon que les patineurs sur glace tournent plus vite quand ils rapprochent leurs bras de leur corps. Cette rotation dans le nuage conduit à la formation d'un disque circumstellaire de matière entourant l'étoile naissante. Ce disque est alors le creuset d'où émergent des planètes.

Quand les naines brunes ont été découvertes, les astronomes supposaient qu'elles naissent selon le même processus que les étoiles. Mais ils étaient perplexes quant à la manière dont la gravité d'une si petite masse était capable de surmonter la pression du gaz et initier un effondrement. Dans les années 2000, les chercheurs ont imaginé divers scénarios et conçu des projets d'observation pour distinguer ces différentes hypothèses. Certaines théories suggéraient que des perturbations empêchaient des étoiles en formation d'atteindre leur masse finale. Selon d'autres pistes, des processus physiques provoquaient



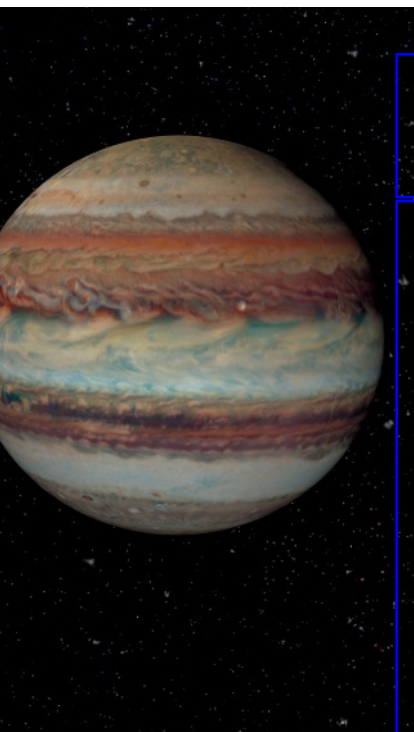
Pour mesurer la vitesse des vents à la surface de la naine brune, Katelyn Allers et ses collègues se sont inspirés d'une technique utilisée sur Jupiter, qui consiste à évaluer la période de rotation des structures se déplaçant à la surface (et poussées par les vents) et d'estimer la période de rotation de la planète à partir des émissions radio émanant des couches plus profondes de l'atmosphère. Dans le cas de la naine brune 2MASS J10475385 + 2124234, les chercheurs ont montré que la différence entre les deux périodes mesurées était de 1 minute, ce qui correspond à une vitesse des vents de 2 300 kilomètres par heure.

l'éjection de la naine brune hors de son environnement natal à un stade prématuré ou conduisaient à la dispersion du nuage de gaz, ne laissant alors qu'une étoile miniature.

Il était aussi possible d'invoquer des versions «réduites» de la formation d'étoiles ou des versions «amplifiées» de la formation de planètes. Cette question est un bon exemple de cas où différentes théories entraînent des prédictions distinctes et vérifiables. Grâce à nos recherches, nous avons recolté de nombreuses informations: nous avons constaté l'ubiquité des disques circumstellaires autour des naines brunes, mesuré la distribution de masse des étoiles et des naines brunes dans divers environnements, déterminé l'orbite de ces dernières dans des systèmes binaires, etc. Avec ces données, il semblait plus probable que la majorité des naines brunes se forment comme des mini-étoiles, à partir de réservoirs de gaz modestes.

Le fait que les naines brunes présentent des disques circumstellaires a soulevé la possibilité qu'elles abritent des planètes. Bien que nous n'en ayons pas encore la preuve définitive, il y a de grandes chances que des planètes se développent dans ces disques tout comme elles le font autour des étoiles. Les scientifiques espèrent confirmer ce scénario dans les prochaines années.

Mais la question de l'origine des naines brunes n'est pas close pour autant. Récemment, des chercheurs ont découvert des naines brunes isolées avec des masses similaires à celles des planètes géantes (moins de 13 fois la masse de Jupiter), ce qui a relancé la



question de leur formation. Certaines de ces naines brunes de masse planétaire sont-elles apparues dans les disques circumstellaires d'étoiles plus massives – en d'autres termes, se seraient-elles formées comme des planètes?

Afin de tester les scénarios de formation de tels objets, mes collègues et moi avons utilisé le télescope spatial *Hubble* pour étudier des systèmes binaires particuliers constitués de paires de naines brunes de masse planétaires. Les caractéristiques de ces systèmes nous permettent de dire comment ces derniers se sont constitués. En 2020, nous avons découvert un système dont les caractéristiques s'expliquent mieux si l'on suppose que les deux naines brunes se sont formées comme des étoiles alors même que leurs masses sont très faibles. Le système, Oph 98 AB, est très jeune à l'échelle de l'histoire cosmique. Il est né il y a à peine 3 millions d'années, et ses deux naines brunes ont une masse de 15 et 8 fois celle de Jupiter, respectivement. Ces objets de masse extrêmement faible sont séparés par 200 fois la distance entre la Terre et le Soleil. Parce que les deux naines brunes sont si légères et si éloignées l'une de l'autre, Oph 98 AB est, à ce jour, le système binaire doté de la plus faible énergie de liaison gravitationnelle. En d'autres termes, ces deux corps n'auraient jamais réussi à se lier s'ils s'étaient croisés en étant nés dans des régions différentes. La meilleure explication est qu'ils sont nés dans le même nuage de gaz et se sont donc formés comme des étoiles. Et la jeunesse du système suggère en outre que l'effondrement du gaz est aussi rapide pour des objets de masse planétaire que pour les étoiles.

DES ASTRES GLACÉS

Ces dernières années, notre compréhension des naines brunes et les techniques d'observation ont assez progressé pour nous permettre de nous attaquer à des questions plus difficiles et des mesures plus précises sur ces objets encore mystérieux. Récemment, les astronomes ont découvert une population de naines brunes très froides, connues sous le nom de naines Y. Ces objets ont des températures allant de 180 °C jusqu'à - 20 °C (voir la photo page 49), qui rivalisent avec celle Jupiter (qui est à environ - 150 °C). Les

naines Y sont difficiles à observer car elles sont à la fois froides et très sombres. La lumière qu'elles émettent se situe principalement dans l'infrarouge (à des longueurs d'onde de 3 à 5 micromètres). L'atmosphère terrestre absorbe une grande partie de ce rayonnement.

Néanmoins, mes collègues et moi avons publié les spectres de plusieurs naines Y. Et, à partir de modèles, nous avons déduit la présence de nuages de glace d'eau, ainsi que des mouvements de mélange verticaux importants dans l'atmosphère de ces objets. Or, dans la même gamme de longueurs d'onde, Jupiter émet sa propre lumière (au lieu de simplement refléter la lumière du Soleil) et est également animé d'un mélange vertical significatif. Nous espérons qu'en étudiant les naines Y, nous réussirons à distinguer, d'une part, les propriétés de Jupiter spécifiques à sa nature planétaire – en d'autres termes, le fait qu'elle se soit formée dans le disque circumstellaire du Soleil et qu'elle soit constamment illuminée par la lumière de l'étoile – et, d'autre part, les propriétés qui sont communes à tous les objets gazeux froids, que ce soient des planètes ou des naines brunes. Jusqu'à présent, nos études montrent que les atmosphères hautement dynamiques ont tendance à être la norme.

L'observation de l'atmosphère des naines brunes a par ailleurs donné naissance à un nouveau sous-domaine de recherche: l'exométéorologie. Les naines brunes sont trop lointaines pour que nous puissions examiner visuellement leurs caractéristiques atmosphériques. Mais, à travers les variations de luminosité, nous pouvons en déduire les grandes lignes. Quand un nuage ou un autre phénomène sur la naine brune passe dans notre champ de vision, il modifie la quantité de lumière provenant de l'astre. En 2014, Ian Crossfield, alors à l'institut Max-Planck d'astronomie, à Heidelberg, en Allemagne, et ses collègues ont analysé les variations durant plusieurs périodes de rotation de certaines naines brunes et ont ainsi établi les cartes des nuages sur Luhman-16. On y observe des taches, et dans d'autres cas des bandes, qui ressemblent de façon remarquable à celles des planètes géantes du Système solaire. Certaines naines brunes voyaient leur luminosité diminuer ou augmenter de 25 % en l'espace d'une seule rotation. Nous avons découvert que les naines brunes dont la température conduit à la dislocation des nuages présentent les plus grandes variations de luminosité et que les objets jeunes sont caractérisés par une variabilité plus importante de leur brillance.

En 2017, Melodie Kao, de l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont également constaté d'autres similitudes entre les naines brunes et les géantes gazeuses. Par exemple, ces deux familles d'astres ont tendance



Les naines Y ont des températures allant de 180 °C jusqu'à - 20 °C



à avoir de forts champs magnétiques et des aurores, comme le révèlent les observations radio qui portent la signature de particules chargées se déplaçant selon des trajectoires en spirale, piégées dans les champs magnétiques. L'intensité de ces champs pour les naines brunes est 1000 et 10000 fois plus forte que pour Jupiter et la Terre, respectivement. Les aurores boréales sur Terre sont déjà un spectacle éblouissant, imaginez le ciel nocturne sur une de ces naines brunes!

L'enseignement est une part importante de mon travail. Je donne des cours d'introduction à l'astronomie. Quand je présente les caractéristiques des planètes du Système solaire, je n'hésite pas à glisser quelques informations sur les naines brunes. Lors d'une de ces séances, la question d'un étudiant a inspiré tout un programme de recherche sur la comparaison de la dynamique de l'atmosphère des naines brunes et des planètes. J'étais en train d'expliquer que l'estimation de la durée d'un jour sur Jupiter dépend de la méthode de mesure utilisée. Si vous appuyez sur le mouvement des éléments visibles dans la région équatoriale de Jupiter, vous obtenez une période de rotation qui est plus courte de cinq minutes que celle mesurée à partir du signal radio, qui sonde la planète plus en profondeur. Lorsque l'étudiant m'a demandé les raisons de cette différence dans la période de rotation, j'ai répondu que les structures équatoriales de Jupiter sont poussées par de forts vents zonaux et se déplacent donc plus vite. Sur Terre, les vents sont alimentés par la redistribution de l'énergie solaire dans l'atmosphère, mais nous ne savons pas dans quelle mesure ce mécanisme s'applique aux vents de Jupiter.

DES VENTS DÉCOIFFANTS

Après cette intervention de l'étudiant, j'ai commencé à réfléchir à ce problème et à la façon dont les naines brunes pouvaient apporter un élément de réponse. Les astronomes mesurent l'émission radio de certaines naines brunes, dont l'origine est probablement similaire à celle de Jupiter. Ils peuvent donc mesurer la période de rotation interne de ces objets. Et notre méthode de surveillance des changements de luminosité nous permet d'estimer la période de rotation de l'atmosphère. J'ai ainsi proposé de calculer la vitesse du vent sur une naine brune en comparant les deux mesures. Le meilleur candidat que nous avons pour essayer la technique était une naine brune riche en méthane avec une émission radio confirmée. Pour évaluer la vitesse du vent, nous avons besoin de déterminer les deux périodes avec une précision inférieure à 30 secondes. Mes collègues et moi avons soumis une proposition d'observation sur le télescope spatial *Spitzer* pour évaluer les variations de luminosité de la naine brune et une demande pour utiliser le *Karl-G. Jansky Very*

Les aurores boréales sur Terre sont déjà un spectacle éblouissant, imaginez sur une naine brune au champ magnétique beaucoup plus intense!

Large Array, au Nouveau-Mexique, pour déterminer la période radio. La comparaison des résultats a révélé une différence d'un peu plus de 1 minute, ce qui équivaut à des vents soufflant à près de 2300 kilomètres par heure (voir la figure page 52). Il est donc possible d'avoir des vents intenses sur une naine brune isolée sans l'apport énergétique d'une étoile proche. Dans le cas de Jupiter, la question de l'influence du Soleil reste ouverte.

Grâce à des relevés d'imagerie profonds du ciel entier, comme *2MASS*, *WISE* et *PanSTARRS* (le *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*), les astronomes continuent d'enrichir leur catalogue de naines brunes. Des programmes de science participative impliquant des citoyens passionnés ont été mis en place. Par exemple, *Backyard Worlds* permet à tout un chacun d'examiner les données de *WISE* pour y trouver entre autres des signes de naines brunes. Dans les prochaines années, les futurs grands relevés effectués avec l'observatoire *Vera-C.-Rubin* (qui commencera à observer début 2022) et le télescope spatial *Nancy-Grace-Roman* (avec un lancement prévu en 2025) compléteront notre recensement des naines brunes.

Malheureusement, nous n'avons pas obtenu de financement pour le télescope de Cerro Toco, et il ne sera jamais construit. Mais avec les débuts du télescope spatial *James-Webb* en 2022, les astronomes auront un regard sans précédent sur les naines brunes dans l'infrarouge, sans interférences avec l'atmosphère de la Terre. Parmi les premiers programmes d'observation prévus, nous étudierons la chimie atmosphérique des naines Y et la composition des nuages des naines brunes poussiéreuses. Nous lancerons même une recherche de planètes autour des naines brunes. Il est à parier que des découvertes palpitantes attendent ceux qui explorent ces objets parmi les plus méconnus du cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. N. Allers et al., **A measurement of the wind speed on a brown dwarf**, *Science*, vol. 368, pp. 169-172, 2020.

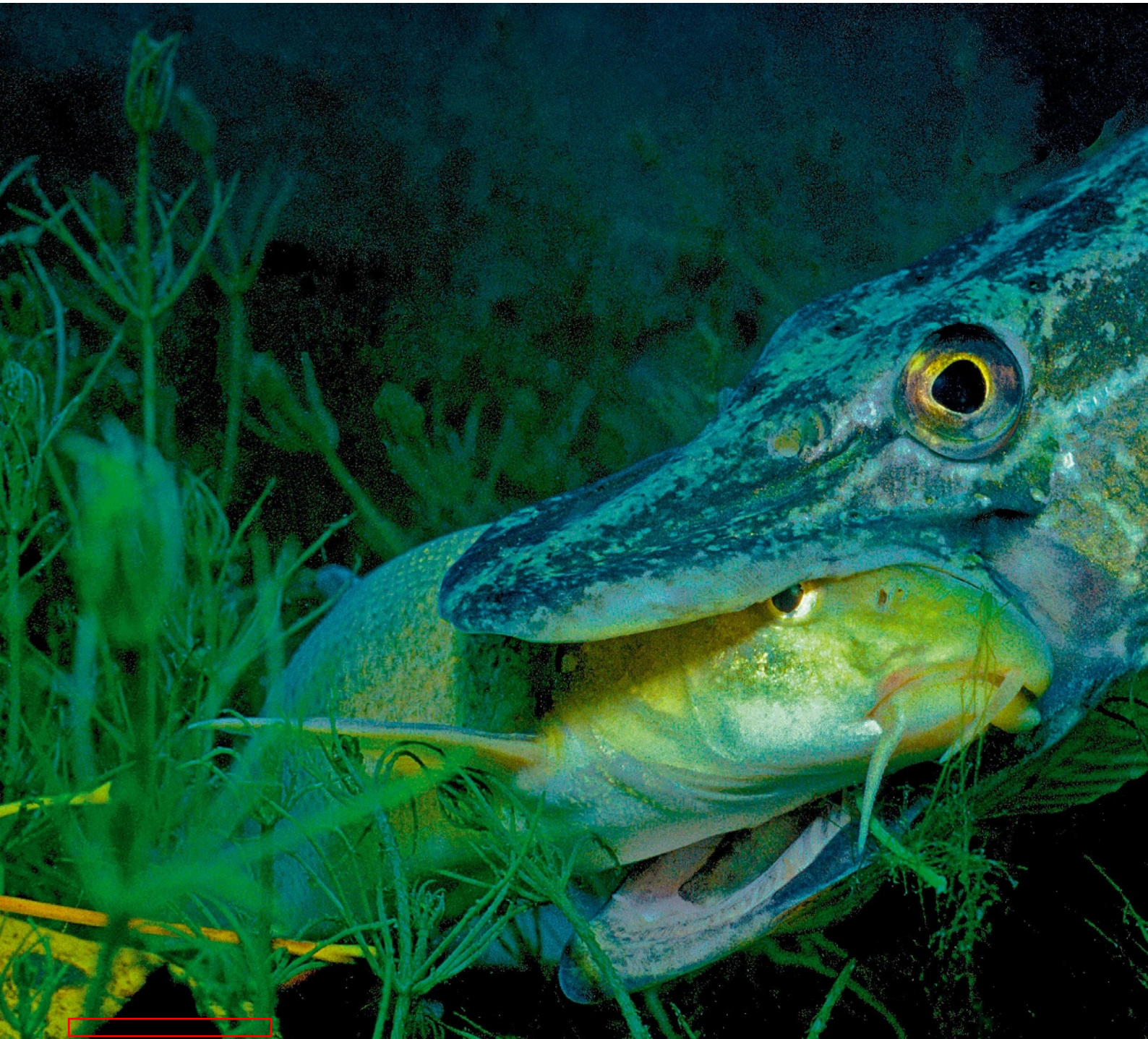
C. Fontanive et al., **A Wide Planetary-mass Companion to a Young Low-mass Brown Dwarf in Ophiuchus**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 905(2), L14, 2020.

G. Basri, **La découverte des naines brunes**, *Pour la Science*, n° 272, juin 2000.

Des poissons qui n'ont pas la vie douce

On recense aujourd'hui en France métropolitaine environ 25 % d'espèces de poissons d'eau douce de plus qu'en 2000. Un chiffre encourageant ?

Non : en réalité, cette augmentation résulte surtout d'une amélioration des connaissances et ne reflète pas l'état inquiétant des populations.



L'ESSENTIEL

> La faune de France métropolitaine est riche d'environ 110 espèces de poissons d'eau douce, dont 13 sont endémiques

> Environ 40 % d'entre elles sont menacées ou quasi menacées d'extinction.

> Cette situation résulte de multiples facteurs liés aux activités humaines :

barrages, pollutions, changements de régimes hydrologiques, destruction des habitats, arrivée d'espèces envahissantes...

> Plusieurs types d'actions sont envisageables pour y remédier. Mais cela demande de gros efforts, ne serait-ce que pour stopper la dégradation des écosystèmes.

L'AUTEUR



NICOLAS POULET
chargé de mission à l'Office français de la biodiversité (OFB) et l'un des coordinateurs de l'ouvrage *Les Poissons d'eau douce de France*

Contrairement à ce que suggère cette photographie, le brochet commun (*Esox lucius*) est, en tant qu'espèce, davantage menacé que sa présente victime, le barbeau fluviatile (*Barbus barbus*).

Combien d'espèces de poissons d'eau douce pouvez-vous citer ? Probablement moins d'une trentaine... Pourtant, il en existe plus de 15 750 dans le monde ! Elles représentent environ 48 % de la totalité des espèces de poissons et près de 25 % de l'ensemble des espèces de vertébrés connues à ce jour. Cette extraordinaire diversité est aujourd'hui en péril en raison des pressions anthropiques exercées sur l'eau et les milieux aquatiques : près d'un tiers des espèces de poissons d'eau douce sont menacées d'extinction. Pour 80 d'entre elles (pour celles que l'on connaît...), il est déjà trop tard, à l'image du spatulaire chinois (ou espadon de Chine, *Psephurus gladius*) qui s'est éteint au début des années 2000 à force de surpêche et de barrages.

La faune ichtyologique de la France métropolitaine, qui a fait l'objet d'une monographie rééditée en 2020 après une importante mise à jour (voir page 62), n'échappe pas à cette situation inquiétante. Cet ouvrage indique que les eaux continentales métropolitaines abritent près de 110 espèces de poissons. Le premier atlas, datant de 2001, en comptait à peine plus de 80. Cette augmentation notable s'explique à la fois par l'introduction d'espèces venues d'ailleurs (espèces dites « exotiques » ou « allochtones ») et, surtout, par la (re)découverte d'espèces que l'on confondait, volontairement ou non, avec d'autres (ces espèces difficiles à distinguer sont qualifiées de « cryptiques »).

En effet, les progrès considérables en génétique et en informatique ont permis de décrire plus finement le génome des poissons et de découvrir qu'au sein de certaines espèces vivent des populations présentant d'importantes différences génétiques. Lorsqu'il existe au moins un autre critère – morphologique le plus souvent – corroborant ces différences, il convient de définir plusieurs espèces au lieu d'une.

Suivant ce concept de «taxonomie intégrative», 21 espèces ont été ajoutées à l'inventaire ichthyologique dulçaquicole métropolitain, dont cinq que l'on n'avait encore jamais décrites (voir l'encadré page 60). Ces ajouts sont en grande partie le fruit des travaux du Muséum national d'histoire naturelle avec l'appui de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (aujourd'hui Office français de la biodiversité, ou OFB).

Au-delà de leur importance scientifique, ces découvertes ont une implication en termes de conservation. Tout d'abord parce qu'on ne protège bien que ce que l'on connaît, mais aussi parce que certaines des espèces présentes en France métropolitaine se révèlent endémiques : elles n'existent nulle part ailleurs, ce qui rend la France responsable de leur survie vis-à-vis du reste du monde. Au total, la France métropolitaine compte 13 espèces endémiques.

En 2019, un groupe d'experts de la Société française d'ichtyologie et de l'OFB a évalué l'état de conservation de l'ensemble des poissons d'eau douce de métropole en utilisant le protocole de la liste rouge des espèces menacées proposé par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Le résultat est préoccupant, puisque 39% des espèces sont menacées ou quasi menacées d'extinction. Parmi elles figurent des espèces endémiques dont l'aire de répartition est très restreinte telles que le chabot du Lez (*Cottus petiti*), la loche léopard (*Barbatula leoparda*), ou encore l'apron du Rhône (*Zingel asper*) dont le linéaire colonisé (longueur des parties des cours d'eau où l'espèce est présente) a régressé de plus de 80% au cours du xx^e siècle.

Mais les risques d'extinction ne concernent pas uniquement les espèces rares : certaines espèces autrefois abondantes sont aujourd'hui en difficulté. C'est notamment le cas des migrateurs «amphihalins», dont le cycle de vie passe par une phase marine et une phase en eau douce, qui comptent des espèces particulièrement exploitées par le passé.

Ainsi, les effectifs des civelles, jeunes stades de l'anguille (*Anguilla anguilla*), ont chuté de plus de 90% en moins de vingt ans, l'esturgeon européen (*Acipenser sturio*) a disparu de la Seine, du Rhin et du Rhône (on ne compte plus que quelques milliers d'individus dans l'estuaire de la Gironde) et la population de grandes aloses (*Alosa alosa*) de la Garonne-Dordogne s'est effondrée de plus de 90% en moins de trois générations (environ quinze ans). Sur le bassin de la Loire, la population de saumons (*Salmo salar*), estimée à 45 000 individus à la fin du xix^e siècle, ne comptait plus qu'une centaine d'individus sur l'Allier à la fin des années 1990... Même certaines espèces communes qui ne font pas l'objet

d'exploitation commerciale ou de pêche récréative se retrouvent en mauvaise posture, comme la vandoise rostrée (*Leuciscus burdigalensis*) ou le toxostome (*Parachondrostoma toxostoma*).

Quelles sont les causes de cette situation peu reluisante ? Elles sont diverses, et certaines sont globales tandis que d'autres ne concernent que quelques espèces.

DÉGRADATIONS DE L'EAU EN QUALITÉ...

Commençons par les atteintes à l'élément dans lequel évoluent les poissons : l'eau. On peut d'abord mentionner les pollutions et notamment l'eutrophisation, phénomène dû à un apport excessif de nutriments (azote, phosphore) en provenance d'eaux usées urbaines et des activités agricoles. Visible sous la forme de prolifération de cyanobactéries ou d'algues vertes, l'eutrophisation exacerbe la consommation d'oxygène et asphyxie le milieu, ce qui peut entraîner des mortalités massives. Par ailleurs, les cyanobactéries sont parfois toxiques et peuvent affecter la santé des poissons.

À l'eutrophisation s'ajoutent les micropolluants – par exemple les résidus de pesticides ou de médicaments, ou encore les hormones – qui



L'apron du Rhône (*Zingel asper*), qui atteint une vingtaine de centimètres de longueur, est un poisson de la même famille que la perche commune. L'espèce est endémique du bassin du Rhône.

ont des effets divers sur les individus et les populations : féminisation (changement de sexe), altération du comportement, troubles de l'olfaction, etc. À titre d'exemple, une équipe conduite par Wilfried Sanchez, de l'Iheris (Institut national de l'environnement industriel et des risques), a publié en 2011 une étude portant sur une rivière du Puy-de-Dôme recevant des effluents d'une usine pharmaceutique et d'une station de traitement des eaux usées ; elle a montré que plus de 58% des goujons (*Gobio gobio*) présentaient des organes reproducteurs non fonctionnels...

La qualité de l'eau est ainsi essentielle pour la survie des poissons et, selon le Rapportage 2016 des données au titre de la DCE (Directive cadre

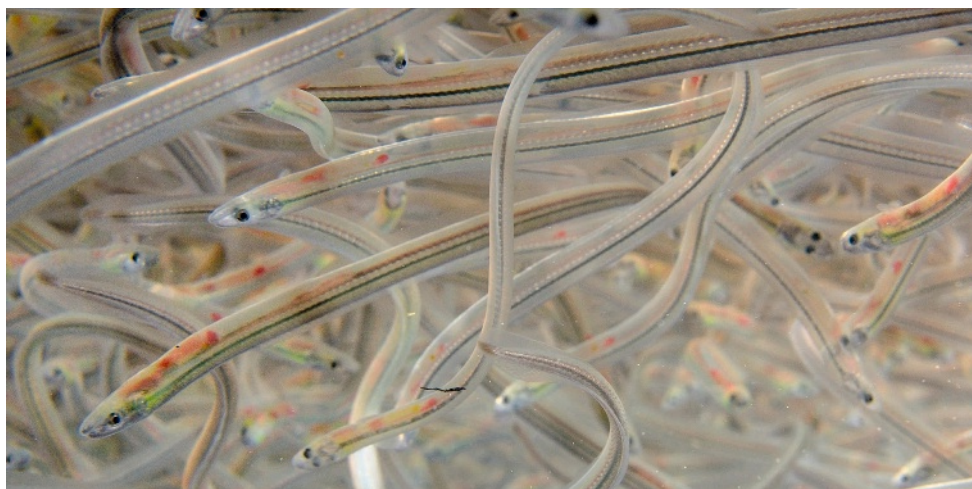
européenne sur l'eau), publié en 2018, seules 62% des masses d'eau (plans d'eau ou sections de cours d'eau) présentaient un bon « état chimique » en 2015 – sachant que cet état chimique réglementaire ne prend en compte qu'une faible partie des contaminants effectivement présents dans ces milieux.

... ET EN QUANTITÉ

La qualité de l'eau n'est pas tout, il faut aussi la bonne quantité et au bon moment. Or l'eau a de nombreux usages, pour l'eau potable, mais aussi pour l'industrie, l'agriculture, la production d'énergie (hydroélectricité, nucléaire)... Son prélèvement et sa consommation (lorsque l'eau n'est pas restituée directement) non seulement diminuent la quantité d'eau et donc la disponibilité en habitats, mais aussi perturbent le régime hydrologique des rivières. L'un des cas les plus emblématiques est la consommation de l'eau des rivières en été à des fins agricoles (typiquement pour la culture du maïs), avec pour conséquences une accentuation des étiages et une hausse de la température de l'eau, voire l'assèchement de sections entières de cours d'eau.

L'eau est parfois considérée comme une nuisance lorsqu'elle abonde. Par le passé, les zones humides (marais, vasières d'estuaires, bras morts...) ont ainsi fait l'objet d'assèchements, car on les considérait comme insalubres et inexploitable pour l'agriculture. De telles actions sont, aujourd'hui encore, menées pour des motifs agricoles ou immobiliers – alors que le rôle essentiel des milieux humides en tant que zones tampons, qui stockent l'eau en saison des pluies et la restituent aux cours d'eau en période sèche, n'est plus à démontrer.

En outre, afin de prévenir les inondations des zones urbaines ou agricoles, on a construit de grands barrages visant à écrêter les crues, ce qui a eu pour effet de limiter la recharge des nappes phréatiques et des zones humides, d'où des étiages estivaux accentués. De plus, la



Les poissons amphihalins, c'est-à-dire dont le cycle de vie passe par une phase marine et une phase en eau douce, figurent parmi les espèces les plus menacées. Il en est ainsi des anguilles d'Europe (*Anguilla anguilla*), dont les effectifs des jeunes stades, les civelles (ci-dessus), ont chuté de plus de 90% en moins de vingt ans.

limitation de l'importance des crues en termes de volume et de durée restreint la mise en eau des annexes fluviales, habitats indispensables à la reproduction de nombreuses espèces telles que les brochets (espèces du genre *Esox*) ou la lote (*Lota lota*).

ATTEINTES AUX HABITATS

Les habitats se sont eux aussi dégradés. Dès le milieu du xx^e siècle, on a extrait des alluvions afin de répondre aux besoins de construction d'infrastructures. Ainsi, des centaines de tonnes de granulats ont été extraites du lit mineur des cours d'eau (pratique interdite depuis 1995), d'où une déstabilisation des berges, l'appauvrissement des faciès d'écoulement, le pavage du fond du chenal, etc. et finalement une dégradation des habitats aquatiques. Ainsi, les extractions de granulats dans la Garonne et la Dordogne ont détruit les frayères de l'esturgeon et contribué à son déclin. Et si ces opérations ont cessé aujourd'hui en amont, elles ont encore lieu actuellement dans l'estuaire de la Gironde, zone de grossissement des jeunes.

Les atteintes à l'habitat incluent aussi les modifications des écoulements. La fragmentation des cours d'eau par les obstacles, tels que les seuils de moulins ou les barrages hydroélectriques, engendre des successions de retenues d'eau. On passe alors d'un système hydrologique principalement courant à un système de plus en plus stagnant. Cette succession d'obstacles limite aussi, voire empêche, le déplacement des poissons et notamment leur migration lors de la reproduction : c'est l'une des principales causes de la chute des populations de migrateurs amphihalins tels que le saumon atlantique.

Cela a commencé dès le Moyen Âge, avec l'avènement de l'utilisation de la force hydraulique par les moulins à eau. Mais c'est la construction des grands barrages qui sera responsable de la disparition des migrateurs

« POISSON », UN TERME TROP VAGUE

Ce que l'on appelle communément « poisson » ne correspond pas à une lignée animale bien définie dans l'arbre de l'évolution. Ce terme englobe en réalité plusieurs groupes zoologiques qui ne sont pas directement apparentés, et est donc inapproprié si l'on veut être scientifiquement précis. La plupart des espèces de « poissons » appartiennent au groupe des téléostéens (« poissons » à squelette osseux), qui eux-mêmes font partie des actinoptérygiens (vertébrés à nageoires rayonnées). Mais les lamproies, par exemple, appartiennent à un groupe distinct (les cyclostomes, vertébrés dépourvus de mâchoire). Autre exemple : les requins et les raies font partie des chondrichthyens (« poissons » à squelette cartilagineux), un groupe non directement apparenté aux actinoptérygiens.

TREIZE NOUVELLES ESPÈCES... AU MOINS

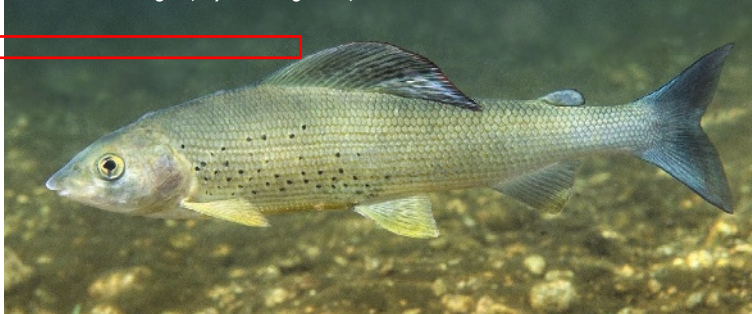
Aussi étonnant que cela puisse paraître, il reste encore dans les eaux douces métropolitaines des espèces de poissons qui n'ont pas été décrites. Le brochet (*Esox lucius*) étant l'un des poissons les plus connus, il semblait peu probable que l'on soit passé à côté d'une autre espèce. Et pourtant, en 2014, Gaël Denys, du Muséum national d'histoire naturelle, et quatre collègues décrivaient le brochet aquitain (*Esox aquitanicus*), espèce endémique des bassins du sud-ouest de la France. Non moins surprenante est la description en 2019 par Henri Persat, de la Société française d'ichtyologie, et ses collaborateurs d'une nouvelle espèce d'ombre (un autre poisson plébiscité par les pêcheurs à la mouche) dans les rivières des piémonts et plateaux d'Auvergne

et du Limousin : l'ombre d'Auvergne (*Thymallus ligericus*). Si ces espèces sont passées sous les radars des taxonomistes jusqu'à aujourd'hui, on peut imaginer la diversité cachée chez les petites espèces peu ou pas pêchées que sont les vairons, les chabots, les loches... C'est ainsi qu'ont été décrits en 2019 la loche léopard (*Barbatula leoparda*) et, en 2020, le vairon de la Garonne (*Phoxinus dragarum*) et le vairon ligérien (*Phoxinus fayollarum*). Depuis 2000, les ichtyologues ont décrit au total, en France métropolitaine, 13 espèces nouvelles pour la science. L'inventaire n'est sans doute pas terminé. Et c'est sans compter avec les départements et territoires d'outre-mer, qui recèlent une diversité ichtyologique dont on est loin d'avoir fait le tour.

Loche léopard (*Barbatula leoparda*)



Ombre d'Auvergne (*Thymallus ligericus*)



Vairon ligérien (*Phoxinus dragarum*)



amphihalins dans de nombreux bassins. Par exemple, le barrage de Donzère, construit sur le Rhône en 1947, a amputé de près de 70% l'aire de migration des aloses sur ce bassin. Notons aussi que certains poissons d'eau douce effectuent des migrations sans passer par la mer; des espèces comme la truite, les ombres ou les vandoises, dont les capacités de franchissement (le saut notamment) sont moindres comparées à celles des grands migrateurs amphihalins, sont donc perturbées par les obstacles même modestes.

Par ailleurs, pour sécuriser les terres urbaines et agricoles face aux inondations, on a engagé dès le milieu du xx^e siècle des travaux hydrauliques (recalibrages, curages...) sur les petits et moyens cours d'eau, qui ont entraîné la destruction des abris en berges et au fond du lit. Dans certains grands cours d'eau, les opérations de maintien d'un tirant d'eau suffisant pour le passage des bateaux ont eu pour conséquence la déconnexion ou la disparition des bras morts, des bras secondaires, des méandres et autres îlots – autant d'habitats essentiels à la reproduction de nombreuses espèces.

Ces différents travaux hydrauliques ont provoqué une forte diminution de la diversité des habitats et donc de la faune ichtyologique: dominant alors les espèces les plus ubiquistes, comme le gardon (*Rutilus rutilus*), et disparaissent les plus exigeantes, comme la truite (*Salmo trutta*).

SURPÊCHE, ESPÈCES ENVAHISSANTES

Bien que la surpêche soit généralement évoquée pour les poissons marins, ce problème se pose aussi pour certaines espèces d'eau douce, notamment les migrateurs amphihalins exploités commercialement. Ainsi, l'esturgeon européen a subi au début du xix^e siècle une pression de pêche telle que les populations n'ont pas pu se renouveler et se sont effondrées. De même, l'anguille et ses jeunes stades (civelles et anguillettes) ont fait l'objet d'une exploitation commerciale considérable, et les captures ont diminué de plus de 90% entre les années 1960-1970 et aujourd'hui. Autre exemple: d'après les suivis de l'association Migrateurs Garonne Dordogne, pour la population la plus importante de grande alose, celle de la Garonne, on est passé de plus de 200 000 captures annuelles au début des années 2000 à quelques milliers seulement depuis 2008.

Bien que la surpêche puisse être un facteur majeur du déclin de certaines espèces, elle n'est rarement la seule et unique cause. Parmi les principaux facteurs de l'érosion de la biodiversité figurent les espèces exotiques qui deviennent envahissantes, et à cet égard les poissons ne font pas exception. De nombreuses espèces ont été introduites, volontairement ou



non et pour différentes raisons. La première est probablement la carpe (*Cyprinus carpio*), dès l'époque romaine, pour la consommation humaine. Aujourd'hui, ce sont plus de 50 espèces de poissons qui ont été introduites volontairement (pêche récréative, aquaculture) ou non (transfert *via* les canaux de navigation...) ; certaines ne s'étant jamais acclimatées, d'autres étant devenues envahissantes.

Parmi ces dernières, on peut citer le gobie à tache noire (*Neogobius melanostomus*) qui pullule dans le Rhin (plus de 90% des poissons capturés, sur certains sites) et qui a commencé à coloniser d'autres bassins. Son arrivée en France en 2011 s'est faite *via* le canal Rhin-Main-Danube qui connecte le bassin du Danube à celui du Rhin, des bassins qui étaient isolés depuis plus de 10000 ans.

Peut-être plus que l'introduction de poissons envahissants, le danger vient des pathogènes qu'ils transportent et auxquels notre ichthyofaune n'est pas adaptée. Ainsi, le pseudorasbora ou goujon asiatique (*Pseudorasbora parva*), apparu à la fin des années 1970 en France et qui a envahi l'aval des cours d'eau et les plans d'eau de nombreux bassins, est porteur sain d'un parasite unicellulaire, l'agent rosette (*Sphaerothecum destruens*), qui est susceptible de causer d'importantes mortalités chez d'autres espèces, dont les salmonidés. Un autre exemple est l'arrivée du ver *Anguillicola crassus* avec l'introduction d'anguilles japonaises au début des années 1980 et qui parasite désormais les anguilles européennes.

Difficile de finir ce tour d'horizon sans évoquer le changement climatique. En France, selon les bassins, on observe depuis vingt ou trente ans une hausse de la température moyenne annuelle de l'eau comprise entre 1 et

Le gobie à tache noire (*Neogobius melanostomus*) est une espèce envahissante originaire des zones côtières des mers Noire, d'Azov et Caspienne, ainsi que de plusieurs fleuves de ces régions. Arrivé en France en 2011, ce poisson pullule dans le Rhin et a commencé à coloniser d'autres bassins.

2 °C, ainsi qu'une augmentation de la sévérité et de la durée des étiages estivaux, notamment dans le Sud. L'effet se fait déjà ressentir. Par exemple, dans sa thèse de doctorat soutenue à l'université Toulouse 3 en 2013, Lise Comte indique que la truite a perdu près de 10% de linéaire de cours d'eau favorable entre les années 1980 et le début des années 2000, tandis que le chevesne (*Squalius cephalus*), plus thermophile et ubiquiste, en a gagné 5%.

RÉCHAUFFEMENT DES EAUX

L'analyse des pêches réalisée par EDF dans le cadre des suivis des centrales nucléaires montre que, sur l'aval de grands cours d'eau, le réchauffement a entraîné une augmentation du nombre d'espèces thermophiles, une augmentation de la densité totale et un rajeunissement des communautés (c'est-à-dire une augmentation de la proportion d'espèces de petite taille et de jeunes) ; en résumé, davantage d'individus, plus petits, et d'espèces méridionales. Selon les projections climatiques, on peut s'attendre à ce que ces changements continuent, voire s'emballent, avec notamment une forte régression des espèces d'eau froide comme les salmonidés (truite, omble chevalier) et une modification profonde des communautés, notamment dans les zones en amont et intermédiaires des cours d'eau : peut-être plus d'espèces, mais différentes de celles que l'on trouve aujourd'hui et finalement plus communes.

L'introduction d'espèces exotiques est l'une des principales causes de l'érosion de la biodiversité

Il reste malgré tout difficile de distinguer les effets du changement climatique de celui des pressions anthropiques plus locales énumérées plus haut. De façon générale, les diverses pressions sur le milieu se renforcent mutuellement. Ainsi, un cours d'eau dont la morphologie est perturbée par un recalibrage verra sa capacité d'autoépuration diminuer. Une retenue sur un cours d'eau entraîne, à

l'amont, une augmentation de la température et une concentration des nutriments, ce qui favorise l'eutrophisation. Un obstacle plus grand, un barrage par exemple, va aussi retenir les sédiments produits par le bassin versant à l'amont. Les modifications d'écoulement provoquées par les seuils, barrages, endiguements, etc. affaiblissent les populations natives et favorisent l'implantation d'espèces exotiques, d'où une pression accrue sur ces espèces natives (l'effet du silure *Silurus glanis* sur les migrateurs amphihalins en est un exemple). Le changement climatique diminue la ressource en eau et renforce ainsi les besoins d'irrigation, ce qui se matérialise par la construction de retenues de stockage, qui augmenteront à leur tour le déficit en eau des cours d'eau...

AGIR SUR L'EAU ET SON ÉCOULEMENT

Existe-t-il des solutions techniques pour inverser la tendance et améliorer la situation ? De gros investissements ont été réalisés depuis les années 1990 dans la collecte, le transport et le traitement des eaux usées. Parallèlement, des dispositifs incitatifs ou réglementaires (par exemple la directive « nitrates » de 1991) ont aussi été mis en place. Cela aura permis de diminuer sensiblement la concentration en nutriments, surtout les phosphates, dans les eaux de surface et ainsi de réduire l'eutrophisation et les épisodes d'hypoxie, donc de mortalités massives.

Il reste néanmoins de nombreux défis à relever avec, notamment, le traitement des micropolluants qui reste encore coûteux et non réglementaire. Par ailleurs, de nombreuses substances sont stockées dans les sédiments et ne sont pas traitables en l'état.

De même, il est difficile aujourd'hui de réduire les polluants diffus d'origine agricole ; c'est pourquoi la réglementation impose le maintien d'une zone non traitée autour des points d'eau et des zones tampons entre les parcelles cultivées et les cours d'eau, en l'occurrence des bandes enherbées. La végétation freine la ruissellement, favorise l'infiltration des eaux et optimise la biodégradation des contaminants dans le sol. Elle retient aussi les matières en suspension et atténue le colmatage de substrat du cours d'eau. Au-delà des bandes enherbées, il est nécessaire de maintenir en état les rives boisées et plus encore les forêts alluviales et les zones humides attenantes aux cours d'eau (bras morts, tourbières...), véritables stations de traitement naturelles efficaces et peu coûteuses. Bien évidemment, ces mesures doivent s'accompagner d'incitations destinées à réduire à la source les émissions de polluants.

Ces mêmes zones humides constituent aussi des solutions naturelles pour le maintien d'un régime hydrologique qui atténue les



Les ouvrages hydrauliques modifient et fragmentent les écosystèmes des cours d'eau. Ils sont l'un des principaux facteurs du déclin des populations de poissons d'eau douce. L'un des moyens d'atténuer leurs impacts est la mise en place de passes à poissons (ici sur la Vienne, à Confolens, en Nouvelle-Aquitaine) qui permettent à ces derniers de franchir l'obstacle artificiel.

crues et limite la sévérité des étiages. La restauration des processus d'échanges entre le milieu aquatique et le milieu terrestre peut passer par des actions visant à redessiner et refaçonner le cours d'eau tel qu'il était avant les travaux de recalibrage ou de curage. Ces actions permettent de retrouver une diversité de faciès d'écoulement et d'habitats, qui s'accompagne généralement du retour des espèces plus sensibles et une diminution des espèces ubiquistes.

Un programme ambitieux de restauration hydraulique et écologique du Rhône, entamé dans les années 2000, avait pour objectif d'augmenter les débits dans les tronçons court-circuités par les aménagements hydroélectriques et de réhabiliter des annexes fluviales qui avaient été déconnectées lors des aménagements hydroélectriques du XIX^e siècle. Bien que les résultats d'un tel projet doivent s'apprécier à une échelle de plusieurs décennies, sur certains sites, la proportion des espèces évoluant préférentiellement dans des habitats profonds et courants (barbeau *Barbus barbus*, hotu ou nase *Chondrostoma nasus*, ombre *Thymallus thymallus*, toxostome et vandoise commune *Leuciscus leuciscus*) a doublé, voire triplé, en moins de quinze ans.

Une action de restauration généralement efficace pour les poissons est la suppression d'obstacles tels que les seuils et les barrages, dans la mesure où elle rétablit la libre circulation des poissons (et des sédiments dans le cas des grands barrages) et réhabilite l'habitat sur les



À LIRE

L'ouvrage **Les Poissons d'eau douce de France** (Biotope/MNHN, 2020), coordonné par Philippe Keith, Nicolas Poulet, Gaël Denys, Thomas Changeux, Éric Feunteun et Henri Persat, synthétise et met à jour les connaissances taxonomiques et écologiques sur la faune ichthyologique métropolitaine.



plans à la fois physique, chimique et thermique. Par exemple, l'élimination en 1998 du barrage de Maisons-Rouges sur la Vienne, haut de 4 mètres, a permis dès 1999 la recolonisation des frayères de grande alose situées en amont de l'ancien barrage, le retour de la lamproie marine et du saumon. Même la suppression d'obstacles plus modestes montre des résultats positifs. Ainsi, l'effacement en 2018 du seuil de Larive sur le Célé, dans le Lot, a permis le retour l'année suivante de cinq espèces patrimoniales (chabot, lamproie de Planer, toxostome, truite et vandoise rostrée).

Lorsque l'arasement de l'obstacle est impossible pour une raison ou une autre, on peut envisager la construction de passes à poissons qui visent à «fragmenter» la hauteur de la chute et à dissiper l'énergie hydraulique de façon que les poissons puissent franchir l'obstacle. Cela nécessite cependant un savoir-faire technique pointu pour la conception, la construction, la gestion et l'entretien. Dans la même logique, il existe des aménagements permettant de diminuer la mortalité des poissons dans les turbines hydroélectriques lors de leur migration vers l'aval.

REPEUPLEMENTS

Parfois, l'espèce cible est absente ou en effectifs trop faibles pour permettre une recolonisation naturelle des habitats restaurés. Pour y remédier, on peut introduire des individus, généralement des juvéniles, qui s'adaptent mieux à leur nouvel environnement que les

adultes. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre du plan national d'action (PNA) en faveur de l'apron du Rhône, avec plus de 26000 larves relâchées dans la Drôme entre 2008 et 2017. De même, dans le cadre du PNA esturgeon européen, environ 1,3 million de larves et 450000 juvéniles issus de reproductions assistées ont été relâchés entre 2007 et 2015 sur les zones de frayères de Garonne et de Dordogne.

Cependant, la reproduction artificielle n'est pas toujours simple. Dans le cas de l'anguille européenne, c'est parfois impossible, les chercheurs ne parvenant pas à nourrir les larves dites «leptocéphales»; les opérations de repeuplement prévues dans le cadre du plan de gestion européen se font alors à partir de civelles achetées à des pêcheurs professionnels (60% des captures) et relâchées en amont de différents bassins. Dans le cas de l'apron, la maîtrise de la reproduction aura nécessité plus de dix ans d'efforts de l'aquarium de la citadelle de Besançon.

Et même lorsque la reproduction artificielle est maîtrisée, comme dans le cas du saumon atlantique, demeurent des questions complexes comme le maintien de la diversité génétique et l'évitement des effets négatifs de la domestication («maladaptation» au milieu naturel). Pour contourner le problème, le recours aux géniteurs sauvages pour la reproduction artificielle est possible, mais se pose alors la question du nombre de poissons à extraire du milieu sans mettre à mal la reproduction naturelle.

De façon générale, les mesures consistant à lâcher du poisson ou à ne pas en prélever (interdiction de pêche, adaptation des périodes d'ouverture de la pêche, quotas...) suffisent rarement au rétablissement des espèces concernées. Si les conditions environnementales (température, débit, habitat...) ne sont pas adaptées, la population finira par s'éteindre. Or, selon le rapportage de 2016 de la DCE, seulement 44,8% des masses d'eau en métropole sont considérées en bon ou très bon état écologique. De très gros efforts de restauration des milieux restent donc à fournir.

Encore faut-il savoir quels sont les facteurs limitants dans la conservation de chaque espèce afin de mettre en œuvre des mesures de restauration adaptées. C'est pourquoi une meilleure compréhension de la biologie et de l'écologie des espèces est indispensable. Reste que les connaissances ainsi que les moyens techniques et financiers nécessaires aux chantiers de restauration sont longs et complexes à acquérir. Afin de laisser une chance aux populations les plus fragiles, dans un contexte climatique qui devient de moins en moins favorable, l'urgence est donc d'adopter une stratégie de non-dégradation des écosystèmes. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Basitico et al., **Quand les rivières reprennent leur cours - Notes sur l'effacement de barrages et de seuils, sur la Sélune et ailleurs**, Office français de la biodiversité, 2021.

P. Keith et al. (coord.), **Les Poissons d'eau douce de France**, 2^e édition, Biotope/MNHN, 2020.

La Liste rouge des espèces menacées en France - Chapitre Poissons d'eau douce de France métropolitaine, UICN Comité français, MNHN, SFI & AFB, 2019 (<https://bit.ly/3DhYDnT>).

F. Baptist et al., **Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : état des lieux et pistes pour l'adaptation**, Onema, 2014.

L'ESSENTIEL

> Dans le sultanat d'Oman, la tectonique a charrié en surface un morceau de manteau terrestre, ce qui a produit toute une chaîne de montagnes.

> Le magnésium et le calcium contenus dans les roches mantelliques constituant ces montagnes réagissent avec le dioxyde de carbone dissous

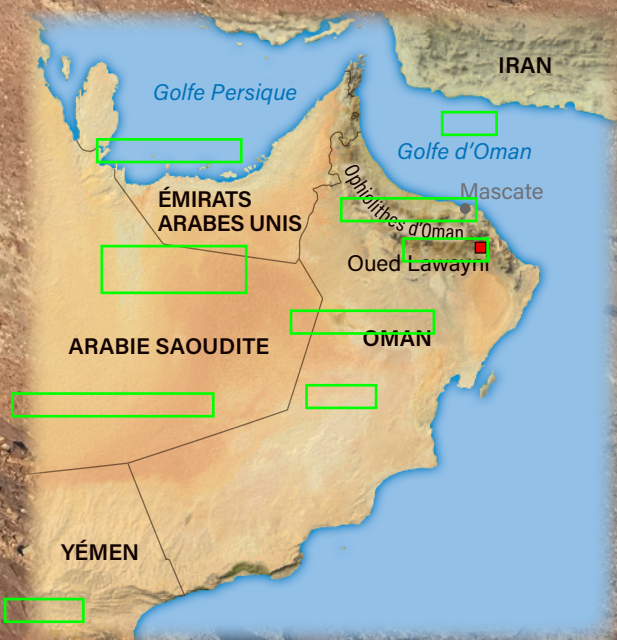
dans les eaux de ruissellement, ce qui forme des carbonates.

> Cette minéralisation du dioxyde de carbone atmosphérique pourrait être industrialisée afin de se rapprocher des objectifs de réduction du réchauffement climatique en retirant de l'atmosphère des milliards de tonnes de carbone par an.

L'AUTEUR



DOUGLAS FOX
journaliste scientifique basé en Californie, spécialisé en science du climat, géologie et biologie



Séquestration du CO₂ La piste d'Oman

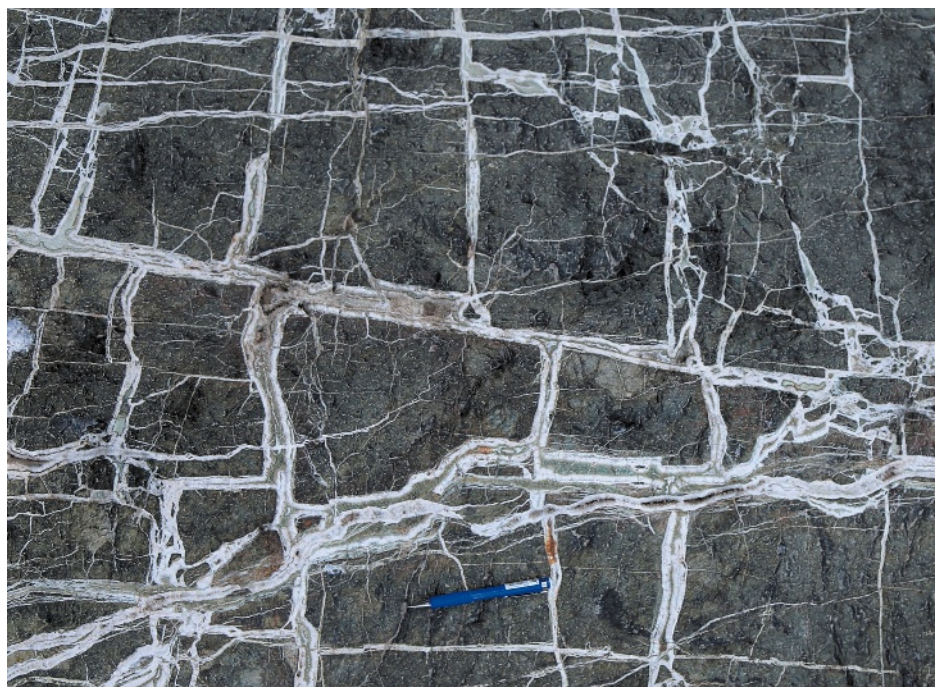
Depuis trente ans, le géologue Peter Kelemen arpente les monts Hajar du sultanat d'Oman, pour y étudier les ophiolites, un type de formation rocheuse qui capte et stocke naturellement du dioxyde de carbone. Son espoir aujourd'hui ? Intensifier le processus pour lutter contre le réchauffement climatique.

À Oman, le transport en surface d'une partie du manteau terrestre est à l'origine d'un immense massif montagneux. Les roches qui le constituent pétrifient naturellement le dioxyde de carbone atmosphérique.

Au nord-est d'Oman, dans les monts Hajar, l'oued Lawayni a creusé une vallée, uniquement accessible par un mauvais chemin de terre, se réduisant souvent à des traces de pneus. De place en place, des sources forment de petits bassins bleutés, saturés d'alcalins et si chargés en hydrogène qu'ils pétillent comme du champagne.

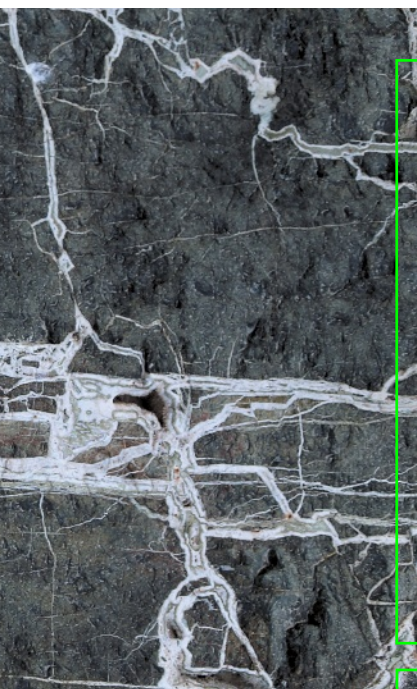
Des sommets érodés dominent de quelques centaines de mètres cette vallée parsemée d'épineux. La roche brun délavé qui les constitue est une anomalie minérale: instable chimiquement, elle subit, au contact de l'air, une décomposition géochimique gazeuse. Si cette roche est particulière, c'est parce que – rareté à la surface de la Terre – elle s'est formée à quelque 200 kilomètres de profondeur à l'intérieur du manteau terrestre, la strate de quelque 2900 kilomètres d'épaisseur intercalée entre l'écorce terrestre et le noyau métallique de notre planète. Jamais l'humanité n'a pu observer directement le manteau, mais il est arrivé de temps en temps au cours des temps géologiques que des accidents tectoniques charrient des portions entières de croûte océanique accompagnées de leur manteau sous-jacent, formant ce que les géologues nomment une « ophiolite ». Celle d'Oman date d'environ 80 millions d'années. Les géologues la considèrent comme la plus spectaculaire du monde. De fait, elle est à l'origine des monts Hajar, qui s'étendent sur 475 kilomètres!

Peter Kelemen, de l'observatoire de la Terre Lamont-Doherty, de l'université Columbia, à New York, pense que l'humanité pourrait exploiter les ophiolites pour modérer le réchauffement climatique. C'est dans l'oued Lawayni qu'un après-midi de janvier 2018 ce géologue de 65 ans, aux cheveux gris et à la peau tannée, m'a exposé sa vision. Nous avons placé nos chaises à l'ombre mitée d'un acacia, où séchaient des crottins de chameau. À quelque 100 mètres, sous un auvent, se trouvaient sur une table les flacons de produits chimiques et l'analyseur d'échantillons minéraux de son laboratoire de campagne. Peter Kelemen désigna la roche située derrière nous et m'expliqua que la pluie, en s'infiltrant à travers ce bloc de roche mantellique – de la péridotite –, y introduit de l'oxygène et du dioxyde de carbone atmosphériques. Ces gaz et l'eau qui les dissout réagissent avec la roche, produisant de multiples veines minérales qui s'enfoncent dans la masse rocheuse comme des racines. Certaines mesurent plusieurs centimètres de large. Peter Kelemen m'en a montré une de 1 centimètre de diamètre, composée de carbonate de magnésium: « Ça, c'est environ 50% de CO₂ », a-t-il dit. Tout en l'écoulant, je frappais un bloc avec un caillou, et entendis un bruit de verre.



Les géologues estiment que les ophiolites d'Oman absorbent et pétrifient naturellement de l'ordre de 100000 tonnes de CO₂ chaque année, soit environ 1 gramme de gaz à effet de serre par mètre cube de roche. Si par des moyens techniques appropriés, « on parvenait à multiplier ce chiffre par 1 million, lance Peter Kelemen, 1 milliard de tonnes de CO₂ par kilomètre cube de roche seraient fixées chaque année. » Or le sultanat d'Oman contient 15000 kilomètres cubes de roches mantelliques...

Environ 150 affleurements similaires à celui d'Oman existent de par le monde, dont certains importants en Alaska, au Canada, en Californie, en Nouvelle-Zélande, en Nouvelle-Calédonie, au Japon et ailleurs. Selon Peter Kelemen, ces masses rocheuses, y compris celles d'Oman, pourraient fixer de 60000 à 600000 milliards de tonnes de CO₂, soit de 25 à 250 fois la masse ajoutée par l'humanité à l'atmosphère depuis les débuts de l'ère industrielle, ce qui aurait un énorme impact sur le climat. Rappelons que dans son rapport de 2019, le Giec – le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – a conclu que l'élévation de la température moyenne de planète ne pourrait être limitée à 1,5°C – un niveau permettant d'éviter la plupart des conséquences catastrophiques du réchauffement climatique – que si l'humanité trouvait le moyen de retirer entre 100 et 1000 gigatonnes de CO₂ de l'atmosphère d'ici à 2100. Si ce travail d'extraction du CO₂ atmosphérique commençait d'ici à 2050, cela signifierait qu'il faudrait retirer de l'atmosphère chaque année entre 2 et 20 gigatonnes (10⁹ tonnes) de dioxyde de carbone.



Très présente dans les roches mantelliques, la péridotite foncée réagit avec le dioxyde de carbone atmosphérique dissous dans l'eau de pluie qui s'infiltre à travers les fissures, formant des veines blanches de carbonates.

Pour que cette vision se concrétise, il faudra que l'humanité se dote d'une vaste infrastructure mondiale de machines à extraire le dioxyde de carbone de l'air pour l'injecter dans des puits forés dans la roche mantellique. L'émergence éventuelle de l'industrie le permettant va dépendre des résultats des recherches menées à Oman. En 2018, alors que Peter Kelemen et moi nous entretenions sous l'acacia, une pelleteuse travaillait à préparer le forage prochain du fond de l'oued Lawayni, dans le but d'étudier les réactions chimiques qui se produisent dans les 400 premiers mètres du terrain. Publiée en 2019 et 2020, l'étude des carottes prélevées donne des pistes quant à la façon dont on pourrait intensifier les réactions de la roche avec le dioxyde de carbone. En mai de cette année, une équipe a mené dans l'oued Lawayni le premier essai de minéralisation du CO₂ dans la profondeur de la roche mantellique omanaise.

LE CAPTAGE DU CO₂, EN QUESTION

Les efforts de Peter Kelemen s'inscrivent dans la vaste mouvance travaillant à créer des « émissions négatives de carbone », c'est-à-dire des retraits de l'atmosphère de quantités notables de dioxyde de carbone afin d'influencer l'évolution climatique. Les chercheurs proposent diverses méthodes : planter des forêts ou fertiliser les océans pour augmenter la croissance consommatrice de CO₂ des arbres ou du phytoplancton ; gérer les cultures afin de garder dans le sol la plus grande partie possible du CO₂ absorbé au cours de la croissance des plantes ; poser des dispositifs de captage du carbone pour retenir le CO₂ passant par les cheminées des centrales électriques ou des usines ; ou encore installer partout sur la planète de centaines de milliers de machines de « captage direct » du CO₂ de l'atmosphère et capables de l'injecter dans le sol nuit et jour.

Le dioxyde de carbone ainsi capté devrait toutefois être séquestré de façon permanente.

Quelques projets sont en cours de test. Ainsi, dans le champ de gaz de Sleipner, au large de la Norvège, le CO₂ naturellement mêlé au gaz naturel est réinjecté à 1 kilomètre sous le plancher océanique, dans le réservoir fait de roches sédimentaires gréseuses. Lancé en 1996, le projet stocke 1 million de tonnes de dioxyde de carbone par an environ, mais avec un inconvénient : comme ce gaz réagit à peine avec les roches sédimentaires, il ne se minéralise pas, mais s'infiltre seulement dans les pores de la roche, de sorte que certains chercheurs craignent qu'il ne finisse par rejoindre l'atmosphère.

Peter Kelemen a passé les années 1990 à poursuivre une autre idée : campant pendant des semaines dans les oueds reculés d'Oman, il y a cartographié les conduits qui transportèrent du magma depuis les profondeurs du manteau vers la surface, où, se solidifiant, il a donné du basalte, cette roche dure, dense et foncée qui forme la plus grande partie de la croûte océanique. Puis en 2004, lorsqu'il est passé de l'institut océanographique de Woods Hole (Woods Hole Oceanographic Institution) à l'observatoire de la Terre Lamont-Doherty, il y a rencontré le géophysicien Klaus Lackner – aujourd'hui directeur du Centre pour les émissions négatives de carbone (Center for Negative Carbon Emissions) de l'université d'État de l'Arizona – et Juerg Matter, alors postdoctorant. Klaus Lackner et Juerg Matter cherchaient à savoir si du CO₂ pouvait être injecté dans des roches riches en magnésium et en calcium, qui, plus réactives que les roches sédimentaires, transformeraient facilement le gaz en minéraux solides – un processus nommé « carbonatation minérale ».

Les roches mantelliques d'Oman – riches en péridotites – contiennent en grande proportion deux minéraux – l'olivine et le pyroxène – très riches en magnésium et calcium. Comme ces roches sont traversées par des veines de carbonate, il est clair qu'elles ont absorbé du CO₂ dans le passé. La plupart des chercheurs avaient toutefois supposé que cette production de carbonates à partir du CO₂ avait duré des millions d'années. Pour sa part, Peter Kelemen n'avait jamais réfléchi à l'élimination du carbone, mais il était sceptique quant à la lenteur des réactions : lorsqu'il travaillait à Oman, il passait souvent dans la vallée Khafifah devant une source alcaline, où l'eau jaillissante était si saturée en calcium qu'elle réagissait continuellement avec le CO₂ atmosphérique pour donner une couche de calcite. Il avait remarqué que lorsque le vent ou la pluie brisait cette couche de calcite lisse et nacrée, fine comme du papier, elle était remplacée en 24 heures. « En géologie, tout processus se produisant en un jour est ultrarapide », soulignait-il.

En théorie, les ophiolites du monde entier pourraient fixer de 60 à 600 gigatonnes de CO₂



La rapidité de cette formation de calcite en surface amena Peter Kelemen à se demander si les veines de carbonates ne se formaient pas bien plus vite dans la roche que ce que l'on pensait. Lorsqu'ils retournèrent à Oman en 2007, lui et ses étudiants recueillirent des fragments de ces veines afin de les dater en laboratoire. «Je m'attendais à des âges de l'ordre de 90 millions d'années, explique Peter Kelemen, mais elles avaient toutes moins de 50000 ans.» Certaines n'avaient que 6000 ans. Les roches du manteau d'Oman ne s'étaient pas contentées d'absorber du CO₂, dans un passé lointain; elles le faisaient encore aujourd'hui, peut-être 10000 fois plus vite que Peter Kelemen ne l'avait imaginé.

En 2008, lors d'une autre mission, Peter Kelemen et Juerg Matter estimèrent que près de la surface, les carbonates représentaient environ 1% du volume rocheux, ce qui impliquait que la région entière minéralise entre 50000 à 100000 tonnes de CO₂ par an, soit l'équivalent des émissions annuelles de 10000 à 20000 automobiles américaines. Cette quantité n'a aucun effet sur le changement climatique, mais le résultat de leur calcul les amena à se demander s'il serait possible d'accélérer assez la carbonatation pour faire une différence à l'échelle planétaire.

Au cours des quatre années suivantes, les deux chercheurs retournèrent donc plusieurs fois à Oman, prélevant des échantillons d'eau profonde afin de suivre les réactions chimiques s'y produisant. Les résultats montrèrent que le dioxyde de carbone dissous dans l'eau de pluie s'infiltre dans le sol, réagit avec la péridotite dans les aquifères peu profonds, ce qui donne des eaux riches en ions Mg²⁺ et HCO₃⁻, produisant des carbonates de magnésium. En

conséquence, des veines de carbonate de magnésium se forment. Dans le même temps, le calcium de la péridotite se dissout et s'accumule dans l'eau. Puis cette eau enrichie en calcium finit par réapparaître dans les sources alcalines comme celle de Khafifah, où elle réagit alors avec le CO₂ atmosphérique, formant les films de calcite notés par Peter Kelemen, ainsi que les vastes terrasses de travertin (calcaire de source chaude) qui existent dans tout le sultanat.

À ce stade, Peter Kelemen et Juerg Matter ignoraient encore dans quelle mesure les humains pourraient accélérer ce processus de carbonatation. Tout dépendrait de la profondeur et de la vitesse d'écoulement de l'eau, mais pour répondre à cette question, il fallait étudier le sous-sol.

L'EAU DES PROFONDEURS

Par une chaude après-midi de janvier 2018, j'observais Peter Kelemen et Juerg Matter en train d'examiner l'intérieur des roches de l'oued Lawayni. Huit dromadaires mâchouillaient des arbustes sans prêter la moindre attention au grondement de la foreuse montée à l'arrière d'un bulldozer en train de creuser le sol dans le fond de la vallée. Un câble avait déjà hissé 9 mètres de carotte hors du trou. Longs de quelques mètres pour environ 5 centimètres de largeur, les morceaux de carotte étaient disposés en ordre sur des tables pliantes sous les regards d'une demi-douzaine de chercheurs. «Beaucoup de choses se passent dans les premiers mètres», résuma Peter Kelemen en se déplaçant de table en table. Effectivement la couleur de la roche changeait de façon notable, même lorsque les différences de profondeur étaient relativement faibles.

Une foreuse perce lentement la roche mantellique (à gauche) afin d'obtenir des carottes de forage cylindriques. Les chercheurs les disposent de façon à reconstituer la colonne de roche (à droite), ce qui met en évidence la profondeur à laquelle l'eau pénètre et quelles quantités de dioxyde de carbone sont minéralisées.



Les roches mantelliques profondes sont vert foncé en raison de la présence d'olivine et de pyroxène, des minéraux riches en magnésium et en calcium formés en profondeur à plus de 1300 °C en l'absence totale d'oxygène, d'eau et de dioxyde de carbone. Une fois remontées en surface, ces roches dévoilent les réactions chimiques subies le long du parcours, ce qui explique que les premiers mètres de carotte étaient teintés de jaune et d'orange: l'oxygène transporté par l'eau de pluie s'y était lié au fer des minéraux, produisant une couleur rouille. Ces tons disparaissaient au-delà de quelques mètres, traduisant l'épuisement de l'oxygène apporté par l'eau. Au-delà de cette profondeur, la roche grise était parcourue d'innombrables fines veines de serpentine, un minéral turquoise qui se forme lorsque les molécules d'eau se fixent aux atomes de magnésium et de fer, produisant l'hydrogène qui fait pétiller les sources.

Sur ce fond, des veines blanches de carbonate s'entrecroisaient. Près de la surface, elles mesuraient quelques centimètres de large, mais à 10 mètres de profondeur, elles devenaient rares et fines, ce qui montre qu'en s'infiltrant de plus en plus profond, l'eau avait perdu son dioxyde de carbone.

Alors que se poursuivait le forage, et tandis que les ouvriers emballaient les carottes les unes après les autres, il s'avéra que les roches provenant de 400 mètres de profondeur étaient encore veinées de serpentine, ce qui confirmait que l'eau avait percolé au moins à cette profondeur. Des analyses se sont poursuivies en laboratoire au cours des trois années qui suivirent, afin de déterminer à quelle vitesse les roches réagissent avec le CO₂ et l'eau. En 2020, Juerg Matter, devenu entre-temps professeur de

géo-ingénierie à l'université de Southampton, en Angleterre, m'a expliqué avoir été frappé par un fait: «Au-delà de 100 mètres de profondeur, on ne trouve plus aucun minéral carbonaté.» Conclusion: le dioxyde de carbone ne pénètre pas plus profondément dans les roches.

Les recherches récemment publiées par l'équipe suggèrent pourquoi: dans un article de 2019, Peter Kelemen, Juerg Matter et Amelia Paukert Vankeuren, alors tous à l'université d'État de Californie à Sacramento, estiment que l'eau souterraine d'origine pluviale des 50 mètres supérieurs de roche se trouve là depuis 4 à 40 ans. L'eau plus profonde, pour sa part, est sous terre depuis au moins 20000 ans. Dans un article publié en 2020, Juerg Matter et Gérard Lods, de l'université de Montpellier, publient leur mesure de la vitesse de déplacement de l'eau dans la roche réalisée en injectant de l'eau dans des forages distants de 15 mètres: il en ressort que l'eau circule facilement d'un trou à l'autre dans les 100 premiers mètres, mais qu'au-delà la perméabilité des roches s'effondre d'un facteur 1000.

L'ensemble de ces observations montre que le taux de carbonatation minérale à Oman est limité par un goulot d'étranglement majeur: l'eau de pluie ne va tout simplement pas plus loin qu'une centaine de mètres, alors que les roches mantelliques omanaises ont une épaisseur moyenne de 3 kilomètres... «Il existe donc un énorme potentiel de carbonatation en profondeur», en déduit Juerg Matter, pourvu que de l'eau chargée en CO₂ puisse d'une manière ou d'une autre pénétrer dans les roches profondes et y circuler rapidement.

Pour surmonter cette difficulté, l'idée serait que des machines de captage direct dotées de grands ventilateurs fasse passer de l'air à travers des absorbants chimiques afin de retirer et de concentrer le dioxyde de carbone atmosphérique; puis d'autres équipements pressuriseraient le gaz et l'enverraient dans un puits de forage. À une profondeur de 1000 à 3000 mètres, le gaz serait mélangé à de l'eau (injectée par un tuyau séparé), et le mélange riche en CO₂ libéré dans les roches mantelliques. S'infiltrant à travers les pores de la roche, l'eau finirait par atteindre un deuxième forage situé à environ 1 kilomètre, et qui ferait office de cheminée de retour. Là, appauvrie en CO₂ elle remonterait à la surface, où elle pourrait se recharger en gaz.

Comme la température de la roche à 3 kilomètres de profondeur est d'environ 100 °C, cela devrait favoriser les réactions chimiques qui, à leur tour, engendreront de la chaleur supplémentaire, qui contribuera à faire remonter l'eau réchauffée dans les cheminées.

En 2020, Peter Kelemen et Amelia Paukert Vankeuren ont publié des calculs suggérant qu'injecter de l'eau modérément chargée en dioxyde de carbone jusqu'à 3 kilomètres de

profondeur multiplierait la minéralisation par un facteur pouvant atteindre 5000. À ce rythme, un seul forage pourrait fixer 50000 tonnes de CO₂ par an à partir d'une surface équivalente à celle de 9 terrains de football. En dix ans, un tel puits pourrait capter 1 demi-million de tonnes de CO₂. Pour le moment, aucun essai n'a été tenté, mais un projet mené avec succès en Islande dans le basalte, une roche proche des ophiolites d'Oman, a préparé le terrain pour les Omanais.

LE FACTEUR DU « FRACKING »

Dense et plein de petits pores, le basalte gris-noir que l'on rencontre en Islande contient moins de magnésium et de calcium que sa roche mère située loin en profondeur, mais davantage que la plupart des autres roches à la surface de la Terre. Wallace Broecker, de l'observatoire de la Terre Lamont-Doherty (disparu en 2019), Pascale Bénézech et Eric Oelkers, du laboratoire Géosciences environnement de l'université de Toulouse, et d'autres chercheurs, de l'université de Reykjavik, ont aidé la société Reykjavik Energy à lancer CarbFix, un essai d'injection de CO₂ dans le basalte installé sur le périmètre de la centrale géothermique islandaise de Hellisheiði. À partir de 2012, des machines ont séparé le CO₂ et le sulfure d'hydrogène (H₂S) se trouvant dans l'eau chaude qui alimente la centrale, les ont concentrés dans de l'eau ensuite injectée dans des puits de 400 à 800 mètres de profondeur forés dans le basalte. En huit mois, les ingénieurs ont injecté 230 tonnes de dioxyde de carbone. L'étude de puits voisins a montré qu'en deux ans, 95% du dioxyde de carbone s'est fixé sous la forme de minéraux carbonatés. Le projet fonctionne depuis lors et fixe environ 10000 tonnes de CO₂ par an. En 2020, CarbFix est devenu une société indépendante dont l'objectif est de séquestrer 1 milliard de tonnes de CO₂ dans le basalte d'ici à 2030.

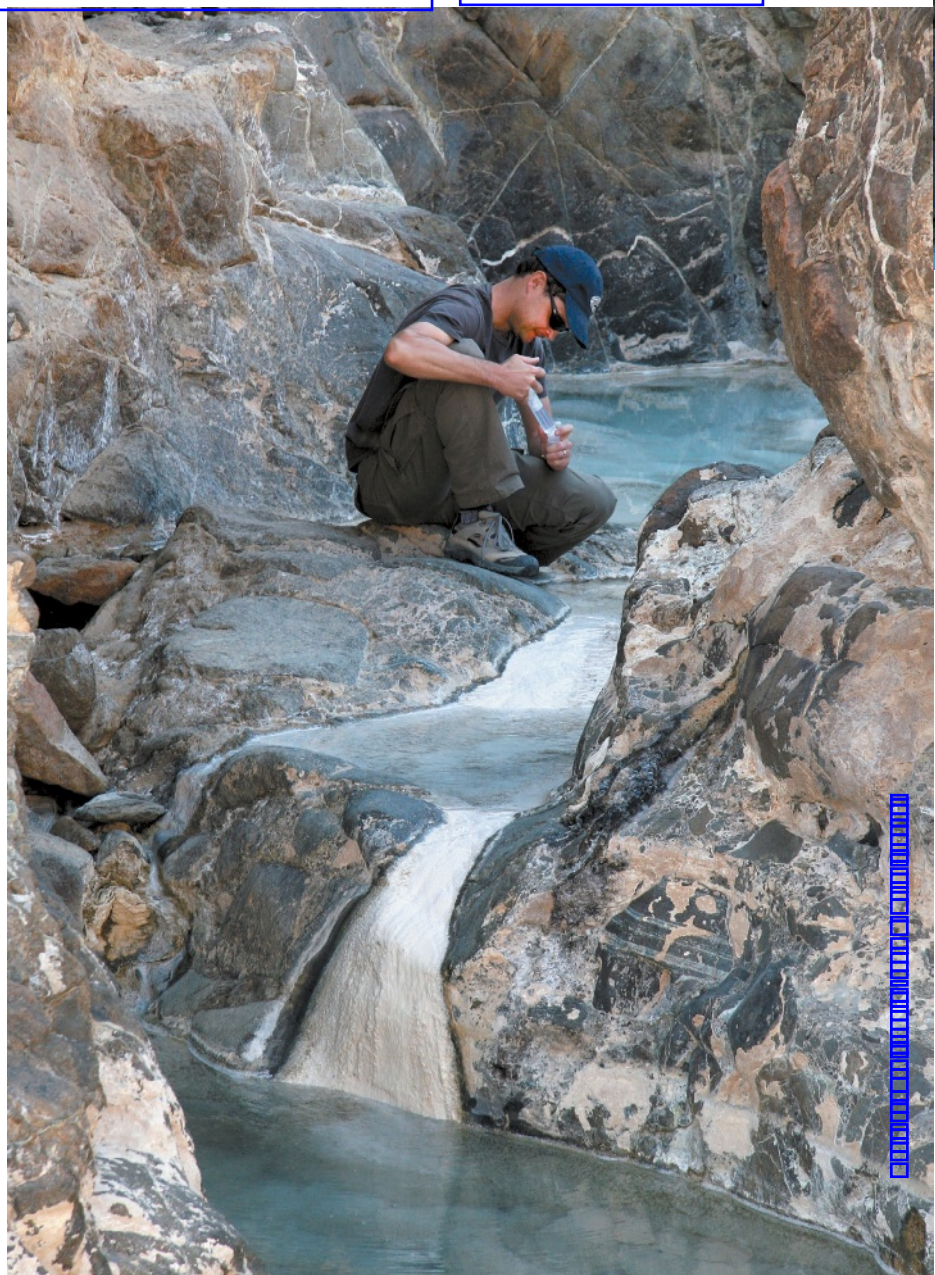
Juerg Matter, qui a codirigé les essais, considère ses résultats comme une validation majeure. Au début, dit-il, «la communauté du captage du carbone nous prenait pour des fous», car elle croyait les basaltes trop peu poreux pour permettre la circulation de l'eau. Depuis, une autre équipe du PNNL (Pacific Northwest National Laboratory), à Richland, dans l'État de Washington, a confirmé la possibilité de séquestrer du dioxyde de carbone dans les basaltes grâce à un projet pilote (*Wallula basalt sequestration pilot project*). Mais comme les roches mantelliques contiennent trois fois plus de magnésium et de calcium, elles pourraient solidifier bien plus de dioxyde de carbone: 500 kilogrammes par tonne contre 170 kilogrammes par tonne de basalte.

Toutefois, tout le monde ne pense pas que les ophiolites, ou même les basaltes, constituent la solution idéale. Ainsi Christopher Zahasky, un hydrogéologue à l'université du

Wisconsin-Madison, promeut plutôt le stockage de CO₂ dans les roches sédimentaires. Pour lui, le principal inconvénient des ophiolites est d'avoir beaucoup moins de pores que les roches sédimentaires. «Il faudra plus de puits pour répartir uniformément les fluides dans le sous-sol», souligne-t-il. Peter Kelemen s'est penché sur ce problème pendant des années, et, selon lui, il existe une solution: si l'injection est effectuée correctement, les réactions chimiques elles-mêmes pourraient fracturer les roches, permettant à l'eau de s'infiltrer. Lors de mon séjour à Oman, il m'avait en effet montré un jour un bloc rocheux particulier. De la taille d'une voiture, ce bloc était saturé de veines de carbonate. Des blocs de la taille d'une brique autrefois jointifs s'y retrouvaient séparés de façon chaotique au sein des entrelacs de veines. «Quand je vois cela, je peux presque entendre la roche exploser», avait commenté Peter Kelemen.

L'«explosion» à laquelle il faisait allusion s'est produite en fait au ralenti. Lorsque, sous

Juerg Matter analyse des eaux souterraines si saturées en calcium qu'elles réagissent avec le CO₂ de l'air, formant des films bleu nacré de calcite à la surface de l'eau (voir aussi page ci-contre). Du carbonate blanc gluant peut s'accumuler aussi là où tombe de l'eau.





terre, le dioxyde de carbone s'attache au magnésium ou au calcium pour former des carbonates, il produit un matériau carbonaté occupant de 20 à 60% plus de volume que celui qu'il remplace. Une modélisation de Peter Kelemen suggère que ces minéraux carbonatés exercent au cours de leur croissance jusqu'à 2900 atmosphères de pression sur la roche les entourant. Le chercheur en conclut que la conversion chimique des roches mantelliques les fracture et propage de larges fissures, ce qui crée de nouvelles surfaces réactives et facilite l'infiltration de l'eau et du CO₂.

En 2019 et 2020, Juerg Matter et le géophysicien Robert Sohn, de l'institut océanographique de Woods Hole en ont découvert des preuves. Au cours de missions dans l'oued Lawayni, ils ont descendu des hydrophones dans plusieurs puits de forage emplis d'eau et placé des sismomètres tout autour de la vallée. Un mois durant, ils ont alors enregistré des centaines de microséismes: «La fracturation due aux réactions chimiques déclenche ces signaux très spécifiques», explique Robert Sohn. Mais si ces signaux suggèrent que les réactions chimiques fissurent la roche, ils ne suffisent pas à le prouver, tient-il à avertir.

Même si les ingénieurs parvenaient à trouver un moyen d'exploiter l'expansion et la fissuration à leur avantage, ils devraient tenir compte des conséquences involontaires. Selon des estimations approximatives, le piégeage de 1 milliard de tonnes de CO₂ dans les minéraux carbonatés pourrait augmenter le volume de la roche de un dixième de kilomètre cube, soit l'équivalent d'environ 35 Empire State Buildings! Si cette expansion était répartie dans les roches sous-jacentes de 300 kilomètres carrés de terres – comme ce serait le cas dans l'un des scénarios de Peter Kelemen –, la minéralisation de 1 milliard de tonnes de CO₂ par an pourrait entraîner une élévation du sol de 30 centimètres par an...

En revanche, l'injection de seulement 1 million de tonnes de CO₂ par an sur 300 kilomètres carrés n'entraînerait pas plus de 1 millimètre d'élévation du sol par an, soit moins que ce que les forces tectoniques entraînent dans de nombreuses régions. Ainsi, l'augmentation du volume des roches ne serait problématique qu'avec les très grands volumes d'injection. Peter Kelemen pense que pour résoudre ce problème à Oman toute injection à l'échelle de 1 gigatonne devrait se faire sur les rives de la mer. Là, les ingénieurs pourraient forer en biais



sous le fond marin peu profond, de sorte qu'ultérieurement seul le sol marin gonflera, vraisemblablement sans effet de bord. Cette stratégie fournirait en outre de l'eau de mer pour transporter le CO₂ concentré, ce qui est important dans ce pays désertique, pauvre en eaux souterraines... Reste à le démontrer.

À LA CONQUÊTE DES COÛTS

Une société basée à Oman et baptisée 44.01 (d'après le poids moléculaire moyen du CO₂) a reçu l'approbation du gouvernement pour mener le premier essai pilote au monde de carbonatation minérale dans les roches du manteau. En mai dernier, après avoir prépositionné du matériel dans l'oued Lawayni, 44.01 a commencé à injecter de l'eau douce contenant du dioxyde de carbone et un traceur chimique inerte dans le forage pratiqué à 100 mètres de celui que j'avais vu creuser en 2018. Pour déterminer la vitesse de diffusion de l'eau dans la roche et la quantité de CO₂ séquestrée, Peter Kelemen et Juerg Matter surveilleront les concentrations de traceur, de CO₂ et de minéraux dans de l'eau parvenant dans un forage situé à une centaine de mètres du puits d'injection. Si l'essai démontre la minéralisation rapide du CO₂ – quatre mois devraient y suffire –, Talal Hasan, le fondateur de 44.01 prévoit de lancer en 2022 la première

opération commerciale d'injection. Elle utilisera de l'eau douce ou éventuellement des eaux usées traitées pour acheminer 10000 tonnes de gaz par an dans un seul puits, avec l'espoir de passer à 100000 tonnes par an. L'entreprise prévoit également de lancer un deuxième essai pilote plus près de la côte, en utilisant de l'eau de mer.

Selon Hasan, 44.01 pourra un jour minéraliser de l'ordre de 1,3 milliard de tonnes de CO₂ par an dans la formation mantellique d'Oman. Cette quantité viendrait en diminution des 2 à 20 milliards de tonnes de dioxyde de carbone que l'humanité doit retirer de l'atmosphère chaque année afin de ne pas laisser croître la température moyenne de plus de 1,5 °C. Actuellement, 44.01 est la seule entreprise tentant d'injecter du CO₂ dans des roches mantelliques, mais une recherche récente de l'Académie nationale des sciences des États-Unis suggère que les diverses ophiolites du monde pourraient séquestrer de 5 milliards à 10 milliards de tonnes supplémentaires par an, sans parler de la séquestration dans le basalte, comme celle pratiquée en Islande.

À quels coûts? La réponse sera déterminante. En Islande, CarbFix minéralise du CO₂ pour environ 22 euros la tonne, tandis que 44.01 n'a pas encore publié d'estimation officielle. Toutefois, selon un rapport de 2018 de Sabine

Le littoral de Mascate, la capitale d'Oman, comprend nombre de zones industrielles. Capturer des milliards de tonnes de CO₂ atmosphérique et le concentrer dans de l'eau injectée sous terre afin de l'y minéraliser impliquerait une très importante infrastructure.

Fuss, de l'institut de recherche Mercator sur les biens communs mondiaux et le changement climatique, ces coûts se situeraient dans la fourchette de ceux des stratégies comme la reforestation ou la gestion des sols cultivés. Certes, les nombreux pollueurs ne semblent pas pressés de payer pour faire minéraliser le CO₂ qu'ils émettent. Mais à mesure que les gouvernements taxent les émissions de carbone, la demande de séquestration minérale devrait augmenter.

Reste une question délicate: la séquestration de 1 milliard de tonnes de CO₂ par an à Oman nécessiterait une infrastructure massive. Peter Kelemen a calculé que si le gaz était concentré 440 fois ce qu'il est naturellement dans l'eau de mer – ce qui peut facilement être fait par les machines de capture d'air actuelles – 5000 puits d'injection seraient nécessaires. Ensemble, ils pomperaient 23 kilomètres cubes d'eau par an, soit presque la moitié du débit du Rhône. Par ailleurs une telle opération nécessiterait entre 700 milliards et 1,3 billion de kilowattheures d'énergie... Pour éviter d'utiliser des carburants fossiles, cette énergie devrait provenir de 300 à 600 kilomètres carrés de panneaux solaires, n'occupant pas plus de 0,2% du territoire d'Oman, selon les formules standard basées sur l'intensité de l'ensoleillement. L'ampleur d'une telle opération peut paraître choquante – notamment dans ce sultanat d'Oman dont le patrimoine naturel fragile doit être protégé – sauf à considérer que l'urgence climatique exige une intervention colossale, et que, bien entendu, il appartiendrait à l'humanité de profiter de cette occasion pour passer aux énergies renouvelables plutôt que de la considérer comme un permis d'émettre encore plus de carbone.

Pour l'instant, la proposition de Peter Kelemen de forer 5000 puits d'injection aurait de plus modestes conséquences: les puits se trouveraient dans les zones industrielles du littoral, de sorte qu'ils ne changeraient guère plus le paysage qu'un parc éolien côtier. Pour leur part, les panneaux solaires pourraient se trouver sur des surfaces soigneusement sélectionnées à l'intérieur des terres. Peter Kelemen, qui se réjouit simplement de voir une première étape – l'essai sur le terrain dans l'oued Lawayni –, réfléchit déjà à l'avance à la manière dont l'empreinte physique de la carbonatation minérale pourrait être réduite.

Un soir de 2018 au crépuscule, il m'a emmené dans un canyon proche pour me montrer un sommet rougeâtre. «Cette petite montagne contient 1 milliard de tonnes de CO₂», m'a-t-il expliqué. D'ordinaire, les carbonates ne représentent que de l'ordre de 1% du volume des roches de surface, mais dans le mont en question, «tous les atomes de magnésium et de calcium ont donné des carbonates.»

À l'origine, cette montagne avait la même composition que les autres roches mantelliques

Les coûts seraient comparables à ceux de stratégies comme la reforestation

omanaises, mais ses minéraux ont réagi avec du dioxyde de carbone et de l'eau alors qu'il y a longtemps elles étaient encore profondément enfouies et donc très chaudes. L'eau et le CO₂ qui réagissaient étaient présents dans les sédiments océaniques que la subduction d'une plaque tectonique sous une autre enfouissait profondément dans le manteau. Sur la base d'analyses géochimiques publiées en 2020, Peter Kelemen avance que les roches se trouvaient alors à une température de 150 à 250 °C. Elles étaient aussi assez chaudes pour que la fracturation entraînée par les réactions aille jusqu'à son terme, de sorte que les magnésiums et les calciums de chaque grain de roche ont pu réagir.

Aujourd'hui, beaucoup des roches mantelliques d'Oman sont à de telles températures, mais elles se trouvent à 5 à 6 kilomètres sous la surface... Pour les atteindre, des forages plus sophistiqués seraient nécessaires, de sorte que, pour Talal Hasan, «dès que la séquestration de dioxyde de carbone sera rentable, des gens commenceront à exploiter cette possibilité.»

Après tout, l'industrie de production d'émissions négatives n'en est aujourd'hui qu'à ses balbutiements, un peu comme l'était l'extraction pétrolière au milieu du XIX^e siècle, tandis que régnait la puissante industrie de l'huile de baleine. Les premiers puits de pétrole n'avaient que quelques mètres de profondeur, puis les entreprises pétrolières ont progressivement cherché à extraire des richesses plus profondes, ce que l'amélioration des techniques de forage a progressivement rendu possible, jusqu'à ce qu'une infrastructure mondiale capable de capter, de transporter et de vendre le précieux produit, ne réponde à une demande toujours croissante. Ces mêmes forces pourraient un jour pousser l'humanité à creuser toujours plus profondément à la recherche d'une autre ressource: des roches chaudes capables de minéraliser le CO₂. Oman est un pays pétrolier, mais le sultanat pourrait dès aujourd'hui se préparer à devenir un spécialiste du réenfouissement dans le sol du carbone qui en fut extrait au cours de l'ère industrielle. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Lods, et al., **Groundwater flow characterization of an ophiolitic hard-rock aquifer from cross-borehole multi-level hydraulic experiments**, *Journal of Hydrology*, vol. 589, article 125152, 2020.

F. Savatier, **Les bactéries influencent la séquestration du carbone dans les basaltes**, *Pour la science*, en ligne le 20 novembre 2017.

M. Tian, **Vers une séquestration géologique sûre et rapide du gaz carbonique**, *Pour la science*, en ligne le 15 juillet 2016.

S. Bryant, **Enterrer le carbone en déterrâant du méthane ?**, *Pour la science* n° 435, décembre 2013.

Magnus Hirschfeld et son institut pionnier pour les transgenres

La première clinique proposant une chirurgie de réattribution sexuelle aurait un siècle si elle n'avait pas été détruite par les nazis.

La nuit était déjà avancée quand, en ce début du XX^e siècle, le jeune médecin allemand Magnus Hirschfeld découvrit, sur le pas de la porte de son cabinet, un soldat, désespéré et agité : l'homme était venu confesser qu'il était un *Urning* – un uraniste –, terme utilisé pour désigner les hommes homosexuels. Ce qui expliquait l'heure tardive : parler de telles choses était une affaire dangereuse. Le tristement célèbre « Paragraphe 175 » du Code pénal allemand rendait l'homosexualité illégale ; une accusation suffisait pour qu'un homme soit dépouillé de ses grades et titres, et jeté en prison.

Hirschfeld comprit la détresse du soldat – il était lui-même homosexuel et juif – et fit de son mieux pour réconforter son patient. Mais le soldat, alors à la veille de son mariage, un événement qu'il ne pouvait affronter, avait déjà pris sa décision : peu après, il se suicida.

Magnus Hirschfeld (à lunettes) lors d'une fête costumée à l'institut, entouré des personnes qu'il a accueillies. Il tient la main de son partenaire Karl Giese (au centre).



© Magnus-Hirschfeld-Gesellschaft e.V., Berlin ; photo de l'aurice, © Medical Humanities, BMJ

L'AUTRICE



BRANDY SCHILLACE
rédactrice en chef
de la revue *Medical
Humanities* du *British
Medical Journal*

L'ESSENTIEL

> Au début du ^{XX}e siècle, l'homosexualité était illégale en Allemagne, et les personnes qui s'éloignaient des normes hétérosexuelles subissaient l'opprobre.

> En 1919, face à cette hostilité, Magnus Hirschfeld, un jeune médecin allemand, fonda à Berlin un institut de sexologie, qui devint un lieu « de recherche, d'enseignement, de guérison et de refuge » pour nombre de personnes sexuellement non conformes.

> Il constitua aussi une immense bibliothèque sur la sexualité et proposa des traitements hormonaux, ainsi qu'une chirurgie de transition homme-femme.

> Mais en 1933, les troupes nazies envahirent le bâtiment et brûlèrent ses livres, anéantissant des années de recherches.



Le soldat légua ses documents personnels à Hirschfeld, accompagnés d'une lettre: «La pensée que vous pourriez contribuer à [un avenir] où la patrie allemande nous considérera en termes plus justes, écrit-il, adoucit l'heure de la mort.» Hirschfeld resta hanté par cette perte inutile; le soldat s'était qualifié de «malédiction» dont la seule issue était la mort, les attentes des normes hétérosexuelles, renforcées par le mariage et la loi, ne laissant aucune place aux gens comme lui. Ces récits déchirants, écrit Hirschfeld dans son ouvrage *Die Sittengeschichte des Weltkrieges* («L'histoire des mœurs pendant la Guerre mondiale») publié en 1929-1930, «nous montrent toute la tragédie [de la situation en Allemagne]; quelle patrie avaient-ils, et pour quelle liberté se battaient-ils?»

EN CROISADE POUR LE DROIT A LA DIVERSITÉ SEXUELLE

À la suite de ce drame, Hirschfeld, qui dès 1897 avait commencé à lutter pour l'abolition du Paragraphe 175 en fondant le Wissenschaftlich-humanitäre Komitee (le «comité scientifique humanitaire»), une organisation de défense des droits des homosexuels, a quitté son cabinet médical et s'est consacré à une croisade pour la justice qui a modifié le cours de l'histoire de l'homosexualité. Il s'est spécialisé dans la santé sexuelle, un domaine d'intérêt croissant. Nombre de ses prédécesseurs et collègues pensaient que l'homosexualité était pathologique, s'appuyant sur les nouvelles théories de la psychologie pour suggérer qu'elle était un signe de mauvaise santé mentale. Hirschfeld, en revanche, soutenait qu'une personne peut naître avec des caractéristiques ne correspondant pas aux catégories hétérosexuelles ou binaires et qu'un «troisième sexe» (ou *drittes Geschlecht*) existe naturellement.

Il proposa par ailleurs le terme «intermédiaires sexuels» pour désigner les individus qui ne correspondent pas aux normes traditionnelles d'hommes et de femmes, que cela soit sur le plan physique (leurs organes sexuels étant ambigus), de l'orientation sexuelle, ou encore de l'identité sexuelle. Une catégorie qui incluait donc ce qu'il considérait comme des homosexuels «situationnels» et «constitutionnels» – une façon de reconnaître qu'il existe souvent un spectre de pratiques bisexuelles, et ce qu'il appelait les «travestis». Ce groupe comprenait ceux qui souhaitaient porter les vêtements du sexe opposé et ceux qui, «du point de vue de leur caractère», s'apparentaient plus au sexe opposé. Selon un soldat avec lequel Hirschfeld avait travaillé, porter des vêtements féminins lui donnait la possibilité «d'être un humain, au moins pour un moment». Par ailleurs, le médecin reconnaissait que ces



Magnus Hirschfeld (1868-1935)

personnes pouvaient être homosexuelles ou hétérosexuelles, ce qui est souvent mal compris aujourd'hui à propos des transgenres.

Peut-être encore plus surprenant, la catégorie des intermédiaires sexuels de Hirschfeld incluait aussi les personnes sans genre fixe – qui s'apparentent aux concepts actuels de *gender fluid* (les individus dont le genre oscille entre la masculinité et la féminité) ou d'identité non binaire (ceux qui ne se reconnaissent ni homme ni femme; le médecin comptait la romancière française George Sand parmi eux). Le plus important pour Hirschfeld était que ces personnes agissaient «conformément à leur nature», et non contre elle.

Les «intermédiaires sexuels» de Hirschfeld incluait les personnes sans genre fixe

Ces idées vous semblent avant-gardistes pour l'époque? Elles le sont. Peut-être même plus encore que celles d'aujourd'hui, cent ans plus tard. Les opinions antitransgenres actuelles sont centrées sur l'idée qu'être transgenre est à la fois nouveau et contre nature. Or l'histoire témoigne de la pluralité du genre et de la sexualité. Hirschfeld considérait Socrate, Michel-Ange et Shakespeare comme des intermédiaires sexuels; il se classait avec son partenaire Karl Giese dans la même catégorie. Le prédécesseur de Hirschfeld en sexologie, Richard von Krafft-Ebing, avait lui-même affirmé au XIX^e siècle que l'homosexualité était une variation sexuelle naturelle et congénitale.

L'étude de Hirschfeld sur les intermédiaires sexuels n'était pas une tendance ou une mode, mais plutôt une reconnaissance de la diversité de la sexualité et du fait que les gens naissent parfois avec une nature contraire au sexe qui leur a été assigné. Et dans les cas où le désir de vivre comme le sexe opposé était fort, il pensait que la science devait fournir un moyen de transition. Début 1919, il acheta une villa à Berlin et, le 6 juillet, il y ouvrit l'Institut für Sexualwissenschaft («institut de sexologie») qui, quelques années plus tard, pratiqua parmi les premières interventions chirurgicales modernes d'affirmation de genre.

UN LIEU SÛR...

Bâtiment d'angle avec des ailes de chaque côté, l'institut était un joyau architectural qui brouillait la frontière entre les espaces de vie professionnels et intimes. Selon un journaliste de l'époque, il ne pouvait s'agir d'un institut scientifique, car il était meublé, cossu et «plein de vie partout». L'objectif déclaré de Hirschfeld était d'en faire un lieu «de recherche, d'enseignement, de guérison et de refuge» qui pouvait «libérer l'individu de ses maux physiques, de ses affections psychologiques et de ses privations sociales».

L'institut était également un lieu d'éducation. Alors qu'il était à l'école de médecine, Hirschfeld avait subi le traumatisme de voir un homosexuel contraint de défiler nu devant la classe et traité de dégénéré. À l'opposé de cela, il proposait une éducation sexuelle et des consultations de santé, des conseils sur la contraception et des recherches sur le genre et la sexualité, tant anthropologiques que psychologiques. Il travaillait sans relâche pour tenter de faire annuler le Paragraphe 175. N'y parvenant pas, il obtint pour ses patients des attestations de «travesti», pour qu'ils ne soient pas arrêtés à cause de leur façon de s'habiller et de vivre. Le terrain comportait aussi des bureaux réservés aux activistes féministes, ainsi qu'une imprimerie de journaux pour la réforme sexuelle, destinés à dissiper les mythes sur la

sexualité. «L'amour, disait Hirschfeld, est aussi varié que les gens.»

Au fil des ans, l'institut a aussi constitué une immense bibliothèque sur la sexualité, comportant des livres rares, ainsi que des schémas et des protocoles pour effectuer la transition chirurgicale homme-femme. Outre des psychiatres, Hirschfeld avait engagé Ludwig Levy-Lenz, un gynécologue. Ensemble, avec le chirurgien Erwin Gohrbandt, ils ont commencé à pratiquer une chirurgie de transition homme-femme appelée *Genitalumwandlung* – littéralement, «transformation des organes génitaux». Cette opération risquée se déroulait sur plusieurs années, en plusieurs étapes: castration, pénectomie et vaginoplastie. (À cette époque, l'institut ne traitait que les femmes transgenres; la phalloplastie ne fut pratiquée qu'à la fin des années 1940, d'abord en Grande-Bretagne.)

Lili Elbe, l'une des patientes de Hirschfeld, photographiée en 1926. Après plusieurs opérations ayant abouti à une réassignation sexuelle en 1930, cette peintre danoise née Einar Wegener est morte un an plus tard à la clinique de Dresde, qui venait de tenter une dernière opération: la greffe d'un utérus.



Dans la propagande nazie, Hirschfeld était présenté comme le pire des criminels

Selon les patients, la chirurgie s'arrêtait à l'une ou l'autre étape. Les patients se voyaient également prescrire un traitement hormonal, ce qui leur permettait de développer des seins naturels et adoucissait leurs traits.

Leurs études révolutionnaires, méticuleusement documentées, ont attiré l'attention du monde entier. Les droits et la reconnaissance juridique n'ont cependant pas suivi immédiatement. Après l'opération, les femmes transgenres ont eu du mal à trouver un emploi pour subvenir à leurs besoins, si bien que cinq d'entre elles ont été employées au sein de l'institut lui-même. Une façon pour Hirschfeld de leur offrir un espace sûr – y compris, parfois, une protection contre la loi.

... JUSQU'À L'AVÈNEMENT DU PARTI NAZI

Qu'un tel institut ait existé dès 1919, reconnaissant la pluralité des identités sexuelles et offrant un soutien, en surprend plus d'un. Il aurait dû être le socle d'un avenir plus audacieux. Mais alors que l'institut célébrait sa première décennie, le parti nazi était déjà en pleine expansion. Séduisant de plus en plus de monde dans une société en pleine crise économique grâce à un nationalisme qui ciblait les immigrés, les handicapés et les «génétiquement inaptes», il devint en 1932 le plus grand parti politique d'Allemagne. Affaibli, sans majorité, la République de Weimar s'effondra.

Adolf Hitler fut nommé chancelier le 30 janvier 1933 et adopta des politiques visant à débarrasser l'Allemagne des *Lebensunwerten Leben*, ou «vies indignes de vivre». Ce qui a commencé comme un programme de stérilisation a conduit à l'extermination de millions de Juifs, de Tsiganes, d'opposants politiques, ainsi que d'homosexuels et de transgenres.

Lorsque les nazis s'en sont pris à l'institut, le 6 mai 1933, Hirschfeld était hors du pays. Face à la menace croissante, il n'était pas rentré d'une série de conférences données dans plusieurs pays. Giese fuit avec le peu qu'il pouvait

emporter. Les troupes envahirent le bâtiment et empilèrent dans la rue un buste en bronze de Hirschfeld et tous ses précieux livres. Bientôt, un feu semblable à une tour engloutit plus de 20 000 livres, dont des exemplaires rares qui avaient contribué à fournir une historiographie aux intermédiaires sexuels.

Le carnage fut filmé et diffusé dans les cinémas allemands. Ce fut l'un des premiers et des plus grands autodafés de livres par les nazis. Des jeunes, des étudiants et des soldats ont participé à la destruction, tandis que les commentateurs déclaraient que l'État allemand avait jeté dans les flammes «les déchets intellectuels du passé». En réalité une collection irremplaçable.

Levy-Lenz, juif comme Hirschfeld, a fui l'Allemagne. Mais par un sombre retournement de situation, son collaborateur Gohrbandt a rejoint la Luftwaffe en tant que conseiller médical en chef et a ensuite contribué à des expériences sinistres dans le camp de concentration de Dachau. Dans la propagande nazie, le portrait de Hirschfeld était présenté comme le pire des criminels (à la fois juif et homosexuel) face à la race aryenne hétérosexuelle.

De son côté, Giese rejoignit à Paris Hirschfeld et son protégé Li Shiu Tong, un étudiant en médecine. Tous trois continuèrent à vivre ensemble comme partenaires et collègues dans l'espoir de reconstruire l'institut, jusqu'à ce que la menace croissante de l'occupation nazie à Paris les oblige à fuir à Nice. Hirschfeld mourut d'une attaque soudaine en 1935, le jour de son soixante-septième anniversaire. Giese se suicida en 1938. Quant à Tong, il abandonna ses espoirs d'ouvrir un institut à Hong Kong pour une vie dans l'ombre à l'étranger.

Au fil du temps, leurs histoires ont refait surface dans la culture populaire. En 2015, par exemple, l'institut a été un élément majeur de la deuxième saison de la série télévisée *Transparent*, et l'une des patientes de Hirschfeld, Lili Elbe, a été la protagoniste du film *The Danish Girl*. Il est à noter que le nom du médecin n'apparaît jamais dans le roman qui a inspiré le film et que, malgré ces quelques exceptions, l'histoire de la clinique de Hirschfeld a été effacée. Si bien, en fait, que malgré les films nazis, toujours visibles, et la reproduction fréquente des images de la bibliothèque en feu, peu de gens savent qu'ils représentent la première clinique pour transgenres au monde.

UN AVERTISSEMENT POUR L'AVENIR

L'avenir ne garantit pas toujours le progrès, et l'histoire de l'Institut für Sexualwissenschaft constitue un avertissement pour aujourd'hui. La législation actuelle dans plusieurs États américains n'est pas sans évoquer cette

BIBLIOGRAPHIE

H. Bauer, *The Hirschfeld Archives: Violence, Death, and Modern Queer Culture*, Temple University Press, 2017.

E. R. Dickinson, *Sex, Freedom, and Power in Imperial Germany, 1880-1914*, Cambridge University Press, 2014.

C. Wolff, *Magnus Hirschfeld: A Portrait of a Pioneer in Sexology*, Quartet Books, 1986.



L'un des premiers et plus grands autodafés de livres orchestrés par les nazis a détruit la bibliothèque de l'institut de Hirschfeld.

sombre époque. Au printemps 2021, un projet de loi a été proposé au Texas, qui vise à inscrire les traitements d'affirmation de l'identité du genre parmi les maltraitances d'enfants. Le vote a été reporté à une date inconnue, mais si la loi est adoptée, elle séparera les enfants transgenres des parents qui les soutiennent. À la même période, le Sénat de l'Arkansas a adopté une loi interdisant au personnel médical de proposer aux jeunes transgenres des hormones ou des opérations chirurgicales visant à affirmer leur identité de genre. Or des études suggèrent que l'hormonothérapie, accessible dès le plus jeune âge, réduirait le taux de suicide chez les jeunes transgenres. La loi a été suspendue temporairement, par un juge fédéral en juillet 2021 en réponse à un

procès intenté par l'Union américaine pour les libertés civiles. Un mois plus tôt, cependant, le gouverneur de Floride entérinait de son côté une loi visant à interdire aux athlètes transgenres de participer à des activités sportives.

Difficile, quand on se plonge dans l'histoire de l'institut de Hirschfeld, de ne pas imaginer ce qu'il aurait changé dans l'histoire actuelle. Quelle société aurait pu être construite à partir d'une plateforme où les «intermédiaires sexuels» étaient considérés en «termes plus justes»? Alors que l'oppression monte contre les personnes LGBTQ+ (lesbiennes, gays, bisexuelles, transgenres, queers et autres orientations sexuelles), l'histoire de l'institut de Hirschfeld résonne comme un avertissement. ■

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul

P.86 Art & science

P.88 Idées de physique

P.92 Chroniques de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

P.98 À picorer

DES SUITES FRACTALES D'ENTRIERS

Une suite numérique fractale est une suite de nombres dont une partie la reproduit entièrement. La construction de tels objets stimule la créativité de nombreux passionnés.

L'AUTEUR



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



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

L'intérêt pour les suites de nombres entiers provient de leur nature concrète et immédiate : tout le monde sait qu'il y a une suite des carrés parfaits (1, 4, 9, 16, 25, ...) et une suite des nombres premiers (2, 3, 5, 7, 11, 13, ...). Leurs termes sont faciles à déterminer et parfois à calculer. De surcroît, ces suites sont, sauf exception, sans limite et elles rendent l'infini immédiat et tangible. Elles suggèrent aux mathématiciens de multiples questions : que deviennent les termes de la suite ? Quelles formules donnent accès directement au n -ième terme, ou à partir du précédent (formules de récurrence) ? Quels liens entretiennent ces suites ? Etc.

Les suites numériques sont parfois étranges, difficiles, voire totalement mystérieuses. Cela explique qu'amateurs et professionnels s'organisent pour collecter, compléter et perfectionner toutes les informations sur ces suites, les algorithmes de calculs qui les produisent, les démonstrations de leurs propriétés. L'encyclopédie des suites numériques de Neil Sloane (<https://oeis.org>) est la principale source d'information sur le sujet.

En relation avec l'encyclopédie, un groupe de passionnés ouvert à tous communique via la « Sequence Fans Mailing List » (<http://list.seqfan.eu>). Il existe aussi une revue spécialisée de mathématiques (*Journal of Integer Sequences*) qui collecte les résultats non triviaux concernant le sujet, et, bien sûr, des livres et quelques vidéos.

J'ai sélectionné plusieurs suites illustrant ce qui retient l'attention et justifie qu'on les examine de près. Les suites fractales sont le fil directeur de notre voyage.

LES SUITES FRACTALES

Comme les images ou les sculptures fractales qui contiennent en elles-mêmes leur dessin ou leur forme, une suite fractale est une suite dont une partie d'elle-même redonne la suite à l'identique. On qualifie aussi une telle suite d'« autoréférente », d'« autodescriptive », ou d'« autosemblable ». Plusieurs définitions plus ou moins restrictives sont possibles. Commençons par la plus tolérante.

Une suite numérique (x_n) est fractale s'il existe un opérateur T , différent de l'identité, $T(x_n) \rightarrow (t_n)$ qui, partant de (x_n) , redonne (x_n) , c'est-à-dire $T(x_n) = (x_n)$. On dit aussi que (x_n) est un point fixe de l'opérateur T .

Plus la suite (x_n) sera alambiquée ou inattendue et plus l'opérateur T sera simple (sans être l'opérateur identité), plus la nature fractale de la suite nous étonnera et plus il sera intéressant d'explorer ses propriétés. Voyons des suites connues qui satisfont la définition.

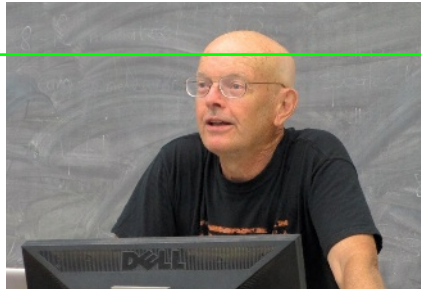
La suite $(x_n) = (2^n) = (1, 2, 4, 8, 16, \dots)$ est fractale car c'est un point fixe de l'opérateur T_1 qui enlève le premier terme de la suite et divise tous les termes par 2 : $t_n = x_{n+1}/2$. On peut aussi considérer l'opérateur T_2 , inverse du premier : il double chaque terme et ajoute le terme 1 devant

C'est peut-être un peu trop facile car, pour toute suite donnée (x_n) , en prenant un opérateur T assez compliqué et bien adapté, on pourra faire de (x_n) un point fixe de T , ce qui permettra de dire que (x_n) est fractale: nous

Pour cette même suite, on peut d'ailleurs considérer l'opérateur T qui retient deux termes consécutifs et en abandonne deux, et recommence indéfiniment. Plus généralement, si p et k sont deux entiers non nuls fixés, l'opérateur d'extraction T qui retient $2p$ termes consécutifs et en abandonne $2k$, puis recommence, fait de notre suite une suite fractale au sens de l'extraction. Le même genre de considérations montre que toute

Au tennis, lors d'un jeu décisif (tie break), le service est attribué selon l'ordre ABBAABBAABB... qui ne suit la suite de Prouhet que pendant quatre coups.

2



Neil Sloane
en 2016.

UN JEU AVEC L'ENCYCLOPÉDIE DE NEIL SLOANE

Le jeu consiste à imaginer des suites aussi simples que possible qui ne sont pas dans l'encyclopédie des suites de Neil Sloane. Celle-ci ne contient qu'un peu plus de 300 000 suites jugées intéressantes. Il est donc facile d'imaginer des suites compliquées que l'on n'y trouvera pas. Par exemple, on peut proposer des suites de la forme (k^n) pour un k fixé. On découvrira que les suites (2^n) , (3^n) , (4^n) , ..., (50^n) sont présentes, mais que (51^n) est absente (le 29/09/2021). Le jeu n'est amusant que si l'on cherche des suites faciles à décrire, ou fondées sur une idée simple. Voici quelques exemples (absents de l'encyclopédie au 11/11/2021). La plupart des suites proposées ici sont si simples qu'une personne attentive identifierait la règle qui les définit.

a) On compte jusqu'au nombre premier 2, et l'on recommence pour le nombre premier 3, puis 5, puis 7, etc :
(0, 1, 2, 0, 1, 2, 3, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, ...)

b) Pour $n = 0, 1, 2, \dots$, on part du nombre premier p_n ($p_0 = 2, p_1 = 3, p_2 = 5, p_3 = 7, p_4 = 11, \dots$) et l'on décroît unité par unité n fois de suite : (2, 3, 2, 5, 4, 3, 7, 6, 5, 4, 11, 10, 9, 8, 7, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 17, ...).

c) On part de la suite des nombres premiers, on garde le premier, on en supprime $2 = p_0$, on en garde un, on en supprime $3 = p_1$, on en garde un, on en supprime $5 = p_2$, on en garde un, on en supprime $7 = p_3$, on en garde un, etc. : (2, 7, 19, 43, 79, 139, 223, ...).

d) Les nombres premiers auxquels on ajoute 1 une fois sur deux : (3, 5, 6, 7, 12, 13, 18, 19, 24, 29, 32, 37, 42, 43, 48, 53, 60, 61, 66, ...).

e) On part de 2, on y reste 2 fois de suite, on ajoute 3, on y reste 3 fois, on

ajoute 5 et on y reste 5 fois, on ajoute 7
et on y reste 7 fois, on ajoute 11, etc.
(en utilisant les nombres premiers) :
(2, 2, 5, 5, 5, 10, 10, 10, 10, 10, 17, 17, 17,
17, 17, 17, 17, 28, ...).

f) Les nombres premiers élevés au carré une fois sur deux :

(4, 3, 23, 7, 121, 13, 289, 19, 529, 29, 961, 37, 1 681, 43, 2 209, 53, 3 481, 61, 4 489, 71, ...).

g) 2 fois le 0, puis 3 fois le 1, puis 5 fois le 2, puis 7 fois le 3, puis 11 fois le 4, ..., puis p , fois le n , ...
(0, 0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 6, ...).

h) On modifie la notion de signature (voir le texte) en prenant non pas les i , mais les j . Avec cette notion, la suite associée au nombre réel e est :

(1, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 1, 3, 2, 1, 3, 2,
1, 4, 3, 2, 1, 4, 3, 2, 1, 4, 3, 2, 5, 1, 4, 3, 2,
5, 1, 4, 3, 2, 5, 1, 4, 3, 6, 2, 5, 1, 4, 3, 6, 2,
5, 1, 4, 3, 6, 2, 5, 1, 4, 7, 3, 6, 2, 5, 1, 4, 7,
3, 6, 2, 5, 1, 4, 7, 3, 6, 2, 5, 1, 8, 4, 7, 3, 6,
2, 5, 1, 8, 4, 7, 3, 6, 2, 5, 1, 8, 4, 7, 3 ...).

i) Pour finir, voici une suite fondée sur l'encyclopédie elle-même. On interroge celle-ci sur les suites commençant par 0, 1, X jusqu'à trouver un X tel qu'elle répond qu'elle ne connaît pas de suite commençant par 0, 1, X. On trouve que c'est 142. On recommence avec 0, 1, 2, Y et l'on trouve que c'est $Y = 26$, etc. : (142, 26, 26, 21, 14, 14, 18, 22, 26, 15, 17, 17, ...).

Cette suite est bien évidemment nulle à partir d'un certain moment. Bien qu'amusante, la suite est appelée à évoluer quand de nouvelles suites seront ajoutées ; elle n'intéressera donc pas l'encyclopédie !

suite périodique est, d'une multitude de
façons, fractale au sens de l'extraction.

Bien moins évidente est la suite de Prouhet-Thue-Morse (p_n) déjà mentionnée plusieurs fois dans la rubrique. Elle a été introduite en 1851 par le Français Eugène Prouhet. Notons au passage qu'il est surprenant qu'on la nomme ainsi alors qu'on devrait la nommer

simplement « suite de Prouhet ». Plus surprenant encore est le fait que, dans Wikipedia en langue anglaise, l'article consacré à la suite s'intitule « Thue-Morse sequence », ce qui est aussi le nom retenu dans l'encyclopédie de Neil Sloane où elle porte le numéro A010060.

LA SUITE DE PROUHET-THUE-MORSE

Dans cette suite de 0 et de 1, le complément de 0 est 1, et le complément de 1 est 0. Selon la règle définissant la suite, on part de 0, on fait suivre par le complément 1. On obtient (0, 1). On le fait suivre par son complément, qui est (1, 0), pour obtenir (0, 1, 1, 0). Et ainsi de suite. On a donc $(p_n) = (0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, \dots)$.

La suite (p_n) est remarquable de bien des façons. D'abord, elle est fractale au sens de l'extraction, car c'est un point fixe de l'opérateur très simple T qui prend un terme sur deux, $T(x_n) = (x_{2n})$. Plus étonnant, ce qui reste quand on a extrait un terme sur deux de (p_n) à partir du premier terme est le complément de (p_n) , que nous notons (p_n^c) , soit $(1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, \dots)$. Autrement dit, (p_n) est point fixe de l'opérateur $T'(x_n) = (x_{2n+1})$.

On écrit $(p_n) = (p_n^a) + (p_n^c)$, le «+» désignant ici l'opération d'insertion l'une dans l'autre des deux suites, comme quand on fait des mélanges de cartes en mitraille: $(a_0, a_1, a_2, \dots) + (b_0, b_1, b_2, \dots) = (a_0, b_0, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots)$.

En utilisant deux fois l'opérateur T qui extrait un terme sur deux, prendre un terme sur quatre de $\langle p_n \rangle$ redonne $\langle p_n \rangle$, et bien sûr, en recommençant, prendre un terme sur 2^k (où k est un entier positif fixé) redonne $\langle p_n \rangle$.

La suite (p_n) est fractale dans un autre sens encore. Si l'on considère l'opérateur T consistant à remplacer chaque 0 par (0, 1) et chaque 1 par (1, 0) – on désigne par « morphisme » ce type d'opérateur –, on a : $T(p_n) = (p_n)$. L'opérateur inverse qui remplace chaque (0, 1) par 0 et chaque (1, 0) par 1 admet encore (p_n) comme point fixe, qui est donc fractale une fois de plus.

Citons quelques propriétés de (p_n) .

Le terme p_n est la parité du nombre de 1 dans l'écriture binaire de n . Cela permet de connaître facilement le n -ième terme de (p_n) . Par exemple, 5000000 s'écrit en binaire 10011000100101101000000, qui comporte huit fois le 1; cela signifie que $p_{5000000} = 0$.

La suite (p_n) ne contient jamais trois fois consécutivement la même séquence de 0 et de 1 : on dit que (p_n) est « sans cube ». Cette propriété est intéressante pour les échecs, où il est interdit de faire trois fois la même chose (voir l'encadré 1).

La suite (p_n) produit un nombre transcendant (c'est-à-dire qui n'est solution d'aucune

équation polynomiale à coefficients entiers) de deux façons :

- en considérant le nombre dont l'écriture binaire des chiffres après la virgule est donnée par la suite: 0,0110100110010110... (voir dans la bibliographie l'article de M. Dekking) ;
- en considérant la fraction continue $f = (a + 1/(b + 1/(b + 1/(a + \dots))))$, les a et b étant deux entiers différents disposés comme les 0 et les 1 de (p_n) (voir l'article de B. Adamczewski et d'Y. Bugeaud).

Une multitude de suites fractales par extraction sont définies en utilisant des morphismes analogues à celui lié à (p_n) . Le morphisme $0 \rightarrow 01, 1 \rightarrow 0$ engendre progressivement la suite dont les premiers termes sont : $M_0 = 0 \rightarrow M_1 = 01 \rightarrow M_2 = 010 \rightarrow M_3 = 01001 \rightarrow M_4 = 01001010 \rightarrow M_5 = 0100101001 \rightarrow \dots$, qui définit le « mot infini de Fibonacci » (suite A003849 de l'encyclopédie de Neil Sloane). La suite est fractale car, si l'on parcourt la suite en remplaçant chaque 01 par 0 et chaque 0 non suivi d'un 1 par 1, on obtient la suite elle-même. La suite se nomme ainsi car on a $M_n = M_{n-1} * M_{n-2}$ où $*$ désigne l'opération de concaténation ($01 * 0 \rightarrow 010$), ce qui évoque la formule définissant la suite numérique de Fibonacci.

Michael Drmota, Christian Mauduit et J  l Rivat ont démontré en 2013 l'étrange propriété suivante: en ne retenant que les termes dont les rangs sont des carrés, la sous-suite obtenue est « normale », c'est-à dire que la fréquence de 1 est $1/2$, la fréquence de 0 est $1/2$, la fréquence de 00 est $1/4$, ..., la fréquence d'une suite de 0 et de 1 de longueur k est $1/2^k$.

LES SUITES HÉSITANTES

Particulièrement intéressantes parmi les suites fractales par extraction sont les suites « h  sistantes » (*reluctant* en anglais). La plus simple est $(H_n) = (1, 1, 2, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, 5, \dots)$, obtenue en comptant jusqu'à 1, puis en comptant de 1 jusqu'à 2, puis en comptant de 1 jusqu'à 3, etc. (suite A002260 dans l'encyclopédie). L'opérateur d'extraction T_a qui transforme une suite numérique en retirant la première occurrence de chaque entier admet (H_n) pour

point fixe: $T_a(H_n) = (H_n)$. Bien sûr, pour tout entier positif fixé k , on peut enlever de la suite les k premières occurrences de chaque entier et ce qui reste est la suite de départ, comme le ph  nix qui renaît de ses cendres.

Mais la suite (H_n) est fractale dans un autre sens. L'opérateur T_b qui soustrait une unité à chaque terme et ensuite retire tous les 0 a aussi (H_n) comme point fixe: $T_b(H_n) = (H_n)$.

La suite $(2, 2, 3, 2, 3, 5, 2, 3, 5, 7, 2, 3, 5, 7, 11, \dots)$ obtenue comme (H_n) , mais en énumérant les nombres premiers de plus en plus longuement, est aussi fractale au sens de l'extraction, car elle est un point fixe de T_a (c'est la suite A037126). Bien évidemment, en partant de n'importe quelle suite croissante, la même idée donnera une nouvelle suite fractale au sens de l'extraction. La suite $(1, 1, 4, 1, 4, 9, 1, 4, 9, 16, 1, 4, 9, 16, 25, \dots)$ tirée de la suite des carrés est encore l'une d'elles (A133819).

Remarquons que ni la suite hésitante tirée des nombres premiers ni celle tirée des carrés ne sont des points fixes pour T_b . Il y a pourtant une infinité de suites numériques qui sont un point fixe à la fois de T_a et de T_b , et elles sont particulièrement remarquables.

LA SIGNATURE DES NOMBRES RÉELS

Franklin Adams-Watters a proposé de nommer « suites doublement fractales » les suites qui sont un point fixe à la fois de T_a et de T_b . Une caractérisation étonnante et totalement inattendue de ces suites doublement fractales a été démontrée, et cela permet d'en construire une infinité.

Pour tout nombre réel positif r , on considère tous les nombres de la forme $i + (j \times r)$ où i et j sont des entiers positifs; on classe par ordre croissant ces nombres, ce qui donne $i_0 + (j_0 \times r) < i_1 + (j_1 \times r) < i_2 + (j_2 \times r) < \dots$; la suite numérique $(i_0, i_1, i_2, \dots)$ est la « signature » du nombre r (voir un exemple détaillé de cette construction dans l'encadré 3 ci-dessous).

En 2004, Clark Kimberling et John Brown, de l'université d'Evansville, aux   tats-Unis, ont démontré que toute suite numérique signature

3

SIGNATURE ET SUITES DOUBLEMENT FRACTALES

Soit r un nombre réel positif. On considère les nombres de la forme $i + (j \times r)$ où i et j sont des entiers positifs. On les classe par ordre croissant. En ne lisant que le i des nombres classés, on a une suite infinie d'entiers qui est la « signature du nombre r ».

Exemple avec $r = \sqrt{2}$. On considère tous les nombres de la forme $i + j\sqrt{2}$ avec i et j entiers.

$1 + \sqrt{2} = 2,414\ 213\dots, 1 + 2\sqrt{2} = 3,828\ 427\dots$

$2 + \sqrt{2} = 3,414\ 213\dots, 2 + 2\sqrt{2} = 4,828\ 427\dots, 3 + \sqrt{2} = 4,414\ 213\dots$, etc.

On les classe par ordre croissant : $1 + \sqrt{2} = 2,414\ 213\dots, 2 + \sqrt{2} = 3,414\ 213\dots, 1 + 2\sqrt{2} = 3,828\ 427\dots, 3 + \sqrt{2} = 4,414\ 213\dots, 2 + 2\sqrt{2} = 4,828\ 427\dots$, etc.

On considère la suite constituée des i (en rouge). Cela donne $(1, 2, 1, 3, 2, \dots)$ et, en menant le calcul plus loin : $(1, 2, 1, 3, 2, 1, 4, 3, 2, 5, 1, 4, 3, 6, 2, 5, 1, 4, 7, 3, 6, 2, 5, 8, 1, 4, 7, 3, 6, 9, 2, 5, 8, 1, 4, 7, 10, 3,$

$6, 9, 2, 5, 8, 1, 11, 4, 7, 10, 3, 6, \dots)$ (c'est la suite A007336 de l'encyclopédie).

Cette suite, comme toutes celles obtenues par ce procédé à partir d'un nombre réel, est doublement fractale :

- si on enlève les premières occurrences des nombres qui y apparaissent, ce qui reste est la suite elle-même ;
- si on diminue d'une unité chaque terme et qu'on retire les 0 de la suite obtenue, on retombe sur la suite initiale.

L'ÉTONNANTE SUITE FRACTALE DE KOLAKOSKI

Définition

On cherche à obtenir une suite composée alternativement de séries de « 1 » consécutifs et de « 2 » consécutifs, et qui démarre par (1, 2). On souhaite de plus que la suite se décrive elle-même selon l'idée que (1, 2) signifie que le début de la suite est composé de 1 fois le 1, 2 fois le 2.

Le 2 de (1, 2) implique ainsi que le troisième terme de la suite doit être un 2, il faut donc que la suite commence par (1, 2, 2), ce qui implique (à cause du deuxième 2, qui indique le nombre d'éléments de la série suivante de 1) qu'elle commence par (1, 2, 2, 1, 1), ce qui implique maintenant que le début de la suite est (1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 7), etc. Le résultat est la suite de Kolakoski :

[illegible]

Spirale associée

Le dessin ci-dessous est dû à « Cmglee », un illustrateur anonyme de Wikipedia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Suite_de_Kolakoski). Il illustre comment la suite s'engendre à partir d'elle-même. Attention, c'est un peu casse-tête !

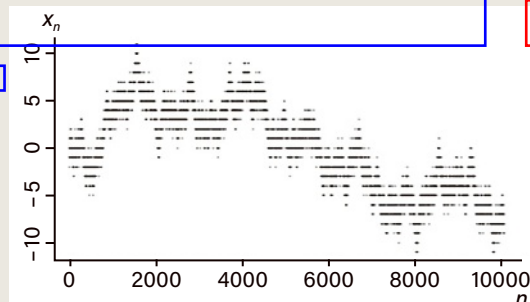
– On part du centre en supposant donnés 1, 2 et on initialise avec un tour complet pour le premier 2 en rouge. On construit ensuite la spirale de proche en proche en utilisant la couleur noire pour les 1, et la couleur rouge pour les 2.

- Quand la partie de la spirale en dessous de celle qu'on construit porte un 1, on tourne pour la nouvelle partie de spirale aussi longtemps que la partie en dessous (par exemple de 360° , de 180° , etc.) en utilisant la couleur qui alterne avec la précédente.

– Quand la partie de la spirale en dessous de celle qu'on construit porte un 2, on construit deux nouveaux morceaux de la spirale, chacun tournant deux fois moins que celle en dessous, et chaque nouveau morceau utilisant la couleur qui alterne avec celle utilisée pour le morceau construit juste avant.

~~Nombres de 1 et de 2~~

On ignore si, à l'infini, les fréquences des 1 et des 2 tendent vers $1/2$ dans la suite de Kolakoski. Certains calculs le suggèrent. Si, dans la suite de Kolakoski, on remplace les 2 par des -1 , et que l'on définit x_n comme la somme de ces nombres jusqu'au n -ième, les valeurs positives de x_n signifient qu'il y a plus de 1 que de 2 jusqu'à n , et les valeurs négatives qu'il y en a moins. Voici une représentation des valeurs de x_n , jusqu'à $n = 10\,000$. Quand x_n repasse par 0, c'est que le nombre de 1 s'équilibre exactement avec le nombre de 2 dans la suite de Kolakoski. Cela se produit régulièrement.



Généralisations

La même idée, mais avec une suite ne comportant que des 1 et des 3 et commençant par (1, 3), conduit à la suite :
1, 3, 3, 3, 1, 1, 3, 3, 3, 1, 3, 3, 3, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 1, 3, 3,
3, 1, 3, 3, 3, 1, 1, 3, 3, 3, 1, 3, 1, 3, 3, 3, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 1, 3,
3, 3, 1, 1, ... (suite A064353).

Avec des 2 et des 3 et commençant par (2, 3) :

2, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 3, 3, 3, 2, 2, 2, 3, 3, 3,
2, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 2, 2, 2, 3, 3,
2, 2, 3, 3, ... (suite A071820).

Dessin fractal

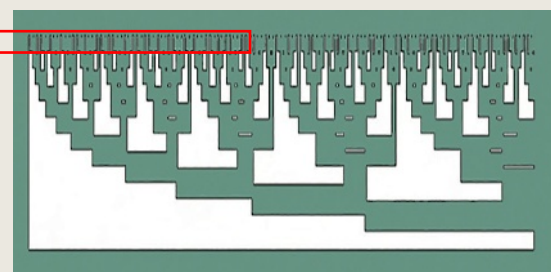
Le site Observable (<https://observablehq.com/@kelleevanevert/the-kolakoski-sequence>) propose une amusante construction géométrique fractale en exploitant la suite de Kolakoski débutant par (1, 2). On part de la suite ; on la décrit sur la deuxième ligne, ce qui redonne la première ligne en plus espacée ; puis on décrit la deuxième ligne sur la troisième, etc.

[illegible]

On conserve les 2 en les répétant pour qu'ils occupent l'espace nécessaire :

[illegible]

On délimite les formes créées :



On dispose la figure sur un disque en la déformant continûment :



Voici des exemples de ces extraordinaires suites doublement fractales:

Partant du nombre π , on tombe sur: (1, 2, 3, 4, 1, 5, 2, 6, 3, 7, 4, 1, 8, 5, 2, 9, 6, 3, 10, 7, 4, 1, 11, 8, 5, 2, 12, 9, 6, 3, 13, 10, 7, 4, 1, 14, 11, 8, 5, 2, 15, 12, 9, 6, 3, 16, 13, ...) (suite A023333).

Pour le nombre e des logarithmes: (1, 2, 3, 1, 4, 2, 5, 3, 6, 1, 4, 7, 2, 5, 8, 3, 6, 9, 1, 4, 7, 10, 2, 5, 8, 11, 3, 6, 9, 1, 12, 4, 7, 10, 2, 13, 5, 8, 11, 3, 14, 6, 9, 1, 12, 4, 15, 7, ...) (suite A023123).

Ces suites vérifient bien que:

(1) Enlever la première occurrence de chaque entier redonne la suite elle-même.

(2) Soustraire 1 à chaque terme puis retirer les 0 redonne aussi la suite elle-même.

On démontre que toutes ces suites ont en plus les propriétés suivantes, qui, d'ailleurs, les caractérisent:

- tout entier positif y figure au moins une fois;
- quand l'entier n apparaît, chacun des entiers positifs inférieurs à n est déjà apparu;
- entre deux occurrences successives de l'entier n , chaque entier compris entre 1 et n apparaît exactement une fois.

Puisqu'il y a une suite doublement fractale associée à chaque nombre réel, et que si les réels sont différents les signatures le sont aussi, la famille de suites doublement fractales est un ensemble infini non dénombrable, c'est-à-dire d'un infini «plus grand» que celui des nombres entiers. Bien évidemment, l'encyclopédie de Neil Sloane n'en a sélectionné que quelques-unes!

Terminons par une suite fractale bien différente de celles envisagées jusqu'à présent.

Découverte en 1939 par l'Américain Rufus Oldenburger, elle porte cependant le nom de suite de Kolakoski, car ce sont William Kolakoski et Necdet Üçoluk, aux États-Unis, qui ont attiré l'attention sur elle en 1966.

Cette suite est étrangement délicate et des dizaines d'articles mathématiques lui ont été consacrés, sans réussir à en livrer tous les mystères. En voici les 100 premiers termes : 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2.

Cette suite est fractale, car si vous la décrivez soigneusement en la lisant – « il y a 1 fois

Comme la suite de Prouhet, elle ne contient jamais trois fois de suite la même séquence.

Mais alors que pour la suite de Prouhet il est évident que la fréquence des 1 (ou des 0) est $1/2$, on ignore s'il y a autant de 1 que de 2 dans la suite de Kolakoski.

Le mathématicien tchèque Václav Chvátal a prouvé en 1993 que la densité des 1 est inférieure à 0,50084. Le résultat a été amélioré en 2014 par le mathématicien allemand Johan Nilsson avec 0,500080. Des calculs menés jusqu'au terme 10^{13} montrent que l'écart à $1/2$ diminue, comme cela se produirait pour une suite uniformément tirée au hasard de 1 et de 2, ce qui suggère fortement que les densités limites des 1 et des 2 sont réellement $1/2$. L'affirmation reste cependant une conjecture non démontrée.

Jon Perry a remarqué que si l'on prend des sous-suites de dix termes consécutifs dans la suite, alors les seules valeurs possibles pour le nombre de 1 sont 4, 5 et 6, mais cette affirmation reste aussi une conjecture. Michel Dekking indique que la suite est fractale dans un second sens, car elle est un point fixe de l'opérateur qui opère les substitutions suivantes sur les paquets de deux termes consécutifs: $11 \rightarrow 12$, $12 \rightarrow 122$, $21 \rightarrow 112$, $22 \rightarrow 1122$.

Le mathématicien amateur français Benoît Cloitre, mentionné à plusieurs reprises dans cette rubrique, a démontré d'intéressants résultats sur cette suite; ils permettent d'écrire des programmes simples pour la calculer. Il a proposé en particulier les formules suivantes qui définissent complètement la suite de Kolakoski, ici notée $k(n)$:

$$\begin{aligned} k(1) &= 1; k(2) = 2; \\ k(k(1) + k(2) + \dots + k(m)) &= (3 + (-1)^m)/2; \\ k(k(1) + k(2) + \dots + k(m) + 1) &= (3 - (-1)^m)/2. \end{aligned}$$

De nombreux auteurs se sont intéressés au calcul rapide de cette suite permettant de la connaître très loin. Reste qu'elle est sans doute la plus délicate et difficile suite fractale connue: elle a suscité une longue série de conjectures encore non résolues.

Prouhet ne se doutait pas que la création de sa suite aurait de tels prolongements. Comme dans la tragédie de Sophocle où le geste d'Antigone de jeter une poignée de terre sur la tombe de son frère entraîne toute une série d'événements imprévus, nos actions se détachent de nous pour mener une existence propre.

Si ces suites et ce type de mathématiques vous amusent, avec l'encyclopédie de Neil Sloane, vous avez de quoi vous occuper! Si vous voulez suivre et participer aux progrès du domaine, rejoignez la liste *Seafan*. ■

A. Della Corte, K. Koski
sequence : Links between
recurrence, symmetry and
limit density, prépublication,
22 septembre 2020 (<https://arxiv.org/abs/2002.08306>).

M. Amini et M. Jahangiri,
**A novel proof for Kimberling's
conjecture on doubly
fractal sequences,**
prépublication, 2016 ([https://
arxiv.org/pdf/1612.09481.pdf](https://arxiv.org/pdf/1612.09481.pdf)).

J. Nilsson, **Letter frequencies in the Kolakoski sequence**, *Acta Physica Polonica A*, 2014 (<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/126/a126z2p31.pdf>).

M. Drmota et al.,
**The Thue-Morse sequence
 along squares is normal**, 2013
 ([https://www.dmg.tuwien.ac.
 at/drmota/alongsquares.pdf](https://www.dmg.tuwien.ac.at/drmota/alongsquares.pdf)).

B. Adamczewski et Y. Bugeaud
**A short proof of the
transcendence of Thue-Morse
continued fractions,**
The Amer. Math. Monthly,
vol. 114(6), pp. 536-540, 2007.

C. Kimberling et J. E. Brown,
**Partial complements and
transposable dispersions,**
Journal of Integer Sequences,
vol. 7, article 04.1.6, 2004.

J.-P. Allouche et J. Shallit, **The ubiquitous Prouhet-Thue-Morse sequence**, dans G. Ding et al. (éd.), *Sequences and their Applications*, Springer, pp. 1-16 1999.

M. Dekking, **Transcendance du nombre de Thue-Morse**, *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris*, vol. 285, pp. 157-160, 1977.

L'AUTEUR



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

UN CLIMAT PHOTOGÉNIQUE

Quand une photographe rencontre une géochimiste, elles donnent à voir... les causes du réchauffement climatique.

« Les gaz sont-ils photogéniques ? » C'est la question qu'aurait pu poser Laure Winants à Catherine Jeandel lorsqu'elles se sont parlé la première fois. La première est photographe, basée à Bruxelles, la seconde est océanologue géochimiste au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales. La rencontre a eu lieu à l'occasion de la Résidence 1+2 « Photographie & Sciences », un programme culturel ancré à Toulouse proposant chaque année à trois photographes (un de renom et deux émergents) une résidence à caractère scientifique de deux mois. Le fruit de ces échanges fait l'objet d'une exposition, de

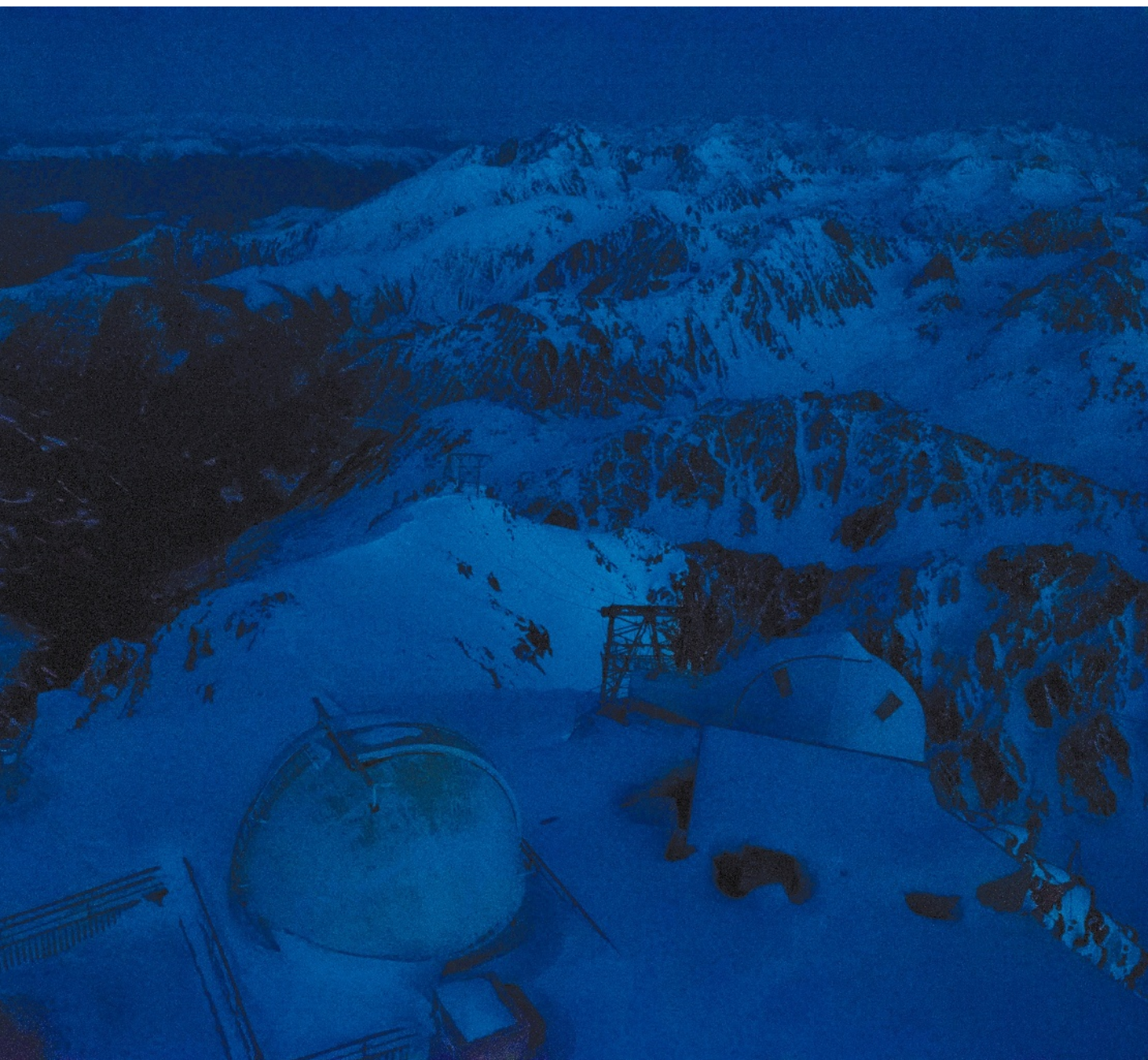
l'édition d'un coffret de trois ouvrages et d'un film de création portant sur les trois associations artiste-chercheur.

Le projet *Albédo*, de Laure Winants, explore plusieurs directions, mais avec pour point de mire l'idée de documenter les causes du changement climatique et de les rendre visibles. En effet, dioxyde de carbone, méthane ou autres à effet de serre sont inodores et incolores. Dans la littérature scientifique, ils n'apparaissent que sous la forme de courbes, d'histogrammes... « Et si on les photographiait ? » demanda la photographe. Soit, mais comment s'y prendre... Se sont ensuivies différentes expérimentations, imaginées et

Cette photographie du projet *Albédo*, de Laure Winants, a été « solarisée », c'est-à-dire exposée à la lumière (de la Lune) pendant son développement.

testées à l'observatoire du Pic du Midi, dans les Hautes-Pyrénées, pour traquer et révéler des indices du dérèglement climatique. Comment s'y est-elle prise ? Par exemple, certains tirages ont été réalisés avec du noir de carbone comme base pigmentaire des images. Pour d'autres, les pellicules photo ont été plongées dans des solutions riches en CO₂ ou en méthane, ces gaz ayant eu pour effet de consteller les images de petites taches, une façon de « donner à voir » l'action habituellement invisible de ces gaz. D'autres photographies encore ont résulté d'une solarisation, une technique chère à Man Ray consistant à exposer à la lumière les





images pendant le développement de façon à jouer sur les densités (*voir la photographie ci-dessus*). À chaque fois, il s'est agi de laisser l'environnement et ses composantes (rayonnement solaire, conditions météorologiques, gaz atmosphériques...) imprégner les images de façon à donner forme à l'insaisissable, et *in fine* «de faire sortir les données des laboratoires pour qu'elles prennent place dans le débat public», selon la photographe.

Les deux autres photographes, Grégoire Éloy et Myriem Karim ont également pris la direction des Pyrénées pour eux aussi rendre compte d'une nature qui change sous l'impact de

l'activité humaine. Chacun à sa manière, et sans concertation préalable, les trois artistes se sont emparé des liens entre l'humanité et la nature pour mieux les comprendre, appeler à les retisser et finalement répondre à la «crise de la sensibilité au vivant» sur laquelle alerte notamment le philosophe Baptiste Morizot. Et c'est heureux qu'art et science puissent ensemble aider à cette mission.

Comme l'indique Héloïse Conésa, conservatrice du patrimoine à la Bibliothèque nationale de France et marraine de l'édition 2021 (Catherine Jeandel en était la marraine d'honneur), la Résidence 1+2 «redonne une forme à des

savoirs qui peuvent nous échapper et crée des passerelles pour un partage du sensible». Il en sera sans doute ainsi en 2022, avec comme nouveau parrain Michel Poivert, président de l'association de préfiguration du Collège international de photographie du Grand Paris (CIPGP)! ■

Le site de la Résidence 1 + 2 : www.1plus2.fr/residences/residence-2021/

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

OXYGÈNE À GOGO

L'oxygène est abondant dans l'air ambiant, mais l'isoler pour en faire bénéficier des malades en insuffisance respiratoire n'est pas si simple.



Dans les hôpitaux, l'oxygène médical est stocké soit sous forme liquide dans des grands réservoirs isolants soit sous forme « gazeuse » dans des bouteilles à haute pression (200 bars). Il peut aussi être produit par des concentrateurs d'oxygène portatifs pour un usage à domicile ou mobile.

L'affaire a défrayé la chronique: pendant quelques mois, au printemps 2021, plusieurs pays confrontés à la pandémie de Covid-19 ont subi des pénuries d'oxygène médical, indispensable au traitement des malades en insuffisance respiratoire. Pourtant, il constitue un cinquième de l'air que nous respirons et, sous forme atomique, un tiers des constituants de l'eau (H_2O). La difficulté n'est donc pas d'en trouver, mais de le séparer et de l'isoler afin qu'il soit pur et utilisable. La physique nous propose des solutions variées et adaptées aux situations: pour les spationautes de la station spatiale internationale, les malades à l'hôpital ou les personnes à insuffisance respiratoire à leur domicile.

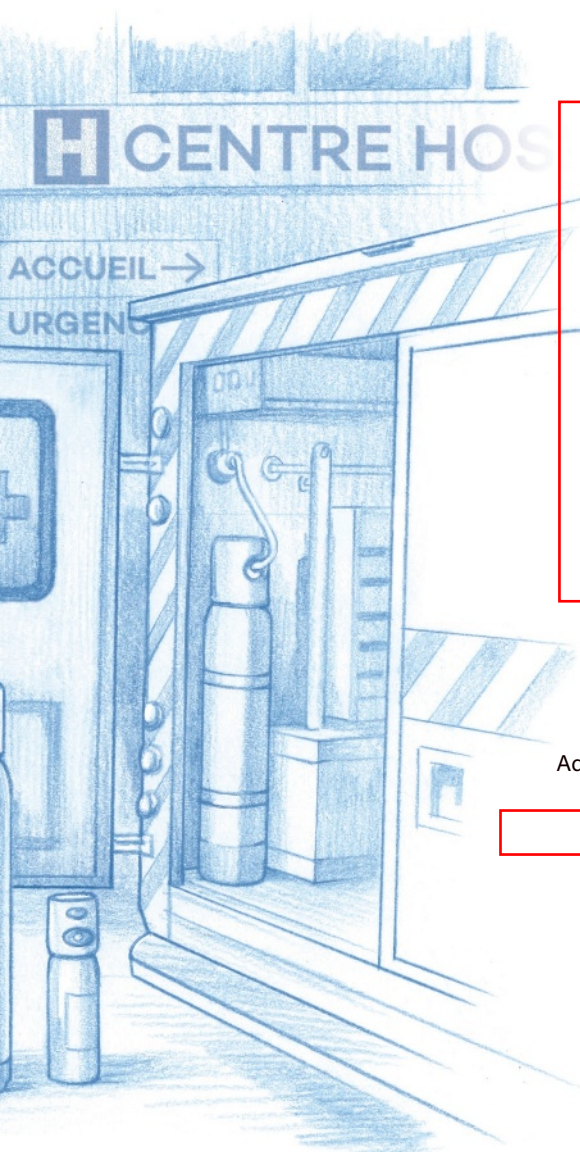
L'oxygène médical, comme celui que l'on achète en bouteilles dans le commerce, est obtenu à partir de l'air ambiant. Cet air est un mélange constitué de 21% de dioxygène O_2 et 78% de diazote N_2 , le 1% restant étant constitué de gaz rares (hélium, argon...) et de dioxyde de carbone.

DISTILLER DE L'AIR LIQUIDE

Le procédé utilisé pour en extraire l'oxygène est, dans son principe, on ne peut plus simple: il s'agit d'une distillation du type de celle pratiquée pour les eaux-de-vie, fondée sur des températures d'ébullition différentes des constituants du mélange. Plus facile à dire qu'à faire cependant, puisque qui dit distillation dit liquide, or l'air est gazeux. Il ne devient

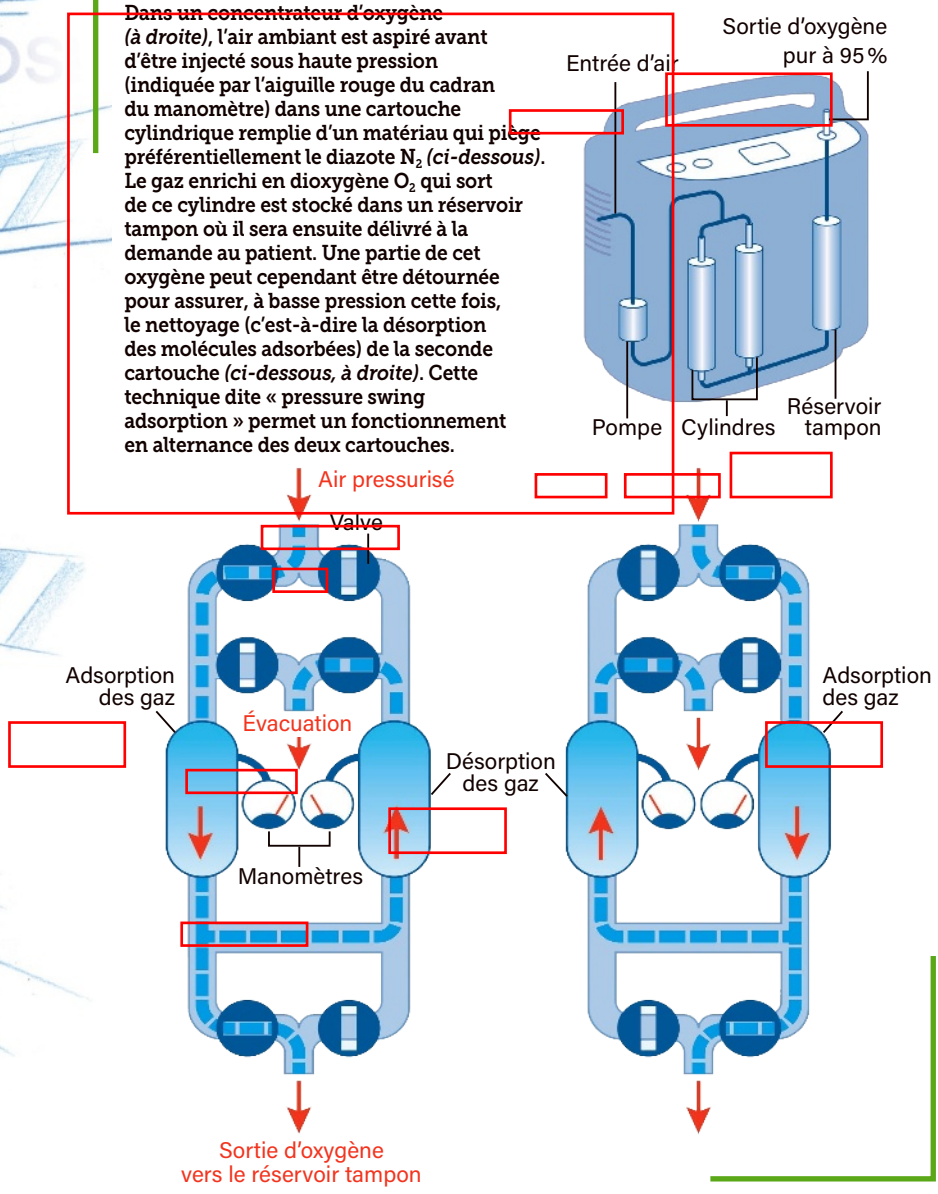
liquide qu'à des températures inférieures à $-141\text{ }^{\circ}\text{C}$ à haute pression et à $-192\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la pression atmosphérique. Il faut donc refroidir l'air ambiant à des températures extrêmement basses puis procéder à la distillation. Ensuite, une fois l' O_2 isolé, lorsque l'on revient à température ambiante, on peut comprimer fortement le gaz O_2 sans qu'il se liquéfie. Ainsi, les besoins quotidiens d'un être humain en O_2 – 700 grammes par jour – correspondent à 500 litres de gaz pur à pression atmosphérique, 2,5 litres à 200 bars, pression de conditionnement en bouteille et, finalement, 0,6 litre sous forme liquide à basse température.

Si l'on peut approvisionner quotidiennement un hôpital, qui peut stocker de



ANATOMIE D'UN CONCENTRATEUR

Dans un concentrateur d'oxygène (à droite), l'air ambiant est aspiré avant d'être injecté sous haute pression (indiquée par l'aiguille rouge du cadran du manomètre) dans une cartouche cylindrique remplie d'un matériau qui piège préférentiellement le diazote N_2 (ci-dessous). Le gaz enrichi en dioxygène O_2 qui sort de ce cylindre est stocké dans un réservoir tampon où il sera ensuite délivré à la demande au patient. Une partie de cet oxygène peut cependant être détournée pour assurer, à basse pression cette fois, le nettoyage (c'est-à-dire la désorption des molécules adsorbées) de la seconde cartouche (ci-dessous, à droite). Cette technique dite « pressure swing adsorption » permet un fonctionnement en alternance des deux cartouches.



l'oxygène en bouteilles sous pression ou en phase liquide dans des grands réservoirs, il est des situations où cela n'est pas envisageable: la station spatiale internationale par exemple! Chaque mois, en effet, les sept habitants de l'ISS consomment 100000 litres, soit 150 kilogrammes d' O_2 . La solution adoptée est donc de le produire sur place par électrolyse de l'eau (on décompose la molécule d'eau H_2O grâce à l'électricité). De l'ordre de 7 kWh (soit la combustion d'un demi-litre d'essence) sont nécessaires pour produire dans des conditions normales de température et de pression un mètre cube d' O_2 (soit 1,4 kg). Le coût est toutefois prohibitif pour une utilisation médicale, et si l'on s'intéresse

aujourd'hui à ce procédé, c'est non pas pour l' O_2 , mais pour produire du dihydrogène vert (sans émission de gaz carbonique quand l'électricité provient de sources renouvelables) et pour stocker l'énergie de sources intermittentes.

DISTINGUER LES MOLÉCULES D' O_2 ET DE N_2

Qu'en est-il pour les patients qui présentent des insuffisances respiratoires et ont besoin d'une oxygénothérapie à domicile? Plutôt que de livrer du gaz sous pression, la solution choisie aujourd'hui est d'utiliser des concentrateurs. Ces appareils aspirent l'air ambiant; le font passer à travers un matériau poreux qui retient le N_2 et

délivrent de l' O_2 à des concentrations au-delà de 90% à des débits de quelques litres par minute. Le principe de fonctionnement? La physisorption, c'est-à-dire l'adsorption réversible de molécules d'un gaz ou d'un liquide sur une surface solide. Ce piégeage temporaire des molécules par une surface est dû aux forces de nature électrique qui existent entre toutes les molécules. Ce piégeage est réversible, car les forces en jeu sont d'un ordre de grandeur plus faible que celles

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



de liaisons chimiques: la molécule a toujours la possibilité de quitter la surface à cause de l'agitation thermique. Comme l'intensité de ces forces dépend des molécules et des surfaces, l'adsorption privilégie certaines espèces au détriment d'autres.

Là encore, si le principe est simple, la pratique l'est moins, car du point de vue d'un physicien, les molécules d'O₂ et de N₂ se ressemblent beaucoup: elles ont des tailles très proches de l'ordre de 0,3 nanomètre, elles sont neutres, elles n'ont pas de dipôle électrique permanent (c'est-à-dire que le barycentre de leurs charges positives et celui de leurs charges négatives coïncident). Cependant, en raison des liaisons chimiques qui s'établissent pour créer la molécule, la distribution des nuages électroniques autour des noyaux est perturbée, conduisant à une concentration des charges électriques autour de l'axe qui relie les noyaux. Il en résulte ce que les physiciens appellent un «quadrupôle» électrique. Ce quadrupôle, qui rend les molécules sensibles à un champ électrique, est quatre fois plus élevé pour N₂ que pour O₂.

DES SURFACES TRÈS SÉLECTIVES

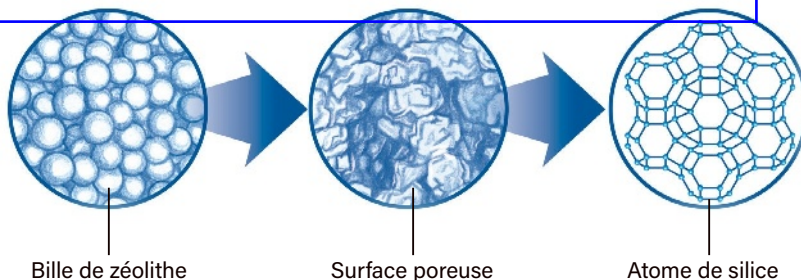
Nous tenons là une piste pour discriminer les deux molécules: avoir une surface avec des charges pour créer des champs électriques forts, susceptibles d'agir plus intensément sur le N₂; prendre un matériau poreux pour avoir le rapport surface/volume le plus élevé possible afin d'adsorber le maximum. Les zéolithes et leurs variantes sont justement dotées de ces propriétés: il s'agit de cristaux d'aluminosilicate agencés de façon à former des cavités régulières d'une taille d'environ 1 nm et interconnectées (voir la figure ci-dessus).

Dans le cas du JLOX-500, utilisé dans les concentrateurs portatifs, on obtient une sélectivité entre N₂ et O₂ de plus de 3, c'est-à-dire que le rapport des concentrations de N₂ et O₂ en surface est trois fois plus élevé que dans la phase gazeuse: on passe ainsi d'un rapport de concentrations N₂/O₂ de 4 dans l'air ambiant à 12 à la surface du matériau. On comprend donc que de l'air passant à travers une colonne de ce matériau s'appauvrit progressivement en N₂ et s'enrichit en O₂. Cette colonne doit bien sûr être suffisamment longue pour obtenir la concentration désirée en oxygène.

Toutefois, on sature aussi progressivement la surface de la zéolite par les molécules adsorbées, même si la capacité

LE SECRET DU TAMIS

Les tamis moléculaires, utilisés dans les concentrateurs d'oxygène, se présentent sous forme de billes d'environ un millimètre de diamètre (à gauche). À l'échelle du micromètre (au centre), ces billes se révèlent extrêmement poreuses: elles sont constituées d'un agencement désordonné de cristallites de zéolithes. Ces cristallites sont formées par la répétition régulière de cages nanométriques dont le squelette est en silice (à droite).



d'adsorption est très élevée: 8 litres de N₂ par kilogramme de JLOX 500, par exemple. C'est pourquoi, pour avoir un fonctionnement continu, les concentrateurs utilisent deux réservoirs cylindriques remplis de zéolithes. Pour une adsorption significative, il faut en effet faire passer de l'air sous pression dans les cylindres. Il suffit donc, grâce à un système de vannes, de mettre un réservoir sous pression (c'est lui qui donne l'air enrichi en O₂) et l'autre à basse pression: dans ce dernier, puisque l'adsorption est réversible, les molécules adsorbées, notamment de N₂, se détachent: la zéolithe est purgée et prête à adsorber de nouveau. On effectue ainsi des cycles d'adsorption/désorption en alternance. Pour un meilleur contrôle, l'air concentré en O₂ est stocké dans un réservoir tampon qui le délivre à la pression adéquate au patient.

N'oublions pas que l'air n'est pas un mélange binaire: si les gaz rares interagissent peu, tel n'est pas le cas du CO₂, certes peu concentré mais doté d'un quadrupôle électrique trois fois plus élevé que N₂ et surtout de la vapeur d'eau dont le dipôle électrique est à l'origine d'une forte adsorption. Aussi, pour améliorer et conserver les performances du concentrateur, il peut être judicieux de faire passer l'air dans un filtre pour se débarrasser des poussières, mais aussi dans un dessiccant pour assécher l'air, avant de l'envoyer dans les réservoirs de zéolithes. Toutes ces précautions prises, le patient bénéficie d'un oxygène de qualité qu'il peut respirer en toute quiétude. ■

BIBLIOGRAPHIE

I. Millot, **Production d'oxygène en situation d'exception. Vers une autonomie totale**, thèse de l'université de Lorraine en Sciences du vivant 2018.

OMS, **Spécifications techniques pour les concentrateurs d'oxygène**, OMS publications, 2015.

O. Talu et al., **Measurement and analysis of oxygen/nitrogen/ 5A-zeolite adsorption equilibria for air separation**, Gas Separation & Purification, vol. 10(3), pp. 149-159, 1996.

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 113 (nov 21)
réf. DO113



N° 112 (août 21)
réf. DO112



N° 111 (mai 21)
réf. DO111



N° 110 (fév. 21)
réf. DO110



N° 109 (nov. 20)
réf. DO109



N° 108 (sept. 20)
réf. DO108



N° 107 (mai 20)
réf. DO107



N° 106 (févr. 20)
réf. DO106



N° 105 (nov. 19)
réf. DO105



N° 104 (juil. 19)
réf. DO104



N° 103 (avr. 19)
réf. DO103



N° 102 (fév. 19)
réf. DO102

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR [BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR](https://boutique.groupepourlascience.fr)

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève– 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

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

1^{re} réf. x 10,40 € = €
 2^e réf. x 10,40 € = €
 3^e réf. x 10,40 € = €
 4^e réf. x 10,40 € = €
 5^e réf. x 10,40 € = €
 6^e réf. x 10,40 € = €

TOTAL À RÉGLER €

Offre valable jusqu'au 21/12/22 en France Métropolitaine.
Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

en nous retournant ce bulletin complété

☐ Par carte bancaire

en nous retournant ce bulletin complété

☐ Par carte bancaire

en nous retournant ce bulletin complété

☐ Par carte bancaire

en nous retournant ce bulletin complété

☐ Par carte bancaire

en nous retournant ce bulletin complété

☐ Par carte bancaire

en nous retournant ce bulletin complété

☐ Par carte bancaire

en nous retournant ce bulletin complété

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

L'AUTEUR



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

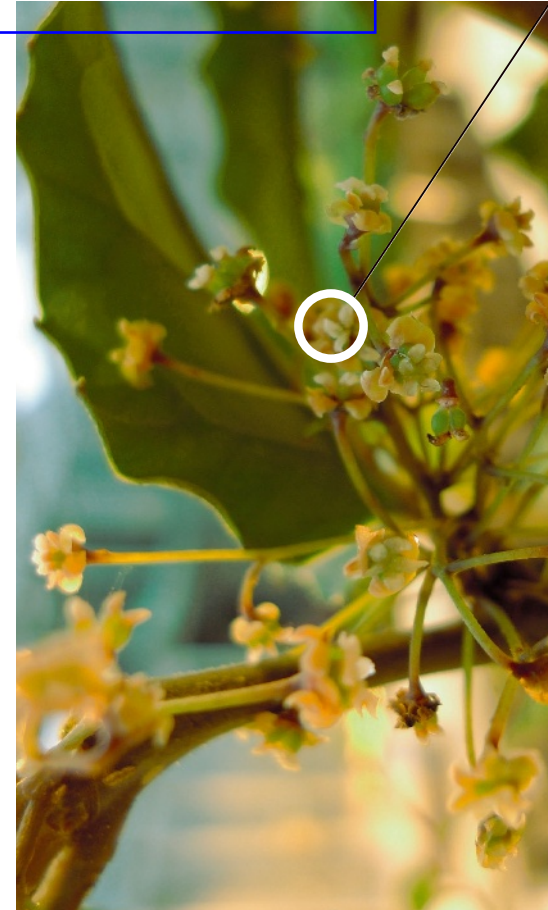
À LA RECHERCHE DE LA FLEUR ANCESTRALE

À quoi ressemblait l'ancêtre des plantes à fleurs ?
Une plante néo-calédonienne a joué un rôle clé dans
la reconstitution de son portrait-robot... en éclairant
au passage l'évolution de la sexualité des plantes.

Dans leur très grande majorité, les plantes vertes qui peuplent nos continents sont des plantes à fleurs, ou angiospermes. Depuis le ^{xvi}^e siècle, les botanistes se sont attelés à les décrire et les classer. Une étape majeure a été franchie en 1774, quand Antoine Laurent de Jussieu a proposé de distinguer monocotylédones et dicotylédones, suivant le nombre de feuilles embryonnaires (ou cotylédons) que présente la graine. Mais, très vite, Jussieu et ses élèves ont perçu une difficulté de taille. Autant on savait identifier les familles d'après la structure de la fleur, autant les répartir de façon cohérente au sein des mono- et dicotylédones était une vraie gageure.

Pendant longtemps, les meilleurs botanistes s'y sont cassé les dents. À la fin du ^{xx}^e siècle, certains d'entre eux ont compris que seule la phylogénie moléculaire – la construction d'arbres de parenté à partir de données génétiques – résoudrait le problème. Devant l'ampleur de la tâche, ils ont créé l'Angiosperm Phylogeny Group, qui a périodiquement publié des travaux de plus en plus précis. Le groupe a ainsi confirmé l'existence des monocotylédones et corrigé les dicotylédones en restreignant la branche, devenue les « eudicotylédones », dont les pentapétales rassemblent les familles majeures. Exit les magnoliales, par exemple, qui se retrouvent à la base de l'arbre.

Endémique de la Nouvelle-Calédonie, cet arbuste est répandu dans les sous-bois de la forêt dense et humide qui recouvre la partie centrale de la Grande Terre. Cette plante est dioïque : chaque arbuste produit soit des fleurs mâles (à gauche), soit des fleurs femelles (à droite). Il arrive qu'un même arbuste passe d'une morphologie reproductrice à l'autre, un phénomène encore mal compris.



Hervé Le Guyader
a récemment publié :
**Ma galerie
de l'évolution**
(Le Pommier, 2021).

Les fleurs mâles ont un diamètre d'environ 4 à 5 millimètres et portent 6 à 15 tépales (pièces de l'enveloppe florale), ainsi que 10 à 20 étamines disposés en spirale.

Les fleurs femelles ont un diamètre d'environ 3 à 4 millimètres et portent 7 ou 8 tépales, ainsi que 4 à 8 carpelles (organes contenant les ovules) libres disposés en spirale.

EN CHIFFRES

22 899

Le génome de l'ancêtre commun des plantes à fleurs comportait au moins 22 899 gènes répartis sur 15 chromosomes. L'agencement de 1 175 de ces gènes sur les chromosomes s'est retrouvé conservé parmi les plantes à fleurs actuelles.

318 965

Actuellement, on a répertorié dans le monde 318 965 espèces de plantes à fleurs. Parmi elles, plus de 15 000 sont dioïques, réparties dans 43 % des familles.

214
MILLIONS

L'origine des angiospermes (les plantes à fleurs) remonte au Trias supérieur, il y a 214 millions d'années. Une importante diversification s'est produite au Crétacé, il y a entre 125 et 72 millions d'années.

ancestrale. Mais faut-il considérer le génome ou la morphologie? Les deux, bien sûr! Ainsi, en 2017, l'équipe de Jérôme Salse, à l'Inrae de Clermont-Ferrand, a proposé la reconstruction du génome de l'ancêtre commun le plus récent des plantes à fleurs.

UN GÉNOME À 15 CHROMOSOMES

Chez les monocotylédones, on connaît le génome de l'ananas, du palmier à huile et de plusieurs poacées (anciennement graminées) – riz, orge, blé, seigle, maïs... Chez les eudicotylédones, les génomes séquencés sont ceux d'espèces variées: soja, pommier, caféier, fraisier, eucalyptus, peuplier, arabette, clémentinier, pêcher, cacaoier. Enfin, le génome d'*A. trichopoda* est lui aussi disponible. La reconstruction est difficile, car de nombreuses polyploïdisations (le génome comporte au moins 3 lots de chromosomes) ont eu lieu. Pas à pas, le groupe de Jérôme Salse a reconstitué les caryotypes ancestraux des poacées (7 chromosomes), des monocotylédones (5 chromosomes), des eudicotylédones (7 chromosomes), enfin du plus récent ancêtre des angiospermes (15 chromosomes), avec un répertoire de plus de 20 000 gènes ancestraux.

Grâce à ces travaux, l'équipe a daté l'origine des angiospermes dans le Trias, il y a 214 millions d'années, en coïncidence avec celle des insectes pollinisateurs, comme les diptères (mouches et consorts) et les hyménoptères (abeilles, bourdons...),

Avec cette nouvelle classification, une espèce est tout à coup devenue une vedette: *Amborella trichopoda*. Cette plante endémique de la Nouvelle-Calédonie représente le premier taxon à émerger – un taxon qui est donc le groupe frère de toutes les autres plantes à fleurs. Dès lors, il était tentant d'imaginer que l'ancêtre commun des plantes à fleurs ressemblait à *Amborella*. Mais l'enquête menée depuis quelques années sur cet ancêtre commun montre que tout n'est pas si simple.

Connaissant les caractères anatomiques de toutes les espèces répertoriées et les génomes de quelques-unes, judicieusement placées dans la classification, on peut espérer inférer cette plante



Amborella trichopoda

Hauteur de l'arbuste: de 2 à 6 m

dont on trouve des fossiles à cette époque. Une coévolution a dû accélérer les diversifications, elles-mêmes favorisées par la forte plasticité génomique des plantes à fleurs dont témoignent la réduction du nombre de leurs chromosomes et la polyploïdisation.

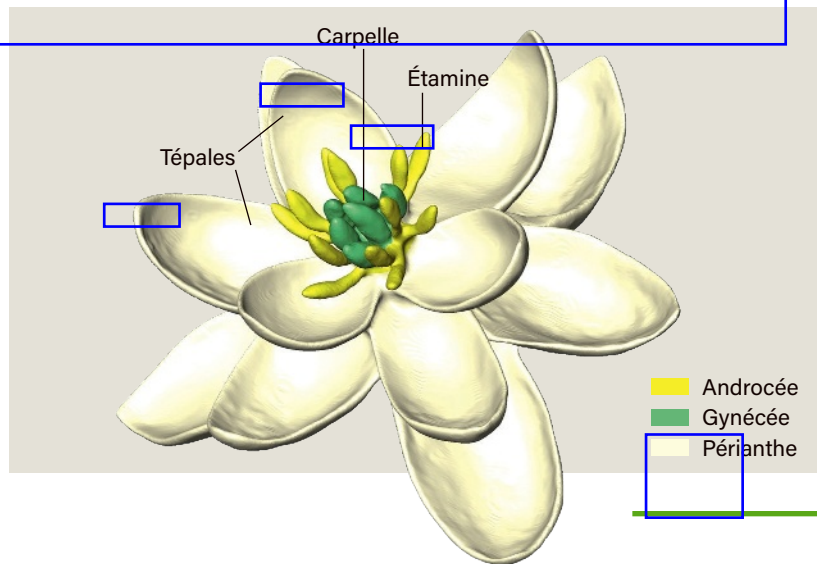
Cependant, rien ne transparait sur la morphologie de la fleur ancestrale. Or, parallèlement, autour d'Hervé Sauquet, de l'université Paris-Sud, et de Jürg Schönenberger, de l'université de Vienne, en Autriche, une équipe internationale est partie à la recherche de cet ancêtre. Pour ce faire, ils ont utilisé la distribution des traits floraux dans la phylogénie pour inférer la structure de la plante. Une approche novatrice: alors qu'auparavant, les caractères anatomiques servaient à réaliser les classifications, maintenant on suit leur évolution sur une phylogénie moléculaire. C'est une démarche plus souple et plus riche, mais qui nécessite le maniement d'une vaste base de données, car l'échantillonnage porte sur 98% des ordres, 86% des familles, avec une calibration de 136 fossiles. Les états ancestraux de 27 traits floraux ont ainsi été inférés, et le portrait-robot de la fleur ancestrale apparaît d'une grande précision. C'est une fleur bisexuée à symétrie radiale qui présente une combinaison de caractères qu'aucune espèce actuelle n'arbore, même s'il existe des similarités avec des espèces éteintes (voir l'encadré ci-contre).

UN TAXON TRANSGENRE

Dans ces deux recherches, les données sur *A. trichopoda* ont été essentielles. Or c'est une plante dioïque, c'est-à-dire avec des fleurs exclusivement mâles ou femelles sur des plants différents. Comment se fait-il que l'espèce représentative du premier taxon à émerger chez les angiospermes n'ait pas des fleurs bisexuées? Pour répondre, Gabriel Marais, de l'université de Lyon 1, James Leebens-Mack, de l'université de Géorgie, aux États-Unis, et leurs collègues ont étudié les séquences d'ADN ou d'ARN de plants d'*A. trichopoda* échantillonnés dans la nature et de populations issues de croisements en laboratoire. Comme on connaît son génome, l'équipe a recherché des régions qui ne portaient pas de traces de recombinaison: les arbustes portant des fleurs exclusivement mâles ou femelles, il était fort probable qu'au moins des portions des chromosomes sexuels ne se recombinaient pas lors de la fécondation, comme les chromosomes X et Y des mammifères.

PORTRAIT DE LA PREMIÈRE FLEUR

C'est une fleur bisexuée, à symétrie radiale, dont tous les organes floraux sont libres les uns par rapport aux autres. Le périanthe (ensemble des enveloppes protégeant les organes reproducteurs), non différencié en sépales et pétales, est constitué de plus de 10 tépales; l'androcée (appareil reproducteur mâle) compte plus de 10 étamines à anthères introrses (le pollen est libéré vers l'intérieur de la fleur), et le gynécée (appareil reproducteur femelle) plus de 5 carpelles, situés au-dessus des étamines et distribués en spirale. Le périanthe et l'androcée comptent au moins 4 verticilles (groupes de tépales ou étamines insérés au même niveau sur l'axe de la fleur) de 3 organes. S'il existe des similarités avec des espèces éteintes, aucune espèce actuelle ne présente une telle combinaison de caractères. Bien sûr, toutes les fleurs actuelles sont dérivées sur certains aspects – y compris *A. trichopoda*. Au fil de l'évolution, le nombre de verticilles du périanthe et de l'androcée s'est réduit, jusqu'à 2 verticilles pour le périanthe et 1 ou 2 pour l'androcée.



Les chercheurs ont découvert que le système sexuel d'*A. trichopoda* est de type ZW, comme chez les oiseaux: les mâles ont deux chromosomes sexuels identiques (ZZ), contrairement aux femelles (ZW), par opposition aux mammifères, de génotype femelle XX et de génotype mâle XY. Surtout, sur les 59 millions de paires de bases (59 Mb) du chromosome sexuel de la plante, ils ont trouvé une région de 4 Mb qui ne se recombine pas. Or il est possible de dater la fin de la recombinaison de cette région de 4 Mb: elle remonte à environ 16,5 millions d'années, c'est-à-dire bien après l'apparition de la lignée d'*A. trichopoda*, vieille d'au moins 130 millions d'années. Ainsi, cette plante étonnante présentait primitivement une fleur bisexuée, puis est devenue dioïque.

Il est intuitif d'imaginer que, dans une phylogénie, le premier taxon à émerger porte une majorité de caractères ancestraux. Mais c'est oublier que lui aussi évolue indépendamment des autres. Ainsi, alors que la branche du chimpanzé est égale à la nôtre, notre ancêtre commun ne ressemble ni à l'un ni à l'autre. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Käfer et al., **A derived ZW chromosome system in *Amborella trichopoda*, representing the sister lineage to all other extant flowering plants**, *New Phytol.*, en ligne le 3 août 2021.

D. Silvestro et al., **Fossil data supports a pre-Cretaceous origin of flowering plants**, *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 5, pp. 449-457, 2021.

H. Sauquet et al., **The ancestral flower of angiosperms and its early diversification**, *Nat. Commun.*, vol. 8, article 16 047, 2017.

F. Murat et al., **Reconstructing the genome of the most recent common ancestor of flowering plants**, *Nat. Genet.*, vol. 49(4), pp. 490-496, 2017.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À

Pour la Science

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 pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

79€

Au lieu de 114,40€

99€

Au lieu de 174,40€

29%

de réduction*

31%

de réduction*

43%

de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG22STD



OUI, je m'abonne pour 1 an à

Pour la Science

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 en nous retournant ce bulletin d'abonnement complété



Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE PAPIER

• 12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,80€

☐ FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

79€

Au lieu de 114,40€

☐ FORMULE INTÉGRALE

• 12 n° du magazine (papier et numérique)
• 4 Hors-série (papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 174,40€

* 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 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>. 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@pouirlascience.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 5814 Z

L'AUTEUR



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

COMMENT FAIRE BRILLER LE CHOCOLAT

L'ajout de petites quantités d'émulsifiants facilite la cristallisation optimale du chocolat... dans les conditions d'un laboratoire de chercheurs, mais pas encore de chocolatiers.

Le chocolat... Cette merveilleuse matière doit l'essentiel de ses vertus gastronomiques au beurre de cacao, un corps gras composé de « triglycérides », dont les molécules sont constituées de trois parties d'acides gras reliées à une partie de glycérol. Les caractéristiques physiques du chocolat varient selon le type des cristaux qui se forment lorsqu'on le laisse refroidir : après l'avoir fait fondre, ce qui advient à une température qui dépend de la longueur des acides gras et du nombre de doubles liaisons entre carbones voisins qu'ils contiennent, c'est-à-dire de leur « insaturation ».

Toutefois les chocolatiers savent bien que pour obtenir un chocolat lisse, brillant et velouté, un « tempérage » est nécessaire : après avoir fait fondre une masse de cacao, ils réduisent sa température à 28 °C, avant de la faire remonter à 32 °C, avant de refroidir jusqu'à la température ambiante. Ils obtiennent ainsi des cristaux où les molécules de triglycérides sont arrangées d'une façon particulière, la « forme V », garante d'un bon chocolat. Des composés mineurs du beurre de cacao émulsifient la préparation, puis soit servent de germes de la cristallisation des triglycérides soit, au contraire, entravent le phénomène. Ces molécules se disposent à la surface des cristaux, plutôt que dans la masse fondue de triglycérides.

Ces émulsifiants sont par exemple des monoglycérides (un seul acide gras est associé au glycérol) ou des diglycérides, ou bien des acides gras libres, ou encore des phospholipides (un diglycéride associé à un acide phosphorique), comme il s'en trouve dans les membranes des cellules, notamment celles du cacao.

Le chocolat des orangettes cristallise en refroidissant. Peut-on rendre son aspect brillant et velouté ?

Dans les années 1960, des chimistes canadiens avaient montré que les monoglycérides ont peu d'effets sur la cristallisation, tandis que l'effet des acides gras libres dépend de leur concentration.

Alejandro Marangoni et Saeed Ghazani, de l'université de Guelph, au Canada, ont relancé l'étude de la cristallisation du chocolat : ils ont étudié l'action de composés variés en les ajoutant un à un à des masses de triglycérides purifiés. Pour suivre de près la cristallisation, les chercheurs ont employé la calorimétrie, la diffraction aux rayons X (pour déterminer la maille cristalline), la réflectométrie (pour quantifier le brillant) et la tomographie synchrotron (pour étudier en 3D la répartition des cristaux dans l'échantillon). Cette mobilisation de ressources a montré que l'ajout de 0,1% de phosphatidylcholines et de phosphatidyléthanolamines saturées (deux phospholipides) à du beurre de cacao fondu, suivi par un refroidissement rapide jusqu'à 20 °C, accélère la cristallisation, stabilise la formation des cristaux recherchés et confère au chocolat une microstructure, une brillance et une dureté semblables à celles des chocolats bien tempérés. Ainsi, l'ajout de ces émulsifiants évite le tempérage... dans les conditions contrôlées d'un laboratoire de recherche, qui plus est avec du beurre de cacao préalablement purifié.



Nous sommes loin d'un atelier d'artisan chocolatier ! Quant à contrôler la quantité de chaque composé mineur, il y a là une autre difficulté, mais ne faut-il pas des explorations scientifiques avant d'arriver à des innovations ? Et la perspective d'un chocolat perfectionné a de quoi faire saliver ! ■

LA RECETTE

- 1 Mettre des segments d'écorces d'orange dans de l'eau froide, et porter à ébullition.
- 2 Jeter l'eau, remettre de l'eau froide, et porter à nouveau à ébullition. Répéter l'opération une fois de plus.
- 3 Puis confire : ajouter de l'eau saturée en sucre, et cuire les segments « blanchis » pendant une demi-journée.
- 4 Poser les segments confits sur la plaque d'un four, et chauffer pendant une heure et demie à 100 °C pour sécher leur surface.
- 5 Fondre du chocolat. Puis immerger les segments un à un dans le chocolat fondu avant de les disposer sur un papier sulfurisé. Mettre au froid.
- 6 Préparer un sirop à l'aide de jus d'orange et de sucre. Puis y dissoudre de la gélatine (environ 5 % en masse).
- 7 Quand le sirop gélatineux est à la limite de la prise en gel, y tremper les segments. Ils auront ainsi une surface brillante... sans tempérage.

ABONNEZ-VOUS À

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

Pour la
Science

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 pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

29 %
de réduction *

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

PAG22STD

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

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

☐ FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

☐ FORMULE
INTÉGRALE

• 12 n° du magazine (papier et numérique)
• 4 Hors-série (papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2/ Mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Tél. :

Courriel :@.....
(indispensable pour la formule intégrale)

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

3/ Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(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)

* 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 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €. En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>.

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@pouirlascience.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 5814 Z

4/ MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

p.80

SUITES HÉSITANTES

La plus simple de ces suites hésitantes est 1, 1, 2, 1, 2, 3, 1, 2, 3, 4... Elle est obtenue en comptant jusqu'à 1 puis en repartant de 1 jusqu'à 2, puis en repartant de 1 jusqu'à 3, etc. Cette suite est fractale, car elle s'autocontient. Si on supprime la première occurrence de chaque entier, on retrouve la suite. Elle est même doublement fractale : en soustrayant une unité à chaque terme et en supprimant les zéros, on retrouve encore la suite.

p.88

700 GRAMMES

Ce sont les besoins quotidiens en dioxygène d'un être humain, soit 500 litres de gaz pur à la pression atmosphérique. À 200 bars, ce volume se réduit à 2,5 litres.

p.40

Les liens entre l'infection au SARS-CoV-2 et l'auto-immunité existent, mais ils n'expliquent pas à eux seuls les formes sévères

FRÉDÉRIC RIEUX-LAUCAT immunologue à l'institut Imagine, à Paris

p.56

40%

En France métropolitaine, près de 40% des espèces de poissons d'eau douce sont menacées ou quasi menacées d'extinction. Parmi elles figurent des espèces endémiques dont l'aire de répartition est très restreinte, telles que le chabot du Lez et la loche léopard.

p.64

PÉRIDOTITE

Cette roche mantellique contient en grande quantité de l'olivine et du pyroxène, des minéraux riches en magnésium et en calcium. Le dioxyde de carbone dissous dans l'eau qui s'infiltre dans la péridotite réagit avec la roche et forme des veines de carbonates. Ce phénomène pourrait être exploité pour piéger ce gaz à effet de serre.

p.46

NAINES BRUNES Y

Ces astres sont remarquables par leur température très basse comprise entre -20°C et 180°C . Ils ont accumulé de la chaleur pendant leur formation, et n'ont cessé depuis de se refroidir. Contrairement aux étoiles, ils ne produisent pas d'énergie par la fusion de l'hydrogène.

p.13

160°C

Lorsqu'une goutte d'eau tombe sur une plaque très chaude, elle se met à danser en se déplaçant rapidement. En effet, une partie de la goutte se transforme en vapeur et crée un coussin sur lequel lévite la goutte. C'est l'effet Leidenfrost. Il ne se manifeste pour l'eau qu'à partir de 160°C .

Vaincre[®]

LE CANCER

NOUVELLES RECHERCHES BIOMEDICALES

**PRENONS UNE LONGUEUR D'AVANCE SUR LE CANCER
QUI RESTE LA 1^{ÈRE} CAUSE DE MORTALITÉ PRÉMATURÉE EN FRANCE**



Credit photo : @michelguyen

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

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

AIDEZ NOS CHERCHEURS À SAUVER VOS VIES

VAINCRE LE CANCER - NRB

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

www.vaincrelecancer-nrb.org
contact@vaincrelecancer-nrb.org

Rejoignez le combat, donnez sur
vaincrelecancer-nrb.org

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

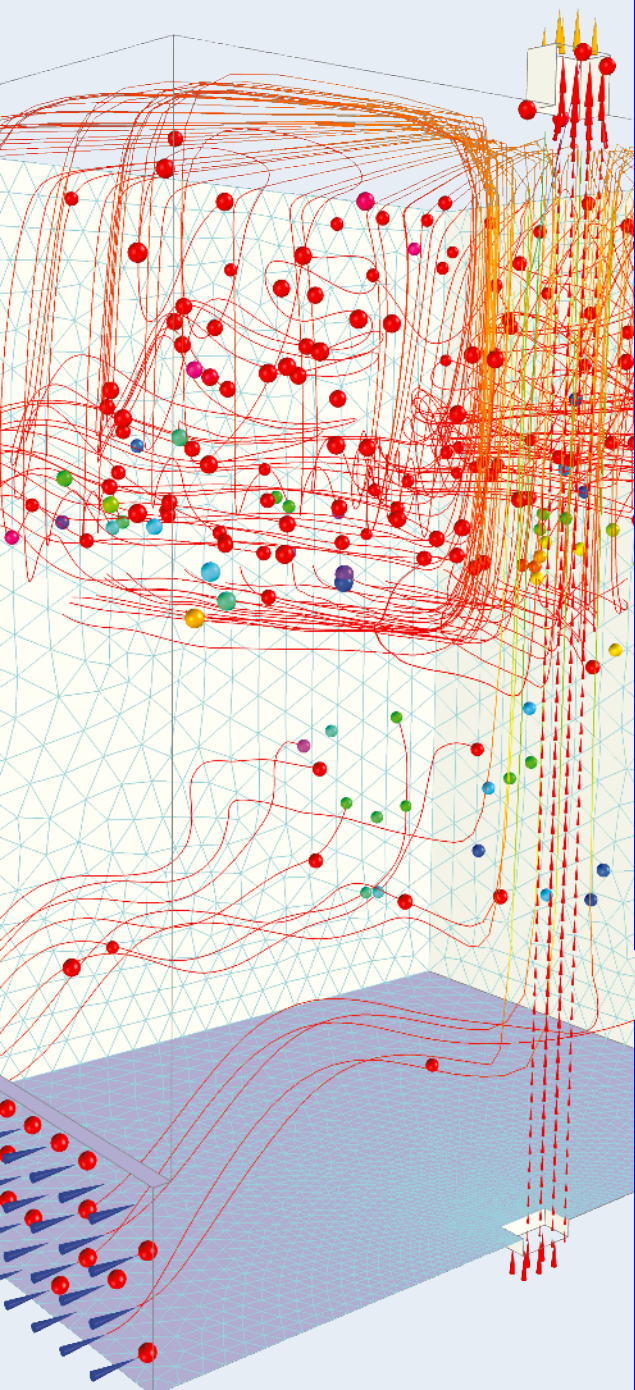
SERVICE MÈCENAT

01 80 91 94 60

Coût d'un appel local

RETROUVEZ-NOUS SUR





ÉTUDE DE CAS

Prévenir les flambées épidémiques grâce à la modélisation mathématique et à la simulation

L'utilisation des mathématiques pour analyser la propagation des épidémies n'est pas une idée nouvelle. L'un des premiers modèles mathématiques d'épidémiologie remonte à 1760 et a été présenté par Daniel Bernoulli pour l'étude du taux de mortalité de la variole. Aujourd'hui, les chercheurs en médecine et les responsables de la santé publique continuent à utiliser la modélisation mathématique et la simulation pour prévenir et contrôler les épidémies dans le monde moderne.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/epidemiology-simulation



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.