

Javier Garcia Martinez

Chimiste, président de l'UICPA

REPENSER LA CHIMIE POUR UN MONDE DURABLE

p.6



Sylvia Serfaty

Mathématicienne, université de New York

DÉVOILER LA RICHESSE DES ÉQUATIONS AUX DÉRIVÉES PARTIELLES

p.120

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE - AVRIL / JUIN 2023 - 9€90

Âges de feu, âges de glace

PALÉOCLIMATS

- L'astronomie modifie le climat
- La quête des archives glaciaires
- Le jeu des rétroactions
- Climat et extinctions
- Les moussons du passé
- Modèles modernes et données anciennes

p.16

Physique
CELLULES SOLAIRES RÉGÉNÉRANTES
p.100

Santé
ZOONOSES ET BIODIVERSITÉ
p.114

Informatique
HORODATAGE NUMÉRIQUE
p.80

Neurosciences
PROUST ET LE RAPPEL IMPLICITE
p.72

Science et fiction
LES TROUS NOIRS SUR GRAND ÉCRAN
p.140

LINKINNOV

Chercheurs, académiques, doctorants, posts-doctorants, **votre expertise a de la valeur.**



Réalisez facilement des missions d'expertise scientifique pour le compte d'entreprises innovantes, sans les contraintes de l'auto-entreprise.

Qu'est-ce que Linkinnov ?

Projet soutenu et financé par l'État, Linkinnov est un réseau social qui stimule la **connexion** entre les entreprises et les acteurs de l'enseignement supérieur et de la recherche. Objectif : encourager les collaborations, développer l'innovation et contribuer à répondre aux **défis sociétaux et environnementaux**.

Linkinnov offre aux entreprises et aux chercheurs académiques la possibilité de **se trouver**, d'**échanger** via un fil d'actualités, un chat ou des **groupes thématiques**, mais également de **contractualiser** pour des missions d'expertise scientifique, grâce à un modèle unique de "Match & Contract".

Mission d'expertise : pourquoi ? pour qui ?

Les chercheurs académiques possèdent, quelque soit leur domaine, une somme de connaissances indispensables aux entreprises pour mener à bien leurs **programmes d'innovation**. Il est encore compliqué pour ces entreprises d'identifier les compétences nécessaires et de contractualiser simplement et rapidement avec l'expert.

Chercheurs, Linkinnov vous offre un service sur-mesure pour faciliter votre implication dans la résolution de défis technologiques. Incrivez-vous en que **« Linkinnov Expert »,** et réalisez des expertises parmi ces catégories :

CONSULTANCE EN STRATÉGIE R&D
VEILLE TECHNO & ÉTAT DE L'ART
EXPERT MEDIA
ÉTUDE TECHIQUE
DUE DILIGENCE TECHIQUE
CONFÉRENCIER
EXPERTISE SCIENTIFIQUE DU CIR
FORMATION SPÉCIALISÉE
ÉTUDE SOCIOLOGIQUE & LINGUISTIQUE

Avantages du modèle Linkinnov

SIMPLE & RAPIDE

Épargnez-vous les contraintes du statut d'auto-entrepreneur

Un gain de temps considérable. Fini les démarches administratives, juridiques et comptables de l'auto-entreprise.

SÉCURISÉ

Bénéficiez d'un cadre légal, sécurisé et protecteur

Un cadre légal compatible avec le statut du chercheur et enseignant chercheur grâce à un CDD et une protection assurantielle sur-mesure.

RÉMUNÉRATEUR

Disposez d'un revenu personnel complémentaire

Des revenus additionnels dès la fin de la mission ainsi qu'une cotisation retraite complémentaire.

MAIS ENCORE...

Déclenchez des opportunités pour votre labo

Au délà de votre expertise, devenez ambassadeur de l'excellence scientifique de votre labo et susciter des contrats industriels.

INVESTIR L'AVENIR
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION
MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE DES FINANCES ET DE LA RELANCE
bpifrance
anr agence nationale de la recherche

www.linkinnov.com
connect@linkinnov.com
+33 1 76 50 02 20

Embrasser la complexité

Il y a 250 millions d'années environ, la Terre subissait des températures infernales de 50 à 60 °C dans les régions équatoriales continentales, et proches de 40 °C dans les océans. Conséquence de ce climat apocalyptique, la plus importante disparition d'espèces que la Terre ait connue, l'extinction permienne : 90 % des espèces marines et 70 % des vertébrés terrestres ont été rayés de la carte, sans compter les insectes et les plantes… Notre planète a aussi connu des épisodes très froids. À plusieurs reprises, au cours des 4,6 milliards d'années depuis sa formation, la Terre a été presque entièrement recouverte de glace, ce que les paléoclimatologues nomment la « Terre boule de neige ». Dans l'histoire plus récente, celle du dernier million d'années, le globe est entré dans une période plus fraîche, avec des alternances de périodes glaciaires où l'extension des calottes polaires et des glaciers est maximale, et des épisodes plus cléments.

Comment peut-on affirmer que les climats de la Terre ont été sujets à de telles variations ? D'une part, parce que l'on dispose désormais d'une multitude d'archives, qu'il s'agisse de sédiments marins, de bulles de gaz dans les carottes de glace, d'enregistrements dans les coraux ou dans les coquillages. D'autre part, car cette science naturaliste qu'est la paléoclimatologie s'est enrichie de l'outil numérique, capable de reconstituer les climats anciens avec une bonne précision et gage de fiabilité des simulations climatiques utilisées pour prédire le futur. Toutes ces études sur les climats d'hier et d'aujourd'hui nous ont appris que le changement actuel – dû aux émissions accrues des gaz à effet de serre – mène à une planète plus chaude, voire beaucoup plus chaude selon les scénarios économiques retenus qui sont, eux, difficiles à prévoir.



BERNARD MARTINEZ

Philippe Pajot
RÉDACTEUR
EN CHEF

Doit-on s'en inquiéter, puisque ces états chauds ont eu des équivalents dans le passé lointain ? Oui, car la vitesse du changement est, elle, sans précédent : le réchauffement qui s'annonce en un siècle s'est déjà produit, mais sur des périodes de 10 000 ans, expliquent les paléoclimatologues. C'est pour cela que les paléosciences décrites dans notre dossier sont encore et toujours primordiales : elles permettent de tester des conditions de bascule, d'étudier les réponses à certaines perturbations climatiques pour comprendre et aider à l'adaptation des écosystèmes, et à la nôtre, à nous, humains.

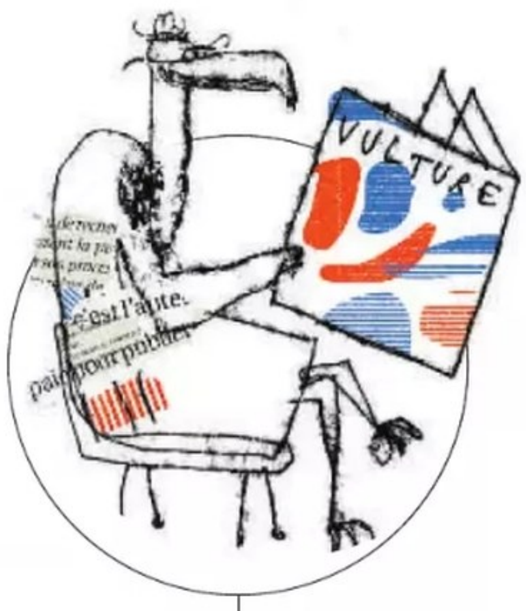
Parmi les évolutions en lien avec notre santé, on constate la forte augmentation des zoonoses, ces maladies animales qui se transmettent à la population humaine. « *On en compte quatre fois plus aujourd'hui qu'il y a quarante ans* », détaillent Sylvie Briand et Benjamin Roche (lire p. 114). L'activité humaine est en cause : émissions de gaz à effet de serre d'un côté, recul de la biodiversité de l'autre. Dans les deux cas, les systèmes sont complexes, avec un jeu varié de rétroactions et d'influences mutuelles : le « système Terre » pour la climatologie, One Health – qui met en relation les santés animale, humaine et environnementale – pour les épidémies. Plus que jamais, nous vivons dans un monde complexe où tout est interconnecté. Et si nous voulons comprendre et agir, il faut embrasser cette complexité. ■

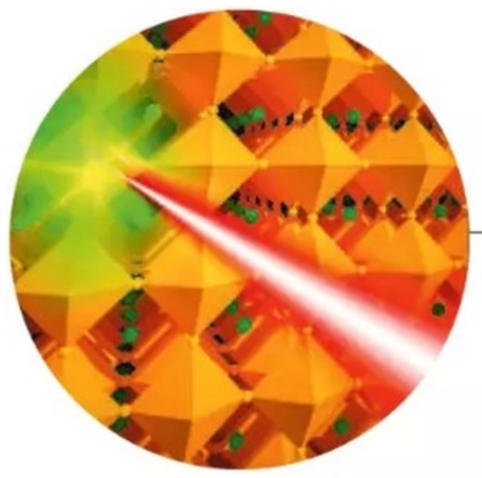
SOMMAIRE

Avril / Juin 2023 - n° 573









3 Édito

6 **GRAND ENTRETIEN AVEC JAVIER GARCIA MARTINEZ**
Président de l'Union internationale de chimie pure et appliquée
« Repensons l'enseignement et le développement de la chimie »

14 Trois mois dans le monde

DOSSIER

16 **LES CLIMATS DU PASSÉ**

18 Cinquante ans de paléoclimatologie *Jean Jouzel*

20 « Les crises du passé éclairent le futur » *Entretien avec Pascale Braconnot*

24 Panorama des climats anciens *Mathias Germain, Jean-François Deconinck*

26 Les influences astronomiques du climat *Didier Paillard*

29 Changements d'hier et d'aujourd'hui de la circulation océanique *Claire Waelbroeck*

32 Les changements climatiques majeurs « récents » *Amaëlle Landais*

36 À la recherche de glaces d'un million d'années *Catherine Ritz*

38 Succès et contraintes de l'*ice core science* *Morgan Jouvenet*

40 Comprendre les moussons en Asie du Sud *Clara Bolton*

43 Les défis de la datation *Pierre-Henri Blard*

44 « Des archives océaniques exceptionnelles » *Entretien avec Mary Elliot*

46 La coévolution de la vie et du climat à l'échelle des temps géologiques *Pierre Sans-Jofre, Sylvain Bernard*

49 L'influence du climat dans la disparition des Néandertaliens *Maria Fernanda Sánchez Goñi*

52 Tester les modélisations actuelles grâce aux paléoclimats *Pierre Sepulchre, Masa Kageyama*

56 La valse des continents et du climat *Hannah Sophia Davies*

58 À quand la prochaine ère glaciaire ? *Didier Paillard, Gaëlle Leloup*

60 Éprouver les variations climatiques grâce à la science-fiction *Irène Langlet, Denis Langlet*

62 Start-up : Des pistes pour recycler le dioxyde de carbone *Pierre Vandeginste*

FONDAMENTAUX

64 **PORTFOLIO** Les graines : une diversité vitale *Philippe Pajot*

72 **NEUROSCIENCES** Proust et le rappel implicite *Pascale Gisquet-Verrier*

80 **INFORMATIQUE** L'horodatage sécurisé à l'ère numérique *Alexis Bonnecaze, Kevin Thiry-Atighehchi*

86 **HISTOIRE DES SCIENCES** Archéologie et espionnage, l'intrigant mariage *Stéphen Rostain*

94 **VIE SCIENTIFIQUE** La prédation dans la publication scientifique *Chérifa Boukacem-Zeghmouri*

100 **PHYSICO-CHIMIE DES MATÉRIAUX** Vers des cellules solaires autocicatrisantes *Davide Raffaele Ceratti*

106 **GÉNÉTIQUE** La carte du génome humain *Mathias Germain*

114 **ÉPIDÉMIOLOGIE** Mieux évaluer le risque des zoonoses *Benjamin Roche, Sylvie Briand*

120 **MATHÉMATIQUES** « J'aime la puissance de l'analyse mathématique » *Entretien avec Sylvia Serfaty*

LIVRES

130 La sélection de la rédaction

RÉFLEXIONS

134 Transition énergétique *Benoît Boutaud*

136 Numérique et IA *Christine Solnon*

137 La chronique dessinée *Gilles Rapaport*

138 Éthique *Jean-Gabriel Ganascia*

SCIENCE ET FICTION

140 Les trous noirs sur grand écran *Étienne Ligout*

ROBERTO RUIZ DE ZAFRA - IXPERT/SHUTTERSTOCK. - SERGE BLOCH POUR LA RECHERCHE - DAVIDE CERATTI ET TAL ABARZEL/BIGDARY/WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

Ce numéro comporte un encart « Le Monde de la Bible » ainsi qu'un encart « First Voyages France » sur une partie de la diffusion abonnés.

48H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER
LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

GRAND OCEAN

29 ET 30 SEPT. 2023

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN

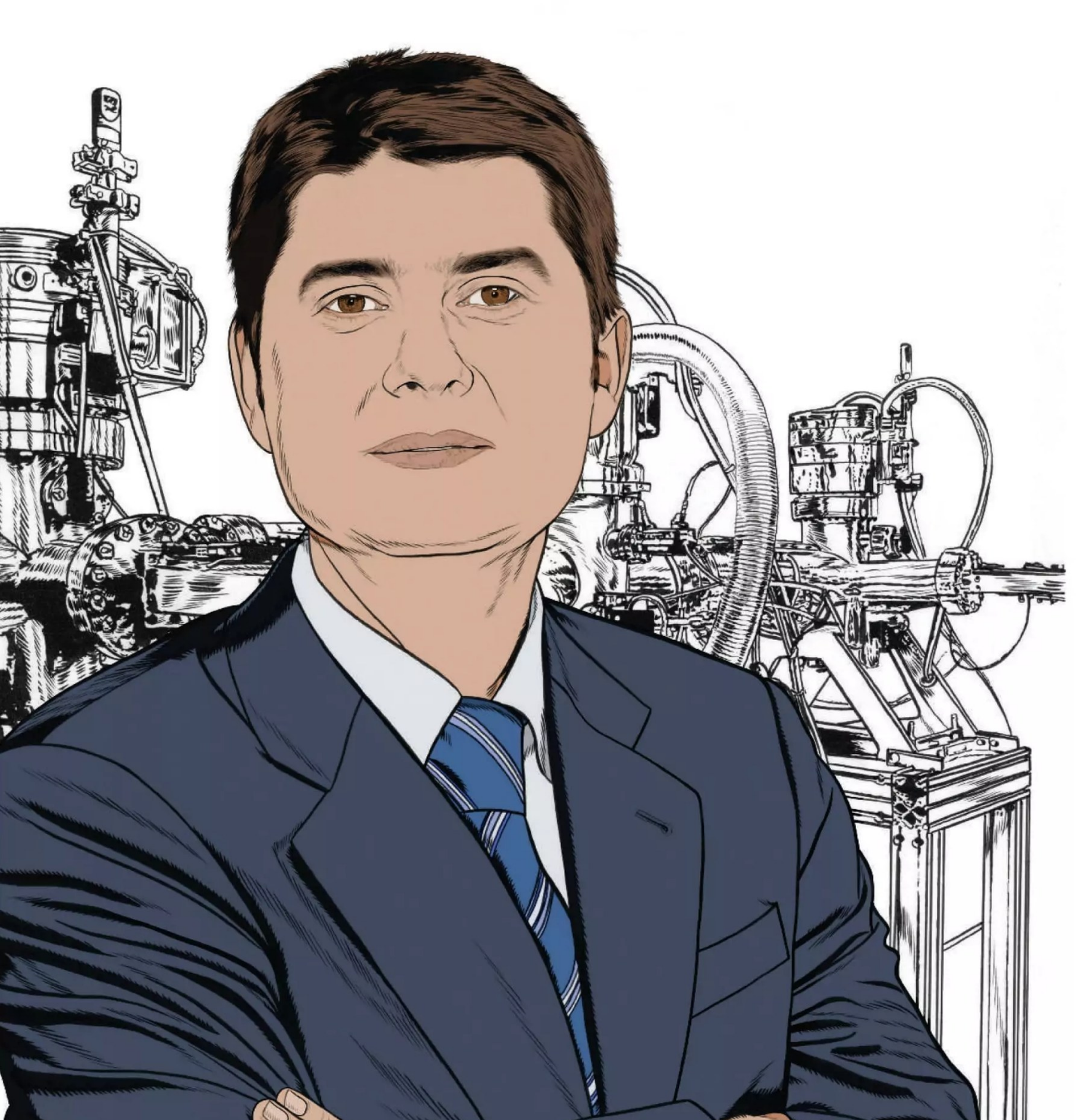
& EN DIGITAL

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

Partenaires Associés

Organisé par



Entretien avec **Javier Garcia Martinez**

PRÉSIDENT DE L'UNION INTERNATIONALE DE CHIMIE PURE ET APPLIQUÉE

“REPENSONS L'ENSEIGNEMENT ET LE DÉVELOPPEMENT DE LA CHIMIE”

L'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) est connue pour établir une nomenclature des composés chimiques permettant l'échange entre tous. Si cette normalisation se poursuit, notamment dans le cadre de l'explosion du recours à l'intelligence artificielle qui nécessite un langage commun, le jeune président de l'UICPA a pour ambition de pousser à la commercialisation des technologies issues des laboratoires de chimie, en favorisant l'innovation pour accéder à une chimie plus verte.

La Recherche On célèbre en 2023 les 25 ans de la publication des *« douze principes de la chimie verte »* (1). Les chimistes tiennent-ils compte de ceux-ci aujourd'hui ?

Javier Garcia Martinez Dans une large mesure, oui. L'intérêt de ces douze principes est de fournir des cibles claires lors de la conception de nouveaux procédés chimiques, telles que « réduire les déchets de réaction », « utiliser des catalyseurs », ou « réduire l'utilisation de solvants ». Cette chimie verte est enseignée dans les cursus de chimie et d'ingénierie chimique de l'enseignement supérieur dans le monde. Nous disposons même de logiciels spécialisés, fondés sur ces principes, qui quantifient le caractère « vert » d'un procédé, et permettent de mettre en œuvre des systèmes plus respectueux de l'environnement. Toutefois, le chemin à parcourir vers la durabilité est encore long. Pour que la chimie soit vraiment verte, nous devrions concevoir des molécules et des procédés en tenant compte de la durabilité dès le début de nos réflexions. Cela implique une conception orientée vers la circularité : tout

JEAN-MARC PAU POUR LA RECHERCHE

ce que nous produisons devrait être pensé à priori, de manière à pouvoir être récupéré et réutilisé. Or, ce n'est pas ce que nous faisons aujourd'hui : en 2019, 31 % des ressources naturelles utilisées en chimie sont transformées en produits utiles, et 8,6 % seulement de ces derniers sont récupérés et réutilisés (2).

Que deviennent les 69% de ressources non utilisées ?

Elles sont émises dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone, incinérées ou mises en décharge. La transformation des matières premières en produits utiles engendre aujourd'hui trop de déchets, et nous devons en réduire le pourcentage. Toutefois, le défi n'est pas tant de produire avec plus d'efficacité que de réutiliser tout ce que nous produisons. Pourquoi ne recyclons-nous qu'un peu plus de 8 % ? Parce que les produits que nous fabriquons n'ont pas été conçus avec cet objectif. Par exemple, il est très difficile d'extraire et de recycler les éléments chimiques contenus dans nos téléphones portables, comme les terres rares (*), car le recyclage n'est pas une priorité lors de la conception de ces appareils. L'aluminium est un bon exemple de la situation à atteindre : ce qui est utilisé est presque entièrement recyclé, parce que c'est facile et que c'est moins coûteux que d'en produire à partir de minerai. Lorsque nous disposerons de procédés permettant le recyclage des produits et des éléments chimiques plus facilement et à moindre coût, cette pratique deviendra la norme.

Dans l'ensemble, les chimistes partagent-ils ce point de vue ?

Je dirais que oui. C'est toutefois une chose d'être conscient de l'enjeu de passer du linéaire au circulaire, c'en est une autre de relever le défi. Par exemple, la plupart des articles de chimie publiés dans les meilleures revues scientifiques mettent en avant de petites améliorations : un catalyseur un peu plus efficace, une petite augmentation du rendement de cellules photovoltaïques, etc. Nous n'atteindrons pas la durabilité en accumulant les petites améliorations. Il faut un changement de paradigme, une nouvelle façon de penser l'enseignement et le développement de la chimie. Le plus grand défi est que l'impact environnemental de la chimie ne croisse pas à l'instar du chiffre d'affaires du secteur, qui devrait passer, selon le programme de l'environnement de l'ONU, de 4 000 milliards de dollars par an aujourd'hui à plus de 6 000 milliards de dollars en 2030 (3).

Existe-t-il déjà des produits conçus en respectant cette circularité ?

L'une des principales avancées de ces dernières années concerne les plastiques. Plusieurs équipes de recherche ont récemment présenté une nouvelle génération de polymères dont les structures peuvent être désassemblées en leurs composants moléculaires de base, les monomères. Par exemple, en 2021, une équipe de l'université de Constance (Allemagne) a réussi à le faire avec l'un des plastiques les plus utilisés, le polyéthylène haute densité (4). En appliquant un traitement avec du méthanol, ils obtiennent les molécules d'éthylène de base. Ces polymères ne sont pas biodégradables, mais ils sont recyclables à l'infini. On reforme les monomères initiaux, et ceux-ci permettent de fabriquer du plastique neuf.

Y a-t-il aujourd'hui des canaux bien organisés pour que de telles découvertes, faites dans des laboratoires universitaires, soient un jour commercialisées ?

La mise en place de divers mécanismes (partenariats, licences, création d'entreprises) est essentielle pour que les avancées de la chimie circulaire passent des laboratoires au grand public. Ainsi, une équipe de l'École polytechnique fédérale de Zürich (Suisse) a publié fin 2021 un procédé dans lequel un photoréacteur contenant de l'oxyde de cérium est chauffé à très haute température grâce à la concentration de la lumière du Soleil ; le dioxyde de carbone et l'eau présents dans l'air qui passe à travers ce réacteur sont convertis en monoxyde de carbone et en hydrogène : un mélange que l'on peut utiliser comme combustible pour l'aviation (5). Aujourd'hui, ce procédé est déjà expérimenté à une échelle préindustrielle, par une société nommée Synhelion, créée par l'équipe qui l'a mis au point.

Les grandes entreprises de la chimie sont-elles impliquées dans la recherche fondamentale et le financement du développement ?

De nombreuses grandes entreprises préfèrent laisser les autres prendre le risque d'effectuer les recherches les plus ambitieuses ; elles ne sou-

BIO

- **1973** Naissance à Logroño, Espagne.
- **2000** Doctorat en chimie à l'université d'Alicante, en Espagne.
- **2001** Postdoctorat au MIT, aux États-Unis.
- **2004** Fondation de la société Rive Technology.
- **2005** Nommé professeur à l'université d'Alicante, en Espagne, où il dirige le laboratoire de nanotechnologie moléculaire.
- **2012** Devient membre de la Global Young Academy.
- **2019** Revend ses parts dans Rive Technology à la société W. R. Grace. Devient le premier président de la Jeune Académie d'Espagne.
- **2022** Devient président de l'Union internationale de chimie pure et appliquée.

(*) Les terres rares sont un groupe de dix-sept éléments chimiques – comme le scandium ou le néodyme –, très utilisés dans l'industrie de l'électronique et de l'énergie pour leurs propriétés. Leur exploitation étant principalement faite en Chine, c'est un enjeu géostratégique et industriel majeur.

Les quatre défis de la chimie

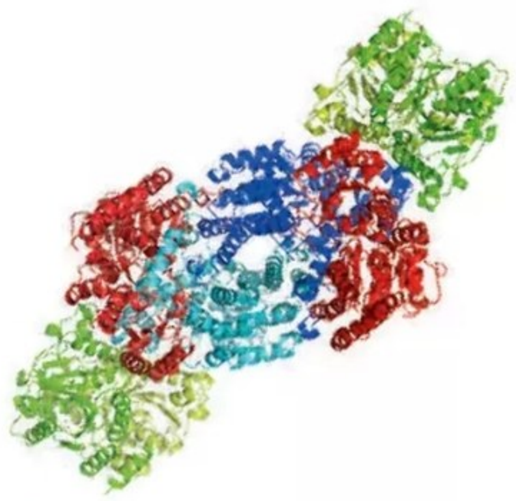
Javier Garcia Martinez distingue quatre problèmes fondamentaux que la chimie doit encore résoudre.

1. L'ORIGINE DE LA VIE

Comment sommes-nous passés des petites molécules telles que l'eau, le méthane, le dioxyde de carbone ou l'ammoniac, aux protéines de plusieurs millions d'atomes qui permettent à la vie de fonctionner ? Comment les premières membranes se sont-elles formées, isolant l'intérieur de proto-cellules, propices au déroulement de nouvelles réactions, de l'environnement extérieur ?

2. RÉDUIRE NOTRE DÉPENDANCE VIS-À-VIS DES ÉLÉMENTS RARES

De nombreux processus chimiques industriels importants nécessitent l'utilisation d'éléments rares ou provenant de zones de conflit. Grâce à une compréhension moléculaire des processus chimiques, à l'utilisation de l'intelligence artificielle et au développement de nouveaux catalyseurs, nous pourrions remplacer ces éléments coûteux et rares par des éléments abondants et bon marché.



▲ *La nitrogénase, enzyme de l'organisme, inspire les chimistes pour des processus durables.*

3. IMITER LA NATURE

La plupart des processus chimiques se déroulent dans des conditions extrêmes et nécessitent des réactifs coûteux. Par exemple, l'ammoniac est fabriqué à plusieurs centaines de degrés Celsius et sous très haute pression (200 atmosphères). Or, de nombreuses bactéries produisent de l'ammoniac à température et pression ambiantes, à partir d'eau et d'azote, grâce à une enzyme nommée nitrogénase. Ce système et d'autres sont une source d'inspiration constante pour les scientifiques qui cherchent à mettre au point des processus chimiques plus durables.

4. ÉLECTRIFIER L'INDUSTRIE CHIMIQUE

L'électrification offre une occasion unique de créer une industrie chimique plus durable et de réduire notre dépendance à l'égard des combustibles fossiles. En utilisant des électrons comme réactifs dans divers processus, nous éviterions d'utiliser des produits chimiques coûteux et potentiellement dangereux, tout en améliorant considérablement l'efficacité et la durabilité.

L. A.

tiennent que les technologies les plus proches de la commercialisation, qu'elles acquièrent éventuellement. L'une de mes priorités, en tant que président de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA), c'est de faire évoluer cela en informant les dirigeants du secteur sur la chimie qui est possible aujourd'hui. C'est la raison pour laquelle depuis 2019, par exemple, nous identifions chaque année, à l'UICPA, les dix principales technologies émergentes en chimie (6). Par exemple, en 2022, nous avons souligné les avancées des batteries sodium-ion, des aérogels ou encore des vaccins à base de nanoparticules associées à des molécules d'ADN.

Le système des startups est classique dans le secteur des biotechnologies. Est-ce aussi le modèle dominant en chimie ?

Tout à fait. De nombreuses grandes entreprises chimiques ont créé des fonds d'investissement, voire des sociétés de capital-risque, dont le rôle est d'investir dans des nouvelles technologies et de nouveaux modèles commerciaux. Les industries de la chimie et de l'énergie repèrent ainsi ce qui se déroule dans les universités et peuvent participer à la création de startups. Elles fournissent du capital et, surtout, apportent à l'entrepreneur leur connaissance du fonctionnement réel de l'industrie, de la découverte scientifique au produit réel. C'est ce qui s'est passé avec Rive Technology, que j'ai fondée en 2004 quand j'étais au MIT, aux États-Unis, avec le soutien de la société Grace, numéro un mondial des catalyseurs. Ils ont identifié ma technologie, qu'il était bien trop tôt pour eux d'acheter, alors ils ont investi. Ils ont ainsi contribué à son développement et à sa mise à l'échelle ; ils ont aussi eu un rôle déterminant dans le recrutement de nos clients et dans notre développement international. En 2019, ils ont acheté ma société, et mes catalyseurs sont aujourd'hui

JJSJJSJJS - CC BY-SA 3.0



« Les scientifiques qui choisissent de commercialiser leurs découvertes construisent l'avenir

utilisés pour le raffinage du pétrole, ou la purification de l'air et de l'eau. Cela aurait été impossible sinon. Une startup n'a pas les ressources économiques ou les canaux de distribution pour devenir une entreprise mondiale dans le secteur de la chimie, où les investissements pour passer à l'échelle et produire de gros volumes sont colossaux. Ce n'est pas comme la création d'une application ou d'un site web, il faut vraiment beaucoup de ressources.

Pourquoi avez-vous choisi de rester dans le monde universitaire, plutôt que de continuer à suivre votre technologie et devenir un manager dans l'industrie chimique ?

J'apprécie cette liberté académique, qui m'a servi à explorer de nombreuses idées et à concrétiser de nombreuses opportunités. Cela m'a permis, par exemple, de contribuer au développement de Rives Technology pendant quinze ans. Ce n'est pas exceptionnel : quatre des six lauréats des prix Nobel de chimie et de physique de 2022 ont créé leur propre entreprise, tout en menant leur carrière universitaire. Et quelques-uns des chimistes les plus influents de notre époque, tels Robert Langer, du MIT, ou George Whitesides, de l'université Harvard, aux États-Unis, ont fondé de nombreuses entreprises qui commercialisent ce qui sort de leurs laboratoires. Les scientifiques qui choisissent de commercialiser leurs découvertes construisent l'avenir, car ils ne se contentent pas de créer des solutions à nos grands problèmes, ils les rendent aussi accessibles à tous. En outre, faire une découverte scientifique majeure, c'est bien, mais si vous faites tout le parcours jusqu'à la mise sur le marché, vous devez développer encore beaucoup de science. Cela permet, en tant que scientifique, de découvrir des aspects de son propre domaine avec lesquels on n'aurait pas été en contact autrement. Et la satisfaction d'apporter une solution à un problème, et de la mettre à la disposition de tous, est incomparable.

Au cours des dix dernières années, sur vingt-huit lauréats du prix Nobel de chimie, seize étaient basés aux États-Unis, onze en Europe et un en Asie. Qu'en pensez-vous ?

Il suffit de regarder la littérature scientifique pour constater qu'une grande partie des meilleures recherches sont actuellement menées en Asie. J'aimerais donc, bien sûr, que davantage de personnes originaires de cette région du monde soient reconnues pour le travail fantastique qu'elles accomplissent et pour les solutions qu'elles apportent aux défis les plus pressants. Mais je m'inquiète davantage que la science, la technologie et les entreprises de haute technologie ne puissent pas se développer partout, que du faible nombre de lauréats du prix Nobel originaires de certaines régions du monde. Les ressources, les talents, et les infrastructures nécessaires pour faire de grandes découvertes et les commercialiser ne sont disponibles que dans très peu d'endroits : autour de quelques grandes villes, dans quelques pays. Cette concentration est préoc-

ROBERTO RUIZ DE ZAFRA

cupante parce que la technologie peut contribuer à creuser le fossé entre les plus riches et les laissés-pour-compte. Les pays riches n'investissent pas dans la science parce qu'ils sont riches : ils sont riches parce qu'ils investissent dans la science. Les vaccins contre le SARS-CoV-2 sont un exemple marquant des conséquences du fait que les meilleures sciences et technologies sont produites par les pays les plus avancés et, par conséquent, ne sont accessibles qu'à ceux-ci. Les pays qui ont mis au point ces vaccins y ont eu facilement et rapidement accès ; et, aujourd'hui, de grandes quantités de doses se périment sans être partagées…

Comment proposez-vous de rétablir l'équilibre ?

Y parvenir doit être une priorité. D'une part, nous avons besoin de tous les talents, pas seulement de ceux des pays développés. D'autre part, si nous ne partageons pas la technologie avec ceux qui en ont le plus besoin, les pays pauvres continueront à se battre contre des maladies évitables, et les agents pathogènes auront plus de possibilités de muter. Les problèmes auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui se posent à l'échelle internationale ; ils nécessitent donc des solutions globales, une coopération internationale, un partage des ressources et des technologies et une science véritablement inclusive. Sans ces efforts, notre avenir est en danger. C'est pourquoi des initiatives telles que l'Année internationale de l'engagement scientifique, et des organisations telles que l'Unesco, l'UICPA ou les sociétés internationales de jeunes scientifiques (Global Young Academy, réseau international des jeunes chimistes) sont très importantes. Cela peut sembler idéaliste, mais si nous continuons à construire des murs et à privilégier nos propres intérêts au détriment du bien commun, nous compromettrons notre capacité à nous attaquer efficacement à ces problèmes urgents et à créer un meilleur avenir pour tous.

Vous venez de mentionner des organisations de jeunes scientifiques dont vous faites ou avez fait partie, et que vous avez même contribué à créer pour certaines d'entre elles. Pourquoi sont-elles importantes ?

Je crois profondément qu'il faut donner des moyens d'action, des ressources et des opportunités aux jeunes du monde entier qui veulent contribuer à la science. L'expérience que j'ai acquise avec tous ces groupes montre que, lorsque vous réunissez des gens formidables, des choses merveilleuses se produisent. Et cela ne peut pas être planifié : vous rassemblez des personnes talentueuses et de bonne volonté, et immédiatement elles commencent à organiser une conférence en Afrique, à réfléchir à comment résoudre la crise de l'eau en Jordanie, à mettre au point des moyens de promotion des vocations scientifiques féminines dans le monde arabe, etc. Si les jeunes des pays du Sud ne se sentent pas partie prenante, s'ils n'ont pas d'opportunités, nous allons rater de nombreux talents, ce qui n'est déjà pas une bonne chose, mais surtout nous allons agrandir ce fossé entre ceux qui font la science et ceux qui n'en bénéficient pas. Bien sûr, tout cela s'inscrit dans la création d'un avenir plus durable. Les jeunes chercheurs d'aujourd'hui sont issus de la génération de Fridays For Future, qui a manifesté pour exiger de leurs gouvernements qu'ils prennent des mesures en matière de changement climatique, de droits de l'homme, de diversité et d'inclusion, en promouvant la tolérance et le respect de tous les individus. Cette génération me donne de l'espoir.

L'une des grandes inégalités, dont la réduction est l'un des objectifs de développement durable des Nations Unies, est celle entre les sexes : la chimie est-elle un domaine accueillant pour les femmes ?

En 2017, l'UICPA s'est jointe à dix autres unions et organisations internationales dans le domaine des sciences naturelles, de l'informatique et des mathématiques pour mener pendant trois ans le projet Gender Gap in Science, financé par le Conseil international de la science (ISC), afin d'examiner l'écart entre les sexes dans le domaine scientifique et de recommander des actions visant à le réduire (7). Les données sont très claires : beaucoup de femmes se lancent dans la science, presque autant que d'hommes, mais les conditions sont plus difficiles pour elles ; et dans le monde, seulement 30 % des chercheurs professionnels sont des femmes, selon l'institut de statistiques de l'UNESCO. L'enquête de Gender Gap in Science a en outre montré que la proportion est à peu près identique en matière de publications scientifiques.

31 %

DES RESSOURCES NATURELLES utilisées en chimie, en 2019, étaient transformées en produits utiles.

Dans de nombreux pays, la situation est encore pire, et ce dès le départ : les femmes n'ont pas accès à l'enseignement scientifique. Nous ne devons pas oublier, même si c'est un cas extrême, qu'en Afghanistan, depuis décembre 2022, les femmes ne peuvent plus aller à l'université. L'UICPA est très active en ce qui concerne l'écart entre les sexes. En plus de notre participation à cet effort orchestré par l'ISC, nous coordonnons chaque année le Global Women Breakfast (« petit-déjeuner mondial des femmes »), invitation ouverte aux femmes et aux hommes pour discuter de la manière d'améliorer l'égalité des sexes. C'est un ensemble d'initiatives locales, et un petit-déjeuner à Bagdad est différent de celui à Shanghai, Paris ou Quito. En utilisant une plateforme en ligne, nous touchons un public étendu, donnant la possibilité de promouvoir la parité et la diversité des sexes dans plus de 400 villes de 75 pays.

Quelles sont les autres priorités de l'UICPA ?

L'une de nos principales priorités est la création d'une nouvelle nomenclature chimique et de nouvelles normes destinées aux ordinateurs, pour accélérer l'utilisation de l'intelligence artificielle en chimie, afin de concevoir de nouvelles expériences et donner un sens à la grande quantité de données disponibles. Le langage actuel de la chimie, où nous parlons d'aldéhydes, de groupes peroxydes ou d'amines, est très utile aux chimistes pour communiquer, et aux étudiants pour apprendre, mais il n'a pas été conçu pour les machines. L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique vont jouer un rôle tellement important dans l'avenir des découvertes en chimie que nous devons élaborer une nouvelle nomenclature, ainsi que des normes pour le partage, le stockage et la gestion des informations chimiques. Si nous continuons comme aujourd'hui, où différentes organisations développent leurs propres protocoles, cela va devenir un cauchemar. Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un projet plus vaste que nous menons avec le comité des données du Conseil international des sciences (Codata), et avec le soutien de la Commission européenne, en vue d'établir une norme dans le cadre FAIR (acronyme anglais pour « faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables »). En établissant des protocoles clairs, des normes et des lignes directrices, l'UICPA vise à faciliter le développement des découvertes et des innovations en chimie. Ces efforts contribueront à garantir que l'utilisation de l'intelligence artificielle en chimie est cohérente et efficace.

« Ne pas se préoccuper des petites améliorations, plutôt des grands problèmes

Vous êtes professeur. Que dites-vous à vos étudiants pour les encourager à poursuivre leurs études, voire leur carrière, en chimie ?

Je leur dis de ne pas perdre de temps avec les petites améliorations, mais de se préoccuper des grands problèmes. Lorsque nous parlons des objectifs de développement durable des Nations Unies, tels que résoudre le problème de la faim, produire de l'énergie propre et peu coûteuse pour tous, lutter contre le changement climatique, ou permettre à tous d'être en bonne santé, cela inspire une nouvelle génération de scientifiques, et même au-delà de la chimie. Nous avons besoin d'un appel mondial pour résoudre les grands problèmes, et la contribution de la science est nécessaire. Cela va dans le sens de l'Année internationale des sciences fondamentales pour le développement durable, décrétée par les Nations Unies et dont l'UICPA est partie prenante, et qui se poursuit jusqu'en octobre 2023 : nous avons besoin de la science, nous avons besoin de solutions fondées sur des preuves pour résoudre nos problèmes mondiaux. Nous devons aussi enseigner la chimie en contexte, en allant au-delà des molécules et des propriétés des structures, pour nous intéresser aux systèmes impliqués dans les réactions chimiques, et qui concernent la santé, l'environnement, les personnes, les emplois, l'industrie, les salaires, l'industrie et la pollution.

Propos recueillis par Luc Allemand

(1) Paul T. Anastas et John C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, 1998.

(2) *The Circularity Gap Report*, CGRi, 2019, www circularity-gap.world/

(3) www.unep.org/resources/report/global chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions

(4) M. Häussler *et al.*, *Nature, 590,* 423, 2021.

(5) R. Schäppi *et al.*, *Nature, 601,* 63, 2022.

(6) iupac.org/what we-do/top-ten/

(7) gender-equality-in-science.org

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL



LE HORS-SÉRIE



UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr



39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL



LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES



TOUTE L'ACTUALITÉ SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

PROMINT-LRCV2

TROIS MOIS DANS LE MONDE

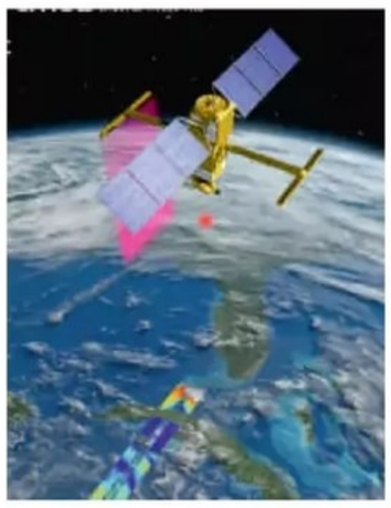
Découverte d'un ADN très ancien, première production nette d'énergie grâce à la fusion nucléaire contrôlée, etc., l'actualité scientifique des derniers mois oscille entre passé lointain et perspectives futuristes…



▲ 22 novembre
L'intelligence artificielle joue les stratèges.



▲ 8 décembre
Ayla, traitée *in utero* pour une maladie génétique.



▲ 16 décembre
Swot, le satellite qui scrute les océans.



▲ 27 décembre
Ce plancton est un mangeur de virus.

22 NOVEMBRE

Meta présente Cicero, la première intelligence artificielle à atteindre des performances de niveau humain dans Diplomacy, un jeu de stratégie qui exige de gagner la confiance, négocier et coopérer avec plusieurs joueurs.
https://tinyurl.com/cicero-nego-ai

23 NOVEMBRE

▶ L'Agence spatiale européenne présente ses dix-sept nouveaux astronautes, dont deux Français. Sophie Adenot devient astronaute de carrière et Arnaud Prost, astronaute de réserve.
https://tinyurl.com/ESA-17-new-astronauts

▶ Une lettre codée de Charles Quint (1500-1558), destinée à son ambassadeur en France, est enfin déchiffrée. La missive révèle les préoccupations majeures de l'empereur du Saint Empire romain germanique vis-à-vis de la France, son ennemi d'alors dans les guerres d'Italie.
https://tinyurl.com/lettre-charles-quint

5 DÉCEMBRE

L'heure d'administration d'un traitement anticancéreux joue-t-elle sur son efficacité ? C'est ce que suggère une étude menée sur des souris par des biologistes de l'université de Genève (Suisse) et de l'université Ludwig-Maximilians de Munich (Allemagne).
C. Wang *et al., Nature, 614,* 136, 2022.

8 DÉCEMBRE

▶ De l'ADN vieux de deux millions d'années est identifié pour la première fois. Ces fragments microscopiques d'ADN environnemental ont été découverts au nord du Groenland, dans des sédiments de l'ère glaciaire. Ils battent d'un million d'années le précédent record d'ADN ancien, prélevé sur un os de mammouth sibérien (*La Recherche* n° 565, p. 14).
K.H. Kjær *et al., Nature, 612,* 283, 2022.

▶ Première mondiale : un fœtus atteint d'une maladie génétique rare, la maladie de Pompe, a été traité avec succès *in utero* avec un médicament administré par voie intraveineuse.
J. L. Cohen *et al., New Engl. J. Med., 387,* 2150, 2022.

13 DÉCEMBRE

La National Ignition Facility (États-Unis) affirme avoir pour la première fois, grâce à la fusion par laser, produit un « gain net d'énergie », c'est-à-dire davantage d'énergie que celle nécessaire pour provoquer cette réaction nucléaire.
https://tinyurl.com/Fusion-nucleaire

16 DÉCEMBRE

Lancement de la mission internationale Swot, un projet de topographie mondiale des eaux de surface et des océans, qui fournira des données relatives aux phénomènes extrêmes et aux changements environnementaux à long terme.
https://tinyurl.com/succes-lancement-swot

19 DÉCEMBRE

Les 196 États signataires de la Convention sur la diversité biologique, réunis à Montréal (Canada), concluent un accord global pour stopper l'érosion de la biodiversité d'ici 2030. Le texte fixe notamment pour objectif de diviser par dix le taux d'extinction des espèces sous la responsabilité de l'action humaine.
https://tinyurl.com/accord-kunming-montreal

27 DÉCEMBRE

Des biologistes observent pour la première fois des organismes se nourrir de virus. Ces « virovores » sont des organismes planctoniques appelés *Halteria,* qui consomment des virus de la famille des chlorovirus.
J.P. DeLong *et al., PNAS, 120,* e2215000120, 2022.

6 JANVIER

Le secret de la durée de vie exceptionnelle des édifices bâtis par les Romains résiderait dans la composition du béton, qui incluait de la chaux vive. D'après les auteurs de l'étude, ce matériau rendait le béton capable de s'autoréparer dès lors qu'il était en contact avec de l'eau.
L. M. Seymour *et al., Sci. Adv., 9,* eadd1602, 2023.

9 JANVIER

Le cerveau compte une nouvelle structure : la membrane lymphatique subarachnoïde, qui jouerait un rôle dans l'immunité du cerveau et le drainage des déchets contenus dans le

PROYECTO AGUA - NASA/JPL-CALTECH - UC SAN FRANCISCO ET MACKENSIE TIPPI - DIPLOMACY/DR

liquide cérébrospinal. Celle-ci complète les trois premières membranes qui, jusqu'à présent, constituaient les méninges.

K. Møllgård *et al.*, *Science*, *379*, 84, 2023.

17 JANVIER

La plus vieille pierre runique au monde aurait été découverte en Norvège, au nord-ouest d'Oslo. Le bloc de grès marron aurait été gravé entre l'an 1 et l'an 250 de notre ère.

https://tinyurl.com/pierre-runique

1ER FÉVRIER

Les Néandertaliens s'attaquaient aux animaux les plus gros du monde à leur époque : *Palaeoloxodon antiquus*, l'ancêtre de l'éléphant moderne, pesait jusqu'à treize tonnes pour quatre mètres de haut. Cette découverte laisse à penser que les groupes de Néandertaliens étaient plus importants (au moins vingt-cinq personnes) que ce que l'on supposait.

S. Gaudzinski-Windheuser *et al.*, *Sci. Adv.*, *9*, eadd8186, 2023.

2 FÉVRIER

Des physiciens de l'University College London (Royaume-Uni) annoncent la découverte d'une nouvelle forme de glace d'eau, dite « amorphe », où, contrairement à la structure classique, les molécules d'eau ne sont pas organisées selon un motif hexagonal. Les auteurs précisent que cette forme d'eau pourrait se trouver à d'autres endroits du Système solaire, telles des comètes ou encore la lune gelée Encelade.

A. Rosu-Finsen *et al.*, *Science*, *379*, 474, 2023.



▲ 1er février
L'ancêtre de l'éléphant ne faisait pas peur aux Néandertaliens.



▲ 2 février
Cette glace « amorphe » ne ressemble à aucune autre.

ALEXANDER ROSU-FINSEN, CHRISTOPH SALZMANN - LUTZ KINDLER, LEIZA

À VENIR

DU 28 AU 31 MARS SE TIENDRA, À MARSEILLE, LE SOMMET 2023 DU HUMAN BRAIN PROJECT (HBP). APRÈS DIX ANS D'EXISTENCE, LES SCIENTIFIQUES DU HBP SE RÉUNISSENT UNE DERNIÈRE FOIS POUR DISCUTER DE LEURS RÉSULTATS ET PEUT-ÊTRE ÉVOQUER UNE PROLONGATION DE CETTE INITIATIVE EUROPÉENNE D'ENVERGURE. https://tinyurl.com/Human-Brain-Project-2023

DU 10 AU 12 MAI AURA LIEU, À AVIGNON, LE SYMPOSIUM INTERNATIONAL SUR LE VIH ET LES MALADIES INFECTIEUSES ÉMERGENTES. https://tinyurl.com/ISHEID-2023

22 MARS OUVERTURE DE L'EXPO « FÉLINS » AU MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, À PARIS (JUSQU'AU 7 JANVIER 2024).

LE 12 MAI S'OUVRIRA AU MUSÉE D'AQUITAINE, À BORDEAUX, L'EXPO « L'ART PRÉHISTORIQUE, DE L'ATLANTIQUE À LA MÉDITERRANÉE » (JUSQU'AU 7 JANVIER 2024).

AU FIL DES TWEETS

Ce trimestre, les chercheurs ont posté sur la mécanique céleste, les forêts face au changement climatique, l'épigénome des espèces animales et l'empreinte carbone du CNRS.

Valérie Masson-Delmotte (@valmasdel), *climatologue au CEA Paris-Saclay,* répond, dans ce premier fil d'une série de quatre, à la question : *« Forêt et climat, quels enjeux, dans le monde et en France ? »* Son exposé, clair, aborde l'impact du changement climatique sur la floraison des arbres fruitiers et sur la réponse des forêts vis-à-vis du stress hydrique. Il y est aussi question de déplacements des forêts boréales vers des zones de toundra sous l'effet du même changement.
https://tinyurl.com/Valerie-Masson-Delmotte

Thibault Fiolet (@T_Fiolet), *épidémiologiste à l'université Paris-Saclay,* revient sur la découverte du lien très probable entre l'infection au virus Epstein-Barr, *« qui peut provoquer la mononucléose »*, et le déclenchement, des années plus tard, de la sclérose en plaques, *« maladie auto-immune où le système immunitaire s'attaque à la gaine de myéline (qui entoure les axones, prolongements des neurones), essentielle dans la communication nerveuse et la transmission des signaux »*.
https://tinyurl.com/T-Fiolet

Simon Tardivel (@simon_tardivel), *ingénieur au CNES,* explique, à grand renfort d'animations, ce qu'est le problème à trois corps. *« C'est quand on se demande comment évoluent [trois] masses qui ne sont affectées que par leurs forces de gravité les unes sur les autres »*, résume-t-il.
https://tinyurl.com/Simon-Tardivel



Olivier Berné (@OliBerne), *astrophysicien au CNRS,* détaille le bilan gaz à effet de serre du plus important organisme de recherche français, réalisé grâce aux outils du collectif interdisciplinaire Labos 1point5, qui rassemble des personnels de la recherche ayant comme objectif commun d'estimer et de réduire l'empreinte carbone de la recherche en France. *« C'est un succès de voir que la recherche [française] s'est autosaisie de ce problème, et que le [CNRS] a soutenu ce travail »*, se félicite celui qui est aussi le cofondateur du collectif.
https://tinyurl.com/Olivier-Berne

Christoph Bock (@BockLab), *bioinformaticien au Centre de recherche en médecine moléculaire de l'Académie autrichienne des sciences,* présente le premier catalogue rassemblant les profils de méthylation de l'ADN de 580 espèces animales (535 vertébrés et 45 invertébrés). Un travail de longue haleine (une dizaine d'années), qui offre l'analyse la plus complète à ce jour de l'épigénome dans son contexte évolutif.
https://tinyurl.com/BockLab-DNA-methylation



LES CLIMATS DU PASSÉ

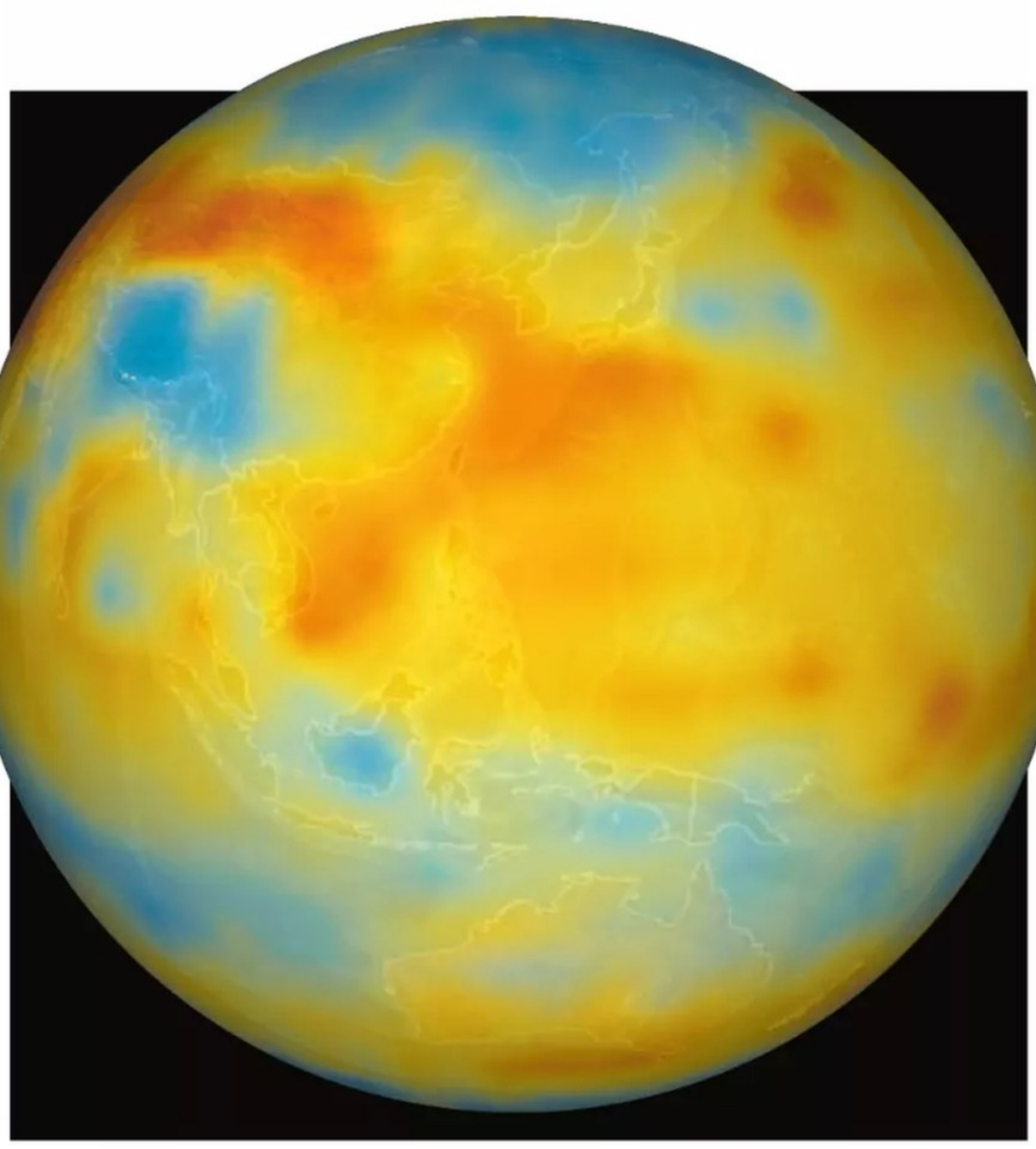
À quoi ressemblait le climat de la Terre il y a 10 000 ans ? Et il y a 1 million d'années ? Et plus loin encore dans le temps ? La paléoclimatologie apporte des réponses de plus en plus précises à ces questions. On sait ainsi que le système climatique de notre planète a toujours fonctionné de manière fortement non linéaire, avec une alternance de périodes chaudes et de périodes glaciaires dont on reconstitue aujourd'hui finement le rythme et l'ampleur. Pour les époques les plus récentes, on parvient également à décrire l'évolution de certains phénomènes climatiques. Ces informations sont obtenues grâce à la découverte et à l'analyse d'archives telles que les carottes de glace, les sédiments ou les coquilles. Grâce, aussi, à notre compréhension de plus en plus étendue des causes possibles des variations climatiques et de leurs interactions. Autant de données qui nourrissent les modèles climatiques actuels, et permettent d'améliorer les projections pour le futur.

PHOTOTHÈQUE R. MAGRITTE / ADAGP IMAGES, PARIS, 2023 © ADAGP, PARIS, 2023

◀ Les Idées claires *de René Magritte (1955).*

Cinquante ans de paléo-climatologie

Si les variations climatiques importantes aux échelles géologiques sont documentées depuis le XIXe siècle, les causes possibles ont été identifiées progressivement. Jean Jouzel, pionnier de l'analyse des archives glaciaires, revient sur le chemin parcouru depuis les années 1970 et la prise de conscience du rôle clé de la paléoclimatologie pour l'étude des climats futurs.



▲ *Au début des annnées 1980, il a été reconnu que la teneur en CO_2 dans l'atmosphère a une incidence importante sur le réchauffement planétaire. Ici, mesure de CO_2 (en orange) par imagerie infrarouge.*

NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER AND NASA/JPL SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO

Depuis près de cinquante ans, je m'intéresse à l'évolution passée de notre climat. Ma thèse, commencée en 1968, porte sur l'étude de la formation de la grêle à partir de l'analyse isotopique de l'hydrogène et de l'oxygène dont la glace est constituée. À Saclay, dans un laboratoire du CEA, je côtoie alors Claude Lorius – pionnier de cette analyse isotopique appliquée à la neige et aux glaces de l'Antarctique. Son objectif est de reconstituer les variations passées de notre climat et de notre environnement. Dès le début des années 1970, il m'entraîne dans cette merveilleuse aventure que constitue une carrière de chercheur largement consacrée à des archives glaciaires qui, aujourd'hui, nous permettent de remonter au-delà de 800 000 ans en Antarctique (lire p. 36) et de 130 000 ans au Groenland.

C'est ainsi que j'ai intégré cette communauté des paléoclimatologues, riche de succès, comme ce dossier de *La Recherche* l'illustre de façon remarquable. D'autres archives y sont évoquées (lire p. 44). Le sont également les mécanismes à l'origine des grands changements climatiques qu'a vécus notre planète, et certaines de leurs conséquences majeures. Le rôle clé des modèles climatiques, qui permettent de faire le lien entre évolution passée et évolution future de notre climat, est mis en avant. Enfin, ce dossier insiste sur l'importance de connaître et de comprendre les climats anciens pour mieux en appréhender l'évolution et ses conséquences au cours des prochaines décennies et au-delà. Ce rôle clé de la paléoclimatologie est progressivement devenu pour moi une conviction largement partagée au sein de notre communauté.

Que de chemin parcouru par cette dernière depuis les années 1970 ! Les causes possibles des variations passées du climat – modifications de la géographie, de la topographie, de la composition de l'atmosphère, de la luminosité du Soleil, de la position de la Terre sur son orbite – sont progressivement identifiées. La théorie de Milankovitch propose un lien entre astronomie et glaciations du quaternaire (lire p. 26).

Les paléoclimatologues se tournent aussi vers l'avenir : de façon erronée lorsqu'en 1972 le glaciologue danois Willi Dansgaard spécule sur l'arrivée possible de la prochaine glaciation (1), mais de façon tout à fait prémonitoire de la part du paléo-océanographe américain Wally Broecker qui, dès 1975, évoque la notion de « réchauffement global » (2). C'est aussi l'époque des premières simulations paléoclimatiques ; y contribue le modélisateur japonais Suki Manabe, prix Nobel de physique en 2021 pour ses travaux portant sur la réponse du climat à un doublement de la teneur en CO_2 dans l'atmosphère. Ceux-ci sont repris dans le rapport Charney qui, en 1979, conclut qu'un tel doublement, alors envisagé autour de 2050, devrait se traduire par un réchauffement planétaire compris entre 1,5 et 4,5 °C. L'alerte est lancée. C'est au cours de la décennie suivante que s'opère la prise de conscience au sein de la communauté scientifique et au-delà. La découverte, publiée en 1987, d'un lien entre les variations du climat et celle de la teneur en gaz carbonique au cours des 160 000 dernières années, à partir de l'analyse des glaces de Vostok, dans le cadre d'une collaboration franco-soviétique, amplifie la prise de conscience (3). Et c'est à l'initiative de Margaret Thatcher et de Ronald Reagan que, en 1988, le G7 crée, sous les auspices des Nations unies, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC).

UNE COURBE EN FORME DE CROSSE

À cette époque, notre communauté est un peu déçue de la quasi-absence dans le premier rapport du GIEC de la prise en compte des connaissances sur l'évolution passée du climat. Elles apparaissent dans la version suivante, celle de 1992, préparée en vue du Sommet de la Terre qui doit se tenir à Rio, au Brésil. Mais c'est à partir du second rapport du GIEC, en 1995, qu'elles y prennent toute leur place (4). L'existence de variations climatiques rapides, au cours de la dernière période glaciaire et de la transition qui l'a suivie, documentée au début des années 1990 dans les forages réalisés au centre du Groenland et dans les sédiments marins de l'Atlantique Nord, y est largement évoquée. À Madrid, lors de l'adoption de ce rapport, je fais la proposition de leur associer le terme « surprise ». Elle se concrétise par cette phrase : la future évolution du climat risque donc de nous réserver des « surprises » dues notamment au caractère non linéaire du système climatique. Cette expression est souvent associée à la possibilité de modifications rapides de la circulation océanique dans l'Atlantique Nord et du Gulf Stream, du type de celles initialement enregistrées au Groenland et dans l'Atlantique Nord, dont il s'avère désormais qu'elles ont largement affecté les régions continentales de l'hémisphère Nord et ont eu des répercussions jusqu'en Antarctique.

À l'aube des années 2000, les projecteurs sont braqués sur une période récente, avec une polémique autour de la reconstruction du climat du dernier millénaire, période clé dans le contexte de l'attribution du réchauffement récent aux activités humaines. Cette courbe en forme de crosse de hockey tend à montrer le caractère exceptionnel de la période récente ; elle fait l'objet de controverses de la part des climatosceptiques, mais est désormais pleinement justifiée puisque le sixième rapport du GIEC conclut que « *le réchauffement est sans précédent depuis 2000 ans* » (5).

La pertinence des informations contenues dans les archives climatiques vis-à-vis de l'évolution future de notre climat n'est plus à démontrer. Interprétées à l'aide de modèles climatiques de plus en plus performants, elles permettent d'évaluer la sensibilité du climat, sa variabilité à différentes échelles d'espace et de temps et d'en caractériser les conséquences et les risques d'instabilité. Un témoignage de cet apport essentiel des climats passés vis-à-vis de notre futur nous vient du GIEC : les deux derniers coprésidents du groupe I, consacré aux éléments scientifiques, Valérie Masson-Delmotte et Thomas Stocker, sont connus pour les travaux qu'ils ont conduits dans le cadre des programmes mis en œuvre en Antarctique et au Groenland. Et Thomas Stocker faisait équipe avec le Chinois Qin Dahe, lui aussi glaciologue, déjà impliqué dans le précédent rapport. Ce dernier est célèbre pour avoir, en 1989, traversé à pied l'Antarctique, avec six collègues dont le Français Jean-Louis Étienne. Cette forte implication de notre communauté est tout sauf anodine. ■



© BRUNO LEVY

Jean Jouzel
PALÉO-CLIMATOLOGUE, GIF-SUR-YVETTE
Directeur de recherche émérite au CEA (Saclay), ancien vice-président du groupe I du GIEC, médaille d'or du CNRS, membre de l'Académie des sciences, il est une figure de la lutte contre le changement climatique. Il est par ailleurs commissaire de la nouvelle exposition permanente « Urgence climatique », qui ouvrira au public à la Cité des sciences, le 16 mai prochain.

(1) W. Dansgaard *et al.*, *Quat. Res.*, *2*, 396, 1972.
(2) W. S. Broecker, *Science*, *189*, 460, 1975.
(3) J. M. Barnola *et al.*, *Nature*, *329*, 408, 1987.
(4) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/2nd-assessment-fr.pdf
(5) https://www.unep.org/fr/resources/rapport/sixieme-rapport devaluation-du-giec-changement-climatique-2022

Entretien avec **Pascale Braconnot**

« Les crises du passé éclairent le futur »

Depuis 2020, un comité de scientifiques travaille à un exercice de prospective sur les sciences du passé – paléoclimat et paléoenvironnement – en France. L'objectif ? Identifier collectivement les enjeux de recherche pour les décennies à venir avec une emphase sur le climat de demain. La climatologue Pascale Braconnot, spécialiste de la modélisation des climats anciens et coordinatrice du livre blanc résumant cet exercice de prospective, nous dresse un état des lieux.



▲ *Carottage d'archives sédimentaires à l'aide d'une barge sur le fond du lac Guynemer, dans l'archipel des Kerguelen (Terres australes et antarctiques françaises).*

EDYTEM, CNRS, UNIVERSITÉ SAVOIE MONT-BLANC

La Recherche **La connaissance du passé nous aide-t-elle à comprendre l'avenir ? Cette question sera-t-elle mise en évidence dans le livre blanc sur la recherche française sur les paléoclimats et les paléoenvironnements, qui devrait sortir à l'été 2023 ?**

Pascale Braconnot Oui, cette connaissance est primordiale. Une des préconisations du livre blanc est justement que la recherche mette encore plus l'accent sur ce lien entre passé et futur que ce qui a déjà été fait. Un premier aspect concerne la compréhension des mécanismes sous-jacents, afin d'appréhender comment la période actuelle a pu être conditionnée par toute l'histoire climatique passée. Pourquoi, à certaines périodes, est-on plus ou moins vulnérable aux perturbations ? Et qu'apprend-on pour le futur en lien avec les risques ? Les sciences du passé ont, je pense, beaucoup à nous apprendre sur cette notion de risque. Dans nos préconisations, nous voulons ainsi souligner comment être de plus en plus pertinent dans la façon dont

on peut décliner ce lien entre passé et futur, comment cela peut être pris en compte dans les décisions sur les questions actuelles.
Et puis, les recherches sur les climats et les environnements du passé apportent de nombreux éclairages pour comprendre le fonctionnement de ces systèmes complexes, l'évolution des sociétés et des écosystèmes.

À quand remonte la dernière prospective ?

Le dernier exercice équivalent date de 1998. Les recherches ont beaucoup évolué depuis. Dans le domaine, nous ressentions le besoin de savoir où l'on en était vraiment, de guider les grandes orientations de recherche dans la vaste galaxie des sciences du passé. Le colloque organisé en 1998 avait permis de créer des interactions entre les différentes thématiques, et des synergies entre climat, environnement, modélisation et observation. Ces interactions et synergies sont encore bien présentes aujourd'hui, à travers les grands programmes de recherche transverses qui ont fonctionné durant plus de vingt ans. Il y avait des programmes CNRS bien sûr, mais nous avons aussi eu des relais européens dans les financements provenant de l'Agence nationale de la recherche. Nous travaillons toujours sur ces grandes lignes aujourd'hui. Or, le monde a changé. D'une part les méthodologies ont évolué et, d'autre part, les enjeux sociétaux ne sont plus les mêmes. En particulier, il y a cette idée que la science climatique doit devenir de plus en plus une science de l'action. On s'est donc posé la question : quel éclairage fondamental les sciences du passé peuvent-elles y apporter ?

Comment vous y êtes-vous pris pour y répondre ?

Tout d'abord, signalons que, s'il s'agit d'une initiative lancée par l'Institut national des sciences de l'univers (INSU) du CNRS, nous avons à cœur de prendre en compte toute la communauté concernée, celle du CNRS, mais aussi celle dans les laboratoires mixtes, celles des universités et celle des autres grands instituts de recherche (IRD, CEA, etc.). Au total, nous avons recensé environ 800 chercheurs et chercheuses en France travaillant sur ces thématiques, et nous avons procédé à des enquêtes, interrogé des collègues, organisé des colloques… Ce livre blanc ne sera pas uniquement un rapport de prospective, mais il fera aussi un état des lieux. C'est pour cela que j'appelle ce livre «conjoncture et prospective». Je voudrais aussi que l'on aille un cran plus loin que ce qui a été fait auparavant, c'est-à-dire être sûr que nous sommes bien parvenus à capter une part du rêve qui soutend nos recherches.


DR

BIO

- **2007** Participe au quatrième rapport d'évaluation du GIEC.
- **2009** Reçoit la médaille Milankovitch de l'Union européenne des géosciences.
- **2015** Élue à l'Academia Europaea (association internationale de promotion de l'éducation et de la recherche).
- **2020-2023** Coordonne la rédaction du livre blanc sur les sciences du climat et de l'environnement du passé.

Qu'entendez-vous par là ?

Il s'agit d'identifier la curiosité et les motivations profondes des scientifiques pour avancer. C'est important, car nous cherchons à orienter les grandes lignes de recherche de la communauté pour les dix, vingt ans à venir. La motivation des scientifiques est donc primordiale. Car cela va avoir aussi des conséquences en termes de réorientation des métiers. Par exemple, quel va être l'impact sur l'utilisation des grosses infrastructures permettant les grands forages glaciaires, marins et terrestres, l'archivage des échantillons ou les bases de données ? Il faut aussi prendre garde à ne pas perdre des compétences. Des métiers plus «naturalistes», comme la palynologie (étude des pollens et des spores), seront peut-être moins en vogue à l'avenir, mais il faut être sûr qu'avec les nouvelles méthodologies, on ne dépeuple pas ces métiers qui ont une vraie connaissance des terrains et de l'environnement. Il y a aussi le besoin d'acquérir de nouvelles compétences, par exemple avec les avancées techniques, informatiques ou méthodologiques qui transforment la façon de travailler et qu'il faut s'approprier. Nous faisons aussi partie des lanceurs d'alerte sur le changement climatique en cours, et la réduction des émissions liées à nos activités professionnelles est aussi considérée au cœur de la prospective.

Quelles questions scientifiques s'est-on posées ces dernières décennies ?

Elles ont été nombreuses. On s'est notamment demandé comment s'attaquer aux climats aux différentes échelles de temps en insistant sur l'importance de l'étude des climats plus anciens, préquaternaires *[antérieurs à 2,58 millions d'années]*. Ensuite, il y a



▲ *Cette carotte de glace, extraite en Antarctique, a permis de reconstituer l'évolution des teneurs en dioxyde de carbone et méthane sur 800 000 ans.*

“Nous sommes en train de faire en un siècle ce qui s'est passé en 10 000 ans”

Quels sont les principaux enseignements des deux dernières décennies, selon vous ?

Les campagnes de carottage – de glace en Antarctique et de sédiments marins – ont permis de caractériser les évolutions relatives entre les gaz à effet de serre, en premier lieu le dioxyde de carbone, et les températures. Nous avons aussi commencé à mieux comprendre les conditions conduisant à de grandes bascules climatiques ou à des crises environnementales. Grâce à tous ces exemples passés, nous percevons mieux comment le climat réagit à une perturbation, comme celle liée aux émissions anthropiques de carbone ou l'utilisation des terres, le cycle de l'eau, du carbone, ainsi que les interactions d'échelle qui façonnent notre environnement actuel ou à venir. Cela nous permet d'anticiper les conditions conduisant, par exemple, à des sécheresses ou à des mégafeux. Un autre pan de progrès résulte de la fréquence à laquelle on est désormais capable de récolter des enregistrements, que cela soit à l'aide de coraux, de petites coquilles, de cernes des arbres, etc. Cette approche multitraceurs ou multiarchives de récolte de données nécessite une compréhension beaucoup plus fine de la façon dont le signal est enregistré, de manière à être capable d'établir l'histoire propre à chacun des enregistrements, et pas seulement à chercher à faire une reconstruction de température.

Quid de la modélisation ?

Les modèles sont de différents types selon la période chronologique que l'on cherche à reproduire et la zone géographique qui est concernée. Il existe des modèles globaux ou locaux qui prennent en compte différents facteurs. Par exemple, des modèles de complexité intermédiaire permettent de représenter tous les compartiments du système climatique (*), tout en autorisant des simulations sur une durée de 100 000 ans ; des modèles de circulation générale prennent en compte l'ensemble des compartiments climatiques ainsi que les phénomènes météorologiques, avec des simulations détaillées sur 500 à 10 000 ans.

La confrontation entre les reconstructions et les données laisse non seulement la possibilité d'évaluer la crédibilité des résultats des modèles utilisés pour les projections futures, mais aussi de vérifier la cohérence d'interprétation des différents enregistrements paléoclimatiques.

Que répondez-vous à celles et ceux qui disent que, finalement, la Terre s'est toujours adaptée et que, par le passé, il faisait beaucoup plus chaud et que la planète s'en est sortie, et donc que le réchauffement climatique n'est pas grave en soi ?

La question, ce n'est pas l'adaptabilité de la nature, qui est déjà passée par de multiples états. La question, c'est celle de la rapidité de la transition et de notre capacité à anticiper, à nous adapter et à émettre moins de gaz à effet de serre. C'est celle de notre

(*) **Les compartiments terrestres,** dont l'interaction joue sur le climat, sont l'atmosphère, l'hydrosphère (mers, océans, lacs et cours d'eau), la cryosphère (neiges et glaces) et la biosphère.

LAURENT AUGUSTIN/CNRS PHOTOTHÈQUE

Les modèles de comparaison

En 1991 a commencé, sous l'impulsion des paléoclimatologues Jean Jouzel et Sylvie Joussaume, le projet d'intercomparaison des modélisations paléoclimatiques (PMIP). Coordonné par le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, à Saclay, ce projet international (1) a alimenté les rapports du GIEC, dont celui de 2021. Les travaux ont permis d'affiner la valeur de la sensibilité climatique, c'est-à-dire la modification de la température engendrée par un doublement de la concentration en CO_2, et ont aussi montré une dépendance de cette valeur à l'état climatique considéré (2). Les simulations incluant une végétation interactive soulignent l'importance des interactions végétation-atmosphère-ruissellement-océan dans l'amplification des moussons. Un accent est également mis sur le fonctionnement de l'océan et la façon dont la température et la salinité affectent le transport de chaleur de l'équateur vers les pôles et peuvent conduire à des événements abrupts en climat glaciaire. Cela nous donne les moyens de déterminer si de tels événements sont à craindre dans le futur. La confrontation avec les données des coraux et des coquilles permet aussi de se prononcer sur la variabilité interannuelle dans les tropiques et de s'interroger sur ses changements à venir (3). Les nouvelles directions de recherche mettent un accent sur la dernière déglaciation, qui offre de nombreux défis de modélisation des différentes interactions intervenant entre climat et environnement.

(1) M. Kageyama *et al., Geosci. Model Dev., 11,* 1033, 2018.

(2) S. C. Sherwood *et al., Rev. Geophys., 58,* e2019RG000678, 2020.

(3) M. Carré *et al., Quat. Sci. Rev., 268,* 107125, 2021.

capacité à nous assurer qu'on ne va pas détruire l'environnement, parce qu'on en a besoin. L'analyse des paléoclimats montre qu'assurément, il y a eu des périodes passées avec des bouleversements climatiques. Certains ont eu pour conséquence des extinctions massives – notamment l'extinction permienne, il y a 252 millions d'années, où 95 % des espèces marines et 70 % des vertébrés terrestres ont disparu (lire p. 56). Quant aux crises qui ont eu lieu lorsque la Terre était peu peuplée, les humains pouvaient se déplacer. Aujourd'hui, des crises climatiques de même ordre engendreraient de vastes déplacements de populations, avec des conflits à la clé.

N'est-ce pas difficile d'anticiper cette situation car, même si l'on ressent quelques effets du réchauffement climatique, cela paraît limité ?

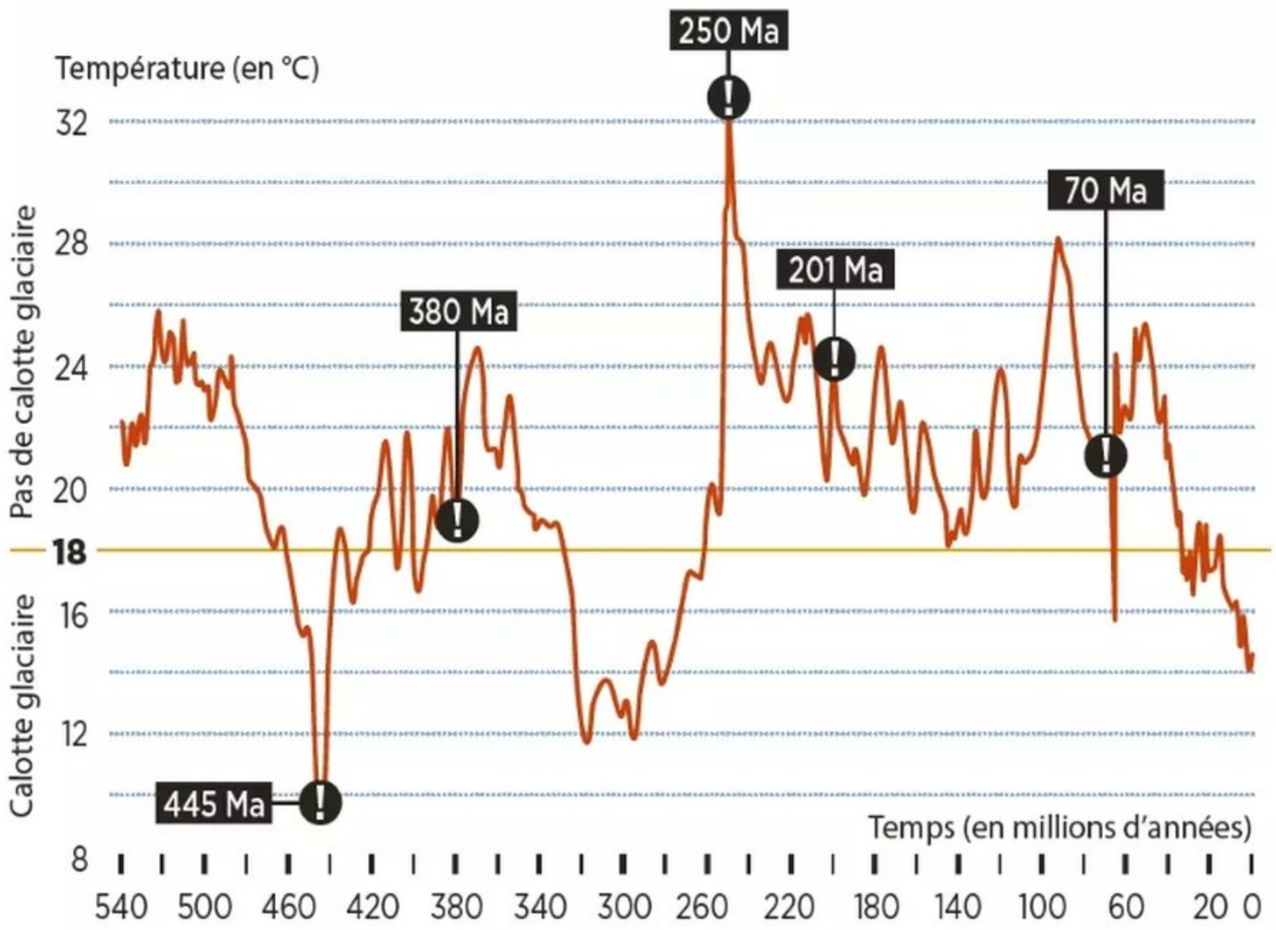
Oui, la prise de conscience est difficile, même quand on travaille sur le sujet. Il y a une sorte de blocage. Lorsque j'ai participé au quatrième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), en 2007, je travaillais sur les modèles d'évolution de température. On parlait beaucoup des scénarios à 4 °C d'augmentation de la température moyenne. Et puis j'ai vu arriver les résultats des simulations du scénario RCP 8.5 *[le pire scénario d'augmentation avec, en 2100, un niveau de CO_2 trois fois supérieur au niveau actuel]*. Les cartes étaient saturées de couleur, et moi qui avais l'habitude de voir des cartes des périodes glaciaires et interglaciaires, je ne comprenais pas. Qu'est-ce que c'est que ce cirque ?, me suis-je dit. J'ai alors compris que ce que nous avions simulé était bien plus fort qu'un cycle glaciaire-interglaciaire. De ce jour, je prends l'image du passage de la dernière période glaciaire à la période actuelle pour faire comprendre qu'on est en train de faire en un siècle ce qui s'est passé en 10 000 ans. On ne se rend pas bien compte car nous n'avons rien vécu de tel depuis 10 000 ans, période d'installation de nos sociétés. Je reste néanmoins optimiste, car les travaux du GIEC montrent qu'inverser la tendance est encore possible. Si la communauté paléo parvient à transformer un peu la façon de présenter ses résultats, elle peut contribuer à faire bouger les choses. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot

Panorama des climats anciens

Depuis sa formation, il y a 4,5 milliards d'années, la Terre a connu de nombreux climats, entre des périodes chaudes et glaciaires. Voici quelques repères pour les 540 derniers millions d'années, avec un focus sur les 65 derniers millions d'années.

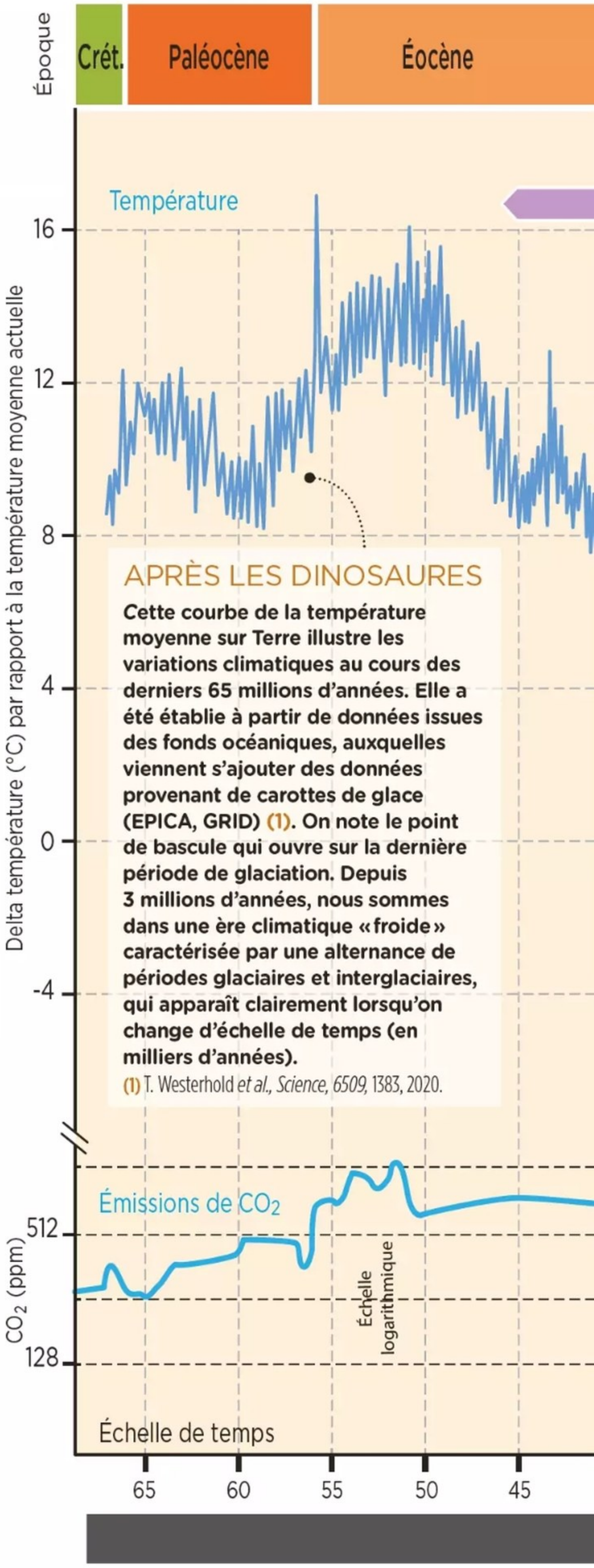
Conception : Mathias Germain et Jean-François Deconinck (université de Bourgogne)



UNE ALTERNANCE DE CHAUD ET FROID

Au cours des 540 derniers millions d'années, du Cambrien jusqu'aujourd'hui, les climats alternent entre des périodes de refroidissement (*icehouse,* remarquables par la présence de calottes glaciaires), et de réchauffement (*greenhouse*). Cette courbe de la température moyenne du globe a été établie à partir des analyses des isotopes de l'oxygène et d'indicateurs lithologiques du climat tels que les charbons, les récifs et les gisements de bauxite (1).

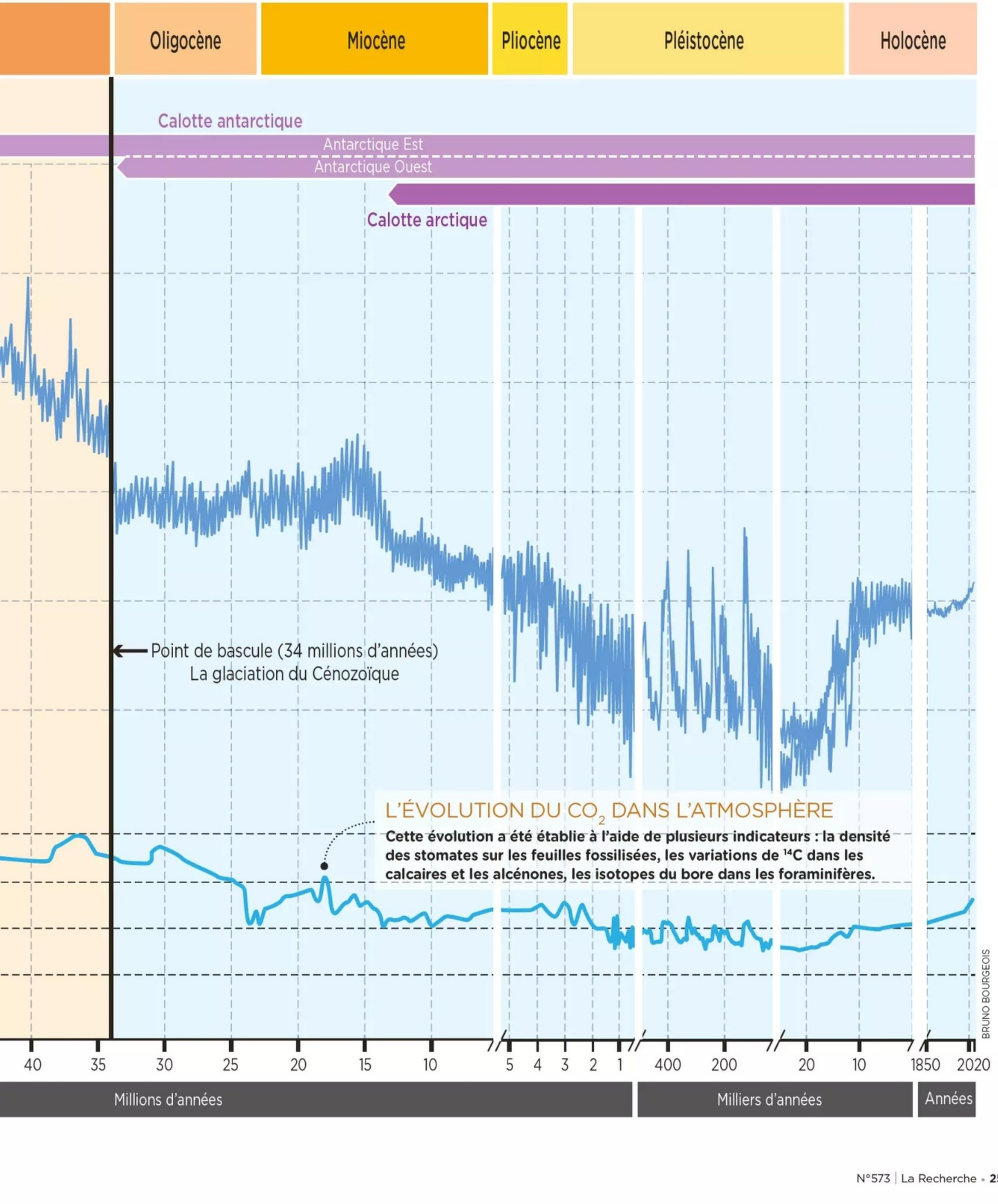
(1) C. R. Scotese *et al., Earth-Science Reviews, 215,* 103503, 2021.



APRÈS LES DINOSAURES

Cette courbe de la température moyenne sur Terre illustre les variations climatiques au cours des derniers 65 millions d'années. Elle a été établie à partir de données issues des fonds océaniques, auxquelles viennent s'ajouter des données provenant de carottes de glace (EPICA, GRID) (1). On note le point de bascule qui ouvre sur la dernière période de glaciation. Depuis 3 millions d'années, nous sommes dans une ère climatique « froide » caractérisée par une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires, qui apparaît clairement lorsqu'on change d'échelle de temps (en milliers d'années).

(1) T. Westerhold *et al., Science, 6509,* 1383, 2020.


Oligocène
Miocène
Pliocène
Pléistocène
Holocène
Calotte antarctique
Antarctique Est
Antarctique Ouest
Calotte arctique
Point de bascule (34 millions d'années)
La glaciation du Cénozoïque
L'ÉVOLUTION DU CO_2 DANS L'ATMOSPHÈRE
Cette évolution a été établie à l'aide de plusieurs indicateurs : la densité des stomates sur les feuilles fossilisées, les variations de ^{14}C dans les calcaires et les alcénones, les isotopes du bore dans les foraminifères.
40
35
30
25
20
15
10
5
4
3
2
1
400
200
20
10
1850
2020
Millions d'années
Milliers d'années
Années
BRUNO BOURGEOIS

Les influences astronomiques du climat

Nous savons désormais que les fluctuations de l'insolation de la Terre sont en partie à l'origine de l'alternance des âges glaciaires et interglaciaires. Si elles résultent de variations des paramètres orbitaux de la planète, d'autres phénomènes non encore élucidés entrent en jeu.



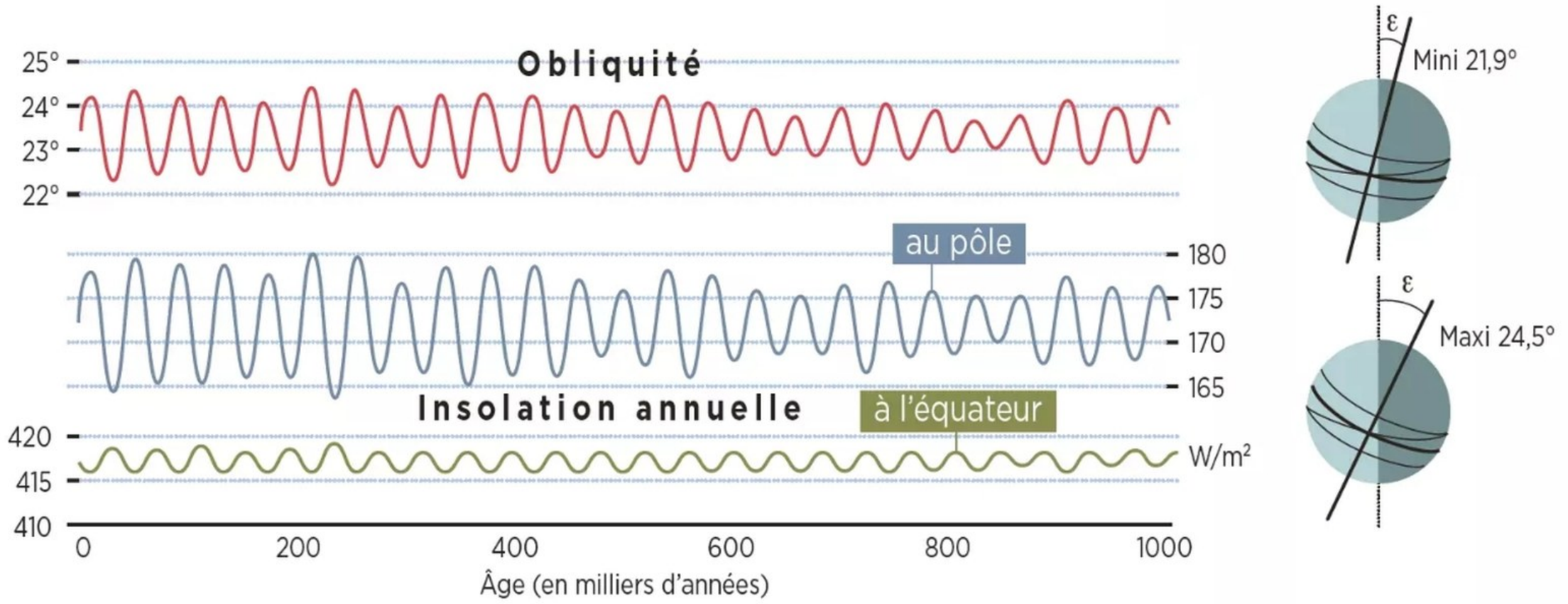
Didier Paillard
CLIMATOLOGUE, SACLAY
Chercheur CEA, il est spécialiste de la modélisation des climats anciens. Il mène ses travaux au sein du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), à Saclay.

Au début du XIXe siècle prévalait cette opinion que la Terre s'était créée dans le feu et donc qu'elle se refroidissait peu à peu depuis sa formation. Les observations géologiques et paléontologiques étaient dès lors souvent interprétées dans ce sens : les mammouths retrouvés au nord de la Russie étaient des « éléphants sibériens », témoins d'un climat de type africain dans un passé relativement proche ; la faune et la flore du début de l'ère Tertiaire (Éocène, entre 33 et 50 millions d'années) étaient reconnues, à juste titre cette fois, comme des marqueurs d'un climat chaud ; et les forêts tropicales du Carbonifère (il y a 250 à 300 millions d'années), qui ont donné naissance aux gisements de charbon en Europe comme en Amérique du Nord – objet de toutes les attentions des géologues en ce début de la révolution industrielle –, étaient interprétées à tort comme le signe d'une planète jeune et encore très chaude.
La situation évolue au milieu du XIXe siècle avec la découverte des âges glaciaires. Alors que l'on pensait le climat plus ou moins immuable, des preuves physiques d'une plus vaste extension des glaciers par le passé s'accumulent dans les Alpes. Ainsi les moraines – ces débris de roche entraînés par les glaciers – correspondent à des extensions maximales des glaces. Les striations sur les roches témoignent de manière cohérente, parfois sur des centaines de kilomètres, de la direction de l'écoulement de la glace. Les blocs erratiques sont retrouvés à des dizaines ou des centaines de kilomètres vers l'aval des vallées, loin de leur position originelle. De surcroît, ces glaciations ne concernent pas seulement les Alpes, mais aussi l'Écosse, la Scandinavie et l'Amérique du Nord.
Conclusion : il y a bien eu une succession d'âges glaciaires dans un passé relativement récent. L'histoire climatique de la Terre n'est pas un simple refroidissement depuis les origines, mais suit vraisemblablement une évolution plus complexe. Pour la première fois, la notion de changement climatique planétaire devient une réalité scientifique.

PREMIÈRE GRANDE INVENTION : LE CALENDRIER DES SAISONS

Les modifications des caractéristiques orbitales planétaires – le forçage astronomique – sont parmi les coupables qui viennent à l'esprit. N'oublions pas que la première grande découverte sur le climat, c'est l'invention du calendrier avec ses saisons : depuis l'Antiquité au moins, on sait que le retour des saisons est commandé par les astres. Pourtant, de manière assez étonnante, ce ne sont pas les astronomes qui s'emparent de cette question du forçage astronomique, mais des « amateurs de science ». Les premiers à poser les jalons de la théorie astronomique du climat sont en effet le Français Joseph Adhémar (1797-1862), professeur de mathématiques, et l'Écossais James Croll (1821-1890), autodidacte qui lisait beaucoup d'ouvrages scientifiques.
L'idée initialement énoncée par Adhémar en 1842 est celle du rôle de la précession dans la survenue des périodes glaciaires. La précession

DR



des équinoxes correspond à la rotation de l'axe de la Terre selon un cône avec une période de 25 700 ans environ – ce qui contribue à décaler les saisons par rapport aux étoiles –, mais aussi par rapport au périhélie (le point de l'orbite le plus proche du Soleil) – ce qui module l'intensité des saisons avec une période de 22 000 ans environ. Aujourd'hui, l'hémisphère Sud connaît des hivers plus longs (par exemple, en suivant notre calendrier : 184 jours entre le 21 mars et le 21 septembre – qui correspondent en gros aux équinoxes –, contre 181,25 pour l'autre moitié de l'année). Selon Adhémar, puis Croll en 1864, ces hivers doivent être plus froids et donc englacés. Autrement dit, les glaciations surviendraient parce que les hivers sont longs et particulièrement froids. Pour Adhémar, l'existence de l'Antarctique constituait une preuve de la justesse de sa théorie. La précession est antisymétrique par rapport aux hémisphères, de sorte que les phases s'opposent : si l'on est en glaciation dans le Sud aujourd'hui, à la phase inverse, il y a environ 11 000 ans, on devait être en glaciation dans le Nord.

Toutefois, comme cela avait déjà été relevé par leurs contemporains, cet argument du rôle de la précession sur les glaciations est fondé sur la situation en hiver (des hivers longs et froids favoriseraient les glaciations). Or, pour former de la glace, il faut de la neige et donc de l'humidité : il ne faudrait donc pas qu'il fasse froid en hiver, mais plutôt en été, notamment pour que la glace ne fonde pas ! Finalement, l'argumentation d'Adhémar et de Croll ne tient pas, mais ils ont eu le mérite d'être les premiers à discuter scientifiquement des mécanismes astronomiques des glaciations.

BRUNO BOURGEOIS

OBLIQUITÉ ET INSOLATION

En calculant la variation d'obliquité de l'axe terrestre (entre 21,9° et 24,5°) au cours du dernier million d'années – période principale de 41 000 ans –, on trouve que la quantité moyenne d'énergie reçue par la planète (l'insolation) est modulée. L'amplitude peut être de l'ordre de 10 W/m² dans les régions polaires (5 à 10 % du total), mais reste faible dans les tropiques (relativement, de l'ordre de 1%). Ce paramètre astronomique est l'une des principales causes des cycles glaciaires.

LE CYCLE DE MILANKOVITCH

Deuxième paramètre astronomique à prendre en compte : l'obliquité. S'ajoute en effet à la précession une variation de 2,5° de l'axe de la Terre, avec une période de 41 000 ans environ. Cette variation d'obliquité avait été mise en évidence dans les calculs de mécanique céleste dès la fin du XVIII[e] siècle. L'intérêt de l'obliquité, c'est qu'elle est en phase dans les deux hémisphères : lorsqu'on incline l'axe de la Terre, la planète reçoit plus d'énergie aux deux pôles et, quand son axe se rapproche de la perpendiculaire au plan de l'écliptique – le plan de l'orbite terrestre autour du Soleil –, moins d'énergie est reçue aux pôles. Ainsi, l'obliquité a un rôle en moyenne annuelle et son effet est symétrique par rapport à l'équateur.

La théorie astronomique du climat renaît au début du XX[e] siècle, sous la houlette du Serbe Milutin Milankovitch (1879-1958). Ingénieur en génie civil, il a construit de nombreux ouvrages d'art, des ponts et des barrages. Discutant avec des géographes, il découvre la problématique

des cycles glaciaires. Il a alors pour ambition de «fonder» la climatologie, branche de la géographie, sur de la physique. Pour cela, il calcule les variations d'énergie reçue par la Terre au cours du temps – ce qu'on appelle l'insolation. Milankovitch comprend que l'obliquité est importante aux hautes latitudes. Il considère que l'insolation d'été dans les régions nordiques est déterminante pour le bilan annuel de la glace, et définit «l'été» comme étant la moitié de l'année centrée sur le solstice. En prenant en compte tous ces paramètres, il trouve que l'insolation varie surtout avec un cycle de 41 000 ans, ce qu'on appellera plus tard le cycle de Milankovitch. En effet, lorsqu'il publie sa prédiction, en 1941, il n'a pas à sa disposition d'enregistrement continu de l'évolution des calottes de glace permettant de la vérifier. On connaissait alors quatre traces discrètes de quelques phases d'avancée maximale des glaces, notamment dans les Alpes (les glaciations de Günz, Mindel, Riss, Würm, du nom d'affluents du Danube). Il s'est donc contenté d'associer les minimums de sa courbe d'insolation aux maximums glaciaires connus alors.

L'avènement de la géochimie isotopique en paléoclimatologie, discipline lancée par l'Italien Cesare Emiliani (1922-1995), permettra de reconstruire des évolutions continues du climat à partir des sédiments marins. Emiliani définit ainsi les « stades isotopiques marins » (*MIS* en anglais), qui servent aujourd'hui de référence pour désigner les périodes glaciaires. Ses résultats mettent en évidence des oscillations glaciaires. En 1955, la corrélation entre les données et le forçage astronomique est assez bonne.

UTILISER LES DONNÉES GÉOLOGIQUES POUR CONTRAINDRE LES PARAMÈTRES

À mesure que de nouvelles informations chronologiques arrivent, il apparaît que la cyclicité de 41 000 ans suggérée par la théorie de Milankovitch ne correspond pas bien aux données isotopiques marines. En 1976, James D. Hays, professeur à l'université Columbia (États-Unis), et ses collègues montrent que ces données sont bien rythmées par l'astronomie et que l'on y retrouve toutes les fréquences attendues, correspondant aux différentes périodes astronomiques (19 000, 23 000, 41 000 et 100 000 ans), mais aussi que le signal dominant est lié à l'excentricité (100 000 ans de période), ce qui ne correspond pas au forçage radiatif (1). La théorie astronomique est à la fois confirmée – car le rythme des changements est bien lié à l'astronomie – et infirmée, car la « théorie de Milankovitch », qui prédit une cyclicité de 41 000 ans, ne fonctionne pas bien sur toutes les périodes. On découvrira plus tard que les glaciations au début du Quaternaire (entre 3 et 1 million d'années avant le présent) sont effectivement rythmées avant tout par l'obliquité : Milankovitch avait donc raison… Mais ce n'est plus le cas au cours du dernier million d'années. La dynamique associée aux cycles de 100 000 ans reste encore largement débattue. L'astronomie pilote les climats du passé mais le CO_2 également, dans un entrelacs complexe (lire p. 58).

Peut-on remonter le cours du temps astronomique et connaître les paramètres orbitaux très anciens ? Il existe une limite intrinsèque car, au-delà de 40 à 50 millions d'années pour les paramètres orbitaux (excentricité), et même seulement 5 à 10 millions d'années pour les paramètres axiaux (précession et obliquité), les calculs échouent, étant donné que le système devient chaotique (ce qu'on appelle la sensibilité aux conditions initiales). Dès lors, des astronomes ont l'espoir d'utiliser les données géologiques pour contraindre les paramètres astronomiques. C'est ce que fait Jacques Laskar, astronome à l'Observatoire de Paris, qui anime le projet ERC AstroGeo visant à échantillonner les paramètres astronomiques grâce à des données géologiques pour l'ensemble du Cénozoïque, c'est-à-dire jusqu'à 66 millions d'années en arrière. Un renversement de situation où ce sont les géologues qui aident les astronomes. ■



▲ *Sur les falaises de Punta Piccola, en Sicile, on peut retrouver dans l'alternance des sédiments, qui enregistrent les changements de précipitations (les sapropèles), les cycles astronomiques liés à la précession de l'orbite terrestre.*

Il existe une limite intrinsèque, où le système devient chaotique

(1) J. D. Hays *et al.*, *Science*, *194*, 1121, 1976.

JULIEN PLANCQ/DR

Changements d'hier et d'aujourd'hui de la circulation océanique

Les données paléoclimatiques obtenues grâce aux carottes de sédiments marins révèlent l'importance de la circulation océanique dans les changements climatiques rapides qui se sont produits ces 90 000 dernières années. Des observations mettant en lumière l'existence de rétroactions, améliorant les modèles climatiques et la fiabilité des projections climatiques qu'ils fournissent, alors que ce type de rétroaction est mal connu et peu pris en compte.



Claire Waelbroeck
PALÉO-OCÉANOGRAPHE
LOCEAN - IPSL, PARIS
Directrice de recherche CNRS, elle s'intéresse aux liens entre changements climatiques et circulation océanique à différentes échelles de temps.

DR

Le changement climatique en cours a pour effet d'accélérer la fonte de la calotte du Groenland et d'augmenter les précipitations aux hautes latitudes Nord (1). Ces changements diminuent la salinité des eaux de surface dans les zones actuelles de formation des eaux profondes. La conséquence extrêmement probable de ce phénomène est un ralentissement de la circulation méridienne atlantique (*). Mais la fiabilité de telles projections est encore à améliorer. La difficulté est que les modèles climatiques, qui fournissent ces projections en réponse aux différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), ne sont actuellement pas capables de reproduire les variations climatiques rapides enregistrées au cours des 90 000 dernières années dans les sédiments marins et les glaces polaires. Ceci est révélateur du fait que certains mécanismes de rétroaction ne sont pas encore bien pris en compte dans les modèles. Pour améliorer ces derniers, ainsi que la fiabilité des projections qu'ils fournissent, récolter des données sur la circulation océanique et les calottes glaciaires passées apparaît donc comme un enjeu majeur de recherche.

1 QU'EST-CE QUE LA CIRCULATION OCÉANIQUE ?

La circulation océanique résulte de l'apport inégal d'énergie solaire à la surface du Globe. Elle contribue à redistribuer l'excès de chaleur des basses latitudes vers les hautes latitudes. Déterminée en grande partie par les contrastes de densité des masses d'eau (*), elle est aussi influencée par les vents et les marées. Dans l'océan Atlantique, elle est actuellement caractérisée par un courant de surface bien connu, qui amène l'eau de surface chaude et salée des basses vers les hautes latitudes Nord : le Gulf Stream. Au cours de son déplacement vers le nord, la densité de cette eau de surface augmente, en raison des échanges de chaleur

avec les masses d'air à son contact (en hiver, ces échanges sont particulièrement vigoureux avec les masses d'air polaire circulant d'ouest en est en provenance du Canada). En cédant sa chaleur aux masses d'air qui la survolent, l'eau se refroidit et devient suffisamment dense pour plonger jusqu'à plus de 2 000 mètres de profondeur. Ce processus engendre la formation d'eaux profondes dans les mers nordiques (mer de Norvège, mer du Groenland et mer d'Islande) et en mer du Labrador (partie de l'océan Atlantique située entre la région du Labrador, au Canada, et le Groenland), qui donnent naissance au courant Atlantique Nord profond s'écoulant vers l'Atlantique Sud entre 2 000 et 3 500 mètres de profondeur. Par ailleurs, en cédant sa chaleur à l'air, l'eau de surface réchauffe celui-ci, ce qui explique que les températures hivernales sont beaucoup plus douces en Europe qu'en Amérique du Nord aux mêmes latitudes, lorsque le vent souffle de l'ouest. La circulation océanique est donc intimement liée aux conditions climatiques : des changements de circulation océanique engendrent des changements climatiques, et réciproquement.

2 COMMENT ÉTUDIE-T-ON LA CIRCULATION OCÉANIQUE PASSÉE ?

Principalement grâce aux sédiments marins, constitués de matières organiques et minérales en provenance de la colonne d'eau ou des rivières, comme la vase au fond d'un lac. Ceux-ci sont prélevés par carottage ou par forage. Le carottage permet de prélever des séquences continues de 10 à 70 mètres de sédiments meubles. Le forage, lui, permet de prélever des sédiments de tout type ou des roches, par tronçons, sur plusieurs centaines de mètres. Le navire océanographique français Marion Dufresne dispose d'un système de carottage unique au monde ; il permet de prélever des séquences continues de sédiment pouvant atteindre 70 mètres sans déformer les couches sédimentaires, c'est-à-dire en préservant l'empilement sédimentaire et donc la séquence temporelle des changements passés. Il a notamment été utilisé dans le cadre du projet ACCLIMATE, dont l'objectif est de *« déchiffrer les causes et les effets des changements climatiques rapides enregistrés dans les sédiments marins et les glaces polaires, et d'identifier les éléments permettant de les simuler à l'aide de modèles climatiques »*. (2)

(*) **La circulation méridienne atlantique** désigne le vaste système de courants qui, dans l'océan Atlantique, transportent de l'eau chaude vers le nord en surface, et de l'eau froide vers le sud en profondeur.

(*) **La densité d'une masse d'eau** augmente lorsque sa salinité augmente et/ou sa température diminue.

3 QUE NOUS APPRENNENT LES CHANGEMENTS PASSÉS DE LA CIRCULATION OCÉANIQUE ?

L'analyse des carottes de sédiments marins et de glace des 90 000 dernières années a montré que la température de surface de l'Atlantique Nord et de l'air au-dessus du Groenland ont connu des variations abruptes de grande amplitude : des réchauffements de 8 à 15 °C en 200 à 400 ans, sans rapport avec les variations de l'énergie solaire reçue par la planète (3). Ces variations climatiques rapides sont l'expression de la variabilité interne du système climatique (la variabilité qui est purement liée à la dynamique interne du système, et donc présente même en l'absence de tout forçage). Elles révèlent l'existence de mécanismes de rétroaction entre les différents éléments du système climatique tels que la température de l'air, la couverture de glace, ou encore l'intensité des courants océaniques. Ces variations démontrent aussi le caractère non linéaire du système, c'est-à-dire la possibilité qu'une modification lente et de petite amplitude d'un facteur externe provoque un changement rapide et de grande ampleur des conditions climatiques.

Les causes et les mécanismes de cette variabilité climatique rapide ne sont pas encore totalement élucidés. Cependant, les mesures effectuées sur les carottes de sédiment ont montré que les épisodes froids étaient associés à des ralentissements de la circulation méridienne atlantique et que des débâcles d'iceberg ont eu lieu durant certains de ces épisodes froids. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- Catherine Jeandel et Rémy Mosseri R. (dir.), *Le climat à découvert,* CNRS éditions, 2011.
- Pierre Morel et Sylvie Jousseaume, *Climat, d'hier à demain,* CNRS éditions, 2000.

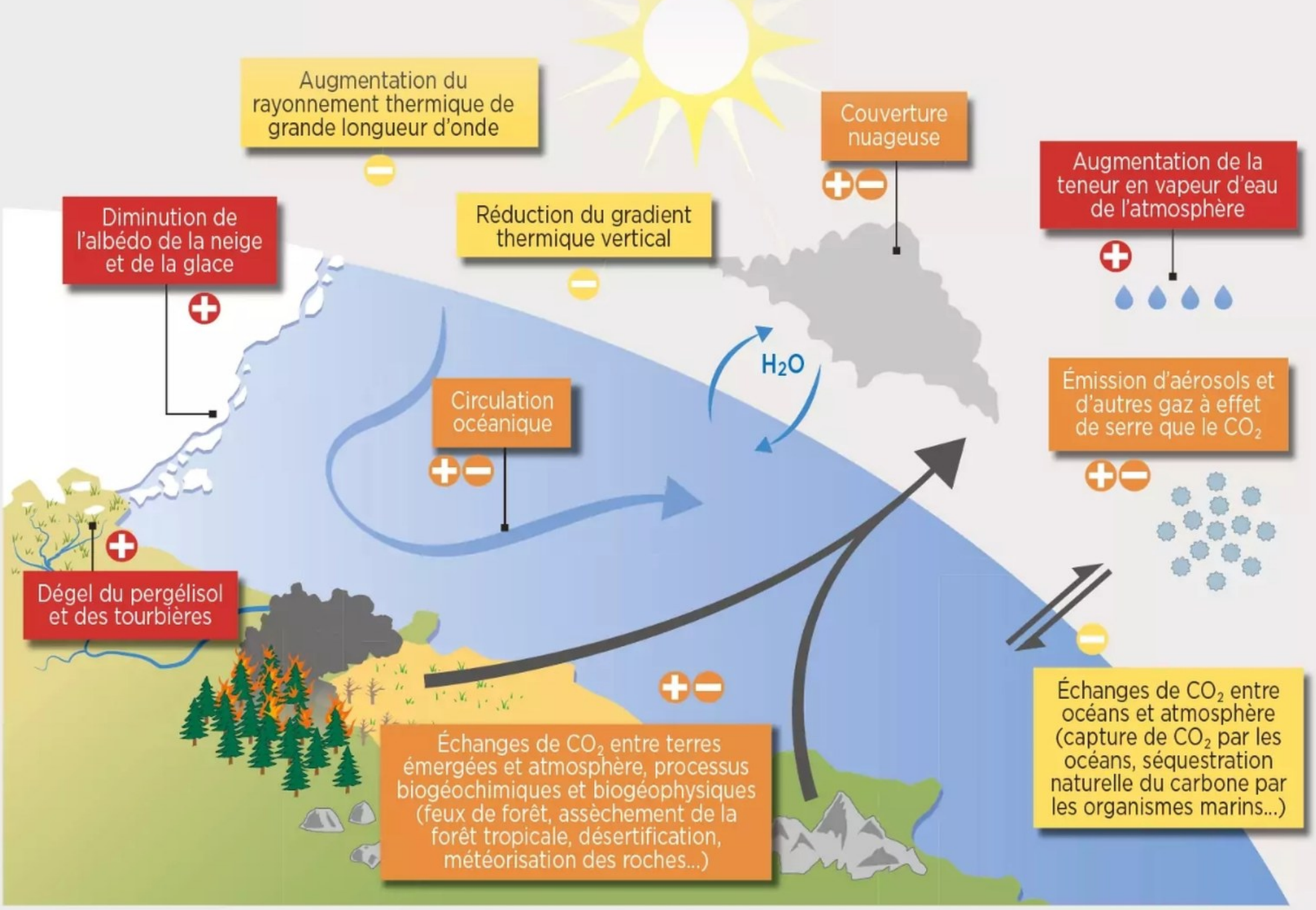
(1) IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis,* Cambridge University Press, 2021.

(2) http://sea acclimateproject.eu/

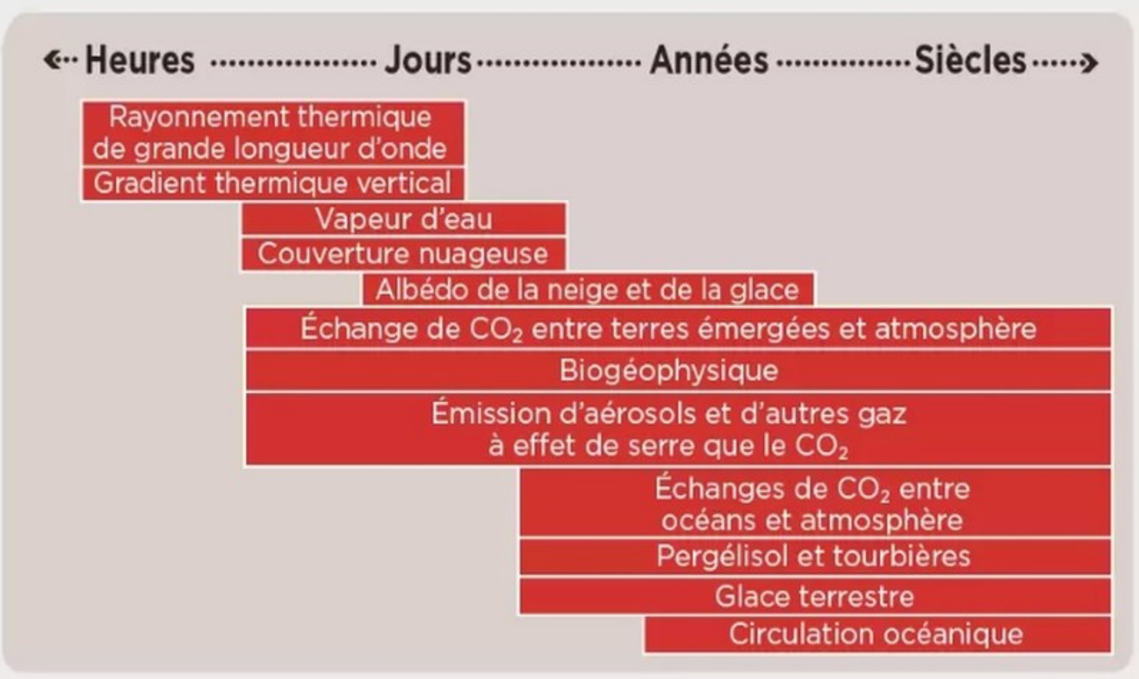
(3) IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis,* Cambridge University Press, 2013.

Une multitude de rétroactions physico-chimiques et biologiques

Les interactions par lesquelles les variables climatiques s'influent mutuellement sont nombreuses. Elles doivent être prises en compte dans l'étude des climats, car elles amplifient ou atténuent les variations au sein du système.



INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS - (SOURCE : HTTPS://TINYURL.COM/WG1AR5-CHAPTER01)



Les rétroactions climatiques liées à l'augmentation du CO_2 et à l'élévation de la température comprennent des rétroactions négatives (-) qui atténuent l'effet des variations du système climatique, telles que l'augmentation du rayonnement thermique de grande longueur d'onde, le taux de renouvellement et d'échange de CO_2 entre océans et atmosphère, et des rétroactions positives (+) qui amplifient les variations du système climatique, comme l'accroissement de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère et la diminution de l'albédo de la neige et de la glace. Certaines rétroactions peuvent être positives ou négatives (+/-), telles les émissions d'aérosols –, ou même incertaines, comme l'effet des nuages. Ces diverses rétroactions se produisent à des échelles de temps très variables, allant de quelques heures à plusieurs siècles.



Amaëlle Landais
GLACIOLOGUE ET PALÉOCLIMATOLOGUE, LSCE, GIF-SUR-YVETTE
Directrice de recherche CNRS au laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), ses recherches portent sur le développement et l'utilisation de méthodes de mesures de haute précision des isotopes stables dans les carottes de glace pour reconstruire le climat et l'environnement du passé.

Les changements climatiques majeurs « récents »

Les données paléoclimatiques sont essentielles pour tester les modèles du système Terre utilisés pour prévoir l'évolution future du climat. La variation récente la plus grande est celle qui caractérise la transition entre le dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, et la période plus chaude actuelle qui prévaut depuis 10 000 ans. D'autres variations climatiques plus rapides et de grande ampleur ont été documentées, qui illustrent le fonctionnement fortement non linéaire du système climatique.

La période géologique dans laquelle nous vivons s'appelle le Quaternaire. Elle a débuté avec la glaciation du Groenland il y a plus de 2,5 millions d'années et, si elle n'a pas vu naître le genre *Homo,* elle l'a vu évoluer. Cette période géologique étant la plus récente, elle est aussi la mieux documentée et de nombreuses archives climatiques récoltées sur les continents, dans les océans et dans les calottes de glace permettent de renseigner les variations climatiques des dernières centaines de milliers d'années. Des données qui sont essentielles pour tester les modèles du système Terre utilisés pour prévoir l'évolution future du climat et illustrent le fonctionnement fortement non linéaire du système climatique.

Au cours du Quaternaire – une période courte sur l'échelle des temps géologiques (environ 4,6 milliards d'années) –, la position des continents a peu bougé. La Terre a conservé sa géographie actuelle, caractérisée par la présence de glace aux deux pôles : les calottes groenlandaise et antarctique. Leur présence joue un rôle essentiel sur la dynamique climatique observée durant le Quaternaire. Le climat de cette période géologique est en effet rythmé par une alternance entre des phases froides, glaciaires – la dernière ayant culminé il y a 20 000 ans – et des phases chaudes, interglaciaires, comme celle dans laquelle nous vivons depuis 10 000 ans. Au cours des périodes glaciaires, de vastes calottes

DR

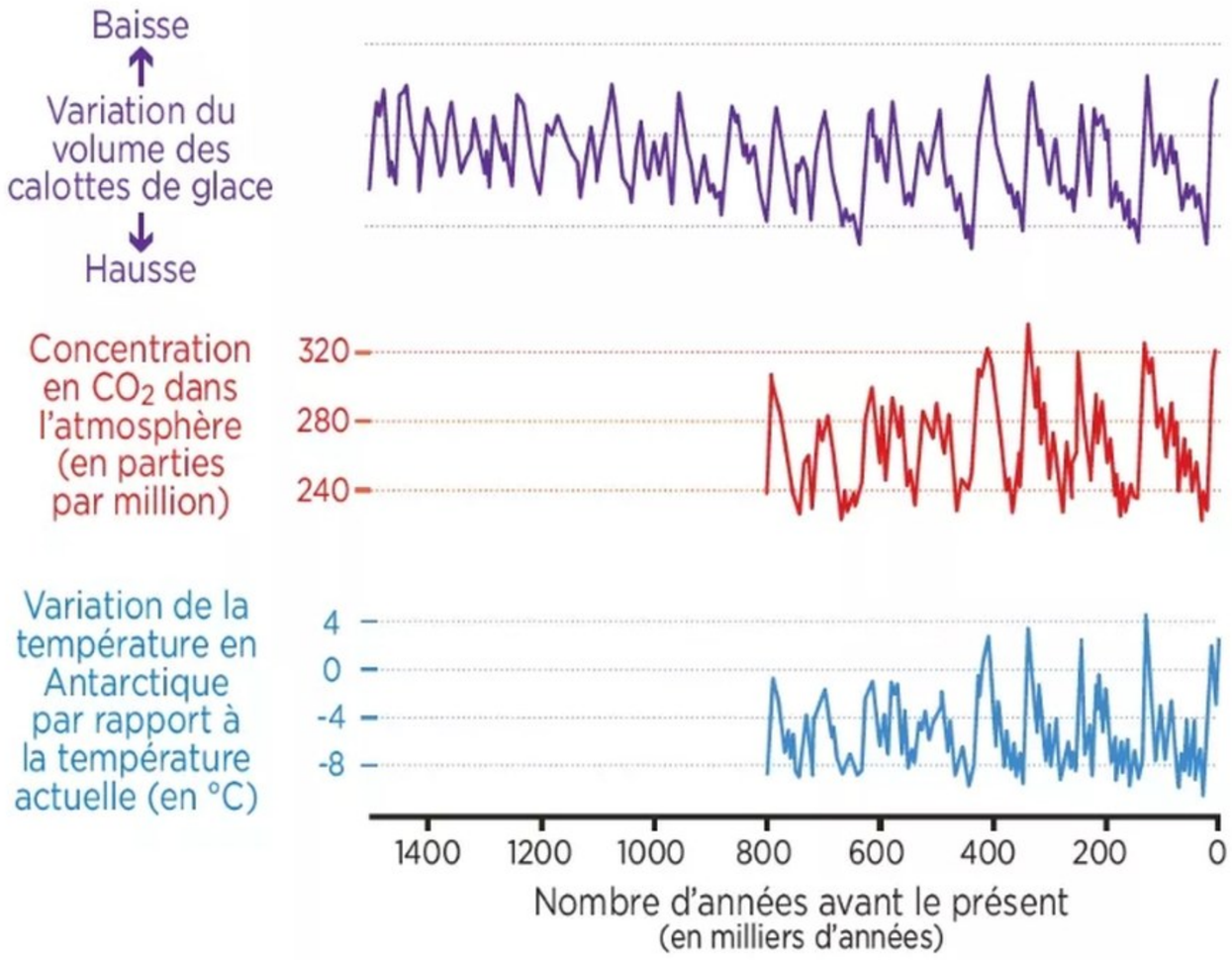


NOAA SCIENCEON A SPHERE - IXPERT/SHUTTERSTOCK.

▲ *Vue récente de l'hémisphère Nord de la Terre, en été. En médaillon : vue de l'hémisphère Nord pendant le dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans.*

DES VARIATIONS PARALLÈLES

L'étude des carottes de glace polaires permet de retracer l'évolution de la taille des calottes de glace au cours des derniers millions d'années. Elle documente aussi la succession des cycles glaciaires et interglaciaires en Antarctique au cours des derniers 800 000 ans, avec un parallélisme entre variations des températures et de la concentration en CO_2.



de glace se construisent progressivement et recouvrent, au bout de plusieurs dizaines de milliers d'années, les terres du nord de l'hémisphère Nord correspondant à l'actuel Canada (calotte Laurentide) et à la Scandinavie (calotte Fennoscandienne). Puisque de larges quantités d'eau se trouvent stockées sous forme de glace, le niveau de l'océan est inférieur de 120 mètres par rapport à son niveau actuel ; et la fraction de terres émergées, elle, est plus importante.

La succession des variations glaciaires-interglaciaires des dernières centaines de milliers d'années se lit à travers de nombreux enregistrements sédimentaires. En particulier, les analyses effectuées sur les carottes de sédiments marins forées au fond des océans permettent de reconstruire l'évolution du niveau des océans et donc la taille des calottes de glace au cours des derniers millions d'années : les périodes interglaciaires, associées à un minimum de volume des calottes de glace, sont plutôt courtes (5 000 à 20 000 ans) et entrecoupées de périodes glaciaires plus longues (jusqu'à 100 000 ans), qui s'achèvent avec un maximum de volume des glaces avant la déglaciation. Les carottes de glace polaires documentent aussi la succession des cycles glaciaires et interglaciaires du point de vue de la température locale et de la concentration en gaz à effet de serre au cours des derniers 800 000 ans en Antarctique, avec un parallélisme entre variations de concentration en CO_2 et variations de température.

LE RÔLE DES RÉTROACTIONS

Si le lien entre les conditions astronomiques et les variations glaciaires-interglaciaires est établi depuis les travaux du Serbe Milutin Milankovitch (1879-1958) publiés en 1941, il est de plus en plus évident que des rétroactions internes au système Terre sont essentielles pour décrire ces variations climatiques (1). Ces rétroactions mettent en jeu le cycle du carbone, le cycle de l'eau et notamment la taille des calottes de glace. Les déglaciations ont lieu pendant des maxima d'insolation d'été au nord de l'hémisphère Nord. En effet, quand la position de la Terre par rapport au Soleil et son inclinaison par rapport au plan de l'écliptique (*) sont telles que l'énergie reçue aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord atteint un maximum, les conditions sont réunies pour que la taille des calottes de glace commence à diminuer. Cependant, il n'y a pas de correspondance systématique entre les variations de la quantité d'insolation en été et les variations climatiques. Seulement 25 % des maxima d'insolation sont associés à des déglaciations et certaines déglaciations ont lieu alors que le maximum d'insolation est de faible amplitude (par exemple autour de 420 000 ans avant aujourd'hui) (2). De plus, la périodicité des cycles glaciaires-interglaciaires a varié, entre il y a 1,2 et 0,8 million d'années, d'une période de 41 000 ans à une période de 100 000 ans, alors que le forçage astronomique est resté le même (3). La compréhension de cette transition, appelée transition du mi-Pléistocène, est l'objet de nombreuses recherches et motive l'obtention et l'étude d'archives glaciaires et marines à haute résolution sur le dernier million et demi d'années. C'est à cela que travaille, par exemple, le projet Beyond EPICA (lire p. 36).

Si le forçage astronomique ne suffit pas à expliquer seul ces variations climatiques, l'influence de la taille des calottes de glace, de l'étendue de

(*) **Le plan de l'écliptique** est le plan géométrique contenant l'orbite terrestre autour du Soleil et, approximativement, celle des autres planètes principales.

ILLUSTRATION : BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : AMAËLLE LANDAIS

la glace de mer et de la concentration atmosphérique en CO_2, est primordiale. L'augmentation de la concentration en CO_2, qui arrive tôt pendant les déglaciations, sans doute en lien avec des modifications de circulation océanique (lire p. 29) au niveau de l'océan austral, est ainsi indispensable pour expliquer l'amplitude des déglaciations. De même, il semble que les déglaciations ont généralement lieu quand le volume des calottes de glace a atteint une certaine taille et donc une certaine latitude sud au-delà de laquelle elle ne peut plus grossir car les températures sont trop élevées. Cette taille critique semble plus importante pour les cycles glaciaires–interglaciaires récents (derniers 400 000 ans) que pour les plus anciens.

Les transitions glaciaires–interglaciaires sont des variations climatiques lentes, associées au temps de réponse des calottes de glace. Ainsi, on estime que la dernière déglaciation s'est étalée entre - 19 000 ans et - 11 000 ans avant aujourd'hui (4).

Superposée à cette dynamique climatique lente, il existe une variabilité climatique bien plus rapide, à l'échelle décennale à multicentennale, qui a ponctué la dernière période glaciaire et probablement les périodes glaciaires précédentes. Elle a été mise en évidence par les analyses des carottes de glace, qui permettent d'obtenir une haute résolution temporelle (5).

DEUX TYPES DE VARIABILITÉ

Cette variabilité climatique rapide a été repérée pour la première fois dans les glaces du Groenland dans les années 1980. Elle se présente comme une succession de vingt-cinq événements appelés événements de Dansgaard-Oeschger. Chacun de ces derniers est caractérisé par un réchauffement abrupt (de 10 à 15 °C en une ou plusieurs décennies), suivi d'une période relativement chaude de quelques dizaines ou centaines d'années (interstade), puis d'un refroidissement vers une période froide (stade) de quelques centaines d'années. Cette variabilité rapide a ensuite été mise en évidence par des mesures de traceurs géochimiques, des comptages de coquilles fossiles ou des comptages de pollens dans de nombreuses archives continentales et marines de l'hémisphère Nord : la végétation de l'Europe de l'Ouest est ainsi caractérisée par un couvert de forêts pendant les interstades et par des espèces semi-désertiques (armoise, chénopodes, etc.) pendant les stades ; les zones de forte précipitation (mousson) des tropiques, quant à elles, sont déplacées vers le sud lors de la transition entre interstade et stade (6).

En Antarctique, ces événements sont visibles aussi, mais en opposition de phase par rapport à ce qui se passe au Groenland : la température antarctique augmente pendant les stades et diminue durant les interstades, ce qui conduit à parler de phénomène de « balance bipolaire ». En parallèle, les sédiments marins révèlent, pendant certains stades, des couches de grains de taille grossière dont l'origine est attribuée à des débâcles d'icebergs à partir de la calotte couvrant le nord de l'Amérique du Nord (7).

Tous ces indices montrent que ces événements climatiques sont globaux et impliquent des modifications internes de la répartition de chaleur à la surface de la Terre, de la circulation océanique et de la circulation atmosphérique en lien avec la dynamique des calottes de glace. La majorité des travaux actuels concluent que ces événements majeurs ne sont pas liés à des forçages externes (volcanisme, forçage solaire), mais plutôt au caractère instable du climat en période glaciaire (8). L'étude des variations climatiques du Quaternaire met ainsi en évidence les processus associés au changement climatique sur des échelles de temps courtes (événements de Dansgaard-Oeschger) et longues (transitions glaciaires-interglaciaires). Ces deux types de variabilité font intervenir les différents compartiments du système Terre (océan, atmosphère, cryosphère, biosphère), ainsi que des rétroactions internes liées au cycle de l'eau et au cycle du carbone.

L'un des grands défis est désormais de réussir à modéliser ces grands événements climatiques du passé et de les reproduire avec les modèles de système Terre, utilisés par les scientifiques du GIEC pour leurs prédictions sur l'évolution du climat dans le futur. ■

Des événements majeurs liés au caractère instable du climat en période glaciaire

(1) D. Paillard et F. Parrenin, *Earth Planet. Sci. Lett., 227,* 263, 2004.

(2) Past Interglacials Working Group of PAGES, *Rev. Geophys., 54,* 162, 2016.

(3) C. J. Berends *et al., Rev. Geophys., 59,* e2020RG000727, 2021.

(4) P. U. Clark *et al., PNAS, 109,* E1134, 2012.

(5) S. J. Johnsen *et al., Nature, 359,* 311, 1992.

(6) S. P. Harrison et M. F. Sanchez Goñi, *Quaternary Sci. Rev., 29,* 2957, 2010 ; X. Wang *et al., PAGES News, 16,* 31, 2008.

(7) S. R. Hemming, *Rev. Geophys., 42,* RG1005, 2004.

(8) L. C. Menviel *et al., Nat. Rev. Earth Environ., 1,* 677, 2020.

À la recherche de glaces d'un million d'années

La calotte glaciaire de l'Antarctique recèle de précieux indicateurs des climats anciens. Des carottes de glace prélevées entre 1999 et 2007, dans le cadre du programme EPICA, ont renseigné les scientifiques sur la température et la composition de l'atmosphère depuis 800 000 ans environ. L'enjeu est désormais de remonter encore plus loin dans le temps : jusqu'à 1,5 million d'années.



▲ *Sur le site de Little Dôme C, en Antarctique, l'équipe du programme Beyond EPICA prépare des carottiers afin d'extraire de la glace profonde.*

R. MULVANEY (BE-OIC)

Imaginez un petit camp au milieu d'un grand espace blanc où la température descend régulièrement jusqu'à - 50 °C. Bienvenue à Little Dôme C ! Ce nouveau site de forage est situé à une altitude de 3 233 mètres au-dessus du niveau de la mer, sur le plateau antarctique oriental, à plus de 1 000 kilomètres de la côte, et à 34 km de la station franco-italienne Concordia. Depuis novembre 2021, les équipes internationales du projet Beyond EPICA Old Ice percent la calotte glaciaire. Le forage a lieu entre novembre et janvier (la saison d'été pour l'Antarctique), et devrait durer au moins trois ans. Il est effectué à l'aide d'un système complexe, qui peut extraire des carottes de glace de quatre mètres de long et atteindre les couches profondes de glace, à 2 700 mètres… Un effort sans précédent dans les études de paléoclimatologie, à la mesure de l'objectif que se sont fixé les participants au projet de recherche : remonter le temps de 1,5 million d'années, afin de révéler des informations inestimables sur la température et la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à l'époque.

L'ANTARCTIQUE : «BIBLIOTHÈQUE» IMMENSE RENSEIGNANT SUR LE CLIMAT

L'Antarctique est une archive inestimable sur l'histoire de la Terre. S'étendant sur 14 millions de km², le continent blanc renferme, dans ses milliers de mètres d'épaisseur de glace, une sorte de bibliothèque immense qui conserve les différents chapitres du climat. En effet, cette neige lentement transformée en glace permet de reconstituer l'histoire de la température et de la composition de l'atmosphère. On doit l'idée de l'étudier au glaciologue français Claude Lorius qui, après sa première mission en Antarctique, proposa une méthode dans sa thèse soutenue en 1963. Partant du principe que, plus il fait froid, moins il y a d'isotopes lourds dans la glace qui se déposent en Antarctique, il suggéra d'étudier sa composition en deutérium (un isotope de l'hydrogène, deux fois plus lourd) et en oxygène 18 (une variante de l'oxygène présente naturellement dans l'océan et l'air), afin de déterminer la température qui régnait sur Terre lorsqu'elle est tombée sous forme de neige. Le



Catherine Ritz
GLACIOLOGUE, IGE, SAINT-MARTIN-D'HÈRES
Directrice de recherche au CNRS, elle travaille à l'Institut des géosciences de l'environnement (IGE) à Saint-Martin-d'Hères. À l'aide de modèles numériques qu'elle a développés, elle s'intéresse à l'évolution des calottes polaires en réponse aux variations climatiques, que ce soit dans le passé, à l'échelle des cycles glaciaires-interglaciaires, ou pour des projections dans le futur proche.

glaciologue s'intéressa aussi aux bulles d'air emprisonnées à l'intérieur de la glace. Il établit que l'on peut y retrouver la concentration de gaz comme le dioxyde carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (N_2O), qui sont tous trois des gaz à effet de serre, et ainsi obtenir un aperçu unique de l'atmosphère passée.

En quelque soixante ans, les forages menés en Antarctique ont permis de remonter très loin dans le temps. Publiés en 1987, les travaux de Jean Jouzel ont été pionniers dans l'établissement de corrélations directes entre les activités humaines et l'évolution du climat sur 160000 ans (1). Plus près de nous, le programme de recherche européen EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica), initié en 1995 avec dix pays européens (dont la France), a, lui, permis de reconstruire les variations de température et de gaz à effet de serre sur les 800000 dernières années (2) !

Aujourd'hui, le programme Beyond EPICA vise à aller encore plus loin dans le temps. Pourquoi ? Depuis 2,6 millions d'années, il se produit une alternance de climats froids et chauds, au cours desquels des calottes glaciaires se développent puis régressent par intermittence sur les continents de l'hémisphère nord. Cette oscillation conduit à deux états de la planète : les stades glaciaires d'une part, et les stades interglaciaires d'autre part ; ces derniers se caractérisent par un climat nettement plus chaud, comparable au climat actuel, avec absence ou quasi-disparition des calottes dans l'hémisphère nord. Ce sont de petits changements de l'orbite terrestre, connus sous le nom de « cycles de Milankovitch », qui pilotent l'entrée et la sortie de notre planète dans les âges glaciaires. Pendant plus d'un million d'années, cette alternance s'est produite tous les 40000 ans environ (quarante glaciations existent entre 2,6 et 1 million d'années). Mais, vers 1,2 million d'années, l'amplitude des oscillations a soudainement grandi, avec des cycles de 100000 ans… Ce changement, que les spécialistes appellent la transition du mi-Pléistocène, ne coïncide pas avec une modification des paramètres astronomiques. Quelles sont les raisons de ce changement ? Sont-elles en lien avec les gaz à effet ? C'est ce que nous cherchons à comprendre en allant chercher des indices dans des glaces datant de cette époque.

QUATRE CRITÈRES ESSENTIELS

Au lancement du projet, la principale difficulté a été de définir le site de forage. Il fallait prendre en compte plusieurs critères. Le premier est le flux géothermique. Plus on fore profond, plus on trouve des couches de glace anciennes. Mais, lorsqu'on approche du socle rocheux, les couches peuvent fondre entre elles car la Terre agit comme une plaque chauffante. Il fallait donc déterminer un site de forage qui nous donne la possibilité d'atteindre des couches de glace datant de 1,2 million d'années avec un flux géothermique faible à sa base. Autre critère : un site où les couches de glace nous renseignent précisément sur cette transition du mi-Pléistocène, où chaque mètre de glace nous permette de distinguer clairement entre 10000 et 20000 ans de l'histoire de la planète. Troisième difficulté : la prise en compte des écoulements et des replis de la glace, qui modifient la stratification des couches de glace qui nous intéressent. Comme point de départ à notre recherche, nous nous sommes appuyés sur des cartes topographiques du socle antarctique et de l'épaisseur de la calotte. Puis nous avons effectué plusieurs missions de terrain avec des radars, pour affiner les mesures de la couche de glace sur les zones qui paraissaient intéressantes, et

90 %

DES GLACES DU GLOBE sont concentrées en Antarctique.

DR

Succès et contraintes de l'*ice core science*

Outre ses résultats cruciaux pour la compréhension des climats passés et futurs, la science des carottes glaciaires est valorisée par les récits d'aventures humaines en milieu extrême.

Les résultats et notamment les graphes issus de l'*ice core science* (la science des carottes de glace), ont été diffusés bien au-delà des publications scientifiques. Ils ont fait de sa communauté de spécialistes un vecteur très visible du déploiement des savoirs des sciences du climat.

La portée de ces résultats repose sur le perfectionnement des méthodes d'analyse de la glace dans les laboratoires. La qualité du signal produit par les chercheurs et chercheuses sur la dynamique climatique s'explique également par leur expérience du terrain. Cette dernière a une dimension technique, qui nourrit les choix des sites de forage et la prise en compte des paramètres locaux dans la lecture des indices climatiques présents dans les carottes de glace. Cette expérience a aussi une dimension plus culturelle, liée aux conditions de vie sur les inlandsis. Celles-ci renforcent la solidarité entre scientifiques, aussi bien que leur crédit auprès des pouvoirs publics : les récits du terrain constituent en effet un atout certain lorsqu'il s'agit, pour les spécialistes des carottes de glace, de valoriser leurs résultats et activités. C'est d'autant plus important que ces activités reposent sur la mise en œuvre d'une logistique lourde et coûteuse. Des contraintes matérielles qui expliquent combien le soutien des institutions publiques a compté dans le succès de l'*ice core science* depuis l'extraction des premières carottes de glace ancienne au Groenland, à la fin des années 1950. Ces premiers forages profonds ont été réalisés à Camp Century, une base militaire étatsunienne destinée à abriter des missiles nucléaires, dans une atmosphère imprégnée par les enjeux de la guerre froide. L'*ice core science* est ainsi née lors d'un pic de la « technopolitique » polaire. Cela n'a pas diminué sa fécondité scientifique : l'analyse des carottes de Camp Century a abouti à la publication de la première courbe paléoclimatique issue des glaces polaires (1), et a motivé la mise en œuvre de nouveaux forages, jamais très loin des militaires et de leur logistique.



▲ *En 1984-1985, une collaboration franco-soviétique a permis d'extraire une carotte de glace à plus de 2000 mètres de profondeur.*

DR - FONDS LORIUS / CNRS PHOTOTHÈQUE

Autre haut fait de l'*ice core science* : la publication, en 1987, d'articles démontrant la corrélation entre températures et teneurs en gaz à effet de serre dans la dynamique climatique (2). Ces résultats ont été produits au terme d'une collaboration franco-soviétique, à partir d'une carotte de 2 083 mètres extraite près de la base Vostok, implantée au cœur de l'Antarctique comme une démonstration de la supériorité de « l'homme rouge ». Elle recelait des données qui ont contribué au consensus scientifique émergent, à la fin des années 1980, au sujet de la sensibilité du climat terrestre aux activités humaines. Créé en 1988, le GIEC en est une émanation directe et déterminante.

À partir des années 1990, l'*ice core science* a fourni l'une des bases empiriques de l'alerte donnée par les climatologues. Cet engagement n'a malheureusement pas eu les conséquences politiques escomptées. D'ailleurs, les climatologues ont dû renouveler leurs promesses de résultats et redéfinir leurs projets, face à un tassement des financements alloués à la recherche fondamentale. En outre, l'accès au terrain est déjà rendu plus difficile du fait même du réchauffement climatique. C'est dire que les intérêts attachés aux espaces polaires continuent de les modeler, et de peser sur la nature des activités scientifiques pouvant s'y dérouler. ■

(1) W. Dansgaard *et al.*, *Science*, *3903*, 377, 1969.
(2) J. Jouzel *et al.*, *Nature*, *329*, 403, 1987.



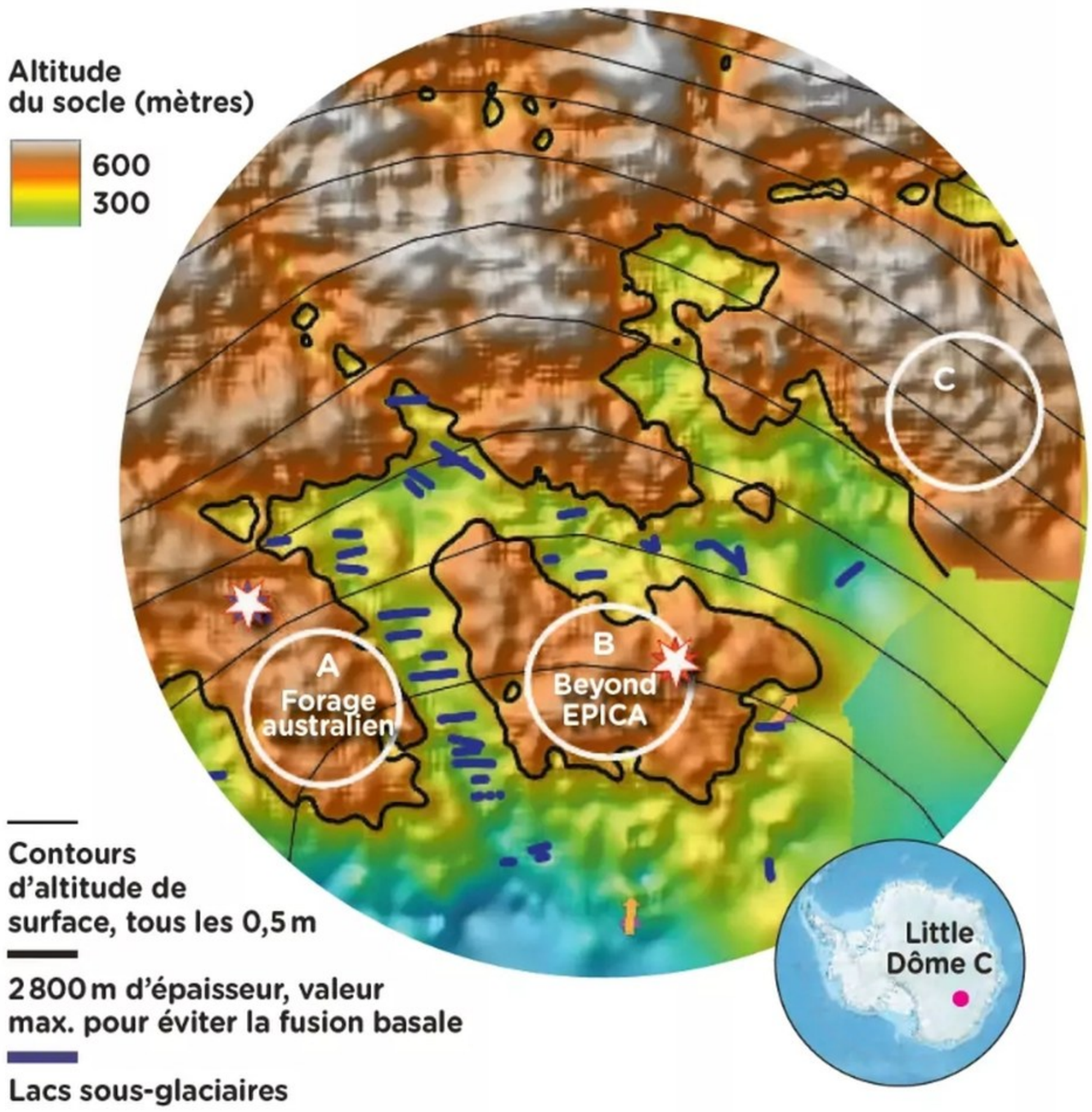
Morgan Jouvenet
SOCIOLOGUE, LABORATOIRE PRINTEMPS, GUYANCOURT
Directeur de recherche au CNRS et membre du laboratoire Professions, institutions, temporalités (Printemps, UMR CNRS/université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines), il a publié Des glaces polaires au climat de la Terre – Enquête sur une aventure scientifique *(CNRS éditions, 2022).*

réalisé un forage de 500 mètres pour évaluer la température dans la glace. Nous avons ainsi progressivement sélectionné le site de recherche : nous sommes passés de cartes générales sur l'Antarctique à la région de Concordia, puis à des zones de quinze kilomètres de côté, réduites par la suite à des secteurs de deux kilomètres de diamètre. Au total, cinq campagnes de recherche ont été nécessaires pour déterminer le site, que nous avons appelé Little Dôme C. En parallèle de ces campagnes, des travaux de modélisation étaient réalisés tirant parti de certaines couches en profondeur obtenues par écho-radar et datées par suivi depuis le forage EPICA et Concordia. Des simulations permettaient de déduire la valeur du flux géothermique des sites prospectés et d'expliquer la répartition spatiale de l'eau sous-glaciaire. Les résultats de ces simulations transitoires ont ainsi montré que le site Little Dôme C est susceptible d'être sans fusion sur de longues échelles de temps, ou de subir une fusion basale très limitée.

Fruit d'un aller et retour constant entre des travaux de terrain et de modélisation (3), le choix de Little Dôme C est aussi le résultat d'échanges constants entre les différentes équipes impliquées. Un dernier critère a été important pour arrêter notre décision : il fallait que le site soit situé à proximité d'une base existante, afin que les conditions de travail ne soient pas trop compliquées. Le choix a été effectué en 2019, après un processus qui aura duré cinq ans. La pandémie de Covid-19 a suspendu le démarrage du forage, qui a finalement débuté en fin d'année 2021. Fin janvier 2022, l'équipe internationale a atteint une profondeur de 130 mètres, où la glace préserve des informations sur le climat et l'atmosphère des 3 000 dernières années environ.

(*) **Un névé** correspond à une couche encore poreuse de neige en train de se transformer en glace par densification.

SÉLECTION DU SITE



Carte du socle sous la glace (région de Little Dôme C). Les trois cercles d'intérêt (2 km de diamètre) ont une épaisseur de glace suffisamment fine, pour éviter la fusion à la base de la glace, et un socle assez plat. La localisation des forages résulte d'une campagne radar dans les cercles A et B, qui a permis d'évaluer la qualité de stratification des couches.

ALEXRK - BEYOND EPICA / CATHERINE RITZ

COMPRENDRE LA TRANSITION DU MI-PLÉISTOCÈNE, À 2 700 MÈTRES

Les premières carottes de névé (*) et de glace de Beyond Epica sont actuellement stockées à la station italo-française Concordia, sur le plateau antarctique oriental. Aujourd'hui, nous avons atteint 800 mètres de profondeur. Lors de la prochaine saison (novembre 2023-janvier 2024), nous devrions atteindre une zone critique, la transition fragile-ductile, située entre 800 et 900 mètres de profondeur ; là, les couches de glace – et donc les carottes que nous en extrairons – sont très cassantes, à cause de la forte pression qui existe dans les grosses bulles d'air qui y sont emprisonnées. Pour éviter d'endommager les échantillons que nous allons prélever à ces profondeurs, nous devrons les laisser pendant un an, à Little Dôme C, sans les toucher. Ces échantillons, et ceux qui seront collectés lors des prochaines campagnes de terrain, seront ensuite transportés vers des laboratoires européens. Nous attendons avec impatience de pouvoir étudier les carottes qui datent d'environ 600 000 ans, soit vers 2 500 mètres de profondeur : elles nous permettront d'avoir un recouvrement de 200 000 ans avec les données provenant de EPICA. Mais l'objectif principal reste d'atteindre une profondeur permettant de comprendre ce qui s'est produit lors de la transition du mi-Pléistocène, à environ 2 700 mètres, soit à 100 mètres au-dessus du socle rocheux à Little Dôme C. ■

(1) J. Jouzel *et al.*, *Nature, 329,* 403, 1987.
(2) L. Augustin *et al.*, *Nature, 429,* 623, 2004.
(3) O. Passalacqua *et al.*, *The Cryosphere, 12,* 2167, 2018.

Comprendre les moussons en Asie du Sud

Pour mieux connaître la sensibilité de la mousson asiatique aux changements des concentrations de gaz à effet de serre et au réchauffement global associé, les scientifiques se penchent sur les moussons du passé. L'enjeu ? Mieux prédire les impacts liés aux risques d'inondations et de sécheresse sur les milliards de personnes qui vivent dans la région.

La mousson d'Asie du Sud, la plus intense aujourd'hui, se caractérise par des vents forts et chargés d'humidité qui soufflent de l'océan Indien, plus froid (au sud), vers la masse continentale asiatique, plus chaude (au nord), pendant l'été. Cette mousson provoque d'intenses et longues pluies en Inde, au Sri Lanka, au Myanmar, au Bangladesh et dans le nord de l'océan Indien. Ces pluies sont essentielles à ces pays : elles leur fournissent de l'eau douce, nécessaire à l'agriculture, à l'industrie et à l'usage domestique. Mais elles sont aussi sources de périls, déclenchant inondations et glissements de terrain.

Les modèles climatiques complexes utilisés pour prédire comment la mousson d'Asie du Sud réagira à l'augmentation actuelle de la température mondiale s'accordent pour conclure que les pluies de mousson s'intensifieront dans les scénarios pour lesquels le réchauffement continue à s'amplifier (1). Toutefois, les effets de rétroaction (lire p. 29) sur les écosystèmes régionaux (par exemple la pêche) et sur la répartition du carbone entre les réservoirs de surface et les réservoirs profonds (le cycle du carbone) sont moins bien connus. C'est dans ce contexte que l'étude du passé peut nous aider : une meilleure compréhension de la façon dont le système de mousson a évolué dans différents états climatiques naturels peut servir à améliorer les prévisions. Pour ce faire, nous devons reconstituer les changements des vents et des précipitations de la mousson asiatique dans l'espace et le temps.

Les indicateurs des climats de mousson saisonniers du passé sont conservés dans les archives fossiles, à la fois sur terre et au fond de l'océan, dans les sédiments marins. Par exemple, lorsque les pluies de mousson sont fortes en Asie du Sud, de grands fleuves, comme le Gange-Brahmapoutre, se gonflent et transportent des quantités importantes d'eau douce et des sédiments, puis les déversent dans le nord de l'océan Indien. Cet apport massif réduit la salinité de l'océan côtier, et les sédiments transportés s'accumulent lentement sur le fond marin avec les restes des plantes et des animaux marins microscopiques – le plancton . Les vents de mousson ont un impact sur le plancton aussi ; ils engendrent un mélange plus profond des couches superficielles de l'océan, injectant des nutriments qui favorisent la croissance dans les eaux de surface ensoleillées.



Clara Bolton
PALÉO-OCÉANOGRAPHE, AIX-EN-PROVENCE
Chargée de recherche CNRS, son objectif est de reconstituer les climats du passé par une approche utilisant plusieurs types d'indices. Elle mène ses recherches au Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Aix-Marseille Université - CNRS - IRD - Collège de France - INRAE), à Aix-en-Provence.

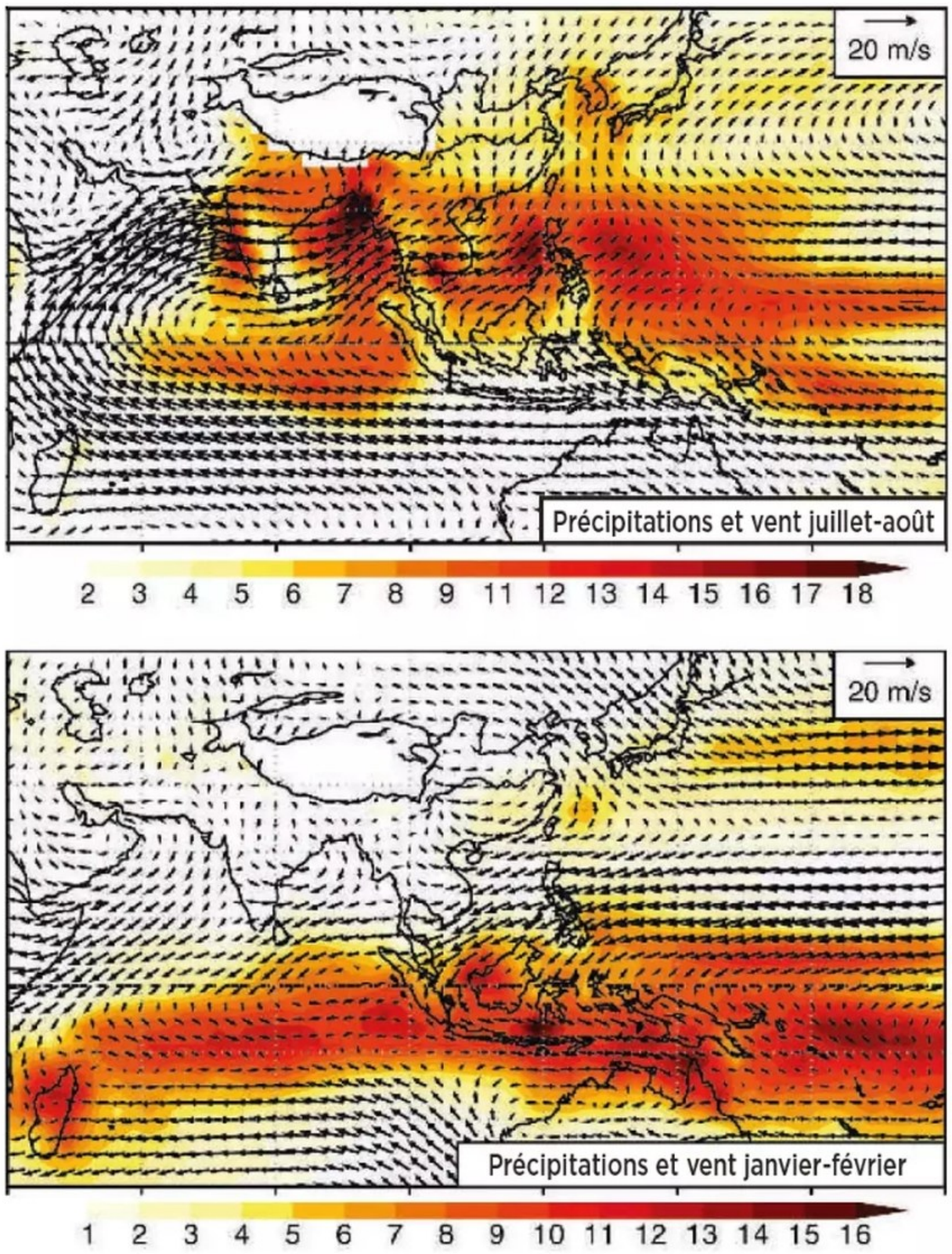
L'INFLUENCE DU SOULÈVEMENT DES MONTAGNES HIMALAYENNES

La réduction de la salinité de l'eau de mer et l'augmentation des nutriments sont enregistrées à la fois dans la teneur de certains types de plancton et dans la composition chimique des coquilles qu'ils fabriquent. Comment extraire ces informations ? En analysant les carottes de sédiments marins forées à l'aide de grands navires de recherche (par exemple, le Joides Resolution dans le cadre du International Ocean Discovery Program). Ces carottes contiennent des archives qui s'étendent parfois sur des dizaines de millions d'années. Sur la terre ferme, la présence de restes fossiles de plantes qui ne se développent que dans des conditions de fortes précipitations saisonnières fournit des indices sur l'intensité des moussons. L'accumulation de vastes quantités de poussière à un endroit peut, elle aussi, indiquer une forte mousson passée.

DR

MOUSSON EN ASIE

Les données moyennes de précipitations (teintes colorées, en mm/jour; moyenne 1979-2000) et le vent moyen (à une pression de 925 hPa, représentée par des flèches; moyenne 1951-2000) permettent de distinguer deux régimes hydrologiques (d'après : S. C. Clemens et al., *hal-01668381, 2016).*



STEVEN C. CLEMENS ET AL. / IODP

Mais la mousson n'a pas toujours existé. L'apparition du système de mousson asiatique moderne de type « brise de mer » résulte au premier chef du soulèvement des chaînes de montagnes himalayennes, qui a commencé il y a environ 50 millions d'années, lorsque l'Inde est entrée en collision avec l'Asie. Ce soulèvement s'est poursuivi en plusieurs phases, jusqu'à il y a environ 20 à 10 millions d'années selon la région. Cette topographie amplifie les précipitations d'été et l'intensité des vents. Toutefois, la présence de hautes montagnes n'est pas indispensable à l'existence d'un autre type de mousson, dit ITCZ, lié au déplacement de la zone de convergence intertropicale. Les modèles climatiques montrent qu'il faut alors une condition supplémentaire : que la température de surface de la mer diffère selon la latitude (2). Dans ce cas, ces différences de températures peuvent déplacer un flux d'air humide de la mer vers la terre, même sans topographie particulière. D'ailleurs, des preuves de l'existence de pluies et de vents de type mousson en Asie entre la fin du Crétacé et l'Éocène (entre il y a 100 à 40 millions d'années), à une époque où le haut plateau tibétain n'existait pas encore, émanent d'archives géologiques, comme d'anciens dépôts de poussière et de feuilles fossiles.

LES RÔLES DE L'AFRIQUE DE L'EST ET DU MOYEN-ORIENT

La géographie a également un rôle sur la mousson, notamment le mouvement des plaques tectoniques et l'élévation des montagnes (lire p. 56). L'évolution de la configuration de la géographie au cours du temps aurait ainsi conduit à une augmentation progressive de la mousson asiatique, et au passage d'une mousson type ITCZ à une mousson type brise de mer, depuis la fin du Crétacé (il y a environ 70 millions d'années) (3). En outre, le développement du relief en Afrique de l'Est et au Moyen-Orient, au cours des vingt derniers millions d'années, a également joué un rôle majeur dans l'établissement de la mousson asiatique telle que nous la connaissons aujourd'hui (4).

D'autres indicateurs de mousson, comme des marqueurs de l'altération des roches ou les taux d'accumulation de sédiments d'origine terrestre sur les fonds marins, laissent penser à un changement vers des conditions plus humides et plus saisonnières en Asie du Sud et de l'Est il y a environ 22-18 millions d'années. Au Miocène moyen (vers 13 millions d'années avant notre ère), les carottes de sédiments marins de l'océan Indien équatorial contiennent des couches distinctes, indiquant de forts courants océaniques de surface à inversion saisonnière, poussés par les vents de mousson (5). À la fin du Miocène (vers 10 à 8 millions d'années avant notre ère), on constate l'apparition de fortes remontées d'eau depuis l'océan plus profond vers la surface dans la mer d'Arabie ; celles-ci se révèlent dans les indicateurs basés sur les restes fossiles

de plancton, qui apprécient les nutriments. Cette remontée d'eau est vraisemblablement découplée des pluies de mousson, les précipitations hautement saisonnières étant probablement une caractéristique persistante de la mousson asiatique depuis la collision entre l'Inde et l'Asie, mais le système de vents moderne n'apparaissant que beaucoup plus tard, il y a environ dix à quinze millions d'années.

COMMANDÉE PAR DES CYCLES LIÉS AUX PARAMÈTRES ORBITAUX DE LA TERRE

On comprend que la circulation atmosphérique de la mousson asiatique résulte d'une interaction entre des processus tectoniques et un système climatique régional qui a une forte influence sur les ressources d'eau et la socio-économie des populations d'Asie du Sud et de l'Est. Si la mousson a varié au cours du temps et de l'espace, en lien avec la migration des plaques tectoniques et l'évolution topographique complexe de la région, elle existe sûrement dans sa configuration moderne depuis au moins dix millions d'années.

Sur des échelles de temps plus courtes, de quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années, nous savons en outre que l'intensité de la mousson asiatique est commandée par des cycles liés aux variations des paramètres qui contrôlent l'orbite de la Terre autour du Soleil (paramètres orbitaux), notamment la forme de notre orbite autour du Soleil (l'excentricité), l'angle d'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport à son plan orbital (l'obliquité) ainsi que la direction dans laquelle pointe l'axe de rotation (la précession) (lire p. 26). Ensemble, ces paramètres agissent sur la distribution et l'intensité du rayonnement solaire sur la surface de la Terre dans l'espace et le temps, et jouent donc un rôle dans la circulation de la mousson, qui est alimentée par le réchauffement différentiel de la Terre et de l'océan (6). ■

(1) B. Wang *et al., J. Climate, 33,* 6471, 2020.

(2) R. P. Acosta et M. Huber, *Geophys. Res. Lett., 47,* e2019GL085112, 2019.

(3) A. Farnsworth *et al., Sci. Adv., 5,* eaax1697, 2019.

(4) A.- C. Sarr *et al., Nat. Geosci., 15,* 314, 2022.

(5) C. Betzler *et al., Sci. Rep., 6,* 1, 2016.

(6) J. H. C. Bosmans, *Quaternary Sci. Rev., 188,* 121, 2018.

Les défis de la datation

Les géochronologues et climatologues créent de nouvelles méthodes de datation des archives paléoclimatiques, tout en améliorant les anciennes. Une tâche délicate, mais indispensable pour progresser dans notre compréhension de la dynamique climatique de chaque région du globe.



Pierre-Henri Blard
GÉOCHRONOLOGUE ET PALÉOCLIMATOLOGUE, CRPG, NANCY
Directeur de recherche CNRS au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, à Nancy, il développe des outils géochimiques pour mesurer le temps et les flux de matières dans diverses archives géologiques, comme les sédiments, les moraines et les carottes de glace.

Pour mieux comprendre la dynamique climatique de chaque région du globe, il faut ancrer très précisément sur l'axe du temps les variations des paramètres paléoclimatiques (températures, précipitations, salinité, humidité) et leurs forçages (irradiance solaire, gaz à effet de serre, poussières, éruptions volcaniques). Dès lors, les géochronologues et climatologues développent et améliorent sans cesse les techniques de datation. Il en existe deux grandes catégories : les techniques de datation absolue (ou calendaire), qui consistent à donner directement un âge calendaire à un échantillon ; et les datations relatives, qui permettent de ranger les signaux dans le bon ordre chronologique, d'identifier des cycles et de synchroniser des archives différentes.

Les méthodes de datation absolue les plus largement utilisées reposent sur les techniques géochimiques de décroissance radioactive. La plus célèbre est la datation par carbone 14, qui a révolutionné l'étude du Quaternaire depuis les années 1950. Ce chronomètre continue à être perfectionné pour améliorer sa précision et sa justesse. Il a toutefois des limites : il ne

DR

permet pas de dater des objets plus vieux que 50 000 ans et fonctionne uniquement pour des échantillons qui contiennent assez de carbone (matière organique, carbonates), ce qui n'est pas le cas de plusieurs archives climatiques. Ainsi, la datation absolue des carottes de glace par cette méthode n'est pas possible. Les chercheurs doivent donc concevoir de nouveaux chronomètres absolus, l'idée étant de disposer d'un « couteau suisse » adapté à chaque archive. Pour dater les plus vieilles couches de glace présentes sur Terre (déposées il y a plus d'un million d'années), une méthode prometteuse repose sur la décroissance d'un isotope du krypton, le krypton 81, gaz rare qui est piégé dans la glace à une concentration connue. Les progrès récents de grands instruments comme l'ATTA (comptage d'atomes par laser) permettent aujourd'hui de détecter le krypton 81 avec des échantillons de quelques kilogrammes seulement, contre 100 kilogrammes il y a dix ans (1).

D'autres techniques sont en train de lever des verrous, telle la mesure des taux de sédimentation par l'hélium 3 d'origine extraterrestre (2), ou la datation des dépôts glaciaires par les nucléides cosmogéniques et la luminescence des minéraux (3).

COMBINER LES DEUX MÉTHODES : L'ABSOLUE ET LA RELATIVE

Les méthodes de datation relative, elles, s'appuient sur les principes de la stratigraphie. En appliquant l'hypothèse que des événements passés se reproduisent à des rythmes immuables, des signaux quasi cycliques peuvent même être transformés en datations absolues, à condition de disposer de points d'ancrage temporels. C'est le cas des couches annuelles des carottes de glace, des cernes de croissance des arbres, des inversions magnétiques ou de la variabilité lithologique des sédiments. La cyclostratigraphie, en plein essor, développe des méthodes numériques pour interpréter ces cycles sédimentaires pilotés par les oscillations de l'orbite de la Terre sur des échelles de temps plurimillénaires (4). Les assemblages de fossiles sont également utilisés pour dater les sédiments par biostratigraphie.

D'autres datations relatives visent à « caler » entre elles des archives différentes, via l'hypothèse que certains signaux sont synchrones à grande échelle, telles les éruptions volcaniques, les poussières ou les anomalies isotopiques. Ces méthodes de corrélation doivent cependant être maniées avec prudence, car l'hypothèse du synchronisme d'un signal climatique peut être trompeuse, surtout lorsqu'on cherche à repousser les limites de datation.

Détecter la présence d'un gaz rare, le krypton 81, pour dater les couches de glace de plus d'un million d'années

Ainsi, en considérant que les variations climatiques enregistrées dans deux régions sont synchrones, on ferme la porte à la possibilité qu'une des régions se soit réchauffée en premier, empêchant d'identifier une relation de cause à effet interrégionale.

Datation absolue et datation relative : pour le futur, les approches les plus prometteuses consistent à combiner ces méthodes complémentaires, en prenant en compte les données issues de toutes les archives paléoclimatiques. Les chercheurs s'y attellent en construisant des outils numériques qui intègrent toutes les données géochronologiques, des lois statistiques et des connaissances à priori sur les phénomènes pris en compte (5). C'est la piste la plus encourageante afin d'arriver à proposer des modèles d'âge cohérents, avec des incertitudes les plus faibles possibles. ■

(1) Z.-T. Lu, *Natl. Sci. Rev., 3,* 172, 2016.

(2) D. McGee et S. Mukhopadhyay, *In The Noble Gases As Geochemical Tracers,* P. Burnard (dir.), Springer, pp. 155-176, 2013.

(3) A. J. Christ *et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 118,* e2021442118, 2021.

(4) L. A. Hinnov, *Geol. Soc. Am. Bull., 125,* 1703, 2013.

(5) F. Parrenin *et al., Geosci. Model Dev., 8,* 1473, 2015.

Entretien avec **Mary Elliot**

« Des archives océaniques exceptionnelles »

L'étude des carbonates qui constituent les coquilles de mollusques bivalves comme les bénitiers géants (*Tridacna gigas*) apporte de nouvelles informations sur les variations des climats anciens. Mary Elliot, paléoclimatologue, s'intéresse particulièrement à ces archives singulières.

La Recherche Depuis quand les paléoclimatologues s'intéressent-ils aux bénitiers fossilisés comme archives de climats anciens ?

Mary Elliot Le naturaliste Charles Darwin (1809-1882) a été le premier à attirer l'attention sur les données climatiques qu'offrent les récifs coralliens fossilisés, sortis des eaux du fait de l'activité tectonique. À sa suite, les géologues se sont efforcés d'appliquer une variété de techniques de datation stratigraphique et radiométrique au cours de leurs enquêtes paléoclimatiques sur ces récifs datant du Quaternaire. Mais, c'est Paul Aharon, aujourd'hui professeur émérite à l'université d'Alabama (États-Unis), qui a montré dans les années 1980 que les bénitiers de Papouasie-Nouvelle Guinée, qui vivent parfois une centaine d'années, sont des archives exceptionnelles du climat : ils sont capables d'enregistrer les variations de température à l'échelle des saisons !

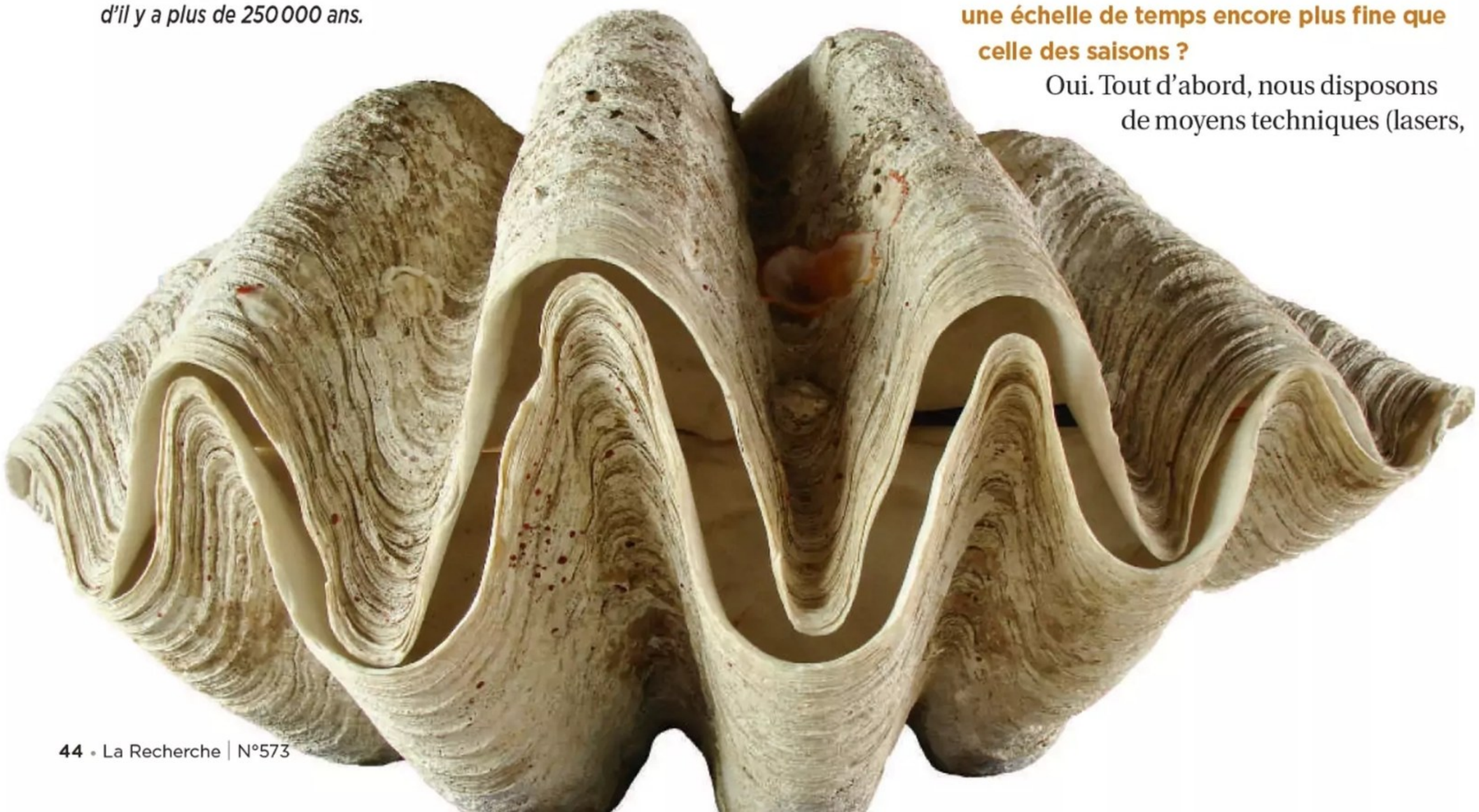
Quelle technique a-t-il utilisée ?

Il a prélevé des échantillons de carbonates dans les bandes de croissance annuelles qui constituent les coquilles de bénitiers fossilisés. En étudiant les rapports isotopiques de l'oxygène présent dans ces carbonates, il est parvenu à retracer les variations de températures à la surface de l'océan, à l'échelle des saisons, sur 140 000 ans (1).

Est-on capable aujourd'hui d'avoir une échelle de temps encore plus fine que celle des saisons ?

Oui. Tout d'abord, nous disposons de moyens techniques (lasers,

▼ *Quelques microgrammes de carbonates provenant d'un bénitier géant fossilisé permettent de documenter finement des événements climatiques d'il y a plus de 250 000 ans.*



FERNANDO LOSADA RODRIGUEZ

sondes ioniques) qui nous permettent d'extraire des échantillons de poudre de carbonate de plus en plus petits. Ensuite, grâce aux progrès des méthodes d'analyse, avec seulement dix microgrammes de carbonate, on obtient une mesure, alors qu'il fallait un gramme de matériau auparavant. Cette précision nous permet d'avoir des échantillons représentatifs de ce qui se produit dans la coquille à l'échelle de la semaine, voire du jour et de la nuit : je suis d'ailleurs en train de mener des travaux exploratoires sur des échantillons à cette échelle du jour et de la nuit pour évaluer s'il est possible d'en tirer des données fiables.

D'une manière générale, qu'analysez-vous dans ces échantillons ?

Nous mesurons la quantité de magnésium, de strontium et de baryum. Outre ces trois éléments chimiques, nous faisons aussi des analyses des isotopes stables de l'oxygène et du carbone (oxygène 18, carbone 13). C'est à partir de ces données que nous établissons les variations de la température et de la salinité de l'eau, ou encore que nous caractérisons la productivité des eaux dans lesquelles le mollusque a grandi.

À quoi cela sert-il d'avoir une échelle de temps de l'ordre de la semaine, voire du jour et de la nuit ?

À cette échelle, nous documentons plus finement des événements abrupts et extrêmes (canicules, cyclones) qui se sont produits dans le passé, dans des climats très différents de ce que nous connaissons aujourd'hui. Ensuite, les informations sur cette variabilité donnent la possibilité de tester nos modèles climatiques, de les améliorer et d'obtenir des prévisions plus précises sur le climat futur. C'est dans cet objectif que la communauté scientifique travaille sur ces précieuses archives que constituent les bénitiers, mais aussi les coraux et les arbres anciens. Elles alimentent une base de données exploitable afin de documenter la variabilité du climat.

Pouvez-vous nous donner un exemple de phénomène climatique que vous documentez grâce aux bénitiers ?

Les bénitiers sont présents dans la zone pacifique tropicale, là où se produit le phénomène climatique ENSO (pour El Niño Southern Oscillation). Celui-ci est une importante source de variabilité climatique puisqu'il déroute les cyclones tropicaux de leurs trajets habituels, déplace les zones de précipitations et de sécheresse, etc. Les bénitiers collectés le long de la côte nord de Papouasie-Nouvelle Guinée sont des témoins privilégiés de ces événements (2). Nous avons constaté qu'ils enregistrent avec une plus grande précision le moment et l'amplitude des variations de la température de surface de la mer et de la composition isotopique de l'eau liées à l'ENSO.



Mary Elliot
PALÉO-CLIMATOLOGUE, LPG, NANTES
Professeure à l'université de Nantes, elle est membre du Laboratoire de planétologie et géosciences (Nantes université/CNRS). Elle étudie les microfossiles marins et de bivalves pour comprendre les paléoclimats.

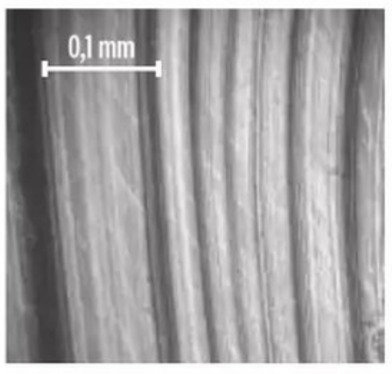
Est-ce que le phénomène d'ENSO existait déjà dans le passé ?

Grâce à des bénitiers fossiles, nous avons montré que ce phénomène a existé dans les derniers 60 000 ans (3) ; mais nous avons aussi constaté que l'amplitude du phénomène est bien plus forte aujourd'hui. Entre 80 à 90 % des enregistrements révèlent une variabilité climatique qui était autrefois bien en dessous de ce qu'elle est actuellement. Nos recherches visent à établir si la variabilité de l'ENSO a évolué avec l'augmentation des gaz à effet de serre, depuis la modification du climat par l'activité humaine. Je suis en train de répliquer cette étude en Indonésie.

De quelle époque datent les fossiles de bénitier sur lesquels vous travaillez ?

Les plus vieux que j'ai examinés ont près de 250 000 ans. Des collègues aux Pays-Bas ont travaillé sur des bénitiers encore plus anciens, datant du Miocène, soit plusieurs millions d'années… Mais trouver des vieux fossiles bien préservés est rare, car le signal originel peut être dégradé et difficilement exploitable. En outre, il ne suffit pas d'avoir des bénitiers fossiles, il est nécessaire de faire des études de calibrations sur des échantillons modernes (4).

Propos recueillis par Mathias Germain



▲ *Image d'une coquille de bénitier, composée d'une succession de lamines de carbonate de calcium. Les bivalves enregistrent en continu les conditions de température et la salinité de l'eau dans laquelle ils ont grandi.*

MARY ELLIOT - DR

(1) P. Aharon *et al., Nature, 304,* 720, 1983.
(2) K. Welsh *et al., Earth Planet. Sci. Lett., 307,* 266, 2011.
(3) R. Driscoll *et al., Geophys. Res. Lett., 19,* 6819, 2014.
(4) C. Arias-Ruiz *et al., Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., 487,* 2017



Pierre Sans-Jofre
GÉOCHIMISTE, MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, PARIS
Responsable de la collection de géologie générale du MNHN, il travaille sur la coévolution vie/Terre.



Sylvain Bernard
GÉOCHIMISTE, CNRS, PARIS
Il s'intéresse à la préservation des traces de vie dans les roches anciennes (sur Terre ou sur Mars).

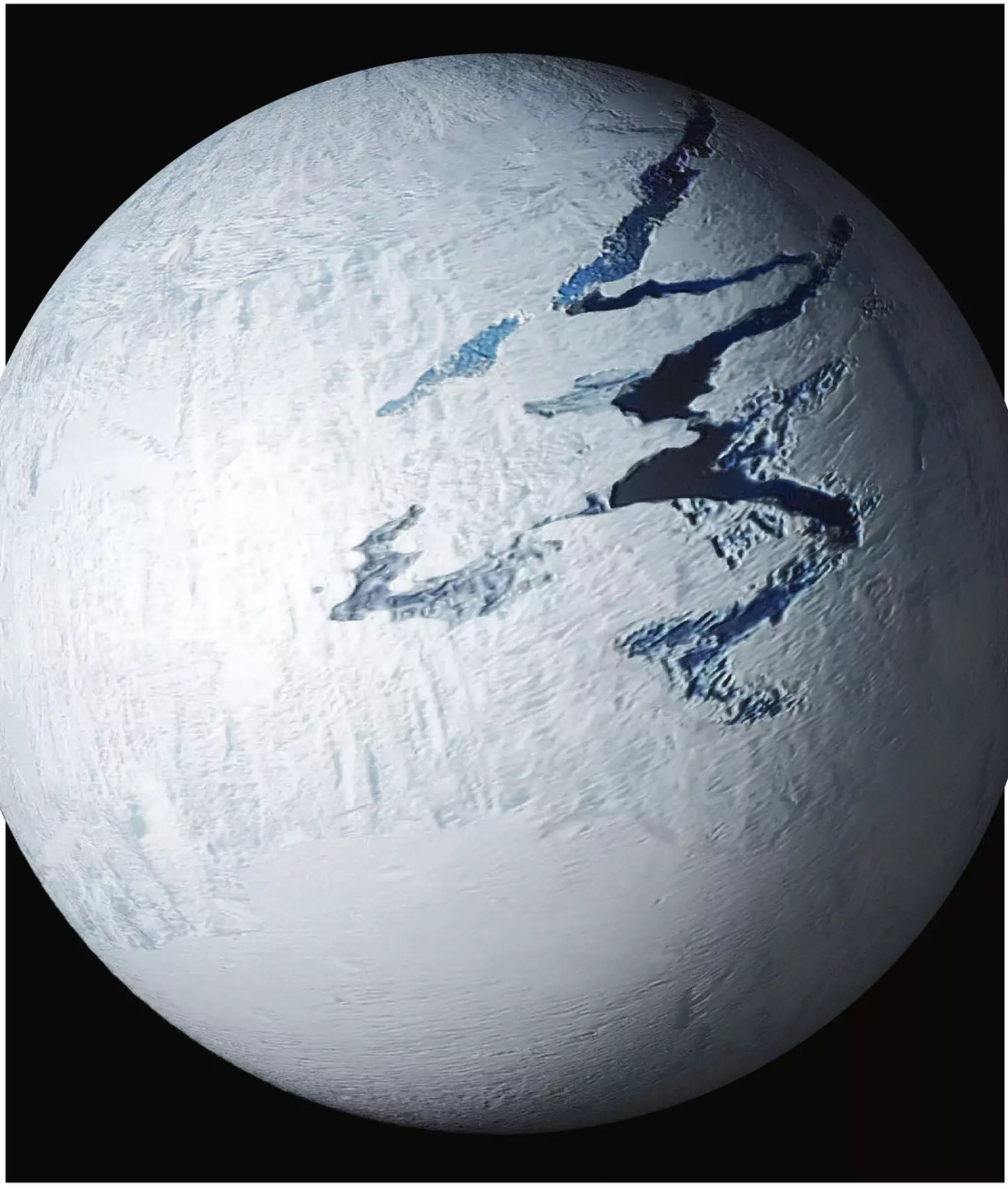
La coévolution de la vie et du climat à l'échelle des temps géologiques

Depuis quelque quatre milliards d'années, le destin de notre planète est intimement lié à l'évolution de la vie terrestre. Cette coévolution est particulièrement probante lors de deux périodes massives d'extinction, qui ont redistribué les cartes biologiques. Ces épisodes passés sont lisibles aujourd'hui dans les roches, des témoins importants de notre passé et des clés de compréhension de notre futur.

Au cours des 4,56 milliards d'années de son histoire, la Terre a vécu de grandes perturbations climatiques, telles les glaciations globales de type « Terre boule de neige » (*Snowball Earth*) ou les phases d'oxygénation de son atmosphère. Nombre de facteurs physiques influencent le climat de notre planète, notamment l'activité solaire, son orbite ou la tectonique des plaques. Mais certaines des plus grandes perturbations climatiques ont été engendrées par… la vie. Tout comme l'activité anthropique actuelle est responsable d'un dérèglement climatique global, l'émergence de certains métabolismes biologiques au cours de l'histoire terrestre a en effet eu un impact majeur sur la chimie de l'atmosphère et de l'océan et, par conséquent, sur le climat. Ces changements climatiques ont réciproquement eu une influence majeure sur l'évolution de la vie, responsables à la fois d'extinctions massives d'espèces mais aussi d'explosions biologiques.

La surface de la Terre était très différente il y a 4 milliards d'années : une Lune plus proche, des marées de plus forte amplitude, une température plus élevée, et surtout une absence totale d'ozone et de dioxygène dans l'atmosphère la rendait hostile à la plupart des formes de vie

DR - JULIETTE AGNEL



SPENCER SUTTON / SCIENCE PHOTO LIBRARY

▲ *La glaciation marinoenne, il y a 650 à 635 millions d'années (ci-dessus, image d'artiste), fait partie des périodes glaciaires les plus extrêmes que notre Terre ait connues. Les chutes de températures allant jusqu'à - 60 °C et la couche de glace de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur qui ont caractérisé cette période ont inhibé toute activité photosynthétique, avant que la vie ne prenne sa revanche.*

macroscopiques actuelles. Pourtant, c'est dans cet environnement que la vie microbienne va naître et commencer à évoluer. Émergent alors de nouveaux métabolismes qui, peu à peu, et pendant des milliards d'années, modifient les conditions environnementales. Ces modifications locales vont, avec le temps, avoir un impact global. Deux événements majeurs de l'histoire de la planète sont directement liés à la vie : il s'agit des phénomènes d'oxydation et d'oxygénation de l'atmosphère du début du Paléoprotérozoïque, il y a 2,4 milliards d'années, et de la fin du Néoprotérozoïque, il y a 700 millions d'années.

L'INFLUENCE DE L'OXYDATION…

Le premier grand événement climatique mondial est ainsi lié à un épisode d'oxydation (le *Great Oxidation Event* ou GOE , en anglais), qui commence il y a 2,4 milliards d'années et dure environ 500 millions d'années. L'atmosphère, qui était jusque-là demeurée anoxique (c'est-à-dire dépourvue d'oxygène) plus de deux milliards d'années, s'en est trouvée largement modifiée. Les enregistrements géologiques racontent cette histoire : les roches sédimentaires datées de 2,4 à 2 milliards d'années sont, chimiquement et isotopiquement, différentes des roches plus anciennes, ce qui témoigne d'une augmentation de la pression du dioxygène dans l'atmosphère. D'où vient ce dioxygène ? Principalement de l'activité photosynthétique du vivant, comme le suggère l'excédent de carbone 13 dans les carbonates marins de l'époque. Cet isotope du carbone permet en effet de mesurer l'efficacité de la pompe biologique : les organismes photosynthétiques absorbant préférentiellement le carbone 12, le carbone 13, délaissé, domine alors dans les carbonates. Cette oxydation de l'atmosphère va à son tour influencer l'évolution de la vie, en favorisant le développement de nouveaux organismes pouvant entre autres utiliser le dioxygène pour respirer : les hétérotrophes aérobiques.
Le début du Paléoprotérozoïque est contemporain de la glaciation planétaire huronienne (il y a 2,4 milliards à 2,1 milliards d'années), au cours de laquelle les températures moyennes étaient d'environ - 25 °C, et dont les causes et les conséquences sont toujours discutées. L'une des hypothèses avancées met directement en cause l'oxydation de l'atmosphère, responsable d'une réduction importante de sa teneur en méthane – puissant gaz à effet de serre –, et donc d'une diminution de la température globale.



▲ *Cette diamictite marine du nord de la Namibie date de la seconde glaciation dite marinoenne. Elle est composée de strates de détritus carbonatés déposés notamment par les eaux de fonte.*

… ET DE L'OXYGÉNATION DE L'ATMOSPHÈRE

Le deuxième épisode climatique majeur de la Terre est lié à un phénomène d'oxygénation de l'atmosphère (le *Neoproterozoic Oxygenation Event*, ou NOE, en anglais). Il débute à la fin du Protérozoïque, il y a environ 800 millions d'années, et s'achève au début du Phanérozoïque, il y a quelque 542 millions d'années, lorsqu'apparaissent les premiers petits animaux à coquille. Deux glaciations planétaires de type « Terre Boule de Neige » ont lieu à cette époque : la glaciation sturtienne (il y a 760 à 700 millions d'années) et la glaciation marinoenne (il y a 650 à 635 millions d'années) (1). De grandes quantités de sédiments glaciaires se déposent alors à faible latitude, comme en témoignent les diamictites, des conglomérats chaotiques de roches sédimentaires, dont la répartition montre que la banquise a atteint l'équateur au cours de ces périodes (2). Ces glaciations ont été extrêmes ! Une couche de glace de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur a recouvert la surface de la Terre, isolant l'océan de l'atmosphère, inhibant notamment toute activité photosynthétique. La vie a ensuite pris sa revanche. Partout dans le monde, on observe que les diamictites glaciaires sont recouvertes d'épais niveaux de carbonates, dont la base est souvent constituée de stromatolites : ces roches laminées, formées par des communautés microbiennes, témoignent de la recolonisation massive des océans au cours des deux déglaciations. Celles-ci, très rapides, ont entraîné un afflux considérable de particules détritiques dans l'océan : autant de matériau nutritif qui a favorisé l'explosion du vivant.
Si les changements climatiques ont été à l'origine de grandes extinctions, ils ont aussi continûment exercé une pression de sélection sur la biodiversité et ont été à l'origine de radiations évolutives. Les roches sont les témoins de ces bouleversements, contenant les clés pour reconstruire l'histoire passée de notre planète mais également pour mieux envisager son avenir. ■

(1) P. F. Hoffman et D. P. Schrag, *Terra Nova, 14*, 129, 2002.

(2) P. F. Hoffman *et al.*, *Sci. Adv., 3*, e1600983, 2017.

P. HOFFMAN ET AL.

L'influence du climat dans la disparition des Néandertaliens

La disparition de nos cousins Néandertaliens remonte à environ 37 000 ans. Certains chercheurs ont soutenu l'idée qu'elle était liée à une lente dégradation du climat. Il semble, au contraire, que les conditions climatiques difficiles de cette époque aient protégé les Néandertaliens de la compétition avec *Homo sapiens* et leur aient donné quelques millénaires de répit.

L'émergence et la disparition des Néandertaliens ont-elles un lien avec les changements climatiques du dernier million d'années ? C'est ce qu'affirment certains scientifiques, selon lesquels les cycles glaciaires et interglaciaires du Quaternaire (changements de long terme, avec une cyclicité dominante de 100 000 ans) et les changements climatiques rapides de la dernière période glaciaire (115 000 à 15 000 avant le présent), marqués par une succession de phases de réchauffement et de refroidissement tous les 1 500 ans environ (lire p. 32), ont eu un impact important sur la destinée de cette population humaine.

L'émergence des Néandertaliens, vers 600 000 - 400 000 avant le présent, serait ainsi intervenue à la suite du renforcement des phases glaciaires et interglaciaires enregistrées à l'époque. Les archives géologiques et les simulations de cette période confortent cette hypothèse : les paléoenvironnements eurasiatiques étaient alors marqués par l'extension la plus méridionale des calottes glaciaires jamais connue, le pergélisol (*) se développant probablement jusqu'à la mer Noire. Cette configuration aurait produit une barrière glaciaire nord-sud et la dérive génétique qui en a résulté. Pour le dire autrement, la population d'*Homo ergaster,* qui a migré d'Afrique environ 1,7 million d'années avant le présent et vivait jusqu'alors dans une Eurasie sans glace, aurait été séparée en deux groupes distincts : les Néandertaliens à l'ouest et les Dénisoviens à l'est (1).



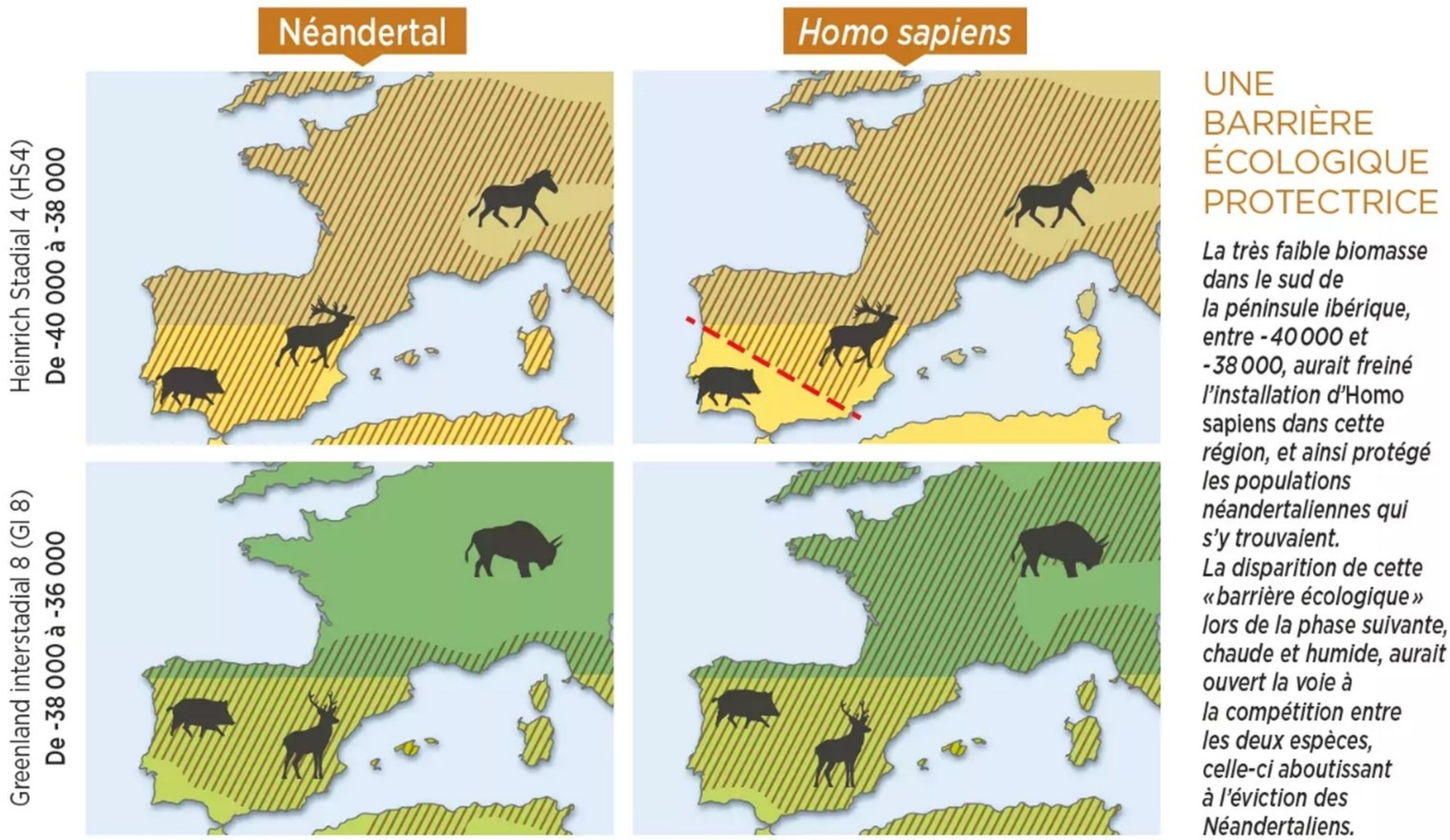
Maria Fernanda Sánchez Goñi
PALÉO-CLIMATOLOGUE, EPHE-PSL, PARIS
Enseignante chercheuse (directrice d'études) à l'École pratique des hautes études (EPHE-PSL), elle est membre de l'unité de recherche Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux (EPOC) basée à l'université de Bordeaux.

DR

NOUVEAUX COMPORTEMENTS ET INNOVATIONS TECHNIQUES

Les caractéristiques anthropologiques et l'encéphalisation (*) des Néandertaliens sont clairement établies après la glaciation d'il y a 450 000 ans. Peut-être est-ce le résultat de leur adaptation aux changements climatiques de grande amplitude, et plus fréquents, enregistrés depuis lors ? En effet, les archives archéologiques mettent en évidence un plus grand nombre d'occupations, ainsi que des preuves de nouveaux comportements de subsistance (augmentation de la chasse par rapport au charognage) et des innovations techniques (comme la technique Levallois, méthode de débitage de la pierre qui consiste à détacher un éclat de forme prédéterminée à partir d'une surface convexe préalablement préparée) pendant l'interglaciaire daté de 400 000 ans avant le présent. L'apparition de ces nouveaux comportements pourrait résulter de la durée exceptionnelle de la phase interglaciaire – 30 000 ans, par rapport à la durée moyenne, entre 10 000 et 15 000 ans, des autres interglaciaires – ayant suivi la sévère période glaciaire centrée vers 450 000 ans avant le présent (2). Ce « super interglaciaire », appelé MIS 11, s'est caractérisé par une chaleur inaccoutumée dans les régions polaires. En raison de précipitations hivernales relativement faibles, l'Europe du Sud, elle, est restée très peu boisée ; l'expansion des prairies dans cette région aurait pu fournir une grande disponibilité de biomasse et donc une grande population d'herbivores, avec comme conséquence l'augmentation de la démographie des Néandertaliens et de la diversité culturelle.

Les Néandertaliens auraient ainsi survécu à plusieurs centaines de milliers d'années de changements environnementaux à long terme et rapides en Europe et au Proche-Orient. Les spécialistes estiment que leur disparition,



UNE BARRIÈRE ÉCOLOGIQUE PROTECTRICE

*La très faible biomasse dans le sud de la péninsule ibérique, entre -40 000 et -38 000, aurait freiné l'installation d'*Homo sapiens *dans cette région, et ainsi protégé les populations néandertaliennes qui s'y trouvaient. La disparition de cette « barrière écologique » lors de la phase suivante, chaude et humide, aurait ouvert la voie à la compétition entre les deux espèces, celle-ci aboutissant à l'éviction des Néandertaliens.*

elle, serait survenue il y a 37 000 ans environ. Le débat sur les causes de cette extinction est animé : a-t-elle été provoquée par un changement climatique abrupt ? Une éruption volcanique ? Des épidémies ?

Les travaux les plus récents suggèrent qu'*Homo sapiens,* porteur de la culture dite « protoaurignacienne », a progressivement remplacé les populations néandertaliennes – porteuses des technologies moustérienne, châtelperronienne et uluzzienne – au cours du réchauffement rapide qui s'est produit vers 42 000 avant le présent (GI 10) et du refroidissement qui a suivi vers 40 000 avant le présent (GS 10) (3).

Dans le sud de la péninsule ibérique, les Néandertaliens ont toutefois survécu jusqu'à vers 37 000 avant le présent (fin de la période chaude appelée GI 8). Dans cette région, la rareté des sites moustériens datés de la période froide allant de 40 000 à 38 000 avant le présent environ (HS 4) et leur réapparition à la fin de cette période suggèrent une contraction de la population néandertalienne, suivie d'une expansion momentanée, avant sa disparition définitive vers 37 000 avant le présent. En se fondant sur la comparaison entre les données archéologiques récoltées sur place et les changements de végétation reflétés par les enregistrements de pollens des séquences sédimentaires profondes de la marge ibérique, nous avons proposé une hypothèse écologique pour y expliquer la survie tardive des Néandertaliens : la faible biomasse végétale et animale caractérisant le paysage semi-désertique de la période froide HS 4 a créé une sorte de barrière naturelle entre le nord et le sud de la péninsule ibérique, qui a freiné la pénétration et l'installation d'*Homo sapiens* dans la partie méridionale, et protégé les populations de Néandertaliens qui s'y trouvaient (4).

CONFINÉS DANS DES ZONES DE REFUGE

Explications. Caractérisés par une très faible biomasse, les environnements du sud de la péninsule ibérique ne pouvaient en effet nourrir qu'un petit nombre de mammifères et supporter de faibles populations de chasseurs-cueilleurs. À l'inverse, les steppes du nord

BRUNO BOURGEOIS

de la péninsule et, surtout, celles de l'ouest de la France, étaient riches en graminées et entretenaient de grands troupeaux d'herbivores (bisons, chevaux, rennes). Étant donné leur mode de subsistance, fondé sur la chasse aux grands mammifères des steppes, les Aurignaciens colonisant le nord de la péninsule ibérique n'ont probablement vu aucun avantage à se déplacer vers un sud aride et pauvre en ressources naturelles. Les Néandertaliens, eux, ont réagi à l'aridification de leurs régions de vie en s'adaptant : leur démographie s'est contractée, et ils se sont confinés dans des zones de refuge qui leur ont permis de maintenir un mode de vie fondé en grande partie sur l'exploitation systématique des ressources locales.

Mais cela n'a pas duré. La phase suivante, plus chaude et plus humide, aurait conduit à la disparition de la barrière écologique. Ce faisant, elle aurait permis le contact entre les populations d'*Homo sapiens* et de Néandertaliens, la compétition aboutissant, comme dans le reste de l'Europe, à l'éviction de ces derniers.

LE « NIVEAU DE CULTURE » EN CAUSE

Cette hypothèse contredit l'idée d'une lente dégradation du climat et son rôle possible dans la fin des Néandertaliens, soutenue par certains chercheurs (5). Elle s'affirme aujourd'hui comme l'explication la plus plausible, même si les raisons du succès d'*Homo sapiens* (taux de reproduction plus élevé ? Technologie plus avancée ? Agressivité plus grande ?), elles, restent spéculatives. Nous avons corroboré cette proposition par une modélisation de niche écoculturelle, qui se fonde sur l'application d'un algorithme prédictif (6).

Plus récemment, notre hypothèse a été appuyée par un modèle numérique de compétition interspécifique incluant le « niveau de culture » d'une espèce comme variable interagissant avec la taille de la population (7). Celui-ci montre que le niveau de culture relatif, plutôt que les épidémies ou le changement climatique, pourrait avoir causé l'extinction finale des Néandertaliens par les humains modernes. Un nouveau modèle numérique conforte encore ces hypothèses : celui de dispersion des hominines, qui simule la migration et l'interaction d'*Homo sapiens* et des Néandertaliens et montre que les changements climatiques rapides n'ont pas été la cause principale de la disparition des Néandertaliens (8). Ce modèle suggère aussi qu'une disparition réaliste des Néandertaliens nécessite de choisir *Homo sapiens* comme population plus efficace dans l'exploitation des ressources alimentaires disponibles pendant les périodes froides, par rapport aux Néandertaliens.

La disparition de ces derniers ne semble donc pas avoir été causée par un changement climatique. Paradoxalement, c'est même une détérioration climatique qui, en interposant des milieux inhospitaliers entre les deux populations dans la péninsule ibérique, aurait protégé les Néandertaliens de la compétition avec *Homo sapiens* et leur aurait donné quelques millénaires de répit.

Homo sapiens, plus efficace dans l'exploitation des ressources alimentaires

Le changement climatique ne semble pas non plus avoir été le facteur déterminant de la colonisation de l'Europe par *Homo sapiens,* puisque ce processus s'est déroulé sur plusieurs cycles climatiques rapides (millénaires). En revanche, à l'échelle régionale, le climat a certainement pu conditionner le remplacement des Néandertaliens par *Homo sapiens,* comme ce fut probablement le cas dans la région méditerranéenne. Cette conclusion est logique si l'on se souvient qu'avant l'arrivée des hommes dits modernes, les Néandertaliens ont été soumis, à plusieurs reprises, à de forts changements climatiques similaires et ont connu des périodes froides bien plus longues que la période HS 4. ■

(1) M. F. Sánchez Goñi, *Evol. Hum. Sci., 2,* e55, 2020.
(2) M.-H. Moncel *et al., Quatern. Int., 409,* 1, 2016.
(3) F. d'Errico et W. E. Banks, *Quaternary Sci. Rev., 118,* 182, 2015.
(4) M. F. Sánchez Goñi *et al., Clim. Dynam., 19,* 95, 2002 ; F. d'Errico et M. F. Sánchez Goñi, *Quaternary Sci. Rev., 22,* 769, 2003.
(5) C. Finlayson *et al., Nature, 443,* 850, 2006.
(6) W. E. Banks *et al., Plos One, 3,* e3972, 2008.
(7) W. Gilpin *et al., PNAS, 113,* 2134, 2016.
(8) A. Timmermann, *Quaternary Sci. Rev., 238,* 106331, 2020.

(*) **Le pergélisol, ou *permafrost* en anglais,** désigne un sol gelé en permanence depuis au moins deux ans (et parfois depuis des millions d'années) ; il est typique des régions arctiques, antarctiques et alpines.

(*) **L'encéphalisation** est le phénomène d'accroissement de la taille du cerveau, notamment par rapport au reste du corps, observé au cours de l'évolution.

Tester les modélisations actuelles grâce aux paléoclimats

Dès les années 1970, les modèles de circulation atmosphérique ont été utilisés pour comprendre les évolutions des climats du passé. Aujourd'hui, les simulations des paléoclimats apportent à la fois des clés de décryptage des processus à l'œuvre dans le système Terre, et des éléments de réglage des modèles utilisés pour la simulation du climat futur.

Au moment d'expliquer ses travaux à son entourage, le paléoclimatologue se voit toujours poser cette question : étudier les climats du passé sert-il à comprendre ce qui se passe aujourd'hui ? Même si l'on ne refuse pas de défendre l'intérêt de la paléoclimatologie en tant que science fondamentale – un élément essentiel pour comprendre le système Terre et son évolution –, la réponse est évidemment affirmative. Grâce à l'atlas interactif du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) disponible en ligne (1), il est désormais possible de visualiser l'évolution du climat dans le futur pour différents scénarios socio-économiques. On peut aussi explorer les simulations de climats passés, réalisées avec le même type de modèles. On peut aller plus loin encore : comparer ces simulations aux reconstructions paléoclimatiques obtenues à l'aide des données dont on dispose. C'est un test important des modèles utilisés pour étudier les conséquences des activités humaines actuelles et futures.



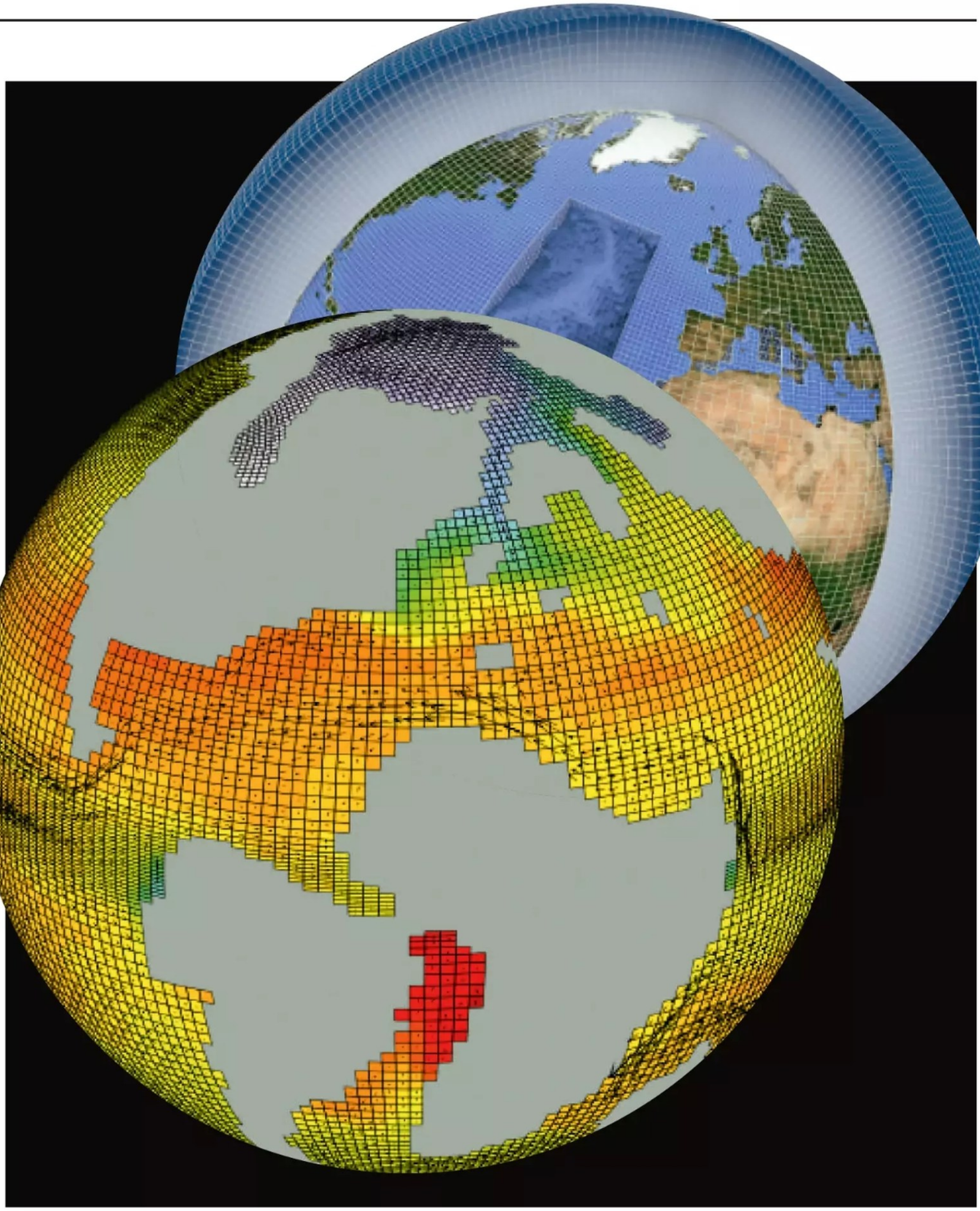
Pierre Sepulchre, PALÉOCLIMATOLOGUE
Chercheur CNRS, il étudie l'évolution du climat aux longues échelles de temps.



Masa Kageyama, PALÉOCLIMATOLOGUE,
Chercheuse CNRS, elle est spécialiste des climats glaciaires.

La modélisation du climat s'appuie sur une diversité de modèles, qui diffèrent par leur complexité (le nombre de processus physiques décrits) et leur résolution spatiale et temporelle. Parmi les plus simples : le bilan radiatif, où l'on cherche par exemple à calculer la température globale d'une planète en fonction de son albédo (son pouvoir réfléchissant), de l'effet de serre de son atmosphère et du rayonnement solaire. À l'autre extrémité, on trouve des modèles élaborés dits « de système Terre », tridimensionnels, pour lesquels les équations dynamiques de l'atmosphère et de l'océan sont « discrétisées » sur un maillage global, et où le maximum de processus aux interfaces des compartiments du système climatique (océan, atmosphère, cryosphère, biosphère), incluant les processus biogéochimiques, sont pris en compte. Cette dernière catégorie, affinée au cours du temps, est la pierre angulaire d'une grande partie de la science figurant dans les rapports de synthèse du GIEC. Néanmoins, il convient de noter que plusieurs avancées majeures en paléoclimatologie, notamment

DR - DR



CEA 2019/RÉALISATION ANIMEA STUDIO/P. BROKMANN/P. SEPULCHRE-LSCE

▲ *Les modèles « système Terre » simulent les interactions entre tous les composants climatiques. En arrière-plan, une vue du maillage du modèle de l'IPSL (avec seulement les premières couches de l'atmosphère), pour une configuration actuelle. Au premier plan, un exemple d'application aux paléoclimats anciens, montrant une configuration paléogéographique du Crétacé : la topographie continentale est masquée, les couleurs indiquent les températures de surface simulées, les flèches représentent les vecteurs de courants marins en surface.*

Comment réaliser une simulation climatique ?

Un modèle de climat est un code informatique représentant tout ou partie du système climatique : atmosphère, océan, cryosphère, végétation. Y sont intégrés les phénomènes physiques importants pour décrire les variations des variables climatiques : les températures, précipitations, vents, courants, salinités. Pour obtenir une simulation climatique, il faut aussi fournir au modèle des informations telles que la répartition des continents et des océans à la surface du globe, leur topographie et bathymétrie, l'extension des surfaces terrestres englacées, la concentration ou les émissions de gaz à effet de serre. Cette méthodologie est suivie pour simuler des climats présents, passés ou futurs. Une simulation climatique dépend de ces conditions et perturbations externes (forçages), ainsi que des conditions initiales choisies. Si plusieurs conditions initiales/conditions aux limites/forçages sont utilisés, on parle d'ensemble de simulations. De tels ensembles ont été coordonnés et engendrés au sein de projets internationaux tels que CMIP (pour les climats présents et futurs) et PMIP (pour les climats passés). Ils sont utilisés pour alimenter les rapports du GIEC.

sur notre compréhension des cycles glaciaires et interglaciaires, émanent de modèles « simples ». Par exemple, en 1998, Didier Paillard (qui travaille dans notre laboratoire) est parvenu à reproduire la succession temporelle des périodes glaciaires-interglaciaires depuis deux millions d'années à l'aide d'un modèle multi-équilibre prenant en compte les perturbations astronomiques (2).

Les premiers modèles numériques sont nés en parallèle des débuts de l'informatique. Dès les années 1950 et 1960 apparaissent des simulations de dynamique atmosphérique, notamment dans deux centres étatsuniens – le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) à Princeton (New Jersey), et le National Center for Atmospheric Research (NCAR) à Boulder (Colorado). Restreints dans un premier temps à une échelle régionale, ces modèles ont rapidement coexisté avec des modèles de circulation atmosphérique générale (GCM), qui ont permis d'étudier le climat global. Très vite, ce type de simulation visant à reproduire la circulation atmosphérique a aussi été utilisé pour l'étude des climats du passé. Le Japonais Syukuro Manabe, pionnier dans l'étude numérique du climat – il a reçu le prix Nobel de physique en 2021 pour ses travaux –, a utilisé dès 1977 le modèle de circulation générale GFDL pour étudier la circulation atmosphérique dans les zones tropicales au dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans (3). Vers le même moment, une collaboration entre l'université du Colorado et le NCAR a conduit à utiliser le modèle de circulation générale de ce dernier pour réaliser une simulation globale de cette période climatique (4). C'est aussi au NCAR que, quelques années plus tard, Eric Barron proposera cette fois les premières simulations numériques des climats chauds du Crétacé, il y a 100 millions d'années (5).

Ainsi, depuis près de cinquante ans, la modélisation des paléoclimats a accompagné les développements des modèles de climats avec un triple objectif : proposer une quantification et une spatialisation des états climatiques passés comparables avec les indications des archives climatiques (sédiments marins, carottes de glace) ; proposer et tester des processus et mécanismes permettant d'expliquer les changements climatiques passés ; tester les nouveaux modèles de climats dans des conditions inédites.

UNE DISCIPLINE NATURALISTE

Aujourd'hui, les modèles de type « système Terre » sont utilisés pour étudier les climats passés sur toutes les échelles de temps. L'accumulation et l'affinement des données paléoclimatiques ont en effet permis la création de conditions aux limites plus fiables pour les modèles et ont ouvert la voie à de nombreuses études numériques. Celles-ci couvrent un large spectre, des glaciations ordoviciennes, il y a 445 millions d'années, à celles du dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, en passant par les climats chauds du Crétacé ou encore le maximum thermique de l'Éocène, il y a cinquante millions d'années.

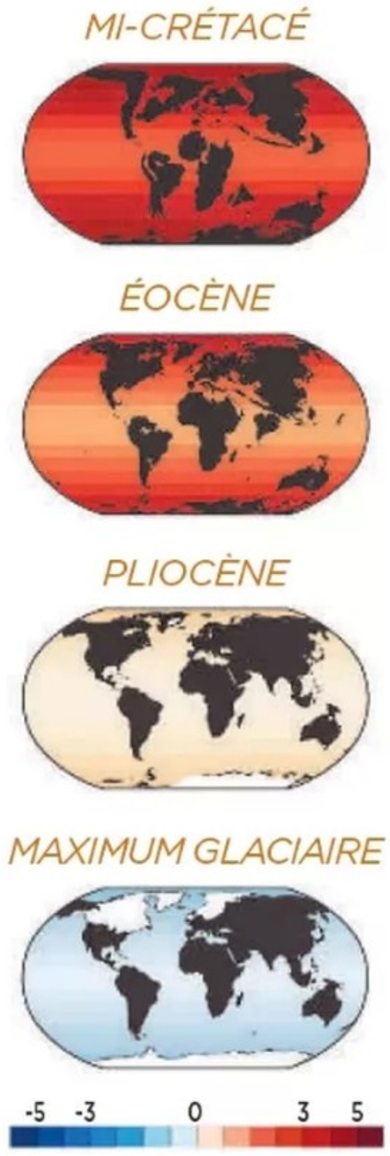
La paléoclimatologie est avant tout une discipline naturaliste reposant sur un éventail d'indicateurs et de données (lire pages 36 et 44). Ce sont ces données, qu'elles soient d'origine paléobotanique, palynologique, isotopique ou sédimentaire, qui fournissent en premier lieu des éléments sur la nature des changements clima-

tiques passés. L'irruption de la physique dans le monde de la paléoclimatologie, par le biais de la simulation numérique, n'a fait qu'ajouter un outil dans un champ de recherche par nature interdisciplinaire. Ainsi, la modélisation du climat dépend-elle crucialement de reconstructions paléogéographiques, des estimations des concentrations en gaz à effet de serre passées, des indicateurs de température et de salinité, ou encore des méthodes de reconstruction de l'insolation. Ces données constituent à la fois des points de départ pour la construction des conditions initiales des modèles, et des points d'arrivée pour la validation des simulations.

Cette validation est primordiale, car c'est elle qui détermine la capacité du modèle à simuler des états climatiques pour lesquels nous disposons d'archives. L'enjeu pour la compréhension du climat futur est également capital : les archives paléoclimatiques montrent que des concentrations en gaz à effet de serre comparables à celles d'aujourd'hui ont été atteintes pour la dernière fois il y a trois millions d'années, et que les concentrations à l'horizon 2200 suggérées par certains scénarios (le SSP5-8.5 par exemple, qui prévoit une poursuite de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre analogue à aujourd'hui pendant cinquante ans), ne sont retrouvées qu'il y a cinquante millions d'années.

Ainsi, les indicateurs paléoclimatiques nous apprennent qu'il n'y a pas eu, au cours des soixante-cinq derniers millions d'années, d'événement de changement climatique aussi abrupt que celui que nous sommes en train de vivre. Mais utiliser les modèles dans des configurations de CO_2 dont on sait qu'elles ont existé dans le passé reste extrêmement informatif. En particulier, la comparaison entre les modèles et les reconstructions paléoclimatiques permet de montrer l'aptitude (ou l'inaptitude) des modèles climatiques à représenter des climats très différents de l'actuel (6). Il est par exemple difficile de simuler correctement les climats chauds de l'Éocène, il y a environ cinquante millions d'années, dont les données font apparaître un gradient de température très faible entre l'équateur et les pôles.

Dans les travaux récents, les simulations paléoclimatiques jouent un rôle encore important pour mieux comprendre ce paramètre clé qu'est la sensibilité climatique, c'est-à-dire la réponse de la température globale à un doublement de la concentration en CO_2. Les nombreux modèles de climat disponibles actuellement et reproduisant correctement le climat historique ont longtemps produit des sensibilités climatiques entre 1,5 et 4,5 °C selon les modèles. Néanmoins, le dernier exercice d'intercomparaison de modèles montre que la sensibilité climatique a fortement augmenté avec la nouvelle génération de modèles (1,8 à 5,6 °C). À l'heure actuelle, les simulations paléoclimatiques entrent en jeu pour tenter de réduire ces intervalles : des études réalisées pour le maximum thermique de l'Éocène et pour le dernier maximum glaciaire ont révélé que la sensibilité climatique dépendait de l'état climatique de départ, et qu'elle pouvait par exemple être encore plus importante pour les taux élevés de CO_2 (supérieurs à 1 000 parties par million).



▲ *Variations des températures moyennes modélisées à quatre époques passées : mi-Crétacé (100 millions d'années), début de l'Éocène (50 millions d'années), Pliocène (1 million d'années) et au dernier maximum glaciaire (20 000 ans).*

D'APRÈS TIERNEY *ET AL., SCIENCE,* 2020.

PARAMÉTRISATION DES NUAGES

Les simulations des périodes de l'Éocène ont aussi montré que les modèles avec une sensibilité climatique trop forte dans les conditions actuelles étaient incapables de reproduire correctement le climat d'il y a 50 millions d'années. En parallèle, des études réalisées sur le dernier maximum glaciaire et l'Holocène moyen, il y a 6 000 ans, ont permis d'affiner, pour les premières, les paramétrisations des nuages dans le modèle du NCAR (7) et, pour les dernières, la représentation des changements de la végétation et des poussières dans le modèle britannique de reproduction du climat baptisé HadCM3 (8). Ainsi, à la fois comme outil de compréhension de l'évolution de notre planète et comme élément de réglage des modèles de climat, la simulation des paléoclimats, à toutes les échelles de temps, apparaît comme une discipline essentielle de la climatologie au sens large. ■

(1) https://interactive-atlas.ipcc.ch/
(2) D. Paillard, *Nature, 391*, 378, 1998.
(3) S. Manabe et D. H. Hahn, *J. Geophys. Res., 27*, 3889, 1977.
(4) J. Williams *et al., J. Appl. Meteorol., 13*, 305, 1974.
(5) E. J. Barron et W. M. Washington, *J. Geophys. Res. Atmos., 89*, 1267, 1984.
(6) J. E. Tierney *et al., Science, 370*, 6517, 2020.
(7) J. Zhu *et al., J. Adv. Model. Earth Syst., 14*, e2021MS002776, 2022.
(8) P. O. Hopcroft et P. J. Valdes, *Clim. Dynam., 45*, 1657, 2015.

La valse des continents et du climat

Au gré des périodes géologiques, un équilibre s'est créé entre les sources et les puits de CO_2, modulé par la tectonique des plaques, l'altération chimique et le volcanisme. L'une des périodes les plus chaudes qu'ait connues la Terre remonte à 252 millions d'années, époque de la Pangée. Un excès de CO_2 a augmenté l'effet de serre, provoquant l'éclatement du supercontinent et donnant son allure actuelle à notre globe.



Hannah Sophia Davies
GÉO-DYNAMICIENNE, POTSDAM (ALLEMAGNE)
Chercheuse postdoctorante au Centre de recherche des sciences de la Terre allemand (GFZ), elle s'intéresse aux modélisations géodynamiques et des marées.

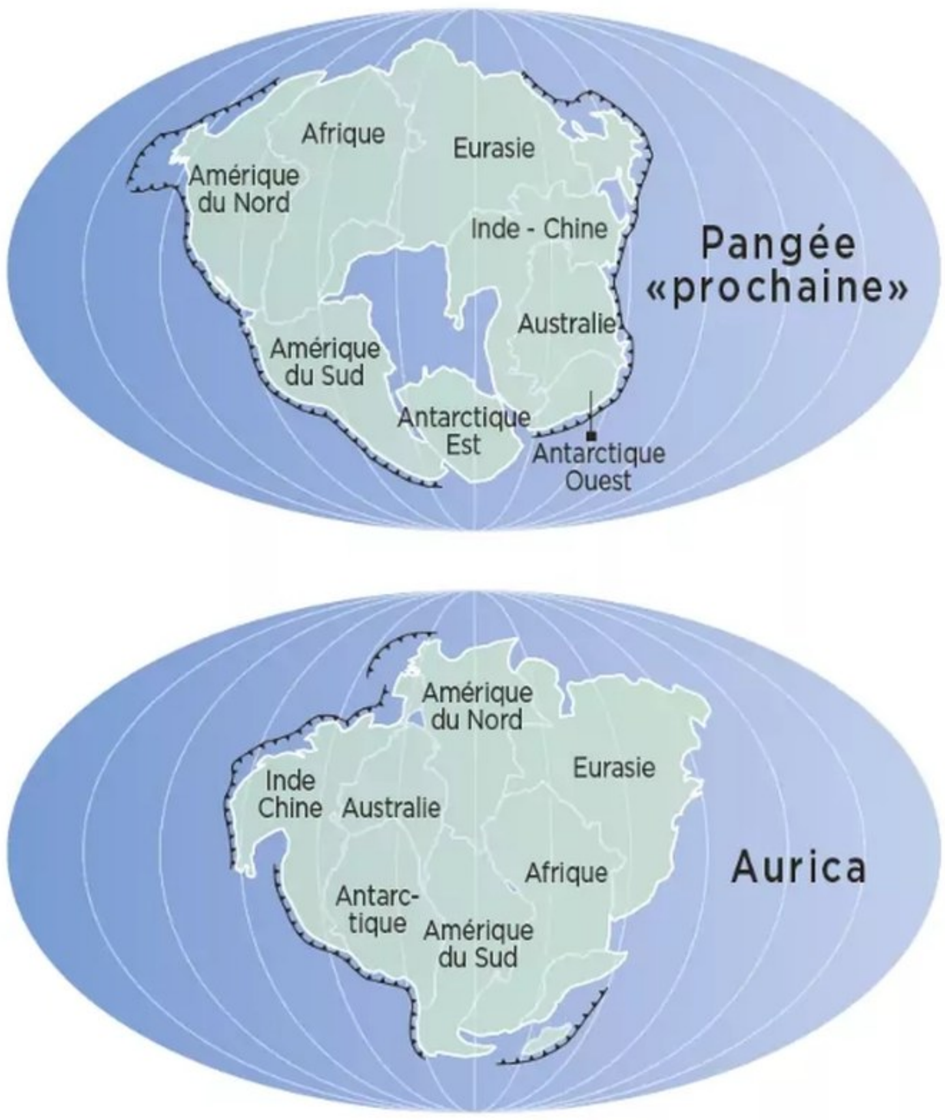
« *Et pourtant, elles bougent.* » Cet aphorisme en forme d'écho de la phrase apocryphe qu'aurait prononcée Galilée sur les mouvements de la Terre s'applique aux mouvements des plaques continentales à la surface du globe. Cette tectonique des plaques a bouleversé la géophysique, jusqu'à la climatologie, car le mouvement progressif des plaques modifie le climat même. Ainsi, lorsque les continents entrent en collision, ils forment des montagnes, exposant les minéraux des roches qui subissent une altération chimique : le CO_2 présent dans l'atmosphère réagit avec l'eau de pluie pour former de l'acide carbonique ; cet acide peut réagir avec les minéraux de la roche de manière à l'éliminer de l'atmosphère. Autrement dit, cette altération chimique piège du CO_2. Au cours des temps géologiques, un équilibre se fait alors entre l'émission naturelle du CO_2 par les volcans et son piégeage par les roches. Cet équilibrage maintient la teneur en CO_2 atmosphérique dans une fourchette qui aboutit à un effet de serre favorable à la vie sur Terre.

Plusieurs facteurs peuvent perturber cet équilibre subtil. D'abord, aucun de ces deux processus – piégeage et émission du CO_2 – n'est constant. Le CO_2 libéré par les volcans est variable, et les taux d'altération des roches fluctuent en fonction de la température, des précipitations et de l'emplacement des montagnes. Une montagne située près de l'équateur, où il pleut fréquemment (la partie nord de la Cordillère des Andes, en Amérique du Sud) absorbera davantage de CO_2 dans ses roches, tandis qu'une montagne située dans le désert (le massif de l'Atlas, en Afrique du Nord) n'aura pas cette occasion aussi souvent.

Peut-on retracer comment cet équilibre a changé depuis la formation de la Pangée – le dernier supercontinent de la Terre –, il y a environ 330 millions d'années ? Lorsque la Pangée s'est formée, elle a fermé l'ancien océan Rhéique, créant à sa place une chaîne de montagnes massive le long de l'équateur, la chaîne hercynienne. L'altération chimique des roches s'est alors accélérée, absorbant une grande partie du CO_2 atmosphérique de l'époque. Ce phénomène a été aggravé par le développement de forêts denses : les racines de cette multitude d'arbres ont brisé la roche et leurs feuilles ont absorbé de grandes quantités de CO_2 de l'atmosphère par photosynthèse. Lorsque ces plantes sont mortes, certains de leurs restes ne se sont pas décomposés mais ont été transformés en tourbe et en charbon, absorbant presque complètement le CO_2 stocké dans l'atmosphère. Tous ces facteurs combinés ont considérablement refroidi la planète, entraînant la formation de glaciers dans les régions septentrionales du jeune supercontinent.

Après cette période glaciaire, il y a environ 252 millions d'années, les niveaux de CO_2 atmosphérique ont augmenté de façon spectaculaire. L'une des plus grandes éruptions volcaniques jamais enregistrées s'est produite dans ce qui est aujourd'hui la Sibérie, couvrant de lave une superficie quatre fois plus grande que la France (soit environ 2 millions de km^2) sur une période de deux millions d'années. Dans un premier temps, la planète a continué à refroidir, en raison des cendres volcaniques qui faisaient écran à la lumière solaire, puis l'effet de

DR



serre dû au CO_2 supplémentaire et à la sédimentation des cendres a pris le dessus sur le refroidissement. Les taux d'altération ont été réduits, puisque les montagnes apparues lors de la formation de la Pangée se trouvaient alors dans l'intérieur sec du supercontinent. La situation s'est emballée et les niveaux de CO_2 dans l'atmosphère n'ont cessé d'augmenter, le taux d'altération parvenant à peine à les réduire. Résultat : la Terre s'est réchauffée de huit degrés Celsius et la teneur en CO_2 a atteint plus de 2 000 parties par million (ppm) – à comparer au niveau actuel de 415 ppm. Cela a entraîné la plus grande extinction de masse de toute l'histoire de la Terre – l'extinction permienne –, avec la disparition de 95 % des espèces marines et de 70 % des espèces animales terrestres.

UN FUTUR SUPER-CONTINENT

Ces globes représentent quatre hypothèses d'un supercontinent, qui pourrait se former dans 200 à 250 millions d'années. L'histoire se répétera alors, puisque le premier supercontinent s'est créé à l'époque de la Pangée, il y a 330 millions d'années, avant de se disloquer.

BRUNO BOURGEOIS / SOURCE HANNAH SOPHIA DAVIES

DES TEMPÉRATURES TERRESTRES QUI VARIAIENT ENTRE 50 ET 60 °C

Dans cette période, le climat était l'un des plus chauds que notre planète ait connus. Le vaste intérieur de la Pangée était essentiellement désertique, avec des températures autour de 50 à 60 °C, les régions humides et tropicales étant reléguées sur ses côtes. La plupart des terres composant la Pangée se trouvaient à l'équateur, ce qui empêchait la formation de calottes glaciaires polaires. En raison de ce climat particulier, les forêts tropicales et tempérées devaient alors s'étendre à des latitudes beaucoup plus élevées qu'aujourd'hui. Tel était le climat, jusqu'à ce que la Pangée commence à se disloquer, il y a 180 millions d'années.

Que peut-on inférer sur le futur de cette histoire ? Tout d'abord, le CO_2 d'origine anthropique, dont les émissions continuent pour le moment d'augmenter, réchauffera la Terre. Toutefois, les intempéries finiront par altérer les roches, qui piégeront de plus en plus de CO_2. La solution au réchauffement actuel ne viendra toutefois pas de là, car ce processus est très lent – la quantité de CO_2 dissoute dans la pluie est particulièrement faible et seule une petite quantité réagit avec les minéraux du sol à chaque fois qu'il pleut –, de sorte qu'il faudra plusieurs millénaires pour diminuer la teneur en CO_2 et réduire l'effet de serre actuel. Dans un avenir plus lointain encore, dans 200 à 250 millions d'années, un nouveau supercontinent finira par se former. Nous étudions plusieurs scénarios pour évaluer comment l'endroit où il se formera influera sur le climat de la Terre à long terme (1). Si tous les continents se rassemblent à nouveau, comme la Pangée, alors l'histoire pourrait bien se répéter, avec une période initiale froide suivie d'une période sèche et très chaude. ■

(1) H. S. Davies *et al.*, *Global Planet. Change*, *169*, 133, 2018 ; M. J. Way *et al.*, *Geochem. Geophys.*, 22, e2021GC009983, 2021.

À quand la prochaine ère glaciaire ?

Depuis la découverte des glaciations au XIX[e] siècle se pose la question d'un éventuel retour de ces périodes froides. Si la cause des alternances glaciaire-interglaciaire était alors débattue, le caractère périodique de ces changements passés était en revanche bien établi. Aujourd'hui encore, le « retour inéluctable » des glaciations est une opinion largement répandue. Pourtant, des scientifiques soulignent que l'effet de serre dû aux émissions anthropiques de CO_2 aura vraisemblablement pour conséquence d'empêcher ce phénomène.



▲ *La fonte totale ou partielle des calottes groenlandaise (ici, en Arctique) ou antarctique jouera nécessairement un rôle dans le devenir de notre ère, commencée il y a 2,58 millions d'années.*

Si l'on en sait aujourd'hui davantage sur les mécanismes du climat et des glaciations, il y a peu d'études sur la question des glaciations futures ou de la fin de l'ère Quaternaire, commencée il y a 2,58 millions d'années et encore en cours. Les rapports du GIEC se focalisent avant tout sur le XXI[e] siècle, et l'habitabilité de notre planète dans les siècles ou millénaires à venir n'a pas fait l'objet d'études poussées. Les seuls acteurs sociétaux intéressés par ces recherches sont aujourd'hui les agences de gestion des déchets nucléaires (en France, l'ANDRA), qui doivent discuter de la sûreté à très long terme – le million d'années – des sites potentiels d'enfouissement. Par ricochet, elles doivent donc discuter du climat futur et du devenir du principal déchet industriel de notre époque : le dioxyde de carbone (CO_2).

Depuis toujours, le climat de la Terre est influencé par les gaz à effet de serre mais aussi par le forçage astronomique (lire p. 26). Les glaciations de l'hémisphère Nord à l'ère Quaternaire sont rythmées notamment par les variations de l'obliquité (l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'orbite : aujourd'hui de 23,4°). Ces premières glaciations, produites il y a entre 3 et 1 millions d'années, survenaient tous les 41 000 ans. Toutefois, au cours du dernier million d'années, on constate que la périodicité dominante était de 100 000 ans. Ceci s'explique lorsque l'on introduit la notion de seuil et d'hystérésis (*) pour la dynamique des calottes : elles basculent d'un état (déglaciation) vers l'autre (glaciation) seulement lorsque le forçage astronomique franchit un seuil critique ; et réciproquement dans l'autre sens (1). Par exemple, il y a 420 000 ans, la période interglaciaire a persisté près de 30 000 ans au lieu des 10 000 ans habituels, car les variations astronomiques étaient trop faibles pour faire basculer le système. C'est encore le cas aujourd'hui et l'interglaciaire actuel devrait naturellement persister pendant 50 000 ans, à condition que le cycle du carbone ne soit pas perturbé.

Or, dès 1901, le météorologue suédois Nils Ekholm (1848-1923) avait compris que le CO_2 injecté par les humains dans l'atmosphère

FRANCK BICHON / EPICUREANS



Didier Paillard
CLIMATOLOGUE, PARIS-SACLAY
Chercheur CEA, il est spécialiste de la modélisation des climats anciens.



Gaëlle Leloup
CLIMATOLOGUE, PARIS-SACLAY
Chercheuse doctorante, elle effectue une thèse sur la modélisation des climats.

pourrait empêcher le retour à une ère glaciaire (2). Partant alors des niveaux anthropiques actuels de CO_2, combien de temps faudrait-il pour revenir à des niveaux « naturels » de CO_2 atmosphérique ? Et cela sera-t-il même possible d'y revenir ?

D'énormes progrès ont été faits sur l'étude du cycle du carbone à l'échelle du siècle, mais son fonctionnement à plus long terme reste mal connu. La théorie dominante fait l'hypothèse d'un retour à cet état initial naturel grâce à l'érosion des roches silicatées qui constituent la majeure partie de la croûte terrestre : s'il fait plus chaud et humide, l'érosion augmente et consomme du carbone atmosphérique « acide » (CO_2) pour le transformer en carbone « basique » (HCO_3^-), ce qui permet de diminuer l'acidité des océans et, au final, de précipiter du carbonate de calcium ($CaCO_3$). Il s'agit probablement, d'ailleurs, du principal thermostat de la planète, permettant de garder de l'eau liquide sur Terre depuis plus de quatre milliards d'années. Mais les flux sont très faibles et le retour à l'équilibre ancien par ce mécanisme seul nécessiterait des centaines de milliers d'années.

VA-T-ON SORTIR DU QUATERNAIRE ?

En outre, cette idée est avant tout théorique et ne prend pas en compte l'influence du cycle organique du carbone : en effet, une part non négligeable du carbone enfoui ou exhumé l'est sous forme organique (c'est-à-dire des molécules variées issues de la décomposition d'organismes qui peuvent à long terme devenir du pétrole, charbon ou gaz), avec une dynamique sans doute bien plus complexe qu'un simple retour à l'équilibre à travers une réaction chimique acido-basique. Ainsi, les données paléo-océanographiques montrent avant tout d'importants changements dans le rapport isotopique du carbone des carbonates ($^{13}C/^{12}C$), ce qui est le signe de modifications majeures dans le cycle organique du carbone (3). Ces variations sont elles aussi rythmées par l'astronomie, avec un cycle de 400 000 ans correspondant aux variations de l'excentricité de l'orbite terrestre. Toutefois, le signal est dominé par des cycles de plus grande amplitude avec une pseudo-périodicité de l'ordre de huit à neuf millions d'années, pour des raisons aujourd'hui mal comprises.

Une nouvelle hypothèse consiste à introduire à nouveau la notion de seuil et d'hystérésis, mais cette fois dans le cycle du carbone planétaire, pour expliquer ces grandes oscillations. En effet, si le cycle du carbone possède plusieurs modes de fonctionnement privilégiés, les variations astronomiques peuvent occasionnellement le faire basculer d'un mode à l'autre à très basse fréquence, ce qui permettrait de mieux rendre compte de ces variations observées dans le passé (4). Pour le futur, tout ceci suggère qu'il ne sera pas aisé de revenir à l'état initial si la perturbation dépasse un certain seuil.

Ces éléments nous indiquent que le retour éventuel des glaciations n'est pas pour demain : dans 50 000 ans s'il n'y avait pas de perturbation anthropique ; dans plusieurs centaines de milliers d'années si l'on fait l'hypothèse d'un écart temporaire au Quaternaire avec un « retour à la normale » reposant sur l'érosion des silicates ; dans bien plus longtemps encore s'il existe des phénomènes de seuil et d'hystérésis dans le cycle du carbone terrestre, seuils que nous sommes peut-être en train de franchir ; et peut-être jamais dans la mesure où la fonte partielle ou totale des calottes groenlandaise et antarctique nous ferait clairement sortir du cadre Quaternaire dans lequel l'humanité s'est jusqu'à présent développée. ■

(*) **Dans un phénomène d'hystérésis,** la réponse d'un système à une variation de paramètre physique ne dépend pas uniquement de l'amplitude de cette variation, mais aussi d'un effet de « mémoire » du système qui retarde la réponse.

(1) D. Paillard, *Nature, 391,* 378, 1998.

(2) N. Ekholm, *Q. J. R. Meteorol. Soc., 27,* 1, 1901.

(3) S. Boulila *et al., Earth Planet. Sc. Lett., 317,* 273, 2012.

(4) G. Leloup et D. Paillard, soumis à *Earth Syst. Dyn.*, doi : 10.5194/esd-2022-46, 2022.

DR - DR

Éprouver les variations climatiques grâce à la science-fiction

La littérature de science-fiction est une formule narrative féconde pour éprouver les changements climatiques. La trilogie *Helliconia,* du romancier britannique Brian Aldiss, le montre de manière exemplaire.

Les dérèglements climatiques appartiennent au répertoire de la science-fiction depuis les prémices de ce genre, au début du XIXe siècle. Ce sont souvent des récits de fin du monde depuis *Le Dernier homme,* de Cousin de Grainville (1746-1805), jusqu'au cycle de *La Terre mourante,* de Jack Vance (1916-2013). Un imaginaire entropique y règne : les montagnes s'érodent, les espèces et les sociétés se désagrègent, le Soleil s'éteint. Cet imaginaire se transforme au XXe siècle : les symboles de l'extinction par épuisement (des hommes, des ressources, du vivant) sont relayés par ceux de la pollution, notamment nucléaire ; et les scénarios, par ceux de la catastrophe, de la course contre la montre et du survivalisme. NooSFère, un site internet français, en recense plus de trente variations depuis 1960 (1).

L'appétence pour la science, ainsi qu'une *«imagination du désastre»* (l'expression est de l'essayiste américaine Susan Sontag), ne sont pas les seules explications de cette vitalité. Il s'agit de symboles, de scénarios, et surtout d'une échelle de narration. Pour se saisir des enjeux climatiques, il faut aimer raconter des histoires à une échelle planétaire, voire au-delà – tant en termes spatiaux que temporels. C'est cette spécialité-là qui fait de la science-fiction une formule narrative féconde pour éprouver les changements climatiques, que ce soit en avant vers le futur, ou en arrière vers la nuit des temps.

Helliconia, trilogie du Britannique Brian Aldiss (1925-2017) publiée entre 1982 et 1985, l'illustre de manière exemplaire : une planète fictive orbite autour d'un soleil, qui lui-même tourne autour d'un astre plus lointain. Deux orbites, donc : la «petite année» compte 480 jours, et la «grande année» près de 2 500 années terriennes. Marquée par des changements climatiques dantesques, cette mécanique céleste est un cadre parfait pour thématiser les rapports d'échelle entre les humains, leurs sociétés et leur environnement planétaire. Alors même que les journées et saisons de leur « petite année » sont comparables aux nôtres, pendant la « grande année », des sociétés disparaissent ou émergent, des connaissances tombent dans l'oubli ou sont découvertes ; tout est cycliquement à reconstruire, ou à retrouver.

Le Printemps d'Helliconia, par lequel débute le cycle, présente un paysage figé sous la neige et la glace, aux surfaces rendues uniformes et lisses par une période glaciaire qui semble avoir toujours existé et ne pas avoir de fin. Ces espaces nous évoquent des environnements préhisto-



Irène Langlet,
PROFESSEURE DE LITTÉRATURE CONTEMPORAINE, UNIVERSITÉ GUSTAVE-EIFFEL
Spécialiste des littératures non-fictionnelles et de science-fiction.



Denis Langlet,
PROFESSEUR AGRÉGÉ
Titulaire d'une thèse de biogéochimie des carbonates.

DENIS LANGLET



▲ *Dans le premier cycle d'*Helliconia, *de Brian Aldiss, le paysage est figé par une période glaciaire qui semble avoir toujours existé et ne pas avoir de fin.*

riques, habités de formes de vie dont la description fait aussi référence au passé de l'humanité. Le paysage est celui d'un commencement, entre les glaces et les vapeurs des circulations hydrothermales. Les vents violents et les éjections cycliques des geysers transportent le lecteur dans un environnement façonné par la puissance des forces telluriques et météorologiques. La place du vivant et de l'humain y semble insignifiante, et l'écrivain le manifeste en confrontant l'échelle individuelle à celle de la « grande année » : *« Le terrain était jonché de pierres roulées, restes d'une ancienne mer qui s'était jadis retirée sous la poussée du froid – mais de cet aspect des choses ils n'avaient nulle connaissance et nul souci ; seul le présent comptait pour Alehaw et son fils. »*

S'ÉLOIGNER DU RÉEL

Cette évocation d'un paléoenvironnement des personnages nous transporte dans un temps du début, à partir duquel nous suivons des transformations de plus en plus complexes à mesure que se modifient les climats, que se tissent les liens entre les formes de vie. Comme les acteurs du roman à leur échelle, lectrices et lecteurs accompagnent la naissance du monde. Pour survivre, l'humain placé dans de telles conditions doit construire son histoire, s'affranchir des contraintes du présent et gagner une nouvelle vision, voir l'avenir possible : en développant des techniques, des outils de connaissance et de prospection.

Parler de paléoenvironnement, c'est aussi prendre de la hauteur et, en accédant à la connaissance, échapper au destin. C'est prendre le risque de s'éloigner du réel, du reste de son écosystème et de son humanité. Brian Aldiss inclut ce thème dans le récit : un satellite terrien installé autour d'Helliconia filme durant quatre mille ans les bouleversements climatiques de la planète et les transmet à la Terre. Ces données mettent mille ans à parcourir la distance et deviennent ainsi, à leur arrivée, une sorte de paléospectacle climatique plein d'étrangeté.

L'atout des paléoenvironnements est de nous mettre dans une position particulière : on voit le passé et l'avenir, on est voyageur dans le temps et témoin des modifications des paysages et des sociétés. L'échelle des temps, leur lenteur ou leurs vitesses, sont indispensables à la compréhension des environnements.

Ainsi voit-on dans les climats futurs d'*Helliconia* – dans 6 000 ans –, une image des climats passés de la Terre. C'est une logique fondamentale de la science-fiction : le présent y prend toujours valeur de passé d'un futur où se raconte l'histoire. ■

(1) https://tinyurl.com/noosfere-dereglement-climat

LES EDWARDS/WWW.LESEDWARDS.COM

Start- up Des pistes pour recycler le dioxyde de carbone

De multiples solutions existent pour réduire nos émissions de dioxyde de carbone. On peut par exemple, au cas par cas, jouer sur l'efficacité, la sobriété, voire la frugalité énergétique. Mais il est aussi possible, à certaines conditions, de capter ce gaz à effet de serre, afin de le séquestrer… ou de le valoriser. De nombreuses jeunes pousses explorent ainsi des pistes visant à le convertir en carburant vertueux, ou en molécules pour l'industrie chimique.

SYNHELION
CONCENTRER LES RAYONS DU SOLEIL ET CONVERTIR LE CO_2 EN CARBURANT

- Créée en mai 2016
- Effectif : 40
- Levée de fonds : 22 M€ en déc. 2022

En attendant l'avion à hydrogène, qui ne dégagerait plus de dioxyde de carbone (CO_2), le secteur aérien cherche un kérosène plus « vert » afin d'alimenter ses réacteurs actuels. Un carburant obtenu à partir de sources renouvelables, comme le biogaz – un mélange de méthane (CH_4) et de CO_2 – ou, mais c'est plus difficile, à partir du seul CO_2. Pour synthétiser ce carburant, encore faut-il une source d'énergie durable. Le solaire ? Synhelion, une start-up suisse, emprunte une voie radicale : en concentrant les rayons de notre étoile, elle transforme à très haute température, en présence d'un catalyseur, ces gaz, additionnés de vapeur d'eau, en « syngas » (gaz synthétique) : un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H_2), que l'on sait transformer en divers carburants, comme l'essence ou le kérosène, en faisant appel au procédé Fischer-Tropsch, inventé en 1923.

La jeune pousse valorise des travaux menés à l'École polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ), en Suisse, par l'équipe d'Aldo Steinfeld, aujourd'hui son conseiller scientifique. Après avoir testé à petite échelle les procédés de l'EPFZ, Synhelion a entrepris de construire à Jülich, près de Cologne (Allemagne), un pilote industriel qui devrait produire, courant 2023, du carburant solaire pour décarboner le secteur des transports. Premier client : Swiss, la principale compagnie aérienne helvétique. Synhelion prévoit aussi la construction en Espagne d'une unité de production bien plus grande, qui devrait entrer en service en 2025 et permettre à la start-up de produire 1,6 million de litres par an. En 2030, elle vise 875 millions de litres, à un euro le litre.

Le procédé de production de syngas conçu à l'EPFZ se divise en trois étapes. Il faut d'abord concentrer la lumière. À Jülich, 1 500 mètres carrés de miroirs orientables redirigent les rayons solaires sur un point focal situé au sommet d'une tour de vingt mètres. Deuxième étape : la lumière issue du champ de miroirs pénètre à travers une fenêtre en quartz dans le « récepteur », une cavité noire où circule un fluide caloporteur. Il s'agit de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, dont le rôle est de capter et accumuler la chaleur et de la transporter vers le réacteur. Le fluide caloporteur y croise un réseau de tubes, à l'intérieur duquel a lieu la réaction thermochimique, en présence d'un catalyseur : une mousse poreuse d'oxyde de cérium.



▲ *Le récepteur solaire où méthane, eau et CO_2 se transforment, à très haute température, en gaz synthétique.*

SYNHELION

« Nous avons été les premiers à travailler sur les oxydes de cérium, dès 2006, pour la dissociation de l'eau et la conversion du CO_2 en combustibles (H_2, syngas), sur le four solaire d'Odeillo, rappelle Stéphane Abanades, chercheur au laboratoire du CNRS, Procédés matériaux et énergie

solaire, à Font-Romeu (Pyrénées-Orientales). *Nous explorons aussi d'autres matériaux, notamment des pérovskites (manganites de lanthane ou de calcium et d'autres minéraux de structure similaire) ou encore des ferrites, c'est-à-dire des oxydes mixtes de fer et d'un autre métal comme le nickel. Mais, jusqu'à présent, il n'existe pas de meilleur candidat que l'oxyde de cérium, en termes de cinétique de production de syngas et de stabilité des performances en réacteur solaire.»*

Dans un premier temps, l'installation de Jülich produira du kérosène à partir de biogaz brut comme source de carbone, plutôt que du seul CO_2. La première solution est rodée et nécessite une température moins élevée (800 à 1 200 °C) que la seconde (1 500 °C), qui est aussi plus coûteuse. *«La biomasse est une source de carbone renouvelable, qui coûte entre 50 et 70 euros la tonne, et contient autant de carbone que deux tonnes de CO_2,* explique Gianluca Ambrosetti, président et cofondateur de Synhelion. *En comparaison, le CO_2 d'origine atmosphérique, la seule autre option vraiment renouvelable, coûte 800 euros la tonne.»* Climeworks, une start-up sœur de Synhelion, spin-off du même laboratoire de l'EPFZ, est un spécialiste réputé de cette capture directe du CO_2 dans l'air ambiant (DAC, pour *direct air capture*). *«Si le prix du CO_2 obtenu par DAC descend un jour à 200 ou 100 euros la tonne,* ajoute Gianluca Ambrosetti, *ce sera une alternative formidable.»* Sachant que capter le CO_2 sur un site industriel a un coût qui, sauf rares situations particulières, se situe entre 50 et 180 euros la tonne, selon l'industrie considérée.

Les avions émettront encore quelque temps du CO_2, mais bientôt, donc, certains brûleront un carburant produit en partie à partir de CO_2. En attendant le kérosène issu à 100 % du dioxyde de carbone. ■ **Pierre Vandeginste**

■ synhelion.com

OXYLUM
CONVERTIR LE CO_2 EN MOLÉCULES VALORISABLES



▲ *L'électrolyseur développé par Oxylum pour transformer le CO_2 en acide formique.*

■ Créée en novembre 2021
■ Effectif : 4
■ Levée de fonds : pas encore

Capturer le CO_2, c'est bien, le valoriser, c'est encore mieux. Oxylum industrialise un procédé électrochimique économe en énergie développé à l'université d'Anvers (Belgique), au sein de l'équipe de Tom Breugelmans, le conseiller scientifique de la start-up. Dans un premier temps, elle transformera le CO_2(+ H_2O) en acide formique (CH_2O_2). ***«Il existe une demande, notamment dans les secteurs agricole, pharmaceutique et textile,*** **explique Bert De Mot, président cofondateur de la start-up.** ***Par la suite, nous prévoyons entre autres de produire de l'éthylène.»*** **Cet hydrocarbure (C_2H_4), aujourd'hui issu du pétrole, est très utilisé dans l'industrie chimique, notamment comme point de départ de la production de polymères.** ***«L'efficacité de notre réacteur,*** **poursuit Bert De Mot,** ***repose sur de nombreux facteurs concernant les électrodes, l'électrolyte, la membrane… Le catalyseur est une des pièces du puzzle. Nous faisons appel à des matériaux non nobles, et même abondants sur terre. Nous avons réalisé un prototype, qui produit un kilogramme d'acide formique par jour.»*** **Dans la zone industrielle d'Anvers, il ne sera pas trop difficile de se procurer du CO_2.** ***«Certains sites captent déjà celui dégagé par leur propre processus,*** **assure Bert De Mot.** ***Nous cherchons le bon candidat pour alimenter un pilote industriel qui devrait produire des tonnes par jour, en 2025.»*** P.V.

■ oxylum.com

En bref

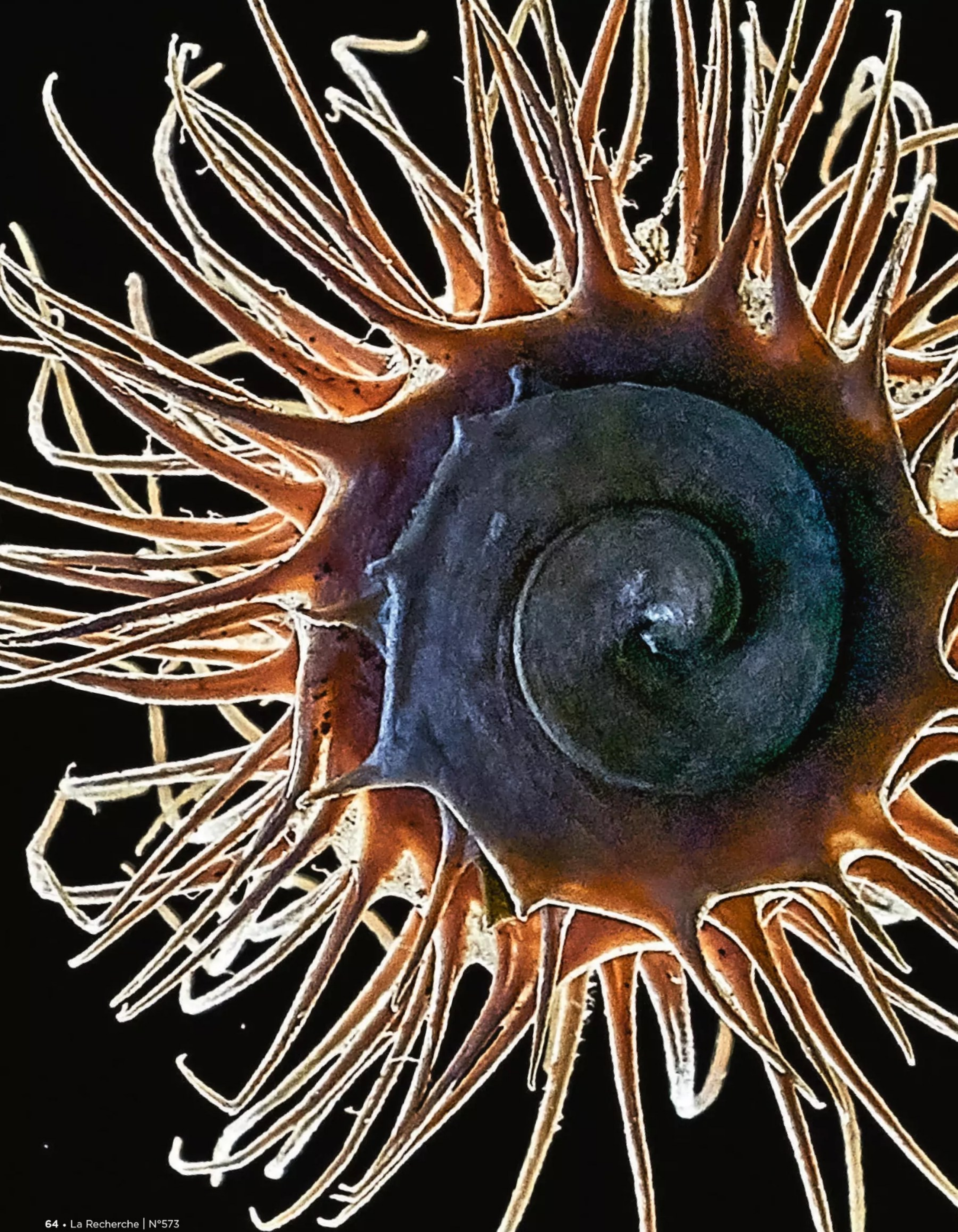
Stocker l'électricité durable. À Rennes, Kemiwatt élabore depuis 2014 sa technologie de batterie à flux faisant appel à un électrolyte organique, biodégradable, recyclable… à base d'anthraquinone ($C_{14}H_8O_2$), un hydrocarbure aromatique organisé autour de trois cycles de benzène. Un démonstrateur a permis de prouver une excellente stabilité, dont on espère une durée de vie de l'ordre de vingt ans. Ce qui fait de cette technologie un candidat pour stocker l'électricité d'origine solaire, éolienne ou autre source intermittente.

■ kemiwatt.com

Chaleur mobile. Récupérer et valoriser la chaleur «fatale» (100-200 °C) que des sites industriels produisent sans pouvoir l'exploiter est une manière d'économiser l'énergie. Water Horizon, près de Toulouse, a mis au point une batterie thermique transportable reposant sur l'évaporation d'une solution saline, qui conviendra à certaines situations. Une levée de fonds de 5 M€, finalisée en mars 2022, doit permettre à la start-up de réaliser un premier pilote industriel qui devrait entrer en fonction dans le courant de l'année 2023.

■ water-horizon.com

OXYLUM





Les graines : une diversité vitale

Dans l'agriculture, ce sont les humains qui ensemencent les sols des graines. Dans la nature, cette dissémination prend des détours surprenants, soulignant les adaptations créatives de l'évolution.

L'été, la moisson des céréales prépare la récolte des graines que l'on peut consommer. À l'automne, marrons, châtaignes ou glands tombent de leurs arbres et s'apprêtent à germer. Les graines renferment l'embryon de la future plante, qu'il s'agisse d'une fleur, d'une céréale ou d'un arbre. La plupart des espèces végétales terrestres produisent en effet des graines (contrairement à celles qui se reproduisent via des spores). Leur apparition dans l'évolution, il y a environ 400 millions d'années, a marqué une innovation en termes d'adaptation, leur résistance et leurs modes de dissémination permettant au globe de se couvrir de forêts. Au gré de l'évolution, ces « capsules du vivant », qui attendent le moment propice pour germer, ont multiplié les moyens de déplacement. De la simple gravité – se laisser tomber de la plante –, on est passé, par sélection naturelle, à des solutions extraordinaires, profitant du vent, des courants aquatiques, ou même du feu. Certaines graines voyagent sur un animal, s'agrippent à un pelage à l'aide de griffes ou de crochets. D'autres ont une valeur nutritive élevée, attirant les animaux disséminateurs de graines. Plutôt que d'être des variations esthétiques, les différentes formes et attributs des graines ont des fonctions bien définies. Les photos de **Thierry Ardouin** que nous présentons dans ce portfolio (sauf pages 70 et 71) sont extraites du beau livre *Histoire de graines* (Atelier EXB – MNHN, 2022). ■ **Philippe Pajot**

La luzerne en forme de disque *(Medicago disciformis)* est endémique des régions méditerranéennes de l'Europe et de l'Asie mineure. Sa graine en forme d'étoile possède des appendices multiples qui lui permettent de s'accrocher et d'être transportée dans le pelage des petits animaux qui vivent dans l'habitat aride privilégié par cette plante herbacée.

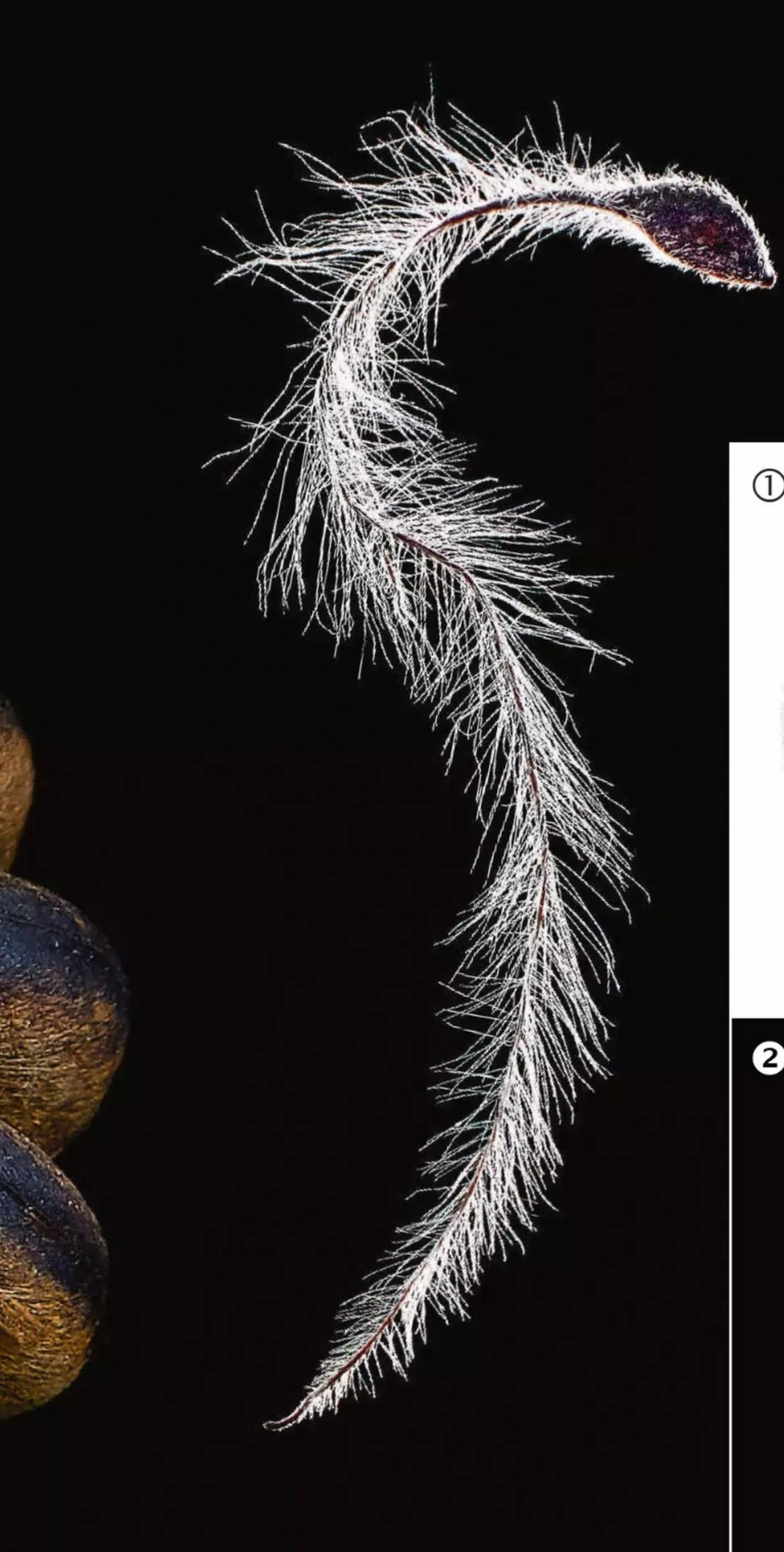


La perle de Zanzibar (*Majidea zanguebarica*) est un arbuste ornemental qui exhibe dans son fruit des graines duveteuses ❶. Cultivées pour en faire des bijoux, celles-ci sont, dans leur milieu naturel, transportées par les animaux. C'est également le cas des graines d'une autre plante, *Afzelia africana*, qui pousse sous forme d'un arbre de trente-cinq mètres de haut répandu en Afrique de l'Ouest. Comme des pois dans leur cosse, les graines sont dans leur fruit et possèdent une excroissance charnue orange – un élaïosome ❸.
Le riz (*Oryza sativa*), dont on voit ici le caryopse – le fruit – ❷, est la première céréale mondiale pour l'alimentation humaine.
L'*Aegilops neglecta*, dont on a photographié le fruit et l'enveloppe ❹, est une herbacée du pourtour méditerranéen.

L'avoine (*Avena sativa*), dont on voit ici le fruit et son enveloppe, est une plante cultivée originaire d'Europe. La domestication des céréales peut être vue comme une coévolution entre plantes et humains, qui aboutit à une dissémination massive des graines.

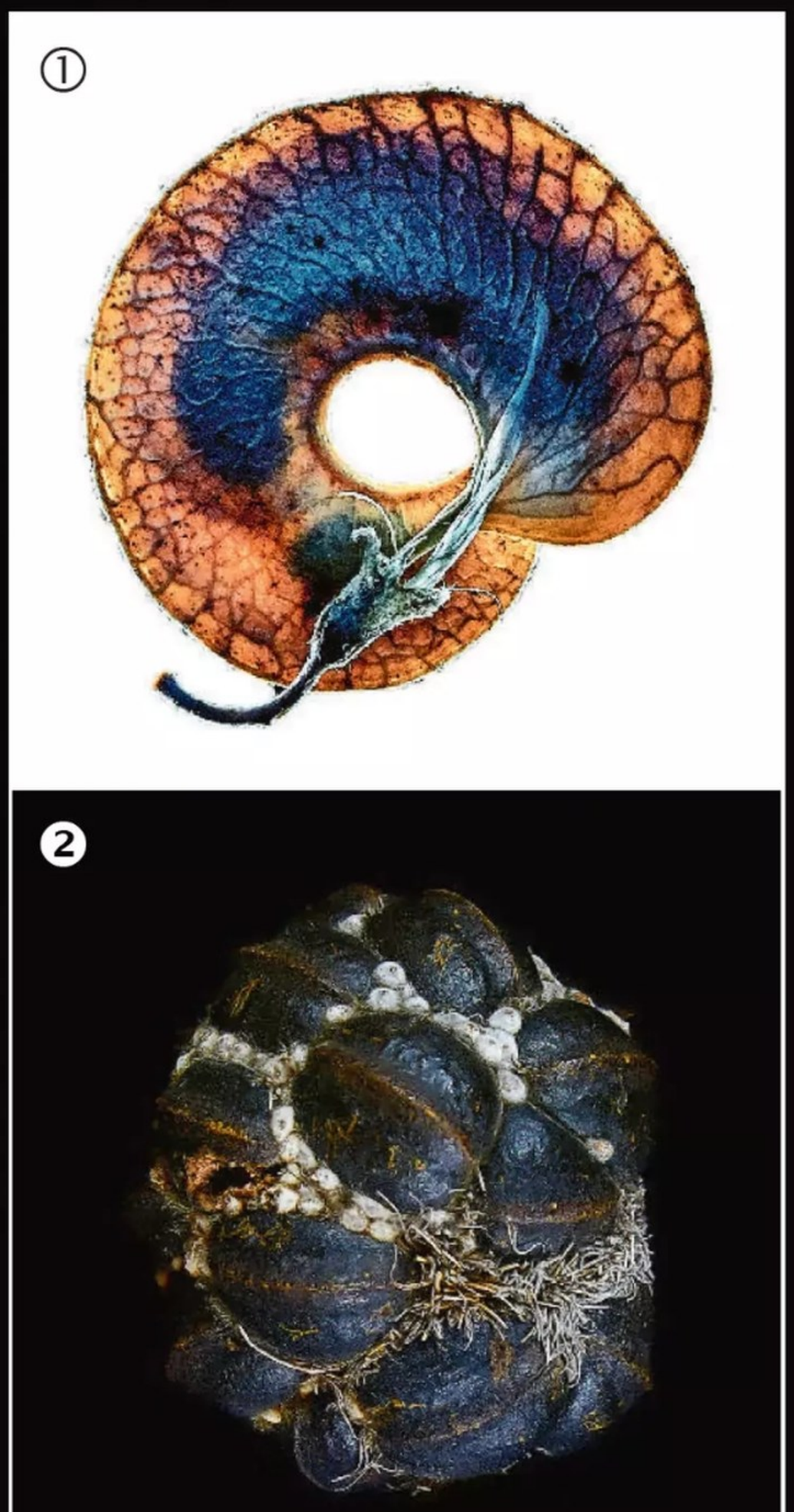
AU GRÉ DES ÉLÉMENTS





◁ Certaines plantes usent de moyens originaux pour répandre leurs graines. C'est le cas de l'***Hura crepitans*** (à gauche), arbre tropical vénéneux qui peut atteindre soixante mètres de haut. Son fruit comprend jusqu'à seize lobes qui explosent et éjectent leurs graines loin de l'arbre.

La clématite vigne blanche (*Clematis vitalba*) est une plante grimpante, parfois considérée comme envahissante. Son fruit, qui contient la graine, est disséminé par le vent.



La gousse de la luzerne arborescente (*Medicago arborea*) ① contient deux ou trois graines qui sont dispersées par l'eau ou les animaux. Originaire d'Australie, la ***Banksia laricina*** ② est un arbuste de deux mètres de haut dont les graines profitent des incendies pour s'éparpiller.



À l'Institut Vavilov, à Saint-Pétersbourg, qui abrite la plus ancienne banque de graines au monde, une étudiante travaille à identifier les semences provenantdes stations de collecte. Plus de 300 000 échantillons y sont stockés.

DES COFFRES-FORTS POUR LES GRAINES

Comment faire lorsque la biodiversité végétale est en péril ? Il faut disposer de réserves de graines utilisables, d'où l'idée de créer des coffres-forts.

Près d'un quart des espèces végétales sont menacées d'extinction. Afin de préserver ces sources de nourriture, de molécules thérapeutiques et de biodiversité, des centaines de banques de graines ont été créées à travers le monde. Ces « coffres-forts génétiques » se trouvent dans des lieux variés du globe. La plus imposante se niche dans les froideurs d'une chambre souterraine de l'île norvégienne du Spitzberg. La plus ancienne, l'Institut Vavilov à Saint-Pétersbourg (Russie), fonctionne depuis la fin du XIXe siècle. De telles banques existent aussi en Allemagne, aux États-Unis, au Japon ou encore en Chine. Avec 400 000 échantillons, la banque de New Delhi (Inde), fondée en 1976, abrite majoritairement des variétés locales. Celle de Texcoco (Mexique), créée en 1963, est spécialisée dans les variétés de blé et de maïs et contient 170 000 échantillons. Le projet Banque de semences du millénaire est, quant à lui, un partenariat mondial visant à préserver toutes les espèces sauvages menacées. La réserve est localisée au Royaume-Uni, dans le Sussex. Lorsque le stock dans ces dépôts devient faible ou trop ancien, les graines sont replantées et le stock renouvelé afin de prévenir la péremption. Ainsi, ceux du Spitzberg sont renouvelés au bout de quelques dizaines d'années, en moyenne. Un travail de longue haleine. ■ **Ph. P.**

MARIO DEL CURTO - RICARDO GANGALE / SVALBARD GLOBAL SEED VAULT

Entrée de la réserve de graines du Svalbard, sur l'île norvégienne du Spitzberg, qui conserve près d'un million d'échantillons. La plus importante banque de semences au monde est à seulement 1120 kilomètres du pôle Nord ; elle est née d'une coopération des pays nordiques et a été inaugurée en 2008.



Pascale Gisquet-Verrier
NEUROSCIENTIFIQUE, CNRS, PARIS. *Directrice de recherche émérite au CNRS (NeuroPSI - Institut des neurosciences Paris-Saclay), elle est spécialiste des bases neurales de la mémoire et s'est particulièrement intéressée aux mécanismes de rappel par indice. Ses travaux ont aussi contribué à réviser le dogme de la consolidation des souvenirs, et à proposer des pistes contre les addictions et le stress post-traumatique.*

Proust et le rappel implicite

À l'occasion du 100e anniversaire de la mort de Marcel Proust, l'intérêt littéraire de son œuvre a été largement rappelé. À la recherche du temps perdu *est non seulement une œuvre monumentale, mais aussi un ouvrage sur la mémoire et sur le temps qui fait de son auteur un des premiers explorateurs des neurosciences modernes. À la lecture de divers entretiens de Proust et en revisitant l'épisode de la madeleine, Pascale Gisquet-Verrier montre qu'il décrit un processus de rappel de la mémoire encore inexploré : un rappel implicite de souvenirs autobiographiques. Un processus inconscient qui démarre par la rencontre d'un indice suscitant une forte émotion et que Proust nommait « réminiscence involontaire ».*

« *Je portai à mes lèvres une cuillerée du thé où j'avais laissé s'amollir un morceau de madeleine.* » Pour le grand public, cette action qui prend place au début du premier volume de *À la recherche du temps perdu* est souvent le seul extrait qu'il retient de l'œuvre immense – sept volumes, plus de deux milles pages – de Marcel Proust (1871-1922). Dans ce passage, l'écrivain, qui se plaint de son manque de mémoire, rend compte d'une expérience gustative qui lui a permis de retrouver des souvenirs de son enfance qu'il pensait perdus pour toujours. Après avoir ingéré un morceau du petit gâteau moelleux, l'auteur décrit minutieusement ses réactions. Tout un chacun y trouve, souvent sans avoir lu le texte, l'illustration d'un phénomène couramment vécu, qui nous permet consciemment, par le truchement d'une information, d'un indice, de retrouver un souvenir enfoui.

Mais, comme nous allons le voir, ce n'est pas ce que décrit Marcel Proust dans ce passage. Au moment où il déguste cette madeleine, il n'a aucune volonté d'agir sur sa mémoire. L'indice se présente à lui en dehors de toute straté-

▶ *La madeleine de Proust est souvent perçue comme un souvenir retrouvé grâce à l'action de la mémoire. Or, ce que décrit Marcel Proust, à travers le premier tome de* À la recherche du temps perdu, *est l'émergence de souvenirs, à la suite d'émotions sensorielles, sans processus conscient.*

PVDE / BRIDGEMAN IMAGES - BONCHAN/SHUTTERSTOCK - DR



“Un plaisir délicieux m’avait envahi, isolé, sans la notion de sa cause”



▲ *Adrien Proust, le père de Marcel, était un professeur de médecine réputé. Il pose ici avec Robert, frère cadet de Marcel, sur le balcon de l’appartement familial parisien au début des années 1900.*

gie de recherche consciente : *«À l’instant même où la gorgée mêlée des miettes du gâteau toucha mon palais, je tressaillis, attentif à ce qui se passait d’extraordinaire en moi.»* Proust est saisi par une information sensorielle qui déclenche un éveil attentionnel : *«Un plaisir délicieux m’avait envahi, isolé, sans la notion de sa cause.»* Cet éveil attentionnel conduit à l’apparition d’une émotion : *«Je sentais qu’elle était liée au goût du thé et du gâteau, mais qu’elle le dépassait infiniment, ne devait pas être de même nature. D’où venait-elle ?»* Petit à petit, le narrateur comprend que l’émotion est liée au goût de la madeleine, et note que l’effet de l’indice diminue avec sa répétition ; *«laisser cela et boire mon thé en pensant simplement à mes ennuis d’aujourd’hui, à mes désirs de demain»*. Il se rend compte qu’il faut laisser l’esprit travailler seul et lui faire confiance : *«Et tout d’un coup le souvenir m’est apparu. Ce goût, c’était celui du petit morceau de madeleine que le dimanche matin à Combray (parce que ce jour-là je ne sortais pas avant l’heure de la messe), quand j’allais lui dire bonjour dans sa chambre, ma tante Léonie m’offrait après l’avoir trempé dans son infusion de thé ou de tilleul.»* Alors que le narrateur a abandonné les processus de recherche conscients, le souvenir émerge. Ce mode de rappel particulier, que Marcel Proust a appelé « réminiscence involontaire », correspond à un rappel inconscient (ou implicite), par l’intermédiaire d’un indice, de souvenirs autobiographiques. Ce qui est étonnant, c’est que ce processus, dépeint depuis 1913, n’a jusqu’à présent pas été décortiqué par les spécialistes de la mémoire. Pourtant, la littérature scientifique fournit un certain nombre d’éléments qui confortent son existence et nous conduisent, un siècle après la mort de l’écrivain, à envisager la réalité d’un rappel implicite de souvenirs autobiographiques, et à rendre hommage au côté visionnaire de Proust.

Marcel Proust n’est pas un chercheur en neurosciences, discipline dont la naissance remonte à la fin des années 1960, mais, pour construire son œuvre, il a eu un besoin vital de comprendre le fonctionnement de sa mémoire afin de l’utiliser au mieux. Pour s’en convaincre, revenons aux conditions dans lesquelles cette œuvre a été écrite. Marcel Proust est issu d’une famille bourgeoise. Sa mère, Jeanne Weil, appartenait à une famille fortunée et son père, Adrien Proust, était un professeur de médecine réputé. La fortune familiale assure au jeune Marcel une existence facile qui, après de solides études littéraires, et malgré ses problèmes de santé, lui permet de fréquenter les salons de la grande bourgeoisie et de l’aristocratie du Faubourg Saint-Germain et du Faubourg Saint-Honoré. Cette vie mondaine est ponctuée de nombreuses sorties et de quelques voyages.

LA MÉMOIRE VOLONTAIRE, OU LA RESTITUTION RESTREINTE DU SOUVENIR

Ce n’est qu’à 38 ans qu’il commence l’écriture d’*À la recherche du temps perdu*. Pendant treize années, c’est-à-dire jusqu’à sa mort, l’homme de lettres vit en reclus dans sa chambre tapissée de liège, au deuxième étage du 102, boulevard Haussmann, à Paris. Seul, enfermé dans sa chambre et alité, il donne forme à son œuvre littéraire. Il s’épuise au travail, dort le jour et ne sort que rarement, toujours à la nuit tombée. Pendant toutes ces années d’écriture intense, il puise dans sa mémoire afin d’y trouver la matière de ses écrits. Il transpose les anecdotes, événements et émotions vécus par lui-même et par son entourage lors de son enfance et au cours de sa vie de dandy parisien aux plus de 200 personnages peuplant la *«Recherche»*. Il se rend compte alors que la prise abusive de médicaments pour calmer ses symptômes, notamment l’utilisation excessive de psychotropes comme les benzodiazépines, altère sa mémoire et ses capacités de rappel. C’est donc par nécessité qu’il est devenu un spécialiste de la mémoire et plus particulièrement d’une de ses étapes clés : le rappel des souvenirs.

Au cours de cet apprentissage, Proust constate que la mise en jeu de la mémoire volontaire conduite par des processus de recherche

BNF, PARIS

La « griffe d'authenticité » des souvenirs involontaires

Quelques jours avant la publication du premier tome d'*À la recherche du temps perdu,* en 1913, Marcel Proust accorde un entretien au chroniqueur littéraire Élie-Joseph Bois, du journal *Le Temps.* Celui-ci se déplace au domicile de l'écrivain, à Paris, *« dans la chambre aux volets presque toujours clos ».* C'est là que Proust lui explique la distinction entre la mémoire involontaire et volontaire. *« Pour moi, la mémoire volontaire, qui est surtout une mémoire de l'intelligence et des yeux, ne nous donne du passé que des faces sans vérité ; mais qu'une odeur, une saveur retrouvées dans des circonstances toutes différentes, réveillent en nous, malgré nous, le passé, nous sentons combien ce passé était différent de ce que nous croyions nous rappeler, et que notre mémoire volontaire peignait, comme les mauvais peintres, avec des couleurs sans vérité. Déjà, dans ce premier volume, vous verrez le personnage qui raconte, qui dit : "Je" (et qui n'est pas moi), retrouver tout d'un coup des années, des jardins, des êtres oubliés, dans le goût d'une gorgée de thé où il a trempé un morceau de madeleine ; sans doute il se les rappelait, mais sans leur couleur, sans leur charme ; j'ai pu lui faire dire que, comme dans ce petit jeu japonais où l'on trempe de ténus bouts de papier qui, aussitôt plongés dans le bol, s'étirent, se contournent, deviennent des fleurs, des personnages, toutes les fleurs de son jardin, et les nymphéas de la Vivonne, et les bonnes gens du village et leurs petits logis et l'église, et tout Combray et ses environs, tout cela qui prend forme et solidité, est sorti, ville et jardins, de sa tasse de thé. » Avant de continuer : ***« Je crois que ce n'est guère qu'aux souvenirs involontaires que l'artiste devrait demander la matière première de son œuvre. D'abord, précisément parce qu'ils sont involontaires, qu'ils se forment d'eux-mêmes, attirés par la ressemblance d'une minute identique, ils ont seuls une griffe d'authenticité. Puis ils nous rapportent les choses dans un exact dosage de mémoire et d'oubli. Et enfin, comme ils nous font goûter la même sensation dans une circonstance tout autre, ils la libèrent de toute contingence, ils nous en donnent l'essence extratemporelle, celle qui est justement le contenu du beau style, cette vérité générale et nécessaire que la beauté du style seule traduit. »***



▲ *Alité chez lui, à Paris, Marcel Proust a écrit* À la recherche du temps perdu, *une œuvre monumentale de plusieurs tomes, sur une période de treize années.*

© ALESSANDRO LONATI. 2023 / BRIDGEMAN IMAGES

conscients est décevante : celle-ci ne donne lieu qu'à une restitution restreinte et imparfaite de l'événement initial. Comme il le confie dans un entretien avec le journaliste Élie-Joseph Bois, en 1913, la mémoire volontaire est *« une mémoire de l'intelligence et des yeux, qui ne nous donne du passé que des faces sans vérité »* (lire encadré ci-dessus). Ce rappel conscient ne donne accès qu'à un passé *« différent de ce que nous croyions nous rappeler »*. Ce n'est qu'en 1932 que Frederic C. Bartlett, un précurseur britannique de la psychologie cognitive, rejoint cette observation. Ce dernier propose que le rappel est une reconstruction qui aboutit à une forme approximative et parfois erronée du souvenir initial, à cause de distorsions induites par l'influence de processus cognitifs et par l'intrusion d'éléments liés aux conditions de rappel (1). À la mémoire volontaire, Marcel Proust oppose la mémoire involontaire, qui est mise en œuvre par *« une odeur, une saveur retrouvée dans des circonstances toutes différentes, […] malgré nous »*. L'écrivain constate que la mise en jeu de cette mémoire involontaire, comme

PREMIÈRE EXPÉRIENCE DE RAPPEL IMPLICITE

*La Bibliothèque nationale de France conserve dans le fonds Marcel Proust la quasi-totalité des manuscrits de l'écrivain, comportant notamment les manuscrits, dactylographies et épreuves corrigées. Voici l'une des pages du premier tome d'*À la recherche du temps perdu, *qui contient une partie du passage où l'écrivain décrit les sensations ressenties lors de la dégustation de la madeleine trempée dans du thé, constituant la première expérience de rappel de souvenir implicite.*

D'où venait-elle ? Que signifiait-elle ? Où l'appréhender ? Le narrateur comprend que l'émotion est liée à l'information sensorielle, mais il ne trouve aucun lien entre l'indice et l'émotion; la répétition de la présentation de l'information sensorielle perd même peu à peu de son efficacité.

« Il est clair que la vérité que je cherche n'est pas en lui, mais en moi. » Le souvenir n'est pas dans l'information sensorielle. C'est l'émotion suscitée qui doit conduire au souvenir. Le narrateur comprend qu'il ne sert à rien de rechercher ce souvenir. Il faut que « l'esprit » (on parlerait aujourd'hui d'inconscient) fasse son œuvre.

il l'a décrit dans l'épisode de la madeleine, est particulièrement efficace. Il s'agit de porter attention aux petites informations sensorielles qui nous entourent. Lorsque celles-ci captent notre attention et induisent une émotion, il convient de laisser son esprit retrouver, par lui-même, le souvenir qui y est attaché. Il utilise ce « protocole » à plusieurs reprises dans le reste de son œuvre et surtout dans le dernier tome, *Le Temps retrouvé* (publié à titre posthume en 1927).

Au cours d'entretiens, Marcel Proust a maintes fois souligné que ce qu'il considérait comme capital dans son œuvre était *« la distinction entre mémoire volontaire et involontaire »*. Cette formule ne fait pas référence à la formation de la mémoire, mais bien au rappel des souvenirs. Il propose de considérer une forme de rappel mise en jeu par un indice sensoriel rencontré par hasard, qui permet de récupérer un souvenir autobiographique sans engager de recherches conscientes. Proust parle de *« réminiscence involontaire »*, c'est-à-dire de réactivation, spontanée, d'un souvenir. Il souligne la supériorité évocatrice de la mémoire involontaire sur la mémoire volontaire qui, à partir d'un élément, ouvre les portes non seulement sur le souvenir auquel est lié l'indice de rappel, mais également sur toute une période passée dans lequel il s'insère et que l'on croyait perdue pour toujours.

Proposer une dichotomie de la mémoire en ces termes n'est pas classique en 1913. Il faudra d'ailleurs attendre 1985 pour que deux neuroscientifiques, les nord-américains Peter Graf et Daniel L. Schacter, proposent une distinction entre mémoire explicite (consciente) et implicite (non consciente), proche de la formulation proposée par Proust plus de soixante-dix ans plus tôt (2). Proust est donc novateur en proposant la mise en jeu de processus différents, selon qu'il y ait ou non implication de la conscience. Il est encore plus novateur qu'on ne le croit car Graf et Schacter ont considéré l'engagement ou non de la conscience lors de la formation du souvenir, alors que Proust fait cette distinction lors du

BNF, PARIS. NAF 16703, FOL.10

rappel du souvenir. Ce qui est beaucoup moins classique. De fait, et pendant de nombreuses années, les recherches sur la mémoire se sont concentrées sur l'enregistrement des informations et sur les étapes d'encodage conduisant à la formation des souvenirs. Bien que déterminante, l'étape du rappel, elle, n'a pas suscité beaucoup d'intérêt de la part des chercheurs et chercheuses travaillant sur la mémoire.

Cependant, différents types de rappel ont été catégorisés chez l'homme, en se fondant principalement sur des études mettant en jeu la présentation de listes de mots à des sujets qui devaient les étudier (3). Il est ainsi classique de distinguer rappel explicite, qui engage la conscience, et rappel implicite, obtenu sans engagement de la conscience. Trois formes de rappel explicite sont décrites dans la littérature scientifique : le rappel libre, où le sujet restitue les mots qu'il a retenus ; le rappel indicé, lorsque des indices sémantiques sont donnés au sujet (un nom d'animal, une couleur) ; et, enfin, la reconnaissance : un mot de la liste est présenté avec un autre mot et le sujet doit reconnaître le mot présenté dans la liste initiale. Les résultats de ces expériences montrent que le rappel libre est plus difficile que le rappel indicé, et que ce dernier est plus difficile que la reconnaissance. Dans tous ces cas, il s'agit d'un rappel engageant des processus conscients, avec l'objectif de retrouver un souvenir particulier. Dans l'esprit du grand public, l'épisode de la madeleine est le plus souvent assimilé à une forme de rappel indicé, l'information gustative conduisant la recherche active du souvenir. Mais nous avons vu que ce n'est pas ce que Proust a décrit, puisque ce rappel fait appel à la mémoire involontaire.

NI UN RAPPEL INDICÉ NI UN AMORÇAGE

Une autre forme de rappel qui n'engage pas la conscience est également décrite chez l'humain. Il s'agit de « l'amorçage ». Ce mode de rappel permet de retrouver « spontanément » une information, sans que le sujet n'engage de recherche ciblée sur cette information. L'amorçage est un phénomène général qui permet de reconnaître plus facilement une information lorsque celle-ci a été présentée préalablement. Il permet également de récupérer des informations sans implication de la conscience. Ainsi, lorsque l'on présente une amorce de mot (par exemple les trois premières lettres d'un mot contenu dans une liste) et que l'on demande au sujet de donner le premier mot qui lui vient à l'esprit, sans faire référence à la liste présentée préalablement, le sujet donne fréquemment le mot de la liste présentée antérieurement, alors que l'amorce correspond à plusieurs mots qui n'étaient pas dans la liste. L'amorçage correspond ainsi à un rappel implicite ou inconscient permettant de retrouver une information sans que des processus de recherche conscients soient mis en œuvre. Il a d'ailleurs été établi que des patients amnésiques et privés de possibilités de rappel conscient conservaient leurs capacités d'amorçage et pouvaient ainsi récupérer des informations passées presque comme des sujets normaux.

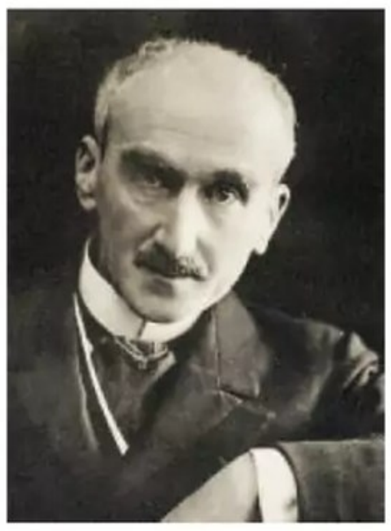
“Une minute affranchie de l'ordre du temps a recréé en nous, pour la sentir, l'homme affranchi de l'ordre du temps”

Proust, après l'avoir lui-même expérimentée, propose donc une autre forme de rappel implicite permettant de récupérer des souvenirs autobiographiques. Elle se fonde sur la rencontre fortuite d'un indice sensoriel, qui induit un éveil attentionnel suivi d'une émotion se prolongeant par un long processus sur lequel la conscience n'a pas de prise (puisque les efforts conscients de recherche n'aboutissent à rien) ; ce processus se termine par la réactivation spontanée d'un souvenir, qui surgit sous une forme plus exacte et plus riche que ne le fait le rappel explicite.

Ce rappel implicite diffère de l'amorçage puisqu'il concerne un souvenir autobiographique. Il est également différent d'un rappel indicé, dans lequel l'indice est un élément qui

facilite les stratégies de recherche explicites. En 1998, Daniel L. Schacter note que les *«rappels involontaires»* de Proust sont une expérience courante qui ne nécessite *«aucune tentative délibérée d'effort pour repenser au passé»*, soulignant la nature implicite de cette forme de rappel, sans toutefois en faire une catégorie particulière (4). Bien que nous ayons tous expérimenté un épisode au cours duquel une information sensorielle fait surgir un souvenir autobiographique sans engagement de processus de recherche conscient, ce type de rappel n'a jamais été considéré chez l'humain, probablement parce que l'étude du rappel est le plus souvent réalisée dans des conditions artificielles qui ne peuvent pas explorer ce genre de situation.

On pourrait s'étonner de la pertinence de Proust, alors que celui-ci est coupé du monde et n'expérimente que sur lui-même. C'est sans compter l'influence de l'époque, de son milieu érudit et de sa famille – on le rappelle, le père de Proust est à l'époque un médecin renommé, à la pointe des dernières découvertes scientifiques et médicales. Avant son isolement, Proust a par ailleurs fréquenté des salons parisiens qui lui ont permis de fréquenter des personnalités éclairées et variées. Proust est le contemporain du philosophe Henri Bergson (1859-1941), qu'il a côtoyé plusieurs fois et qui a travaillé sur la mémoire (5). Et bien que leurs conceptions sur ce sujet ne se recoupent pas, Bergson a exercé une grande influence sur l'écrivain. Proust est également le contemporain de Sigmund Freud (1856-1939) et, s'ils ne se sont jamais rencontrés, on peut souligner que la mémoire involontaire est probablement largement inspirée par la notion d'inconscient développée par Freud à la même époque.



▲ *Henri Bergson (1859-1941), qui avait travaillé sur la mémoire, notamment pour son ouvrage* Matière et Mémoire *(1896), a eu une importante influence sur Proust, bien qu'ils n'eussent pas les mêmes conceptions en la matière.*

LA PUISSANCE ÉVOCATRICE DES ODEURS

Depuis la publication d'*À la recherche du temps perdu*, de nombreuses études sur la puissance évocatrice d'indices sensoriels ont été réalisées. Notons tout de même que celles-ci ont débuté près de quatre-vingts ans plus tard… L'une des pionnières dans ce domaine, la psychologue canadienne Rachel Herz, publie un article en 1992 dont le but est d'étudier le pouvoir significatif des odeurs sur le rappel de souvenirs (6). Les nombreux autres articles qui ont suivi, à la croisée de perception, émotion et cognition, ont montré la forte puissance évocatrice et émotionnelle des odeurs, qui dépasse généralement celle d'autres informations sensorielles comme les informations visuelles ou auditives (7). Cependant, bien que certaines études évoquent l'épisode de la madeleine de Proust, les sujets doivent, dans la plupart d'entre elles, engager des processus de recherche explicites/conscients en se servant des indices fournis et ne reproduisent donc pas les conditions de l'épisode de la madeleine.

Des travaux visant à explorer la mémoire chez l'animal apportent des arguments en faveur des intuitions de Marcel Proust. En effet, il a été montré que la présentation d'indices de rappel (éléments présents lors d'un apprentissage initial, comme un stimulus visuel, auditif ou olfactif) facilitait le rappel de cet apprentissage, même si celui-ci a été perturbé par l'oubli ou par des traitements mécaniques ou chimiques (8). Les quelques recherches qui ont comparé l'efficacité de ces divers indices montrent que celle-ci varie en fonction de la durée de rétention de l'information et les caractéristiques de l'indice : les indices plus globaux, par exemple contextuels, sont les meilleurs après un long délai de rétention, alors que les indices doivent être précis et très proches de l'information initiale, peu après l'apprentissage, pour être efficaces lors du rappel de la mémoire. Il a également été montré que la répétition de l'indice entraîne une perte de son efficacité, ainsi que l'a constaté Proust avec sa madeleine. L'émotion est largement impliquée dans ce type de rappel. Les lésions de l'amygdale, structure clé des processus émotionnels, bloquent l'efficacité des indices de rappel. Par ailleurs, des prélèvements sanguins chez les animaux, réalisés après présentation d'un indice efficace sur le rappel, indiquent une augmentation des taux de corticostérone, hormone dont la présence dans le sang témoigne de l'impact émotionnel (de l'anxiété en l'occurrence). Pour expliquer le lien entre l'émotion et le rappel de mémoire, il a été proposé que la présentation d'un indice de rappel induit une sorte de réflexe conditionné entraînant une libération de noradrénaline qui en augmentant l'attention, facilite le rappel des souvenirs (9). On sait que l'hippocampe

MARY EVANS / BRIDGEMAN IMAGES

impliqué dans les processus de rappel explicites/conscients ne l'est pas dans ce rappel par indice, ce qui a été démontré non seulement chez l'animal mais aussi chez l'homme (10). L'ensemble de ces résultats est en parfait accord avec la description de Proust et conforte l'existence d'un rappel implicite concernant les souvenirs autobiographiques.

REVIVRE ET SE RÉAPPROPRIER LE PASSÉ

Dans le dernier volume de la «*Recherche*», Proust expérimente la puissance des réminiscences involontaires en provoquant la résurgence du passé à partir d'informations sensorielles diverses, rencontrées au cours de sa vie quotidienne. Dans *Le Temps retrouvé*, l'écrivain multiplie ainsi les exemples de souvenirs obtenus grâce à la mémoire involontaire, en relatant une série de moments bienheureux : le trébuchement provoqué par un pavé de la rue posé de guingois lui rappelle le baptistère de Saint-Marc de Venise ; le choc d'une cuillère contre une assiette évoque le son d'un marteau sur une roue d'un wagon de chemin de fer ; le contact d'une serviette de table empesée fait resurgir son arrivée à Balbec (station balnéaire imaginaire qu'il situe en Normandie). Ainsi, en intensifiant l'attention portée aux menus indices que la vie lui offre spontanément, il peut réactiver et rendre actuels de nombreux souvenirs anciens. Il montre également que tout type d'information sensorielle peut être utilisé pour favoriser cette résurgence, que ce soit une information auditive (le choc de la cuillère), kinesthésique (le pavé), somesthésique (la raideur de la serviette) ou visuelle (comme la vue des clochers de Martinville, dans un autre volume de son œuvre). Ces épisodes rapportent tous l'émotion qui précède le rappel et le bonheur ressenti à pouvoir faire ressurgir la mémoire vivante d'un souvenir ancien.

Proust s'émerveille alors sur sa capacité à se jouer du temps. Au cours de la rédaction de son œuvre, il a pu reproduire l'expérience initiale et a découvert la possibilité d'obtenir «*un peu de temps à l'état pur*» en vivant en même temps un événement du passé par l'imagination et par la réalité. La phrase clé de son œuvre semble être : «*Une minute affranchie de l'ordre du temps a recréé en nous, pour la sentir, l'homme affranchi de l'ordre du temps.*» Marcel Proust signale que la réminiscence involontaire du passé permet de le reconstruire, de le revivre et de se le réapproprier. Ainsi, il ne s'agit pas seulement de faire ressurgir des moments du passé, mais aussi de faire coïncider le passé imaginé avec des sensations éprouvées au présent. Proust a donc déplacé l'intérêt de ses lecteurs non sur la mémoire, mais sur le temps. C'est ainsi que le temps est devenu la principale thématique dans son œuvre. C'est probablement la raison pour laquelle les épisodes de réminiscences involontaires qu'il décrit si minutieusement n'ont pas suscité l'intérêt et l'analyse qu'ils auraient dû. Comme le déplore dans *Le Sens de la mémoire* (Gallimard, 1999) Jean-Yves Tadié, spécialiste de l'écrivain et professeur émérite à l'université Paris-Sorbonne, les neurosciences n'ont pas suffisamment reconnu le caractère visionnaire de Proust. L'épisode de la madeleine a très souvent été analysé de façon incorrecte. Cent ans après la mort de cet auteur de génie, il est temps que les neurosciences engagent des recherches scientifiques visant à tester les intuitions proustiennes, afin d'envisager l'existence d'un rappel implicite de souvenirs autobiographiques chez l'humain et chez l'animal. ■

Un chef-d'œuvre en sept tomes

À la recherche du temps perdu se compose de sept tomes

- ***Du côté de chez Swann*** **(publié à compte d'auteur chez Grasset en 1913, puis dans une version modifiée chez Gallimard en 1919).**
- ***À l'ombre des jeunes filles en fleurs*** **(1919, chez Gallimard ; reçoit le prix Goncourt la même année).**



- ***Le Côté de Guermantes*** **(en deux volumes, chez Gallimard, 1920-1921).**
- **Sodome et Gomorrhe I et II (chez Gallimard, 1921-1922).**
- ***La Prisonnière*** **(publié à titre posthume en 1923).**
- ***Albertine disparue*** **(publié à titre posthume en 1925 ; titre original : *La Fugitive*).**
- ***Le Temps retrouvé*** **(publié à titre posthume en 1927).**

(1) Frederic C. Bartlett, *Remembering,* Cambridge University Press, 1932.

(2) P. Graf et D. L. Schacter, *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn., 11,* 501, 1985.

(3) Béatrice Desgranges et Francis Eustache, *Les Chemins de la mémoire,* Le Pommier, 2012.

(4) D. L. Schacter, *Science, 5360,* 59, 1998.

(5) H. Bergson, *Matière et Mémoire,* éd. Félix Alcan, 1896.

(6) R. S. Herz et G. C. Cupchik, *Chem. Senses, 17,* 519, 1992.

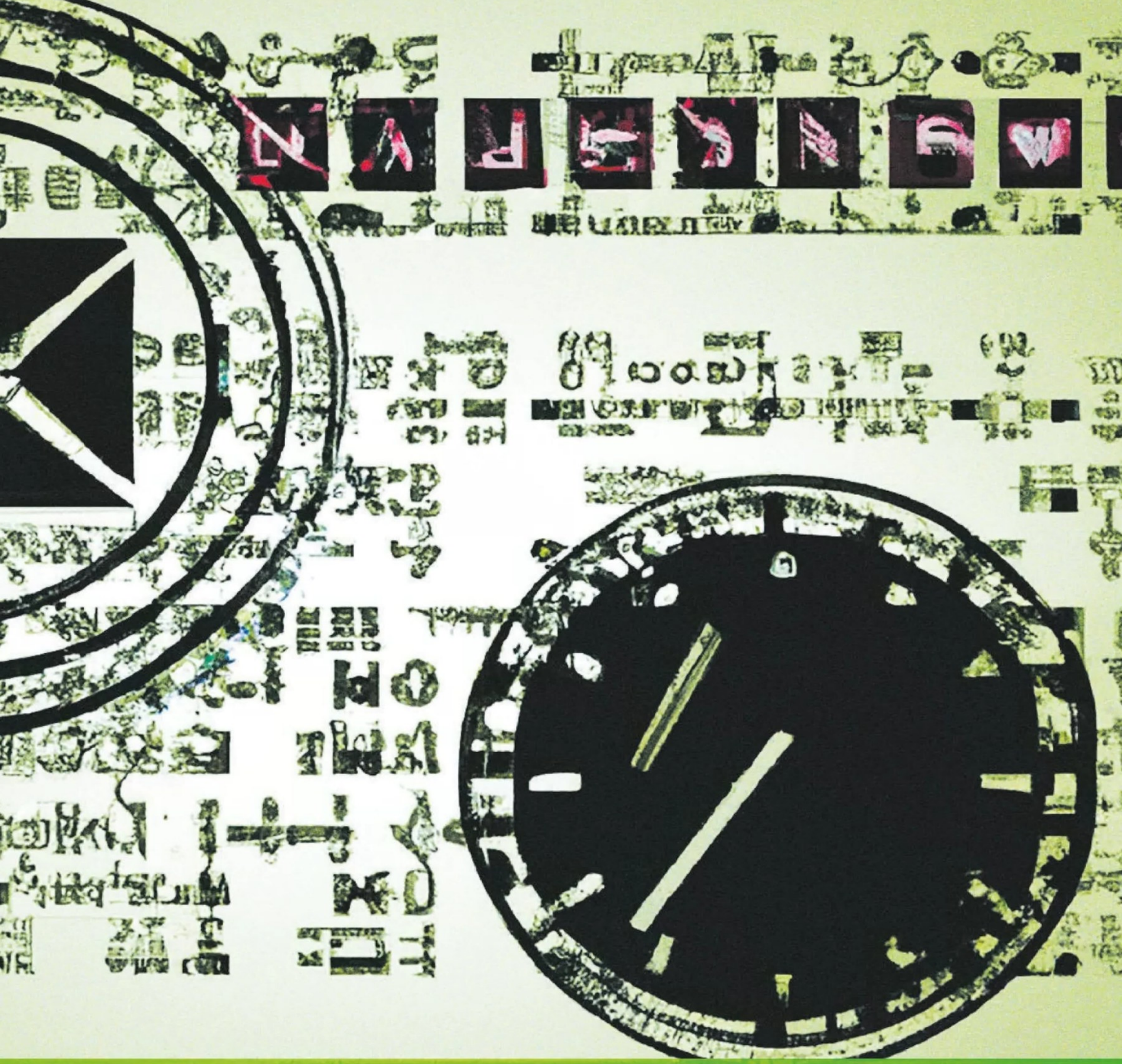
(7) A. L. Saive et al., *Front. Behav. Neurosci., 8,* 240, 2014.

(8) P. Gisquet-Verrier et D. Riccio, *Learn. Mem., 19,* 401, 2012.

(9) S. J. Sara et S. Bouret, *Neuron.*, 130-141, 2012.

(10) P. Gisquet-Verrier et F. Schenk, *Psychobiology, 22,* 289, 1994.

MIGNY/KHARBINE TAPABOR





DALL-E - DR



Alexis Bonnecaze
INFORMATICIEN,
UNIVERSITÉ AIX-MARSEILLE



Kevin Thiry-Atighehchi
INFORMATICIEN, UNIVERSITÉ CLERMONT-AUVERGNE

L'horodatage sécurisé à l'ère numérique

La mention « le cachet de la poste faisant foi » permettait naguère, grâce au tampon des services postaux, d'attester de la date d'envoi d'un document. À l'ère numérique, altérer un document numérique, notamment sa date, est facile. De surcroît, si les différentes parties exigent que la datation soit prouvable indépendamment d'une autorité extérieure – un tiers de confiance –, la difficulté est encore accrue. Depuis les années 1990, les informaticiens élaborent des technologies qui mettent à profit des outils cryptographiques de plus en plus performants.

◀ *Les auteurs de ce sujet ont utilisé une IA de génération d'images (DALL-E 2) pour créer cette illustration à partir d'une description en anglais (*A time clock and a post mark inside a matrix theme selection*).*

Le quotidien américain *The Washington Post* a révélé, dans une série d'articles publiés en décembre 2000, que le géant pharmaceutique Pfizer avait antidaté un document permettant de se justifier d'avoir traité une centaine de jeunes malades nigérians avec un nouveau médicament non encore testé. Généralement, ce type de fraude concerne des contrats ou des rapports et peut avoir, notamment, de lourdes conséquences financières. Pouvoir s'assurer de l'ordre temporel d'événements est donc crucial dans notre société, que ce soit dans un cadre commercial, juridique, ou en cas de conflit lors de la signature de contrats et de clauses (de confidentialité, de non-concurrence, de non-sollicitation, etc.).

L'avènement du numérique a accru les enjeux. Les documents numériques posent des problèmes spécifiques, car une copie d'un document numérique est en fait un clone qu'il est impossible de distinguer de l'original. Il existe en effet des logiciels pouvant contrôler l'ensemble des informations qui décrivent le fichier – par exemple, son auteur ou sa date de création –, ce qu'on appelle les métadonnées. Ainsi, en modifiant celles-ci, la date d'un document est « officiellement » changée. Comment les informaticiens sont-ils parvenus à assurer un « ordre temporel » dans le monde informatique, si important dans nos sociétés numérisées ?

L'idée consiste à envoyer le document à un tiers de confiance, appelé « autorité de certification des temps » (*Time Stamp Authority* en anglais, ou TSA). Concrètement, une telle autorité est un serveur, appartenant à une société reconnue de confiance par les parties. Ce serveur est muni d'un logiciel qui appose la date sur le document, signe le tout avec un algorithme de signature numérique standard (*), et renvoie ces données.

Cette méthode admet toutefois deux points faibles. Tout d'abord, l'autorité reçoit le document en clair, ce qui signifie qu'elle peut prendre connaissance de son contenu. Or, si elle est de confiance pour dater un document, l'autorité n'est pas forcément habilitée à accéder aux informations qu'il contient. Le deuxième défaut concerne précisément cette autorité de confiance : une des parties en jeu pourrait contester une datation effectuée par une autorité qu'elle ne reconnaît pas comme étant de confiance.

Les techniques cryptographiques résolvent le premier point faible en utilisant ce qu'on nomme une « fonction de hachage », qui est une opération mathématique permettant d'obtenir une empreinte (dit aussi « haché » ou « condensé ») à partir d'un document donné. Cette empreinte est constituée d'une chaîne de caractères de longueur fixe, par exemple trente-deux caractères (256 bits), qui identifie le document tout comme les empreintes de doigts permettent une reconnaissance biométrique. En appliquant une fonction de hachage à n'importe quel document, et quelle que soit sa longueur, on obtient une empreinte du document de la longueur fixée. Une fonction de hachage cryptographique est construite de telle manière qu'elle soit à sens unique. Elle est aussi conçue de façon qu'il soit difficile de trouver, dans un temps de calcul raisonnable, deux documents distincts qui ont la même empreinte. Ainsi, pour préserver la confidentialité, au lieu d'horodater le document, il suffit d'horodater son empreinte. Il existe aussi un autre intérêt à l'utilisation d'une fonction de hachage. Supposons que le document à horodater soit très volumineux et que la fonction de hachage produise un haché de 256 bits, l'autorité d'horodatage ne recevra pas le document volumineux mais simplement l'empreinte de 256 bits. L'envoi sera bien plus rapide et la gestion du document nécessitera moins de ressources en calcul et en stockage. Mais comment construire

L'idée utilise la notion de datation relative, bien connue des preneurs d'otages

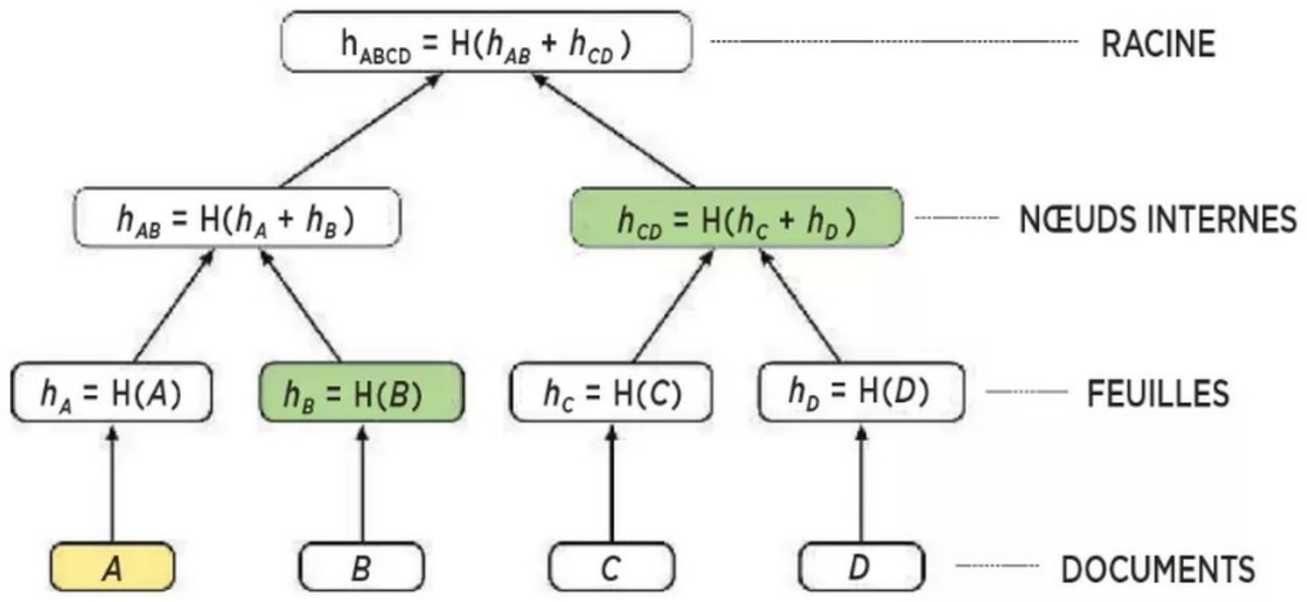
(*) **Un algorithme de signature numérique** est un système cryptographique qui sert à vérifier l'intégrité (la non-altération) et l'authenticité (la garantie de la provenance) d'un document. En outre, une signature numérique permet de garantir la non-répudiation de la signature (le signataire ne peut pas contester sa signature).

une preuve de datation qui soit acceptée par tous, indépendamment de l'autorité ? En 1991, le cryptographe Stuart Haber et le physicien Scott Stornetta, tous deux chercheurs au laboratoire Bell Communications Research, à Bellcore (États-Unis), proposent une première solution (1). L'idée utilise la notion de datation relative, bien connue des preneurs d'otages : pour assurer que la personne qu'ils avaient enlevée était toujours vivante, ils prenaient une photo de l'otage exhibant le journal du jour, prouvant que le cliché avait été pris après la date de publication. Plus généralement, la datation relative permet d'attester qu'un document B a été créé avant un document C et après un document A. Supposons que le document reçu au temps *t* soit stocké dans un bloc de données. Un document reçu à un temps ultérieur est alors stocké dans un nouveau bloc qui dépend du bloc précédent. Par ce processus, Stuart Haber et Scott Stornetta ont construit une chaîne de blocs (*blockchain* en anglais). Ils sont, de ce fait, considérés comme étant coinventeurs de la notion de *blockchain*. Leur premier protocole, élaboré en 1991, horodate en utilisant un tel chaînage temporel et produit, pour chaque document, un certificat signé par l'autorité d'horodatage.

Cette idée de datation relative – qui utilise un chaînage – diffère de la datation absolue, qui produit une date (par exemple : le 25 janvier 2001 à 18 h 00). Pourquoi ne pas combiner les deux types de datation ? C'est ce que font peu après Stuart Haber et Scott Stornetta, conjointement avec Dave Bayer, un mathématicien de l'université Columbia à New York (États-Unis). Ce faisant, ils améliorent le système d'horodatage afin de le rendre plus pratique et efficace. Leur méthode consiste à lier les documents à horodater et à procéder à un ancrage à intervalles réguliers par datation absolue (2). On peut ainsi choisir la précision de la datation. Supposons que la précision soit d'une minute. Durant cette minute, l'autorité reçoit un certain nombre de documents qui seront horodatés à la même date, par exemple 18 h 00. L'intervalle précédent correspond donc au temps $t = 17\,h\,59$ et l'intervalle suivant à $t = 18\,h\,01$. Le certificat (appelé jeton) produit par l'autorité est publié dans un journal de grande audience, donc rendu public et accessible à toutes et à tous. Le jeton est complété par une preuve de datation envoyée à l'utilisateur, qui est constituée d'informations permettant à celui-ci de reconstruire le jeton.

PREUVE D'HORODATAGE

Arbre de Merkle de quatre documents avec preuve d'horodatage du document A, où H est une fonction de hachage, et + correspond à l'opération de concaténation. Ici la preuve est égale à $P = \{h_B, h_{CD}\}$. Le vérifieur dispose du document A et de la preuve P. Il hache A pour obtenir h_A, puis hache la concaténation de h_A avec h_B pour obtenir h_{AB}, puis hache la concaténation de h_{AB} avec h_{CD} afin d'obtenir la racine. La valeur calculée par le vérifieur est ensuite comparée à la valeur publiée.



1979 : INVENTION D'UNE NOUVELLE STRUCTURE DE DONNÉES

Si l'on ne reçoit qu'un document à horodater de temps en temps, il est facile d'en garder la trace. En revanche, si l'autorité d'horodatage reçoit un grand nombre de documents durant l'intervalle de temps d'une minute – on peut choisir cette durée –, elle doit tout de même rester efficace. Au début des années 1990, Stuart Haber et Scott Stornetta échangent régulièrement avec un pionnier de la cryptographie du nom de Ralph Merkle sur cette problématique de l'horodatage sécurisé. L'un des objectifs était d'arriver à calculer efficacement une seule valeur dépendant de tous les hachés des documents reçus dans un intervalle temporel donné. Ralph Merkle était connu en particulier pour avoir inventé, en 1979, une nouvelle structure de données, l'arbre de Merkle. Il se trouve que cette structure représente une solution idéale pour le problème de l'horodatage car elle est facile à calculer et permet, à postériori, de prouver qu'un document appartient bien à

Des jetons cryptographiques cachés dans le *New York Times*

Afin de garantir l'immuabilité du registre d'horodatage de leur société Surety, les deux chercheurs américains Stuart Haber et Scott Stornetta se sont mis à publier chaque semaine, à partir de 1995, dans la rubrique *«Annonces et objets trouvés»* du *New York Times,* un jeton d'horodatage. Cette suite de caractères cryptiques, accessible à la vue de tous, était en fait un moyen d'assurer que personne – y compris Surety – ne puisse altérer et antidater les documents qu'ils produisaient. Ces jetons numériques hebdomadaires étaient donc un peu l'équivalent des cachets de La Poste des temps anciens et permettaient d'assurer l'intégrité de l'horodatage. Avec l'avènement des chaînes de blocs – la *blockchain* –, ces publications sont devenues obsolètes, car cette technologie permet de déployer des techniques d'horodatage et de certification décentralisées infalsifiables, sans besoin d'une autorité de certification.


NOTICES & LOST AND FOUND
(5100-5102)

Universal Registry Entries
Zone 2—
iTKbfLUUVC2irMO5eFFeb
DUB5zneP08brimTDuf0+X2INbMb
S6YvUS7v44EBceEEhAZQ==
Zone 3—
IVQVuspLAcBSV5VIK9CGW
ba3PMRsUO2Eo8UFWDMIIKLBK
pqQ1KPjRqd9vzM+dn6A==
These base64-encoded values represent the combined fingerprints of all digital records notarized by Surety between 20180808Z - 20180814Z.
www.surety.com 229-436-2790

▲ *Ancienne technique d'horodatage, utilisée par la société Surety en 1995.*

un ensemble. Ainsi, le propriétaire d'un document peut prouver que son document appartient à l'ensemble des documents horodatés durant un certain intervalle correspondant à une date absolue donnée.

LE NŒUD RACINE, ANTIFALSIFICATEUR

Comment ce système fonctionne-t-il ? Les feuilles de l'arbre sont les hachés des documents à horodater. Ces hachés sont mis bout à bout, deux à deux, et sont hachés à leur tour de manière à obtenir un haché parent. Autrement dit, deux feuilles de l'arbre sont transformées en un haché et ainsi de suite en appliquant le procédé au nœud parent, jusqu'à obtenir un nœud racine – *root* –, qui dépend donc de toutes les feuilles dont il est issu. Un nœud racine dépend donc de tous les documents à horodater, ce qui permet d'éviter toute falsification. En effet, modifier un seul document de l'arbre changerait son haché (deux documents différents, même s'ils diffèrent d'un seul bit, ont des hachés différents), ce qui se verrait sur le nœud racine. De plus, nous avons dit que l'autorité renvoyait à chaque utilisateur une preuve de datation du document. Cette preuve contient la valeur de certains nœuds de l'arbre. Si quelqu'un souhaite vérifier la date du document, le propriétaire dudit document lui envoie la preuve de datation. À partir de cette dernière et du document, le «vérifieur» est en mesure de reconstruire une partie de l'arbre de Merkle et de recalculer le jeton d'horodatage. En comparant ce jeton calculé à celui qui a été publié publiquement, il peut ainsi s'assurer que l'horodatage n'a pas été altéré.

Depuis une vingtaine d'années, le système d'horodatage par chaînage d'arbres de Merkle est utilisé à grande échelle. Dès le milieu des années 1990, Stuart Haber et Scott Stornetta ont proposé un service d'horodatage fondé sur cette technologie au sein de leur entreprise Surety. En particulier, ils utilisaient un journal de grande audience – *The New York Times* – pour la publication des jetons (lire encadré ci-dessus). Toutefois, ce système peut être amélioré en remplaçant la publication dans un journal de grande audience par un algorithme de consensus décentralisé. C'est l'approche utilisée en 2009 pour construire la première *blockchain* de l'histoire : la Bitcoin. Une blockchain est assimilable à un grand livre de comptes, c'est-à-dire un registre où chaque bloc représente l'une de ses pages. Les blocs, qui contiennent les transactions, sont liés, dans le sens où chaque bloc contient l'empreinte du bloc précédent. Il existe actuellement un grand nombre de *blockchains* liées à des systèmes de

POUR EN SAVOIR PLUS

- www.guardtime.com
- www.surety.com

DR

cryptomonnaie différents. Ces systèmes se fondent sur une architecture décentralisée, c'est-à-dire démunie d'une gouvernance centrale, qui peut être représentée par un réseau de nœuds interconnectés. L'objectif premier de ces systèmes est d'archiver des transactions comptables en respectant l'ordre temporel de leur émission. L'ajout de blocs dans la chaîne ne peut se faire qu'après accord commun, appelé consensus, des nœuds participant au réseau. Un protocole de consensus est un mécanisme qui permet aux nœuds de se coordonner dans un cadre distribué, même si certains des nœuds dévient, volontairement ou non, dans leur exécution. Le système de *blockchain* permet de résoudre ce problème de consensus – par le biais d'une stratégie à base de preuves de travail pour le système Bitcoin, de preuves d'enjeu pour le système Ethereum, ou d'autres stratégies dans le cadre d'autres cryptomonnaies.

LA QUESTION DE LA PÉRENNITÉ DES SYSTÈMES CRYPTOGRAPHIQUES

Comment comprendre l'analogie entre le journal papier et la *blockchain* sur le plan de la sécurité ? Le journal de grande audience est difficile à attaquer car il est distribué dans le monde entier en plusieurs centaines de milliers d'exemplaires identiques. Pour réussir une attaque, il faudrait retirer ces exemplaires et éditer des faux à la place, ce qui est en pratique impossible. De même, la *blockchain* est un registre public (donc visible de tous) qui est distribué sur des milliers de serveurs indépendants à travers le monde. Après l'étape de consensus et de stabilisation, ces serveurs hébergent et publient exactement la même version de la *blockchain*. Ainsi, la cryptographie et les algorithmes de consensus, qui sont au cœur des cryptomonnaies, permettent de fournir un service de datation sans avoir besoin de passer par un tiers de confiance.

L'horodatage utilisant une chaîne de blocs fournit donc une datation prouvable cryptographiquement. Mais est-ce suffisant pour en faire une solution robuste à long terme ? La sécurité de cette technologie dépend des outils cryptographiques utilisés. Or, on sait bien que les fonctions de hachage et les signatures ne sont robustes que pendant un temps limité. En effet, la puissance de calcul grandissante des ordinateurs ainsi que les avancées scientifiques fragilisent ces « primitives » cryptographiques. Puisque certaines données numériques doivent être conservées plusieurs décennies, voire plusieurs siècles, l'horodatage, et plus généralement la notarisation électronique, doit être conçue pour être robuste durant une période de temps qui dépasse la durée de vie d'un algorithme cryptographique. La pérennité des systèmes cryptographiques n'a pourtant jamais fait l'objet d'effort particulier de la part des chercheurs. Stuart Haber, Scott Stornetta et Dave Bayer se sont intéressés à la problématique du renouvellement des briques cryptographiques dès le début des années 1990 pour les systèmes d'horodatage traditionnels. Des standards ont été adoptés, fondés sur leurs travaux. Ensuite ? Rien ou presque, jusqu'à l'émergence de la *blockchain*. Le problème est plus complexe lorsque l'horodatage utilise cette technologie. La pérennité des services qui s'appuient sur elle a fait l'objet de travaux très récents. Ainsi, en 2022, Long Meng a soutenu une thèse à l'université de Surrey, à Guildford (Royaume-Uni), intitulée « *Renouvellement cryptographique à long terme dans les services d'horodatage et les* blockchains ». L'idée des travaux actuels sur le sujet est de protéger l'intégrité des anciens blocs en leur appliquant la dernière fonction de hachage standardisée quand l'ancienne est fragilisée mais non encore compromise, et en écrivant le résultat dans de nouveaux blocs (3). Il s'agit d'une solution lourde à mettre en œuvre d'un point de vue pratique. Cependant, ce type d'avancée devrait permettre l'éclosion de nouvelles idées vers des protocoles d'horodatage plus efficaces. ■

Une *blockchain* est assimilable à un grand livre de comptes : un registre où chaque bloc représente l'une de ses pages

(1) S. Haber et W. S. Stornetta, *J. Cryptol.*, *3*, 99, 1991.

(2) D. Bayer *et al.*, doi : 10.1007/978-1-4613-9323-8_24, 1993.

(3) L. Meng et L. Chen, *Computer Security* - ESORICS 2022, doi : 10.1007/978-3-031-1714-6_1, 2022.

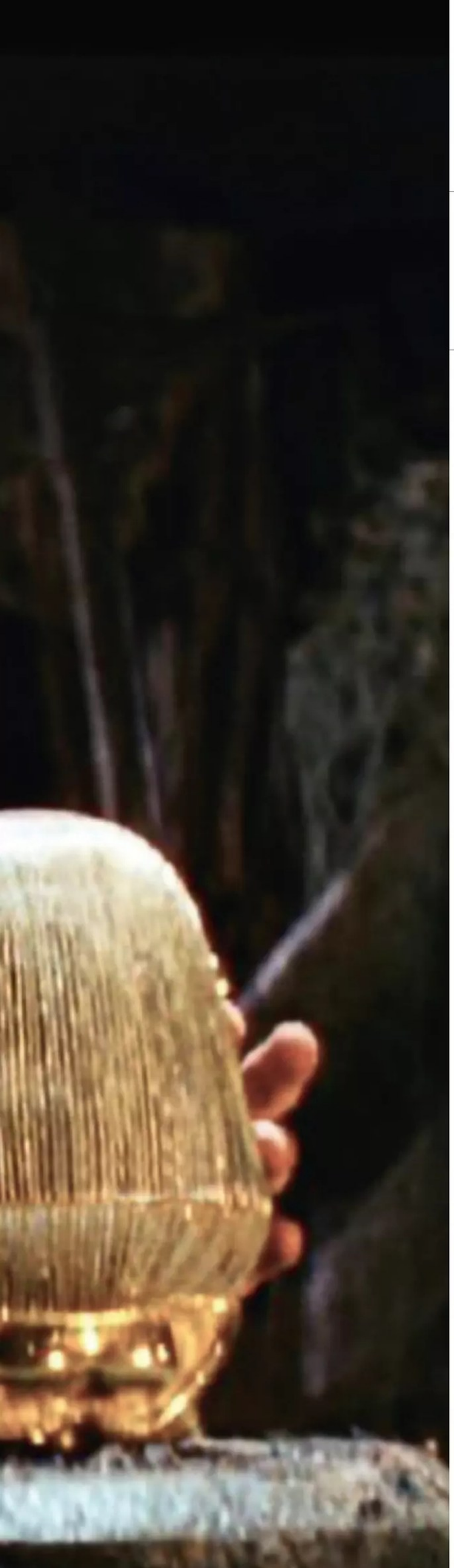




Stéphen Rostain
ARCHÉOLOGUE, PARIS
Directeur de recherche CNRS au sein de l'UMR « Archéologie des Amériques » (CNRS / Université Paris 1), il est spécialiste de l'Amazonie. Il a publié Amazonie, l'archéologie au féminin *(Belin, 2020) et* La Forêt vierge d'Amazonie n'existe pas *(Le Pommier, 2021).*

Archéologie et espionnage, l'intrigant mariage

On connaît Lawrence d'Arabie à travers le film de David Lean. Mais Thomas Edward Lawrence, de son vrai nom, avant d'être immortalisé par Hollywood comme protagoniste de la Révolte arabe contre les Ottomans en 1916-1918, fut avant tout archéologue… et espion. Et il est loin d'être le seul spécialiste des vestiges du passé à avoir été dans ce cas. L'implication d'archéologues dans des activités d'espionnage constitue l'une des pages les plus mystérieuses et les plus palpitantes de l'histoire des sciences. Ces activités secrètes, souvent intimement liées à des préoccupations diplomatiques, ont connu leur apogée pendant l'entre-deux-guerres mondiales.



COLLECTION CHRISTOPHEL © PARAMOUNT PICTURES / LUCASFILM - DR

◀ *Indiana Jones (joué par Harrison Ford), personnage créé par George Lucas et mis en scène par Steven Spielberg, est l'archétype de l'archéologue-aventurier. Téméraire et tête brûlée, il combat tantôt les nazis tantôt les espions soviétiques, dans des contrées hostiles et lointaines.*

Le métier d'archéologue fascine. À tel point que le cinéma s'en est inspiré pour créer l'un des héros les plus emblématiques de ces dernières décennies : Indiana Jones, dont la sortie du prochain opus, intitulé *Indiana Jones et le cadran de la destinée*, est d'ailleurs prévue en juin de cette année. L'image du valeureux archéologue affrontant à coups de fouet les redoutables espions nazis est toutefois quelque peu exagérée. En effet, les chercheurs de ruines du passé ont en réalité une vie bien plus paisible, avec pour seuls ennemis, la plupart du temps, les moustiques ou les punaises de lit… Elle n'est cependant pas totalement fausse : certains archéologues ont effectivement fricoté avec le « renseignement », n'hésitant pas à sacrifier leur métier pour prendre l'apparence de mouches curieuses.

Les activités secrètes de ces archéologues sont surprenantes, mais peuvent s'expliquer. Il faut se souvenir que l'archéologie est jeune. Elle n'est devenue une discipline scientifique à part entière que vers 1880 – avant cela, les sites archéologiques étaient considérés comme de simples champs de ruines où n'importe qui pouvait se servir pour revendre les trouvailles aux antiquaires. Il faudra attendre les premières décennies du XXe siècle pour que l'archéologie gagne finalement ses lettres de noblesse, quand les sciences de la nature s'unirent aux sciences de l'homme, et l'histoire ancienne de l'homme à l'histoire des civilisations du monde classique. On assista alors, tout au long du siècle, à la professionnalisation croissante des chercheurs en parallèle des innovations technologiques et des perfectionnements méthodologiques.



▲ *T. E. Lawrence (1888-1935), l'illustre Lawrence d'Arabie, fut archéologue et principalement officier de liaison britannique dans la Révolte arabe (1916-1918) contre les Ottomans.*

En France, les premiers pas de l'archéologie avaient suivi intimement ceux des militaires lors de l'expédition d'Égypte de Bonaparte (1798-1801). Ce dernier s'entoura d'une cohorte de savants et d'artistes pour rendre compte de son épopée et en rapporter le maximum de témoignages divers. Les archéologues en herbe avaient dans ce contexte un rôle précis en faisant rejaillir la gloire passée de l'Empire égyptien sur le futur Empereur de France. Leur fonction dépassait donc le simple enregistrement scientifique, et flirtait déjà avec la diplomatie d'influence. Ce phénomène a perduré. Ainsi, il y a encore quelques décennies, un diplomate racontait hors micro à propos de l'importance de l'archéologie dans la présence française à l'étranger que, *« lorsque la France désirait s'implanter dans un pays, elle envoyait tout d'abord ses chanteurs et ses archéologues »*.

DES OBSERVATEURS DANS LES CONFINS DE PAYS SENSIBLES

La pratique de l'archéologie est donc parfois intimement liée à des préoccupations diplomatiques. Prenons l'exemple des fouilles françaises en Iran. Les premières datent de 1876 et, depuis, les travaux archéologiques de notre pays, sur place, n'ont jamais vraiment cessé – c'est d'ailleurs un Français, André Godard, qui fonda, dans les années 1920-1930, le Musée national d'Iran, qui collabore encore aujourd'hui avec le musée du Louvre pour mener des fouilles sur le territoire de la République islamique. Or, ces travaux archéologiques sont, pour partie, directement financés par le ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. Quand les relations officielles grincent entre deux pays, la tradition tranquille d'échanges scientifiques des archéologues est un bon recours pour huiler les rouages diplomatiques…

De ce fait, rien d'étonnant que, par le passé, les spécialistes de cette discipline aient été, à l'occasion, sollicités pour faire part de leurs observations dans les confins de pays sensibles. Dans des lieux souvent isolés et peu visités, ils dressaient impunément des cartes inédites, collectaient des témoignages sur les dispositions militaires, ou renseignaient l'état des frontières. Leur formation universitaire et

GIANCARLO COSTA / BRIDGEMAN IMAGES

scientifique offrait l'assurance d'obtenir des relevés et des informations précises. Ils étaient des agents secrets rêvés.

Dès le début du XXe siècle, de nombreuses places stratégiques se mutèrent en vrais nids d'espions. Le Moyen-Orient, la Chine, l'Amérique Centrale et bien d'autres régions du monde sont devenues tour à tour des repaires d'agents en mission. Souvent, ces lieux étaient au centre de recherches archéologiques menées par des chercheurs de différents pays extérieurs. Il semblait dès lors logique de recruter ces discrets serviteurs de l'État, passe-partout et curieux de nature. Une situation frisant parfois la caricature comme dans le Turkestan chinois (l'actuel Xinjiang) où, avant la Première Guerre mondiale, toutes les missions archéologiques anglaises, allemandes, françaises, russes et japonaises se consacraient à l'espionnage et dressaient des cartes à visées militaires (1).

Quelques archéologues sont même devenus plus célèbres pour leur identité d'espion que par leurs résultats scientifiques. On se souviendra de la Britannique Gertrude Bell (1868-1926), à qui on doit la création du Musée national d'Irak en 1922. En effet, ce ne sont pas ses contributions à l'archéologie du Moyen-Orient qui la rendirent illustre, mais bien son rôle souterrain au sein du Foreign Office et des services secrets de la Couronne. Comme toujours, cela commença doucement, par de petites faveurs. Ainsi, en pleine Première Guerre mondiale, Bell partit en 1915 en Égypte pour rencontrer des organisations clandestines nationalistes arabes afin de les rattacher à la Grande-Bretagne dans son combat contre l'Empire ottoman (2).

LAWRENCE D'ARABIE CONTRE MAX VON OPPENHEIM

Toutefois, le plus célèbre des archéologues-espions fut sans nul doute Thomas Edward Lawrence (1888-1935), immortalisé par Hollywood sous le nom de Lawrence d'Arabie et considéré comme le père de la Révolte arabe contre les Ottomans en 1916-1918. Sa rencontre avec sa concitoyenne donna d'ailleurs lieu à un échange houleux, raconté dans sa correspondance : «*Mademoiselle Gertrude*

Parfois plus célèbres pour leur identité d'espion que pour leurs résultats scientifiques

Bell nous a rendu visite dimanche dernier [...], elle a dit à Thompson [l'archéologue Reginald Campbell Thompson était à cette époque le responsable des fouilles de Karkemish, au sud de l'actuelle Turquie, NDLR] *que ses idées sur les fouilles remontaient à la préhistoire : il nous a donc fallu l'écrabouiller avec un étalage d'érudition.*» (3) Les espions ne sont pas forcément très cordiaux entre eux…

Lawrence eut une vie épique. Adolescent, il entreprit de visiter les plus beaux châteaux forts et cathédrales de France au cours de cinq voyages à bicyclette. Après un premier séjour au Proche-Orient pour sa recherche doctorale, il participa à des fouilles archéologiques en Syrie en 1911. Il poursuivit en Palestine, en 1913 : son travail scientifique – remarquable – s'accompagnait déjà de missions de repérage et de cartographie dans un objectif bien plus stratégique que pacifique. La Première Guerre mondiale vit son engagement total dans le renseignement.

Dans le camp ennemi de celui de Lawrence, le baron allemand Max von Oppenheim (1860-1946) mêla également recherche du passé et science du secret. Souvent présenté comme le «Lawrence d'Arabie allemand», il aida l'Empire ottoman à combattre la Révolte arabe de 1916-1918. En parallèle de ses travaux archéologiques en Syrie, ce fils de famille fortunée garda un œil sur les remous politiques de la région. Et pas seulement parce qu'il occupa des postes diplomatiques en Égypte pour le compte de son pays ; en réalité, il émargeait aussi au service de renseignement allemand couvrant l'Orient, dont il était le directeur. À ce poste, von Oppenheim attisa des rébellions au sein même de l'Empire britannique, que ce soit le djihad islamique ou les tribus rebelles perses. Avec

ce baron, on entrait en fait dans une nouvelle dimension de l'activité d'archéologue-espion, qui s'intensifia notablement dans la région durant les années 1930.

À partir de la Seconde Guerre mondiale, et encore plus durant la guerre froide, l'espionnage devint un sport national pour bien des pays occidentaux. Les conflits ont été le terreau d'engagements plus prononcés des serviteurs de l'État. Par exemple, dès les années 1930, près de 90 % des archéologues d'Allemagne s'affilièrent au parti nazi et n'hésitèrent pas à tordre la réalité scientifique pour la faire coller avec l'idéologie discriminatoire de leurs nouveaux maîtres. Pourvus de moyens financiers considérables, ils ont ainsi alimenté le fantasme d'une « race germanique » originelle.

À l'inverse du boom qu'a connu l'archéologie allemande à partir de 1933, la discipline, en France, était en chute libre, la plupart des professionnels ayant été tués durant la Grande guerre. Plus de chercheurs, plus d'enseignement à l'université, seuls quelques amateurs la pratiquaient encore avec plus ou moins de bonheur. Il fallut attendre bien des années après la Libération pour que le corps des archéologues français se reconstitue pleinement.

Dans les années 1930, 90 % des archéologues d'Allemagne étaient affiliés au parti nazi

Au sud de l'Europe, avant de devenir un orientaliste spécialiste des cultures tibétaine et mongole, l'Italien Giuseppe Tucci (1894-1984) était employé par les services secrets de l'Italie fasciste. Plus récemment, son concitoyen Maurizio Tosi (1944-2017) a habilement combiné une lumineuse carrière scientifique avec une activité d'agent secret plus obscure. Enfin, pas si obscure puisqu'il a avoué publiquement, notamment



THE GERTRUDE BELL ARCHIVE, NEWCASTLE UNIVERSITY

dans une entrevue au *Monde* en 2013, avoir travaillé pendant deux décennies, entre les années 1960 et les années 1980, comme espion au Pakistan et en Afghanistan. Une exception de sincérité dans ce monde prônant le secret. De plus, il n'a pas officié pour son pays comme l'essentiel des autres, mais pour le compte du bloc soviétique. Rarement un spécialiste du double visage aura autant multiplié les paradoxes. Contrairement à ce que pourrait laisser supposer son dynamisme dans l'espionnage, il fut également un brillant chercheur reconnu par ses pairs, contribuant notamment à l'archéologie du sud-est de la péninsule arabique, de l'Iran et de l'Asie centrale, tout en étant un pionnier de la préhistoire omanaise (4). De telles compétences furent remarquées par son gouvernement, qui le nomma attaché culturel de l'ambassade d'Italie à New Delhi en 1989, puis professeur à l'université de Bologne en 1994 et enfin conseiller du sultan d'Oman à partir de 2011, jusqu'à son décès en 2017. Une vie de ping-pong entre ténèbres et lumière.

Et qu'en était-il de l'autre côté de l'Atlantique ? Le moins que l'on puisse dire, c'est que le réalisateur George Lucas n'a pas manqué de sources d'inspiration pour créer le personnage d'Indiana Jones, car bien des professionnels de la discipline ont porté un chapeau « fédora » avant lui et manié aussi habilement le pistolet que la truelle.

Par exemple, l'Américain Sylvanus Griswold Morley (1883-1948) fut un spécialiste des Mayas, célèbre à son époque pour le déchiffre-





◀ *La Britannique Gertrude Bell, espionne pour la Couronne, est entourée de Winston Churchill (à gauche) et de T. E. Lawrence (à droite), en visite sur le site de Gizeh lors de la conférence du Caire de 1921.*

◀ *Max von Oppenheim, considéré comme le « Lawrence d'Arabie allemand », archéologue et agent de renseignement, aida l'Empire ottoman à combattre la Révolte arabe de 1916-1918.*

◀ *L'Américain Sylvanus G. Morley, au côté de sa femme Frances, fut un spécialiste des Mayas et au service du renseignement de la Navy. Ici, sur le site de Chichén Itzá, dans le Yucatán (Mexique).*

ment de glyphes inscrits sur des stèles et ses fouilles de Chichén Itzá, dans la péninsule du Yucatán, au Mexique (5). Toutefois, il brilla également dans l'obscurité, au service du renseignement de la marine (la fameuse Navy) des États-Unis. À partir de 1908, ses voyages pour des travaux de terrain en Amérique centrale et au Mexique constituèrent ainsi la vitrine en trompe-l'œil de sa véritable mission : la mise en place d'un réseau d'espions et de surveillance des actions allemandes dans ces régions. Il était notamment chargé de trouver une supposée base côtière camouflée de sous-marins. Il a fourni une grande quantité de rapports et de clichés pointant des menaces potentielles des Allemands, alimentant par là même la paranoïa de sa hiérarchie.

DOUBLE VIE ET DOUBLE CASQUETTE

Disciple de Morley, Samuel Kirkland Lothrop (1892-1965) était lui aussi représentatif de ce type de double casquette. Il fut ainsi un archéologue nord-américain reconnu, spécialisé dans les cultures d'Amérique latine. Après ses premiers pas sur des fouilles de centres mayas du Mexique, du Guatemala et du Honduras et dans les sites de la culture Coclé au Panama, il s'intéressa au Chili et à l'Argentine. Sa biographie officielle fait donc état d'un parcours prestigieux, en partie conté par sa seconde femme, Eleanor Lothrop, dans un amusant livre publié en 1948, *Throw Me a Bone*, traduit en français en 1965 sous le titre *J'ai épousé un archéologue* (éditions Marabout, collection Mademoiselle). Mais Lothrop avait également sa part d'ombre. En plus de son mariage, il eut en effet une envahissante maîtresse : la patrie. En dépit du fait que cette double casquette fut particulièrement occultée par la profession et quelques soudards peu recommandables, il en subsiste des traces. Dans les archives de la Dumbarton Oaks Research Library and Collection, centre de documentation sur les études byzantines, précolombiennes, ainsi que sur l'aménagement du territoire, Lothrop est ainsi désigné comme *« fouilleur, conservateur, soldat, espion »* (6). Un panégyrique édifiant !

Après l'obtention de sa maîtrise en 1915, il voyagea deux ans en Amérique centrale. Durant cette période, il participa aux fouilles du site maya de Tulum, au Mexique, sous la direction de Morley, dont on connaît maintenant les accointances avec le renseignement. Puis, au cours de fouilles postérieures, en 1917 au Honduras, son professeur Alfred V. Kidder, sous les ordres duquel il travaillait, demanda par télégramme à Lothrop de retrouver Morley. C'est là que celui-ci le convainquit et le recruta comme espion : l'agent spécial n° 173, avec permis de fouiller. Lothrop finit la guerre en tant que lieutenant dans le service d'espionnage nord-américain. Sa biographie officielle indique qu'il arrêta ces activités après le conflit pour retourner à de sages études doctorales à Harvard, puis entrer en 1924 au prestigieux

MAX FREIHERR VON OPPENHEIM FOUNDATION - PEABODY MUSEUM OF ARCHAEOLOGY AND ETHNOLOGY HARVARD UNIVERSITY

National Museum of the American Indian de New York. Mais, grattons un peu ce vernis patriotique et académique pour voir ce qu'il dissimule. Vu depuis l'extrême sud du continent américain, une autre histoire est racontée. Les archéologues argentins Mariano Bonomo et Máximo Farro ont reconstitué en 2014 le déroulé de cette double vie professionnelle (7).

MONDANITÉS ET CLANDESTINITÉ

Il faut pour cela remonter aux lendemains de la Première Guerre mondiale, lorsque Buenos Aires s'était convertie en la plaque tournante centrale de l'espionnage allemand en Amérique du Sud. En réaction, dès 1917, les États-Unis implantent un réseau d'agents sur la frange littorale de l'Argentine et de l'Uruguay, afin d'épier les mouvements maritimes.

Par un curieux hasard, ce sont à ces endroits, dans le delta du Paraná et la Terre de Feu, que Lothrop organise des expéditions scientifiques en 1925 pour le compte du musée national des Indiens d'Amérique. Parfaitement formé à l'office du petit espion, le savant, comme on le sait maintenant, y déploie son trouble jeu avec maestria, relevant toutes les places stratégiques de la région et annotant les secrets de la politique locale. Fine mouche, il fait appel à ses connaissances archéologiques en transposant ses informations en hiéroglyphes mayas, indéchiffrables par le commun des mortels, pour les transmettre à sa hiérarchie.

Lothrop garda, probablement tout au long de sa vie, un pied dans le renseignement. Ce qui est sûr, c'est qu'il fut réactivé par le Federal Bureau of Investigation en 1940, peu avant d'aller s'installer au Pérou. Durant ce séjour, sa production académique fut aussi peu dynamique que sa contribution souterraine pour le gouvernement des États-Unis était active. Il entraîna sa femme dans ce tourbillon de cachotteries et de simulacres. De par son occupation de journaliste, elle l'aida à construire une façade archéologique acceptable, dissimulant son travail souterrain tout en collectant pour son compte ragots et informations dans la haute société de Lima. Moins d'un an après son installation, Lothrop finit par tomber dans une béchamel infernale et s'inquiétait déjà auprès du FBI : « *En ce qui concerne la couverture archéologique de mon travail au Pérou, […] elle s'épuise et, un jour, quelqu'un commencera à se demander pourquoi un archéologue passe la plupart de son temps à poser des questions dans les villes.* » (8) Ce double jeu mondain et un peu bancal dura jusqu'à ce que la police péruvienne le suspecte et commence à mettre le nez dans ses affaires. Se sentant sur la pente raide, il fut forcé de revenir aux États-Unis en 1944.

Soyons honnêtes, Lothrop fut un archétype d'archéologue autant qu'une espèce d'espion. Toujours est-il que ce type d'engagement n'était pas sans conséquence. Dans le cas présent, le célèbre anthropologue Franz Boas (1858-1942) réagit vertement à cette activité dissimulée dans un article intitulé « *Scientists as Spies* », publié le 20 décembre 1919 dans l'hebdomadaire américain *The Nation*. Il y accusait quatre anthropologues nord-américains, sans les nommer, d'avoir profité de leur statut pour développer des activités d'espionnage en Amérique centrale pendant la Première Guerre mondiale. Encore plus violemment, Boas leur reprochait d'avoir « *prostitué la science en l'utilisant comme couverture pour leurs activités d'espions* », et ainsi avoir trahi leur engagement et leur éthique scientifique. La réaction officielle à cette dénonciation fut, hélas, sans surprise. Accusé de s'adonner à des manœuvres politiques, Boas fut censuré et renvoyé du conseil de l'American Anthropological Association où il siégeait. Est-il besoin de préciser que les quatre espions pointés du doigt faisaient partie de ce même conseil d'administration : John Mason, Sylvanus Morley, Herbert Spinden et Samuel Lothrop…



▲ *Samuel K. Lothrop et sa femme, Eleanor, vers 1948, assis devant l'une des sphères mégalithiques du Costa Rica. L'archéologue passa la majeure partie de sa vie en Amérique du Sud au service du renseignement américain.*

L'INTELLIGENCE COMME UN SERVICE ET NON COMME UNE QUALITÉ

Archéologie et espionnage ont longtemps fait bon ménage. En effet, les fureteurs professionnels qu'étaient les chercheurs avaient autrefois autant le nez dans les espaces lointains que les yeux sur les événements locaux et les oreilles dans les pince-fesses officiels. Diplomates, politiques et militaires ont donc rapidement compris l'intérêt d'employer ces mouches – souvent tout à fait ingénieuses –, qui acceptèrent des missions ténébreuses. Mais, loin des luttes et

GIFT OF THE CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON, 1958. © PEABODY MUSEUM OF ARCHAEOLOGY AND ETHNOLOGY, HARVARD UNIVERSITY,2004.1.391.1

acrobaties à la Indiana Jones, leur rôle fut plutôt passif, consistant à être de minutieux témoins des événements et rapporteurs de rumeurs des lieux qu'ils traversaient. Moins Mata-Hari ou Lawrence d'Arabie que simples petits agents gris et farfouilleurs.

Toutes les nations profitèrent un jour ou l'autre de cette manne intellectuelle, au patriotisme généralement exacerbé, habile à tracer des cartes précises. Allemands, Anglais, Chinois, Nord-Américains, Italiens, Français, Japonais ou Russes utilisèrent ces barbouzes amateurs, particulièrement pendant et entre les deux guerres mondiales. Leurs contributions étaient en majorité des relevés topographiques à destination militaire. Aux États-Unis, l'intelligence était considérée comme un service, et non comme une qualité. D'ailleurs, plusieurs « chercheurs » inconnus de leurs confrères officiels se caractérisaient par une production académique famélique, voire inexistante. Jusqu'à récemment, un flou soigneusement entretenu mêlait faux scientifiques et vrais archéologues en mission à l'étranger, instrumentalisant ainsi à des fins militaires une profession qui n'en demandait pas tant.

Aujourd'hui, avec l'ultraprofessionnalisation et spécialisation de l'archéologie, il ne reste plus beaucoup d'espace pour s'investir dans le renseignement. En outre, le relevé topographique de zones stratégiques isolées a été évincé par la cartographie Lidar ou satellitaire de haute précision. Devenu inutile pour les activités secrètes, l'archéologue est maintenant exclu du grand jeu. ■

(1) Peter Hopkirk, *Bouddhas et rôdeurs sur la route de la soie*, Éditions Philippe Picquier, 1998.

(2) Lisa Cooper, *In Search of Kings and Conquerors: Gertrude Bell and the Archaeology of the Middle East*, New York, L. B. Tauris, 2016.

(3) Thomas Edward Lawrence, *Dépêches secrètes d'Arabie* ; [Le rêve anéanti] ; *Lettres de T.E. Lawrence à E.T. Leeds* ; *Lettres de T.E. Lawrence*, Robert Laffont, 1992.

(4) Maurizio Tosi et Serge Cleuziou, *In the Shadow of the Ancestors*, Archaeopress, 2020 (2e édition).

(5) Sylvanus Griswold Morley, *An Introduction to the Study of the Maya Hieroglyphs*, Smithsonian Institution Bureau of American Ethnology, 1915 ; *The Inscriptions of Petén* (5 vol.), Carnegies Institution of Washington, 1938 ; *The Ancient Maya*, Stanford University Press, 1946.

(6) https://tinyurl.com/doa-sklothrop

(7) M. Bonomo et M. Farro, *Chungará*, 46, 131, 2014.

(8) https://tinyurl.com/anthropologists-spies

STEPHEN ROSTAIN

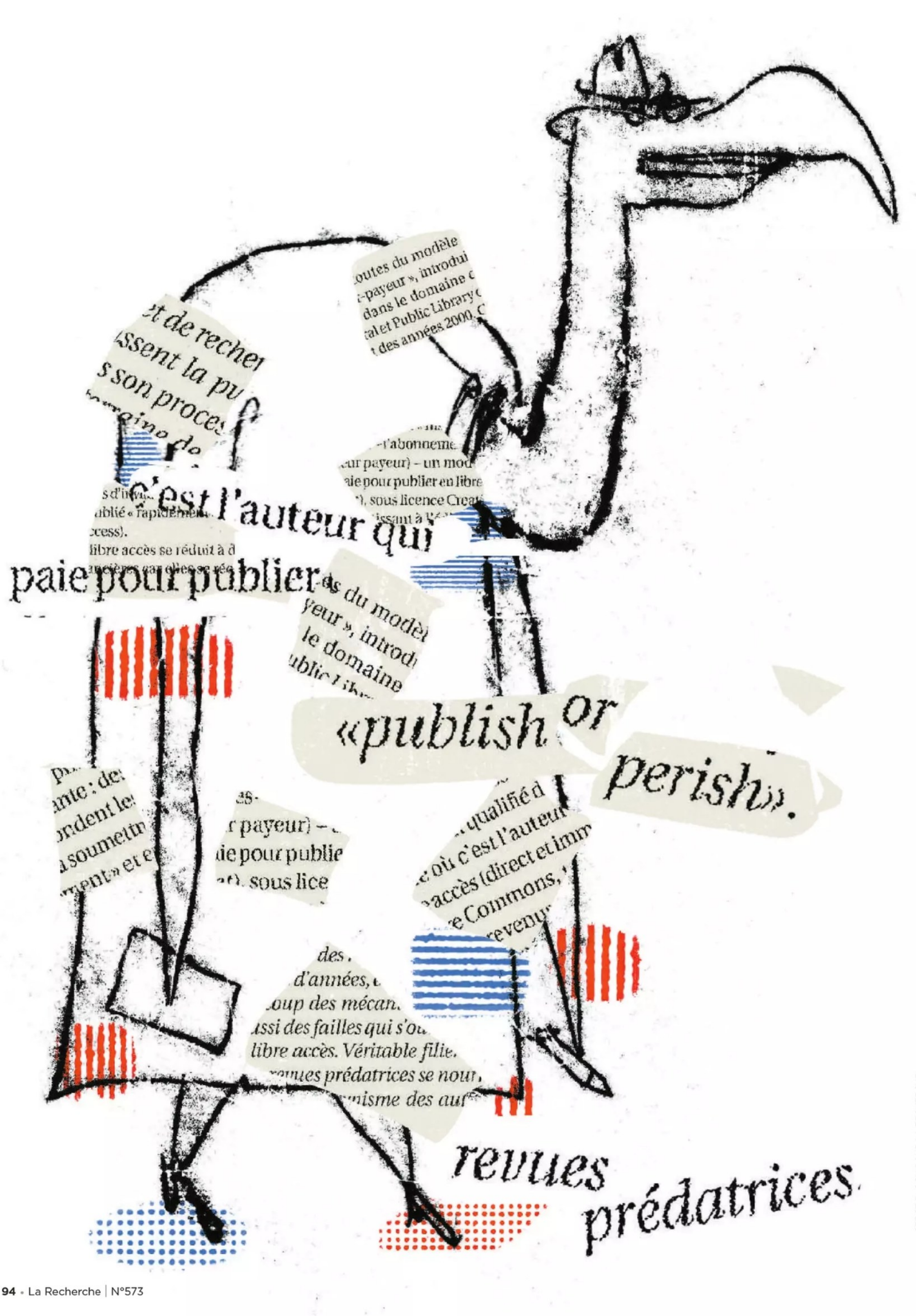
L'Europe ne suffit pas

La France a développé un outil de diplomatie original reposant sur la coopération scientifique, dont l'archéologie est le fer de lance. Cette coopération est un instrument de la politique d'influence française dans ses relations bilatérales. C'est également un vecteur de rayonnement de la science française par le prisme du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. En effet, depuis deux siècles, archéologie et diplomatie sont intimement liées. Cette proximité fut formalisée après la Seconde Guerre mondiale par le général de Gaulle et l'archéologue Henri Seyrig (1895-1973), fondateur et directeur de l'Institut français d'archéologie du Proche-Orient. Ils créèrent la Commission des fouilles au ministère, avec l'objectif de soutenir des programmes scientifiques. Rien qu'en 2022, 180 projets de recherches archéologiques ont été examinés, parmi lesquels 162 ont été en partie financés par le ministère, et se sont déroulés dans 73 pays – en majorité en Afrique-Arabie, suivies à parts égales de l'Orient, de l'Europe-Maghreb et de l'Asie-Océanie, et enfin les Amériques (1). Point de visée d'espionnage ici, mais plutôt une vitrine des compétences scientifiques et universitaires et la mise en place de coopérations internationales. S.R.



▲ *Fouilles archéologiques au pied des Andes, en Équateur.*

(1) https://tinyurl.com/archeo-fr-etrang-2018-2022



SERGE BLOCH POUR LA RECHERCHE



Chérifa Boukacem-Zeghmouri
PROFESSEURE EN SCIENCES DE L'INFORMATION – COMMUNICATION, LYON
Travaillant à l'université Claude-Bernard Lyon 1, elle est spécialiste de l'information et de la communication scientifiques numériques ; elle étudie les mutations de la publication scientifique, fondées sur des modalités ouvertes et collaboratives, et les processus de légitimation de ses nouveaux modèles.

La prédation dans la publication scientifique

Le phénomène des revues prédatrices, apparu comme un fait divers il y a une dizaine d'années, est devenu un objet de recherche à part entière, qui dit beaucoup des mécanismes qui régissent la publication scientifique, mais aussi des failles qui s'ouvrent dans son processus de transformation vers le libre accès. Véritable filière souterraine de la publication scientifique, elles se nourrissent des articles et de la naïveté, du désespoir ou du cynisme des auteurs soumis à la règle implacable du « publier ou périr ».

Le lexique de la publication scientifique s'est récemment élargi à la notion de prédation. Revues « prédatrices », éditeurs « prédateurs », sont des expressions connues dans le milieu universitaire pour désigner un phénomène d'une ampleur devenue alarmante : des revues qui se disent scientifiques inondent les chercheurs de courriels d'invitation à soumettre un article, qui sera publié *« rapidement »* et en libre accès.

Leur définition du libre accès se réduit à des considérations financières car elles se réclament toutes du modèle économique « gold » (auteur-payeur), introduit par d'authentiques éditeurs dans le domaine de la santé (BioMed Central et Public Library of Science – PLOS) au début des années 2000. Ces derniers avaient proposé de substituer au modèle économique « historique » des revues scientifiques, c'est-à-dire l'abonnement (souvent qualifié de lecteur-payeur), un modèle où c'est l'auteur qui paie pour publier en libre accès (direct et immédiat), sous licence Creative Commons (*), tout en garantissant à l'éditeur des revenus. Les frais de publications sont alors avancés par le chercheur et désignés par un acronyme aujourd'hui consacré : APC (pour *article processing charge,*

(*) **La licence Creative Commons** est un type de licence libre permettant la réutilisation et la distribution des articles selon des conditions définies.

DR

ou « frais de traitement d'un article » en français). De plus en plus d'éditeurs – y compris historiques – s'y sont mis, et les prix des APC se sont envolés, indexés au prestige de la revue. *Nature,* la plus célèbre d'entre elles, demande 9 750 euros pour son APC en 2023 (1).

Ce modèle a introduit une dimension transactionnelle entre l'auteur et l'éditeur, et c'est la faille sur laquelle se sont positionnées les revues prédatrices. Même si elles ne pratiquent pas les mêmes tarifs d'APC, elles construisent un discours qui associe systématiquement libre accès et acte de paiement d'APC. Elles se positionnent également sur une autre faille du système, celle de la pression à la publication à laquelle les chercheurs sont soumis pour faire avancer leur carrière, et qui est résumée par l'expression « publish or perish »(publier ou périr). Ces revues se présentent en outre comme des revues internationales, pluridisciplinaires, reconnues par les communautés scientifiques, indexées dans les bases de données de référence et dotées de tous les indicateurs de légitimité et de prestige dont un chercheur peut rêver pour son CV et donc sa carrière : citations, facteur d'impact (*),etc.

Mais revenons sur les origines du phénomène de prédation. Apparu d'abord comme un fait divers, et abordé comme tel dans les médias, il est devenu rapidement un sujet de préoccupation lorsqu'un bibliothécaire américain, Jeffrey Beall, révèle au début des années 2010, dans son blog, une liste de revues et une description de leurs stratégies pour « harponner » les auteurs (2). Ces revues viennent majoritairement des pays du Sud (Inde, Bangladesh, Chine, Nigeria, etc.). Elles ne pratiquent pas d'évaluation par les pairs (*) pour les articles soumis, et se contentent le plus souvent de diffuser en format PDF l'article reçu, dans un délai record (entre 12 et 72 heures), pour ensuite réclamer les frais d'APC à l'auteur.

C'est cette arnaque à la publication en libre accès que le bibliothécaire américain désigne par « prédation ». Les auteurs sollicités soumettent leurs articles dans l'idée de les faire évaluer par les pairs, mais se retrouvent avec une simple mise en ligne de cette même version qui, le plus souvent, n'est même pas débarrassée de ses scories orthographiques. Dans le même temps, ces articles scientifiques, certes

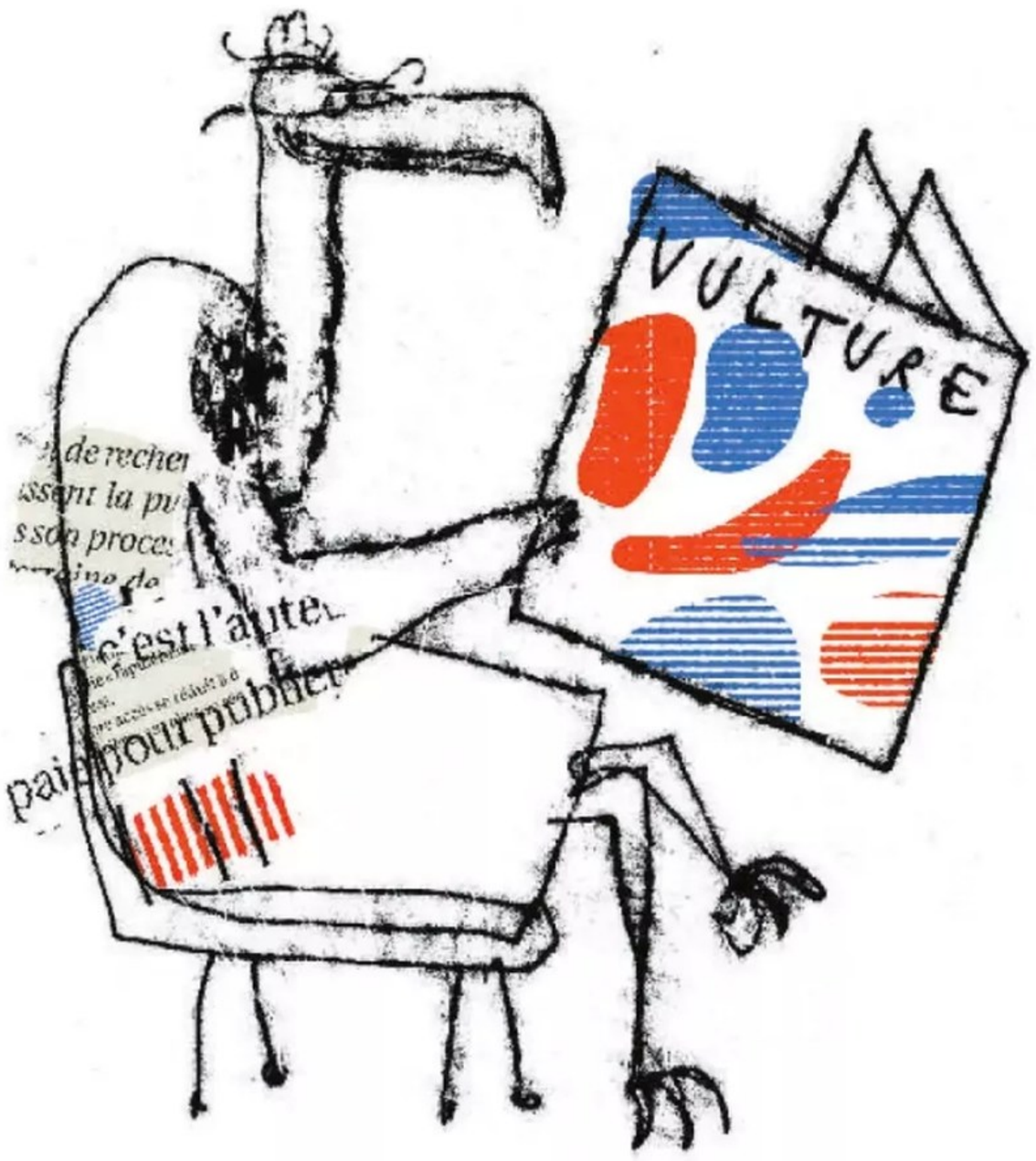
(*) **Le facteur d'impact** est un indicateur bibliométrique, qui calcule la visibilité d'une revue savante à partir d'une moyenne des citations qu'elle a reçues pour les articles qu'elle a publiés sur les deux années précédant le calcul.

(*) **L'évaluation par les pairs** consiste à faire examiner un article par des chercheurs spécialistes du domaine, pour en établir la validité.

OMICS, éditeur sans foi ni loi

OMICS est l'exemple « parfait » de l'éditeur prédateur qui publie des milliers de revues et de conférences prédatrices depuis 2008 : à ce jour, le nombre est estimé à 69 000 publications. Il n'est donc pas surprenant de voir OMICS qualifié de *predatory mega-publisher.* Le statut d'éditeur prédateur d'OMICS a pour ainsi dire été officialisé en août 2016 lorsque la US Federal Trade Commission (FTC) a lancé des poursuites en justice, puis a été confirmé en 2018 avec une condamnation à payer 50,1 millions de dollars pour ses pratiques déloyales et déceptives vis-à-vis d'auteurs passés à la barre témoigner de l'arnaque dont ils ont été victimes. Parmi ces pratiques, l'ajout de noms de chercheurs reconnus à des comités éditoriaux de revues et de conférences, sans que ceux-ci n'aient jamais donné leur accord. Les allégations d'indexation de ses revues dans des bases de données internationales ont également fait partie des accusations à l'encontre d'OMICS. Cette condamnation a donné un caractère notoire au statut d'éditeur prédateur d'OMICS, faisant de lui un modèle caractéristique de cette pratique. Les mécanismes de ses stratégies reposent entre autres, depuis plusieurs années, sur des actions de rachat et de rebranding d'éditeurs et de revues, avec l'objectif de paraître légitime auprès d'un lectorat qu'il tente de conquérir ou de fidéliser. L'éditeur, dont le siège est en Inde (Hyderabad), a remis en question le jugement fédéral et a contrattaqué avec un procès pour diffamation, réclamant des dommages et intérêts. OMICS poursuit ses activités en toute impunité, même si le nombre de ses articles publiés est en baisse.

réels, mais sans aucune forme de certification, se retrouvent sur la Toile, accessibles par tous. À l'heure actuelle, cependant, le terme de « prédation » ne fait pas l'unanimité. Certains préfèrent parler de « déception » et qualifient les revues de « déceptives » car elles promettent le plus souvent ce qu'elles ne sont pas en mesure de donner, à savoir l'évaluation par les pairs, et donc la certification (3). Cette difficulté à s'accorder sur un terme reflète en réalité celle que l'on a à définir exactement le phénomène. Il aura fallu un colloque de trois jours où des spécialistes dans le domaine de la santé, très touché par la prédation (4), se sont penchés sur la dénomination exacte du phénomène pour élaborer une définition considérée désormais comme la définition officielle : *« Les revues et éditeurs prédateurs sont des entités qui privilégient l'intérêt personnel au détriment de l'érudition et se caractérisent par des informations fausses ou trompeuses, une déviance vis-à-vis des bonnes pratiques éditoriales et de publication, un manque de transparence et/ou le recours à des sollicitations agressives. »* (5).



SERGE BLOCH POUR LA RECHERCHE

QUATRE PROFILS DE VICTIMES

Cette difficulté à définir la prédation n'a pas empêché le phénomène de devenir un objet de recherche au bout d'une dizaine d'années. La littérature scientifique consacrée à la prédation dans le champ de la publication scientifique est croissante, et des travaux d'analyse théoriques côtoient des études plus empiriques. Compte tenu du risque qu'il représente pour le secteur de l'édition scientifique dans sa transversalité, les contributions autour de la prédation apparaissent dans des revues de différents secteurs disciplinaires. La dynamique de ce nouveau champ de recherche a couvert de nombreuses questions et nous permet déjà de mieux comprendre les ressorts du phénomène (6).

Les travaux menés permettent de mieux comprendre la morphologie de la prédation et ses mécanismes, et notamment de tordre le cou à des idées reçues, notamment sur le profil des victimes des revues prédatrices. Ainsi, les auteurs ne sont pas que des jeunes chercheurs et chercheuses sans expérience ; « l'autorat » est également composé de chercheurs des pays du Nord, dont la France. Dans le même temps, de plus en plus de travaux cherchent à décrypter les stratégies des revues prédatrices, et donc les mécanismes qui conduisent les auteurs à tomber dans les mailles du filet. L'expérience des auteurs dans ce qui précède et accompagne la soumission, durant et après le processus de mise en ligne, est ainsi de plus en plus documentée. La question du profil des auteurs est importante car si les revues prédatrices connaissent un tel essor, c'est parce qu'elles parviennent à trouver des chercheurs qui soumettent des articles, ou bien acceptent de faire partie des comités éditoriaux de ces revues. On distingue quatre profils.

Le premier est celui de l'auteur « victime ». Au début du phénomène, l'autorat des revues prédatrices est majoritairement constitué de jeunes chercheurs, voire très jeunes, inexpérimentés et venant des pays dits du Sud. Même si le phénomène de la prédation est globalisé, comptant aussi des chercheurs occidentaux, sa géographie reste concentrée dans les pays d'Afrique et du Sud-Est asiatique qui ne disposent pas d'une industrie d'édition scientifique mature et dont les chercheurs éprouvent des difficultés à publier dans les revues internationales (7). Dans les pays émergents et dans

certains des pays du Sud, les États ont alloué au début des années 2000 des moyens financiers significatifs pour la recherche, particulièrement après la crise économique mondiale de 2007-2008. Cependant, les difficultés de navigation et de décryptage des espaces numériques du web, et le manque de connaissance de l'écosystème de la publication scientifique seraient parmi les principales raisons qui conduiraient les chercheurs à être victimes de la prédation.

Deuxième profil : celui de l'auteur résigné. Des travaux ont attiré l'attention sur le fait que les chercheurs du Sud, conscients de leur manque de formation et d'expérience, se sentent désavantagés par rapport à ceux du Nord ; ils ne croient donc pas en leur chance d'être publiés dans des revues internationales. Renonçant explicitement aux revues dites légitimes, ils feraient donc le choix de soumettre leurs articles à des revues plus identifiées à leurs zones géographiques. Ce qui revient à un recours par ces chercheurs à une espèce de modèle d'auto-



REVUES PRÉDATRICES figurent à l'heure actuelle sur la liste Cabells, qui recense ces journaux.

publication qui peut être appréhendé comme une riposte des scientifiques des pays du Sud, vis-à-vis d'un système de publication scientifique occidental, capitaliste, pensé par les pays du Nord, qui les exclut et ne véhicule donc pas l'universalisme de la science.

L'auteur désespéré constitue le troisième profil. Les politiques de financement de la recherche mentionnées plus haut ont été accompagnées de leur corollaire d'évaluation, alignée sur les pratiques de publication internationales et d'indicateurs bibliométriques. Ceci alors même que la formation et l'acculturation à la publication scientifique ne sont pas toujours présentes ou suffisantes pour accompagner les communautés locales à ce changement de cap. La pression à la publication compte donc également parmi les facteurs incitatifs à la soumission dans des revues prédatrices. Plus la pression à la publication se fait sentir, plus le chercheur perd son sens critique dans la précipitation et l'urgence de publier, ou bien cède à la tentation de la facilité pour publier rapidement.

Quatrième et dernier profil : l'auteur consentant. Il est celui qui est le plus fustigé par la critique. Les auteurs concernés expliquent leur démarche par le fait qu'ils s'estiment satisfaits des services proposés par ces revues, notamment la soumission facilitée par e-mail et la diffusion rapide de l'article. Il a aussi été établi que des scientifiques expérimentés (souvent qualifiés de seniors), y compris des pays du Nord, font partie de cet autorat conscient et consentant des revues prédatrices. Le consentement repose alors sur la justification que les revues incriminées sont indexées dans les bases de données internationales et par là-même prises en compte par les institutions du chercheur pour l'évolution de sa carrière. Dans ce cas de figure, la relation de l'auteur à la revue prédatrice est donc fondée sur des intérêts différents mais convergents.

Que la littérature les présente comme des victimes ou comme des complices cyniques, les auteurs des revues prédatrices sont liés entre eux par leur subordination à l'implacable règle du « publier ou périr ». La condition de la publication d'articles, nombreux et dans des revues prestigieuses, est devenue un tel dogme que les chercheurs fragiles ou mal intentionnés trouvent la parade dans le fait de succomber à

Conférences illusionnistes

La prédation n'épargne pas les conférences scientifiques. Ces dernières sont moins abordées, mais elles ne sont pas moins intéressantes pour comprendre le phénomène. Les chercheurs découvrent l'arnaque sur place, lorsqu'ils se rendent compte que le congrès international a plutôt la taille du petit séminaire, que les frais élevés d'inscription ne sont pas cohérents en regard de la modestie des moyens engagés pour l'organisation (des sous-sols de centres commerciaux, ou des salles de réunions d'hôtels de banlieue) et, surtout, que le programme rassemble des contenus de tous domaines confondus, dans une cacophonie qui ne peut être appréhendée comme de « l'interdisciplinarité », autre valeur sûre de la rhétorique ambiante en prédation.

Les victimes de ces conférences prédatrices sont harponnées de la même façon que les victimes des revues, à l'aide de SPAM vantant les qualités *« symboliques »* de la conférence ou du congrès international, qui garantit la présence de sommités mondiales et reconnues. Les têtes d'affiche sont des pseudo-chercheurs ou des invités malgré eux, car leur nom a tout simplement été utilisé pour susciter les soumissions et/ou les inscriptions.

D. Bloch, *Reflets de la Physique, 58,* 44, 2018.

des revues qui, précisément, leur proposent une « solution » correspondant en tout point à leurs attentes, du moins en apparence. Ceci d'autant qu'il n'y a pas de vision commune chez les chercheurs de ce que sont les revues prédatrices. Les représentations développées à propos de celles-ci sont donc multiples et participent au brouillage et à la confusion entre revues.

À l'inverse, les revues prédatrices connaissent bien les auteurs, leurs besoins et leurs vulnérabilités et jouent à plein sur ces registres. Elles développent des stratégies de prédation redoutables, comme l'inclusion abusive de chercheurs prestigieux dans les comités éditoriaux, de faux noms de chercheurs, d'invitations pressantes et flatteuses par courriels, l'annonce de faux facteurs d'impact, le mimétisme avec d'autres revues légitimes ou, plus radicalement, le *hijacking*, qui consiste à usurper l'identité d'une revue légitime, ayant pignon sur rue.

UNE RHÉTORIQUE BIEN RODÉE

Les SPAM (e-mails indésirables) envoyés aux chercheurs sont des vecteurs particulièrement révélateurs des stratégies employées. Ce procédé est similaire à celui des SCAMS (e-mails abusant de la confiance d'individus pour soutirer de l'argent) associés à la criminalité du web (8). À l'instar de ces derniers, ils font des promesses mirobolantes : une publication rapide, internationale, visible, prestigieuse et à un coût raisonnable. Ils présentent tous les arguments d'une rhétorique bien rodée, fondée sur la flatterie et les marqueurs discursifs de la légitimité académique. Les SPAM sont donc là pour « hameçonner » des victimes conditionnées à la nécessité de publier. Il ne s'agit pas seulement d'extorquer la somme d'argent pour la « publication », mais aussi de récupérer l'article qui viendra alimenter la masse critique nécessaire pour crédibiliser la revue.

Les enquêtes auprès des auteurs révèlent également que la réponse à l'un de ces SPAM, voire la soumission de leur article, peut ensuite basculer dans le harcèlement, par e-mail, téléphone ou sur les messageries type WhatsApp. Ils sont menacés, parfois physiquement, pour payer une seconde fois la somme qu'ils ont déjà réglée (9). Il s'agit donc là d'une avancée extrême de l'anomie créée par la marchandisation de la publication, qui forme une niche dans le phénomène de l'escroquerie sur le web : la cybercriminalité. Cette espèce de parodie critique que représente la prédation remet en question la légitimité des hiérarchies établies des revues internationales prestigieuses, qui développent à grande échelle le modèle « gold auteur-payeur ». Les revues prédatrices sont donc un phénomène complexe, qui pose les questions importantes du rôle, de la culture et du devenir de la publication scientifique, car elles touchent désormais autant aux inégalités géopolitiques des processus de production des connaissances scientifiques qu'au statut et à la légitimité des contenus scientifiques produits et qui circulent librement sur le web : « fake » science (science fausse et mensongère produite par des personnes mal intentionnées) et « junk » science (science produite par les chercheurs, se prétendant scientifique, mais ne présentant aucune rigueur ou aucun intérêt scientifique) côtoient la vraie science dans les résultats des moteurs de recherches, y compris en médecine, sans que l'usager, chercheur ou citoyen, soit toujours capable de distinguer le bon grain de l'ivraie.

Un retour sur la définition établie des revues prédatrices mériterait d'être fait pour prendre en compte ces inégalités, ces hiérarchies et les rapports de force et de domination jusque-là invisibles entre des régions du monde situées en périphérie vis-à-vis du centre qui les déprécie, voire les exclut. De manière corollaire, tout un pan de l'autorat développe une expérience relationnelle à la publication scientifique traumatisante et négative, passant de la fascination à la déception, voire au harcèlement. Cette constatation est alarmante et ne peut plus être ignorée dans les débats qui agitent aujourd'hui le champ de la publication scientifique en mutation. ■

Un phénomène complexe, qui pose les questions du rôle, de la culture et du devenir de la publication scientifique

(1) https://tinyurl.com springer-nature hybrid-j-2023

(2) J. Beall, *Nature*, *489*, 179, 2012.

(3) K. Siler *et al.*, *Nature*, *598*, 563, 2021.

(4) A. de La Blanchardière *et al.*, *La Revue de médecine Interne, 42*, 421, 2021.

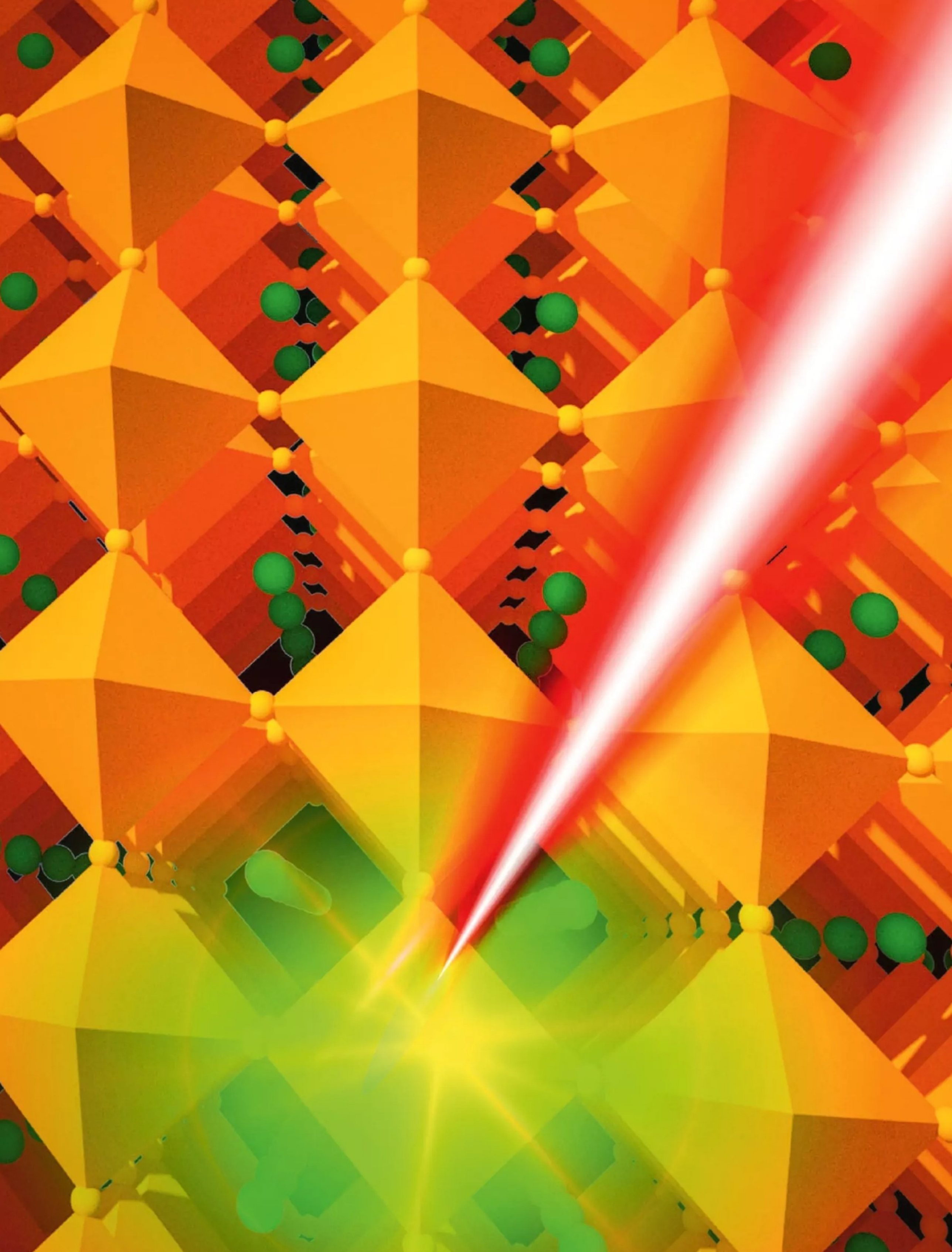
(5) A. Grudniewicz *et al.*, *Nature*, *576*, 210, 2019.

(6) C. Boukacem-Zeghmouri *et al.*, *Nat. Sci. Soc.*, *29*, 382, 2021 ; C. Boukacem-Zeghmouri *et al.*, https://papers.hypotheses.org/640, 2022.

(7) D. Allman, *Crit. Public Health, 29*, 413, 2019 ; F. Beigel, *Curr. Sociol.*, *62*, 743, 2014.

(8) N. Auray, *Réseaux*, *171*, 103, 2012.

(9) A. H. Chambers, *Science*, doi: 10.1126/science.caredit.aax9725, 2019.

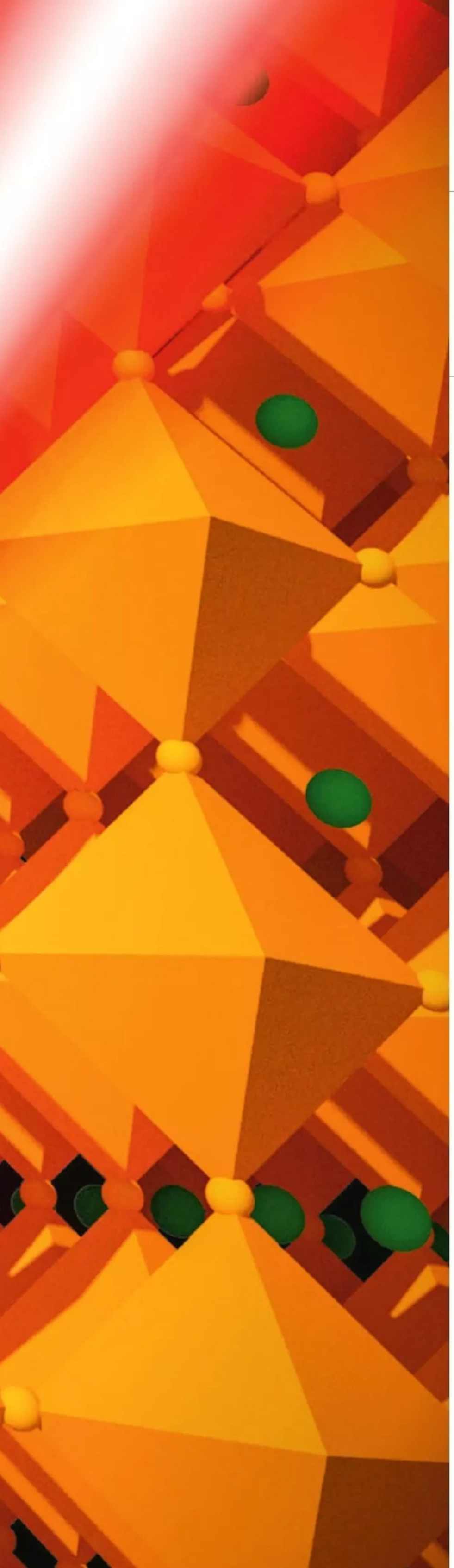




Davide Raffaele Ceratti
PHYSICO-CHIMISTE, PARIS
Postdoctorant au Laboratoire de chimie de la matière condensée de Paris, il a effectué un postdoctorat au sein de l'Institut photovoltaïque d'Île-de-France (2020-2022) et à l'Institut Weizmann en Israël (2017-2020).

Vers des cellules solaires auto-cicatrisantes

Fabriquer des panneaux solaires qui conservent toute leur efficacité pendant plusieurs dizaines d'années est un rêve de physico-chimiste. Les cellules solaires à base de pérovskite permettront peut-être d'atteindre cet objectif. Très performantes en termes de rendement de conversion, au point d'avoir rattrapé les cellules solaires à base de silicium qui dominent le marché depuis un demi-siècle, elles pâtissent encore de leur manque de stabilité. Mais la découverte récente de la capacité d'autocicatrisation des cristaux de pérovskite pourrait changer la donne.



DAVIDE CERATTI ET TAL ABARZEL/BIGDARY/WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE - DR

◀ *Représentation artistique de l'excitation de cristaux de pérovskite à l'aide d'un laser à deux photons. À basse intensité, le faisceau (rouge) stimule la luminescence (lumière vert-jaune) dans le matériau. À haute intensité, il génère aussi des défauts qui la réduisent. Le phénomène de photoluminescence permet de suivre le processus d'autocicatrisation dans la pérovskite.*

La transition énergétique est en marche ! Et, dans ce cadre, il faudra compter avec l'énergie d'origine solaire, notamment collectée sous forme d'électricité grâce à des installations à concentration thermodynamique (*) ou des systèmes de panneaux photovoltaïques. Aussi prometteuse que soit cette dernière méthode, elle reste confrontée à un défi principal : obtenir cette énergie de manière fiable et à bon marché. Cela implique que les panneaux solaires photovoltaïques soient eux-mêmes fiables – autrement dit, que leur conception et leur fonctionnement n'ajoutent pas des difficultés à la problématique de l'intermittence, inhérente à cette source d'énergie (en raison du cycle jour/nuit).
La fiabilité des panneaux solaires va de pair avec un autre aspect : leur économicité, c'est-à-dire le rapport entre leur coût et leur rendement. Des panneaux solaires photovoltaïques qui perdent en rendement rapidement doivent être remplacés plus souvent ; ils sont donc plus coûteux. À l'inverse, plus un panneau dure longtemps, plus son coût et donc celui de l'énergie qu'il produit diminuent (étant entendu que nous ne prenons en compte, ici, ni le prix du terrain sur lequel il est installé, ni celui de la manutention nécessaire à l'entretien).
Dans la réalité, les panneaux solaires ne s'arrêtent pas de fonctionner d'un seul coup, mais perdent leur efficacité progressivement avec le temps. Prenons l'exemple des panneaux en silicium cristallin, qui sont actuellement les plus répandus sur le marché. Ils convertissent environ 20 % de l'énergie solaire en électricité au début de leur vie. Un bon niveau de rendement. Mais qui ne masque pas certaines difficultés. Premièrement, ces panneaux sont difficiles à fabriquer car le matériau qui les compose, le silicium cristallin, est obtenu grâce à des procédés précis et coûteux. Il est en effet produit à partir de sable (la silice), qui est mélangé avec du charbon et chauffé à haute température sans oxygène. Le silicium issu de ce processus doit ensuite être purifié à 99,98 % ; pour cela, il est fondu à 1 500 °C et cristallisé – c'est-à-dire solidifié très lentement, de façon que les atomes prennent des positions précises et périodiques dans le solide – plusieurs fois. Cette étape permet d'éviter de piéger dans le matériau des atomes qui ne sont pas du silicium, et aussi de faire en sorte que les atomes de silicium s'organisent parfaitement à l'intérieur du matériau, sans laisser d'espace.
On l'aura compris, une telle opération est difficile d'un point de vue technologique (en particulier la gestion de la haute température), et nécessite beaucoup d'énergie. Cela signifie qu'elle ne peut être réalisée que dans de grandes entreprises, dont la plupart se trouvent aujourd'hui en Chine, même si des efforts sont effectués pour que la production reprenne en Europe. De plus, le silicium doit être mélangé à des atomes choisis – souvent du bore et du phosphore –, qui viendront modifier ses propriétés électroniques par un processus appelé dopage, nécessaire pour former les structures électroniques capables de récupérer l'électricité générée par la lumière. Une telle procédure nécessite, là encore, des machines technologiquement avancées, relativement imposantes et qui travaillent sous vide. Autant de contraintes qui les rendent inabordables pour de petites sociétés.

DÉGRADATION CONTINUE ET RÉPARATION IMPOSSIBLE

Les panneaux de silicium posent deux autres problèmes : leur rendement décroît lentement au fil des années – on évalue la dégradation moyenne à 0,8 % par an (1) ; et ils ne sont pas réparables. Le seul moyen pour qu'ils retrouvent un meilleur niveau de rendement, c'est en fait de les recycler. En pratique, cela signifie parvenir à séparer les différents éléments constitutifs du panneau pour valoriser le silicium, puis le soumettre à un nouveau – et coûteux – processus de cristallisation, avant de l'utiliser dans des panneaux neufs…
On retrouve ces mêmes difficultés dans la très grande majorité des technologies photovol-

(*) **Un système solaire à concentration thermodynamique** exploite le rayonnement du Soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce type de système permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés.

taïques existantes, quel que soit leur degré de commercialisation : le tellurure de cadmium (relativement répandu aux États-Unis), l'arséniure de gallium, à haut rendement mais très cher, et uniquement employé dans le domaine spatial (la vitesse de dégradation de ces deux technologies est même plus élevée que celle du silicium, etc.) Une technologie qui a émergé récemment suscite cependant de grands espoirs : les pérovskites halogénées. Étudiées depuis une dizaine d'années pour des applications dans le solaire, elles sont potentiellement capables de s'auto-réparer en vertu d'un processus dit d'« autocicatrisation » (*self-healing* en anglais). Par autocicatrisation, on entend la capacité d'un matériau à revenir à son état d'origine après avoir été endommagé (par exemple, suite à l'exposition à des traitements chimiques, thermiques ou lumineux dégradants), ou à prévenir les dommages perceptibles.

BIENTÔT LE NEC PLUS ULTRA DES PANNEAUX SOLAIRES

Que sont les pérovskites halogénées et qu'ont-elles de si particulier ? Ce sont des sels, c'est-à-dire des matériaux formés par des ions positifs et négatifs. Si le sel de cuisine est composé de sodium (Na^+) et de chlore (Cl^-), les pérovskites halogénées, elles, sont formées avec des métalloïdes comme le brome et l'iode, capables de se transformer facilement en ions négatifs, et des ions positifs comme le césium (Cs^+) ou de petites molécules organiques (méthylammonium MA^+, formamidinium FA^+, etc.). Ce sont des semi-conducteurs : des matériaux isolants – qui ne laissent donc pas passer le courant électrique en temps normal –, que l'on peut rendre conducteurs dans certaines conditions (lorsqu'on les chauffe ou qu'on les illumine, par exemple).

À l'heure actuelle, environ 3 000 chercheurs et chercheuses dans le monde travaillent à la compréhension et à l'optimisation des propriétés des pérovskites halogénées, afin de les transformer en matériau de choix pour les panneaux solaires du futur – ce chiffre correspond au nombre de participants et participantes à la dernière édition de la plus grande conférence scientifique du secteur,

25,7 %

DE RENDEMENT DE CONVERSION en énergie électrique a été obtenu après un test en laboratoire de cellules solaires photovoltaïques à base de pérovskites halogénées. Ce chiffre est très proche du record atteint par des cellules à base de silicium (26,1%).

l'International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics, qui s'est tenue à Lausanne, en Suisse, en 2019 (la prochaine a lieu en septembre 2023, à Oxford, au Royaume-Uni). Parmi eux, quelque 300 travaillent en France (nombre de chercheurs et chercheuses adhérant au groupement de recherches du CNRS sur le sujet, le GDR HPero).

Une grande partie de l'effort de recherche sur les pérovskites halogénées consiste à optimiser leur rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Avec succès, puisque les meilleures cellules solaires photovoltaïques à base de pérovskites halogénées testées en laboratoire ont atteint, récemment, un rendement de 25,7 %, très près du record des cellules à base de silicium monocristallin monojonction (26,1 % en laboratoire) et proche de la limite théorique maximale (la limite de Shockley–Queisser), qui est de 33 % (2). Il y a donc fort à parier que les pérovskites halogénées deviendront le nec plus ultra des panneaux solaires dits « à jonction unique », qui est la configuration la plus typique des cellules solaires photovoltaïques, dans laquelle une seule couche de matériau absorbe la lumière.

Les pérovskites sont des matériaux à liaisons faibles, c'est-à-dire faciles à casser mais aussi à reformer

La capacité d'autocicatrisation des pérovskites halogénées, quant à elle, a été évoquée pour la première fois en 2015 par une équipe rassemblant des chercheurs aux États-Unis et en Israël (3). Commentant les propriétés de ce nouveau super-matériau, le groupe s'est intéressé à la nature des liaisons chimiques qui relient les atomes en son sein. En effet, à la différence du silicium et des autres matériaux utilisés pour le solaire, qui possèdent tous des liaisons fortes, la pérovskite est considérée comme un matériau à liaisons faibles. Ce qui veut dire que ses

Encapsuler les cristaux de pérovskite de manière parfaite est fondamental, tout comme le fait de les associer à des matériaux avec lesquels ils sont chimiquement non réactifs

liaisons sont faciles à casser – mais aussi à reformer – et, par conséquent, les atomes qui constituent les cristaux de ce matériau bougent beaucoup plus facilement que ceux qui sont contenus dans le silicium par exemple (et ils nécessitent bien moins d'énergie pour ce faire). Schématiquement, c'est un peu comme si les pérovskites halogénées se décomposaient et se recomposaient continuellement. Cela leur confère un avantage, a estimé, en 2015, l'équipe israélo-américaine : il est bien plus simple d'éliminer les défauts qui peuvent s'y former quand on les fabrique. Et, grâce à ce phénomène, la qualité des cristaux de pérovskite – et donc le rendement des cellules solaires fabriquées avec ce matériau – peut atteindre des niveaux très élevés, de manière durable.

UN MÉCANISME D'AUTOCICATRISATION D'ORIGINE CHIMIQUE

Restait à observer ces effets de cicatrisation de manière expérimentale. Ce fut fait dès l'année suivante, en 2016, lorsqu'une équipe animée par Aditya D. Mohite, du laboratoire national de Los Alamos, aux États-Unis, rapporta de premières observations de ce phénomène (4). Les physico-chimistes ont montré que le fait d'exposer des cellules photovoltaïques en couches minces à base de pérovskite à une illumination continue pendant deux heures faisait diminuer leur rendement, en raison de la rupture des liaisons dans le matériau. À l'inverse, lorsqu'on les laisse reposer dans l'obscurité, elles retrouvent presque leur rendement de départ, en moins d'une minute. Ils ont aussi observé que la dégradation des performances peut être complètement évitée en faisant fonctionner les dispositifs à 0 °C. Cependant, en raison de la complexité des cellules solaires utilisées dans le cadre de leurs travaux, ils n'ont pas réussi à déterminer comment fonctionnait le mécanisme d'autocicatrisation, et s'il était dû aux propriétés intrinsèques des pérovskites ou à leur interaction avec d'autres phases (c'est-à-dire d'autres matériaux, ou même le milieu ambiant).

Mais, là encore, les choses sont allées très vite. Dès 2018, au sein de l'équipe de David Cahen de l'Institut Weizmann des sciences à Rehovot (Israël) et avec l'aide de mes collègues de l'université de Milan (Italie), nous sommes parvenus à mettre en évidence que le mécanisme d'autocicatrisation était bien lié aux propriétés intrinsèques des pérovskites, et donc à exclure l'effet de tous les autres composants des cellules solaires (5). Nos expériences ont été réalisées dans des conditions idéales. Nous avons utilisé des monocristaux de pérovskite « purs » : un à base de bromure de plomb de méthylammonium ($MAPbBr_3$), un deuxième à base de bromure de plomb de formamidinium ($FAPbBr_3$), et un troisième à base de bromure de plomb de césium ($CsPbBr_3$). Dans des conditions ambiantes (air libre, environ 45 % d'humidité), nous avons ensuite soumis ces trois types de cristaux au faisceau laser d'un microscope à deux photons, en faisant fonctionner ce dernier à différents niveaux de puissance et pendant un nombre variable (entre 1 et 100) de cycles de quelques microsecondes. Grâce à cette source de lumière focalisée, nous avons réussi à dégrader l'intérieur de chaque cristal à un dixième de millimètre de la surface, y cassant un grand nombre de liens chimiques et, ce faisant, y créant des défauts.

L'intérêt de cette technique d'imagerie optique est qu'elle nous a aussi permis de surveiller l'état des matériaux (par le biais du phénomène de photoluminescence). C'est ainsi que nous avons pu observer, pour la première fois, la régénération complète au sein des pérovskites. À ce petit jeu, le $FAPbBr_3$ est celui qui s'est montré le plus rapide et le plus spectaculaire dans sa récupération (environ une heure), tandis que le $CsPbBr_3$ a été le plus lent (quelques dizaines d'heures). Le fait que la vitesse de ce

processus varie en fonction de la composition des pérovskites, et ce alors que les conditions d'expérience excluaient les possibles effets de surface, d'interface et d'interaction avec l'air ambiant, montre que la cicatrisation des pérovskites est bien un phénomène intrinsèque, d'origine chimique.

LA QUESTION DE LA STABILITÉ DU MATÉRIAU

Une fois cette étape importante franchie, nous nous sommes attaqués à un autre aspect, qui suscite un intérêt croissant depuis quelques années au sein de la communauté des spécialistes du solaire photovoltaïque : la question de la stabilité du matériau. De par la nature des liaisons qui forment les cristaux de pérovskites halogénées, ceux-ci – et par extension les dispositifs solaires dans lesquels on les insère – se caractérisent par une grande instabilité. Ce qui est problématique lorsqu'on ambitionne de les commercialiser à grande échelle – niveau qui requiert des panneaux solaires capables de résister pendant des dizaines d'années.

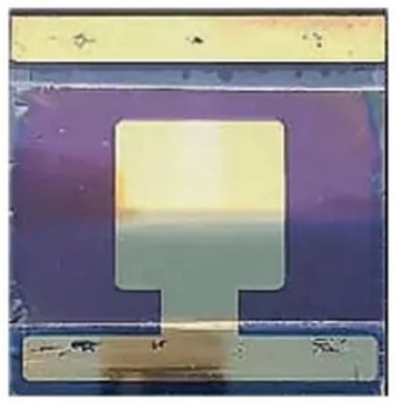
Il faut bien comprendre que la cause réelle de perte de stabilité dans les pérovskites diffère de celle qui prévaut pour le silicium. Dans ce dernier, la lumière et la chaleur ont une faible probabilité de casser les liaisons fortes entre les atomes. Mais quand cela survient, ce petit sacrifice périodique au « dieu » de l'entropie crée dans le matériau des défauts irréversibles qui diminuent son rendement avec le temps. Au sein des pérovskites, la lumière a une probabilité un million de fois supérieure de casser les liaisons entre les atomes. Mais cela n'a pas de conséquence tant que ces derniers recréent ensuite de nouvelles liaisons et que le cristal peut se reformer, selon un processus d'autocicatrisation rapide et efficace. Dans le cas contraire, la dégradation peut être extrêmement rapide – de l'ordre de quelques secondes dans le pire des cas.

Comment assurer la stabilité à long terme des dispositifs solaires à base de pérovskites, sans compromettre leur efficacité ? Pour répondre à cette question, il est fondamental de comprendre de manière fine les phénomènes chimiques qui régissent ces cristaux. Nous y avons donc consacré nos travaux les plus récents. Nous nous sommes notamment intéressés aux cristaux de pérovskite à base d'iodure de plomb méthylammonium ($MaPbI_3$). Les cellules solaires utilisant ces cristaux sont actuellement parmi les plus prometteuses en termes de rendement de conversion. Mais la stabilité de ces cristaux reste un point noir.

Notre étude a permis de progresser dans ce domaine. Nous avons mis au point un cristal de $MaPbI_3$, que nous avons illuminé avec un laser plus de 2000 fois sur un laps de temps d'environ 5 heures 30. L'énergie déposée en moyenne pendant l'illumination périodique était similaire à celle du soleil. Nous avons ainsi noté que l'échantillon atteint un état quasi stationnaire où, en dépit du fait que l'exposition à la lumière n'est pas continue, plus aucun changement n'est observé. Nous avons aussi remarqué les effets bénéfiques que pouvait provoquer la présence d'eau dans le matériau. En effet, utilisée en petite quantité pour la fabrication des panneaux à base de pérovskite, l'eau permet à ceux-ci d'atteindre des rendements très élevés. Par ailleurs, si le niveau d'humidité auquel le matériau est alors exposé est inférieur à 50 %, nous constatons que cela augmente sa vitesse d'autocicatrisation et compense les dommages dus à l'illumination (6).

UNE COMMERCIALISATION À L'ÉCHELLE INDUSTRIELLE AVANT 2030

Maintenir un état d'équilibre chimique est essentiel pour assurer la stabilité à long terme des dispositifs solaires à base de pérovskite. Encapsuler les cristaux de pérovskite de manière parfaite apparaît aussi fondamental, tout comme le fait de les associer à des matériaux avec lesquels ils sont chimiquement non réactifs (7). Cela suppose de poursuivre et d'amplifier le travail d'analyse et de compréhension des phénomènes chimiques à l'intérieur de ces dispositifs solaires. Cette approche, complémentaire de celle visant à améliorer les performances, est indispensable à leur développement et à leur commercialisation, à l'échelle industrielle, avant la fin de la décennie. Un objectif que poursuivent un certain nombre de laboratoires et entreprises, notamment en France. ■



▲ *Cette cellule solaire à pérovskite d'une surface de 1 cm² a été mise au point au sein de l'Ulsan National Institute of Science and Technology à Ulsan, en Corée du Sud. Son rendement est supérieur à 24,8 %.*

M. JEONG *ET AL., SCIENCE, 369,* 1615, 2020

(1) D. C. Jordan *et al., Prog. Photovoltaics, 24,* 978, 2016.

(2) https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html ; M. Jeong *et al., Science, 369,* 1615, 2020.

(3) J. Berry *et al., Adv. Mater., 27,* 5102, 2015.

(4) W. Nie *et al., Nat. Commun., 7,* 11574, 2016.

(5) D. R. Ceratti *et al., Adv. Mater., 30,* 1706273, 2018.

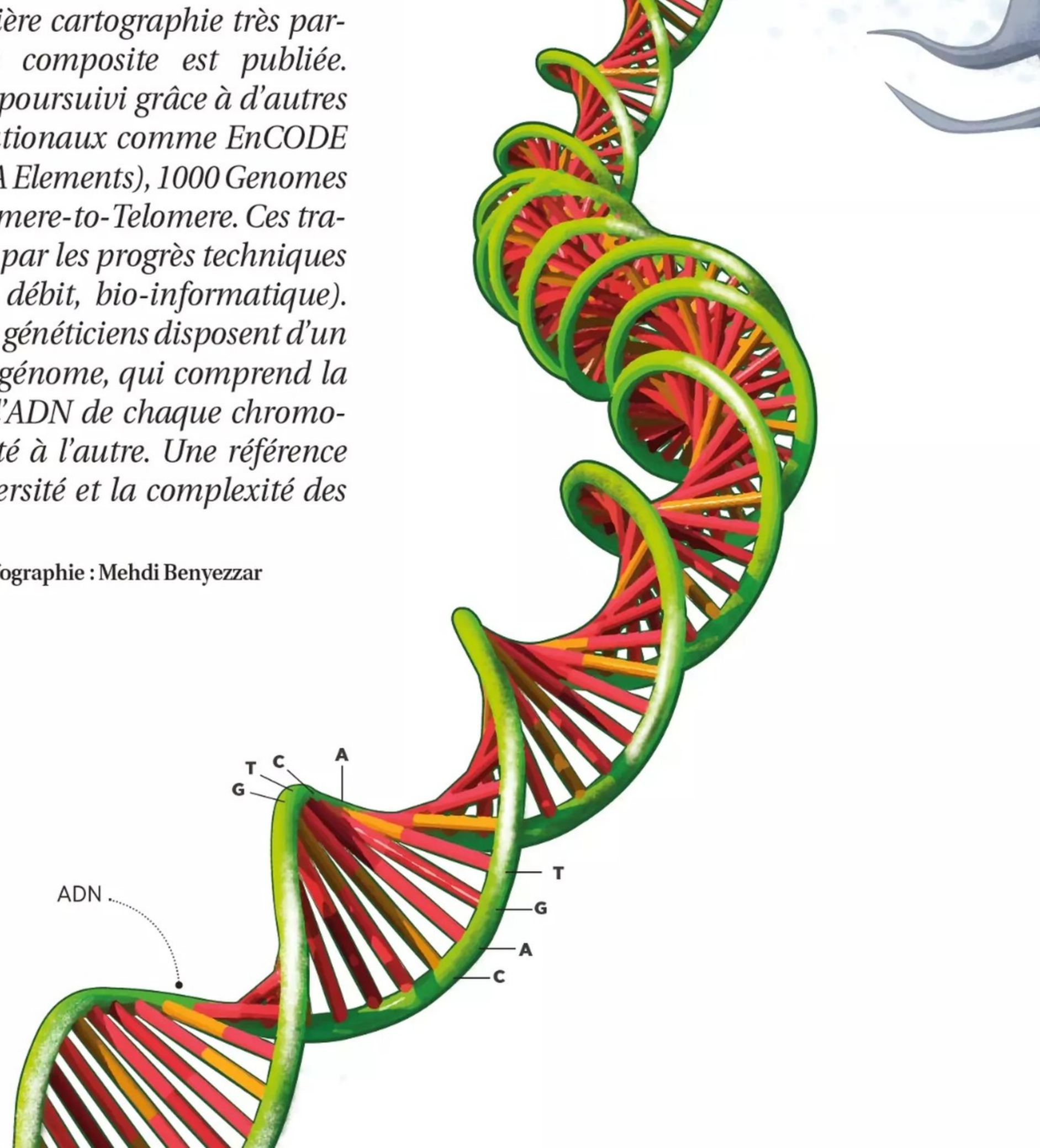
(6) D. R. Ceratti *et al., Adv. Mater., 34,* 2110239, 2022.

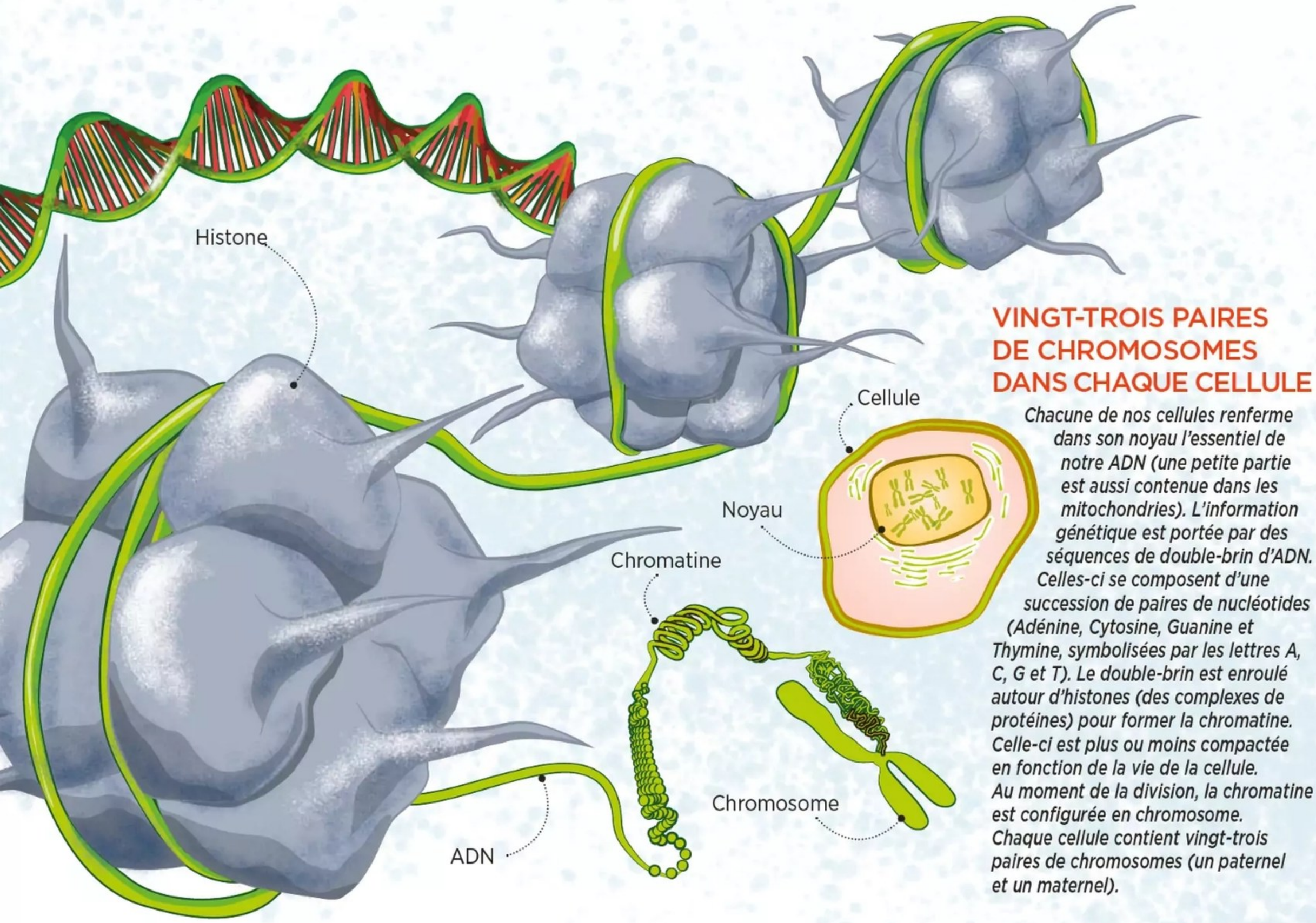
(7) D. R. Ceratti *et al., Mater. Horiz., 8,* 1570, 2021.

La carte du génome humain

Il y a vingt ans, en avril 2003, le projet génome humain, un effort de recherche international et collaboratif, était officiellement clos. À l'issue de ce travail, une première cartographie très partielle d'un génome composite est publiée. Depuis, l'effort a été poursuivi grâce à d'autres programmes internationaux comme EnCODE (Encyclopedia of DNA Elements), 1000 Genomes et le consortium Telomere-to-Telomere. Ces travaux ont été facilités par les progrès techniques (séquençage à haut débit, bio-informatique). Depuis avril 2022, les généticiens disposent d'un plan exhaustif d'un génome, qui comprend la séquence complète d'ADN de chaque chromosome, d'une extrémité à l'autre. Une référence pour explorer la diversité et la complexité des génomes humains.

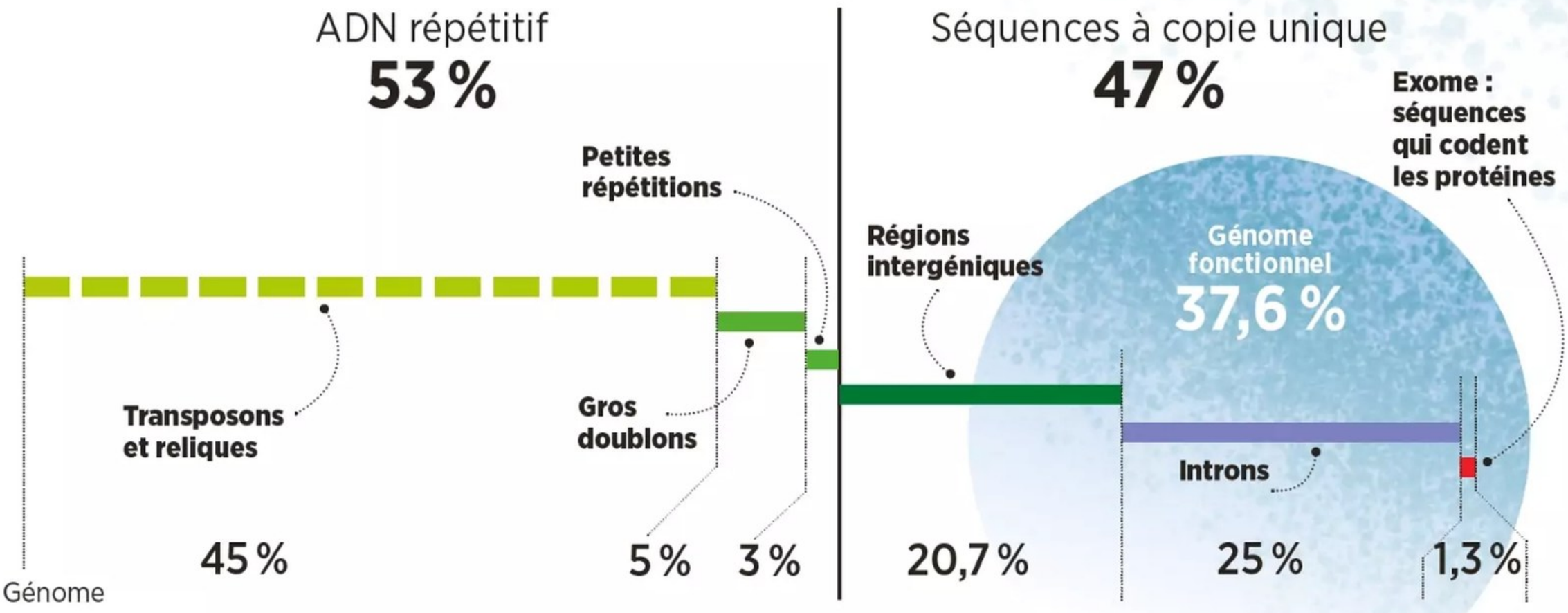
Texte : Mathias Germain - Infographie : Mehdi Benyezzar





VINGT-TROIS PAIRES DE CHROMOSOMES DANS CHAQUE CELLULE

Chacune de nos cellules renferme dans son noyau l'essentiel de notre ADN (une petite partie est aussi contenue dans les mitochondries). L'information génétique est portée par des séquences de double-brin d'ADN. Celles-ci se composent d'une succession de paires de nucléotides (Adénine, Cytosine, Guanine et Thymine, symbolisées par les lettres A, C, G et T). Le double-brin est enroulé autour d'histones (des complexes de protéines) pour former la chromatine. Celle-ci est plus ou moins compactée en fonction de la vie de la cellule. Au moment de la division, la chromatine est configurée en chromosome. Chaque cellule contient vingt-trois paires de chromosomes (un paternel et un maternel).



L'EXOME, SYNTHÉTISEUR DE PROTÉINES

Surprise, seulement 1,3 % des trois milliards de paires de nucléotides qui compose notre génome code l'information nécessaire à la synthèse des protéines : c'est l'exome. Pour le reste, notre ADN est composé de courtes séquences répétitives. Certaines d'entre elles sont des vestiges génétiques d'événements liés à notre évolution, comme des infections virales. En explorant cette partie de l'ADN, longtemps jugée inutile, les chercheurs ont découvert qu'elle code des petits ARN utiles au bon fonctionnement de la cellule : régulation de la transcription et de la traduction, organisation des chromosomes. Environ 37,6 % de notre génome (exome compris) sert au bon fonctionnement d'une cellule.

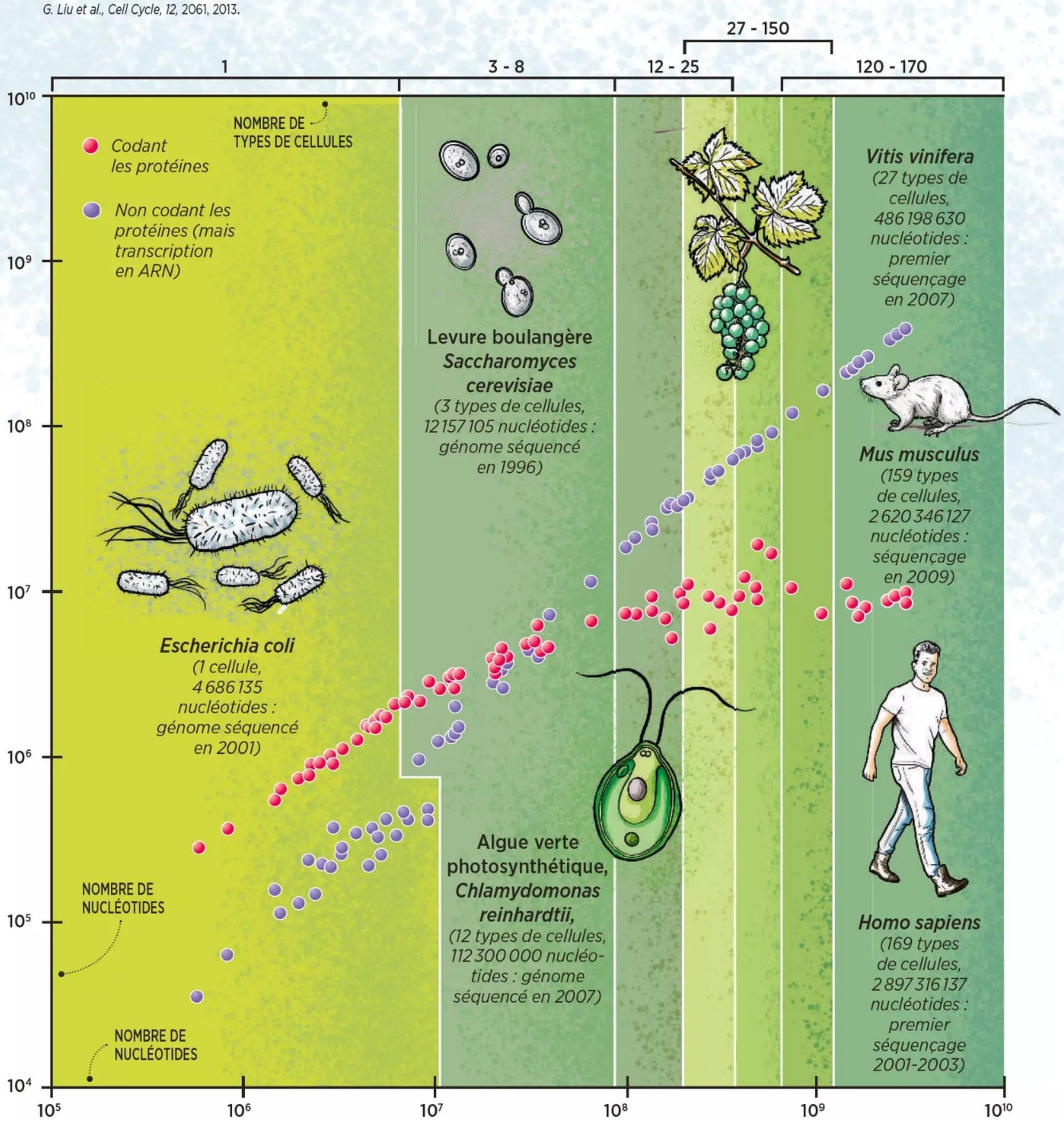
UN PAYSAGE ASSEZ DÉSERTIQUE

Une toute petite partie du génome sert à coder les protéines. En voici l'illustration sur un chromosome (en bleu, les zones qui codent des protéines). Ce chromosome 22 est l'un des plus petits de nos chromosomes non sexuels. Il est l'un des premiers à avoir été séquencé (en 1999). Il est composé de plus de 40 millions de paires de nucléotides. Près de 800 gènes ont été identifiés et 27 maladies génétiques ont été attribuées à des anomalies situées sur ce chromosome. Parmi celles-ci, on compte une maladie rare, le syndrome de DiGeorge : il manque, chez les personnes touchées, entre trente et soixante gènes sur l'un de leurs deux chromosomes 22.

LA COMPLEXITÉ D'UN ORGANISME NE TIENT PAS AU NOMBRE DE GÈNES

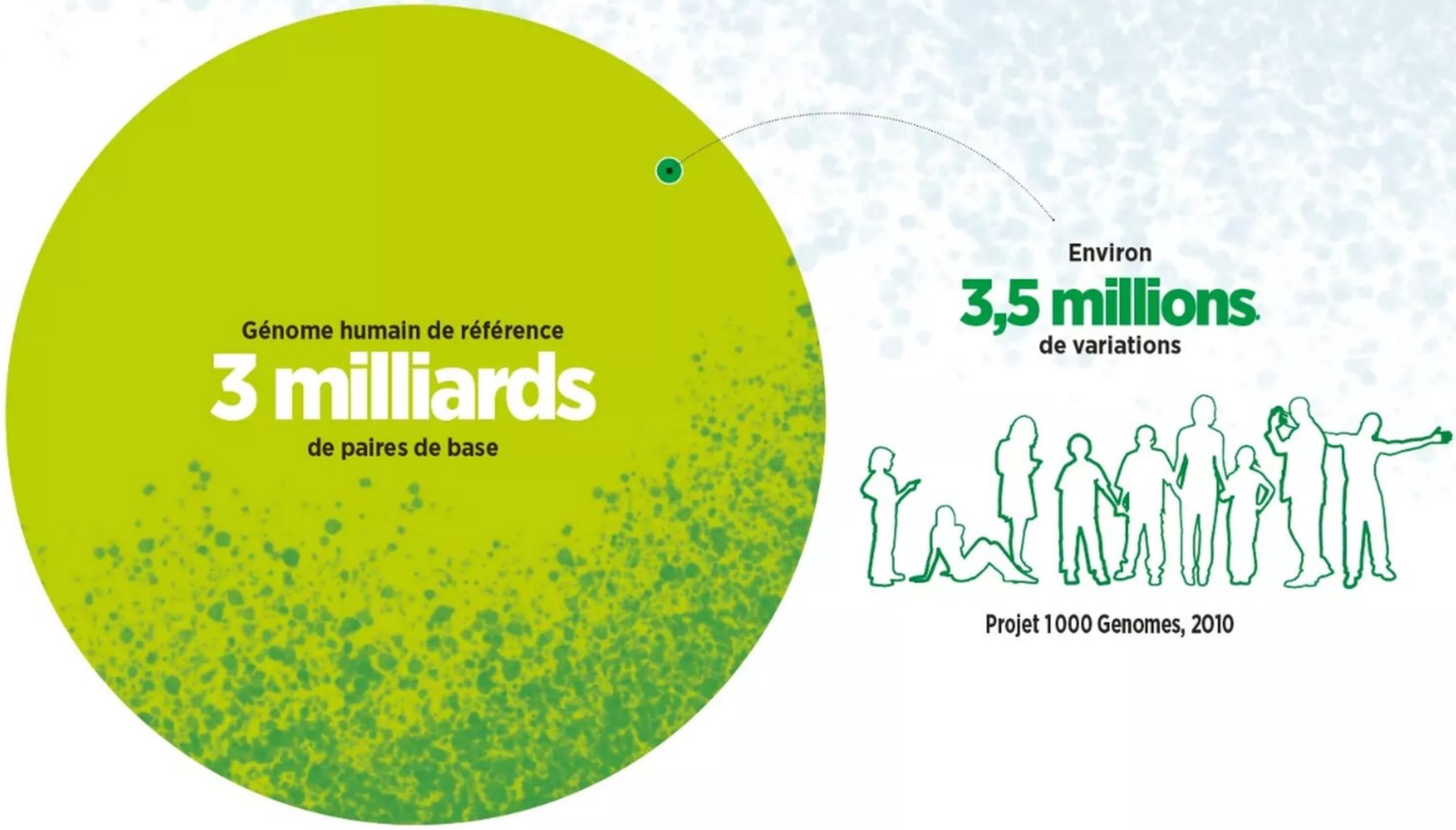
Une équipe de généticiens de l'université du Queensland, en Australie, a comparé 73 espèces dont le génome a été séquencé. Ils montrent que ni la longueur du génome, ni la taille de l'exome (partie qui code les protéines, en rouge), ne sont à l'origine de la complexité d'un organisme (illustrée par la variété de types cellulaires). Cette complexité semble reposer sur la partie ne codant pas les protéines (en bleu).

G. Liu et al., Cell Cycle, 12, 2061, 2013.



PLUS ON SÉQUENCE LES POPULATIONS, PLUS ON DÉCOUVRE DE VARIANTS

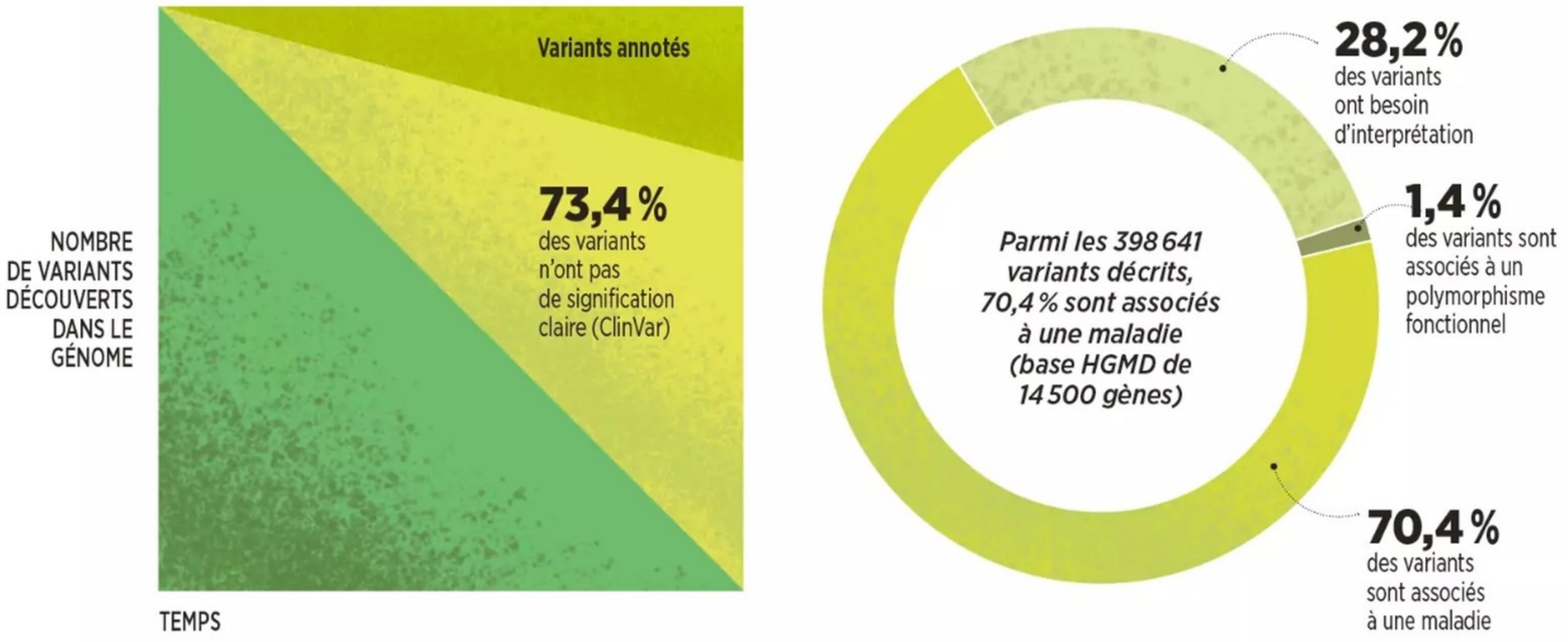
Si les humains partagent globalement le même génome, il existe des variations entre les individus. La majorité des variants génomiques sont des changements ponctuels entre deux nucléotides (A ou G, C ou T, etc.). Ce sont des variations de simples nucléotides. Mais il existe d'autres types de variations : il peut se produire des répétitions de petites séquences (3 à 4 nucléotides), ou de longues séquences (supérieure à 500 000 nucléotides).



LA CLASSIFICATION DES VARIANTS, UN ENJEU MAJEUR

Les variations du génome n'ont pas les mêmes conséquences sur la santé d'une personne. Certaines sont bégnines, d'autres pathogènes. Entre ces deux extrêmes, il y a des nuances, des variants probablement pathogènes ou bénins. En médecine, la grande mission du généticien est donc de les classer. Un travail immense : sur les 460 000 variations de simples nucléotides répertoriées dans la base ClinVar, 73,4 % n'ont pas de signification claire.

Bhat et al., Genetics in Medicine, 25, 16, 2023.



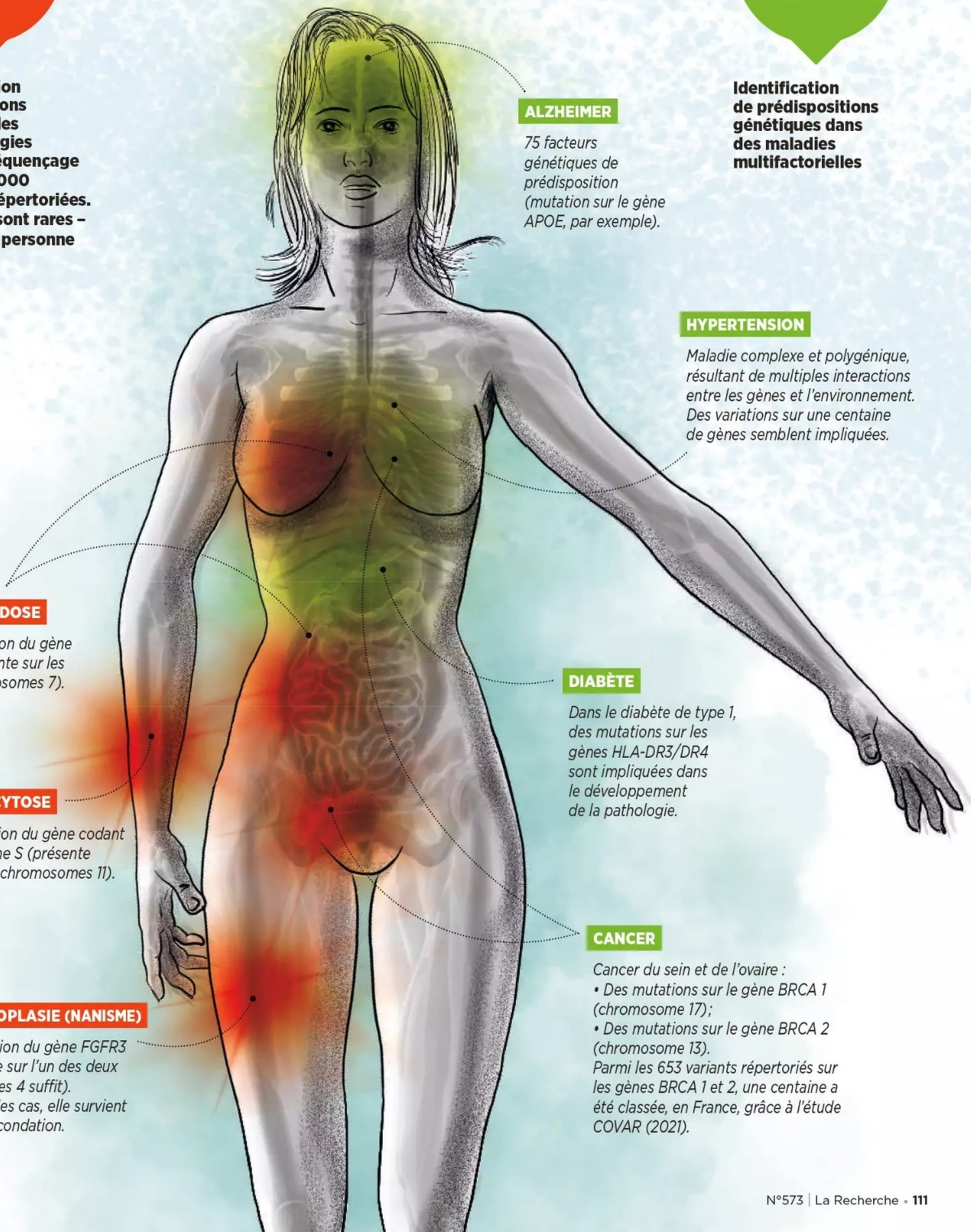
LES DÉCOUVERTES EN MÉDECINE À TRAVERS QUELQUES EXEMPLES

Maladies génétiques

Identification des mutations responsables de pathologies grâce au séquençage (environ 8 000 maladies répertoriées. la plupart sont rares – moins de 1 personne sur 2 000)

Maladies multi-factorielles

Identification de prédispositions génétiques dans des maladies multifactorielles



ALZHEIMER

75 facteurs génétiques de prédisposition (mutation sur le gène APOE, par exemple).

HYPERTENSION

Maladie complexe et polygénique, résultant de multiples interactions entre les gènes et l'environnement. Des variations sur une centaine de gènes semblent impliquées.

MUCOVISCIDOSE

• Une mutation du gène CFTR (présente sur les deux chromosomes 7).

DIABÈTE

Dans le diabète de type 1, des mutations sur les gènes HLA-DR3/DR4 sont impliquées dans le développement de la pathologie.

DRÉPANOCYTOSE

• Une mutation du gène codant l'hémoglobine S (présente sur les deux chromosomes 11).

CANCER

Cancer du sein et de l'ovaire :
• Des mutations sur le gène BRCA 1 (chromosome 17) ;
• Des mutations sur le gène BRCA 2 (chromosome 13).
Parmi les 653 variants répertoriés sur les gènes BRCA 1 et 2, une centaine a été classée, en France, grâce à l'étude COVAR (2021).

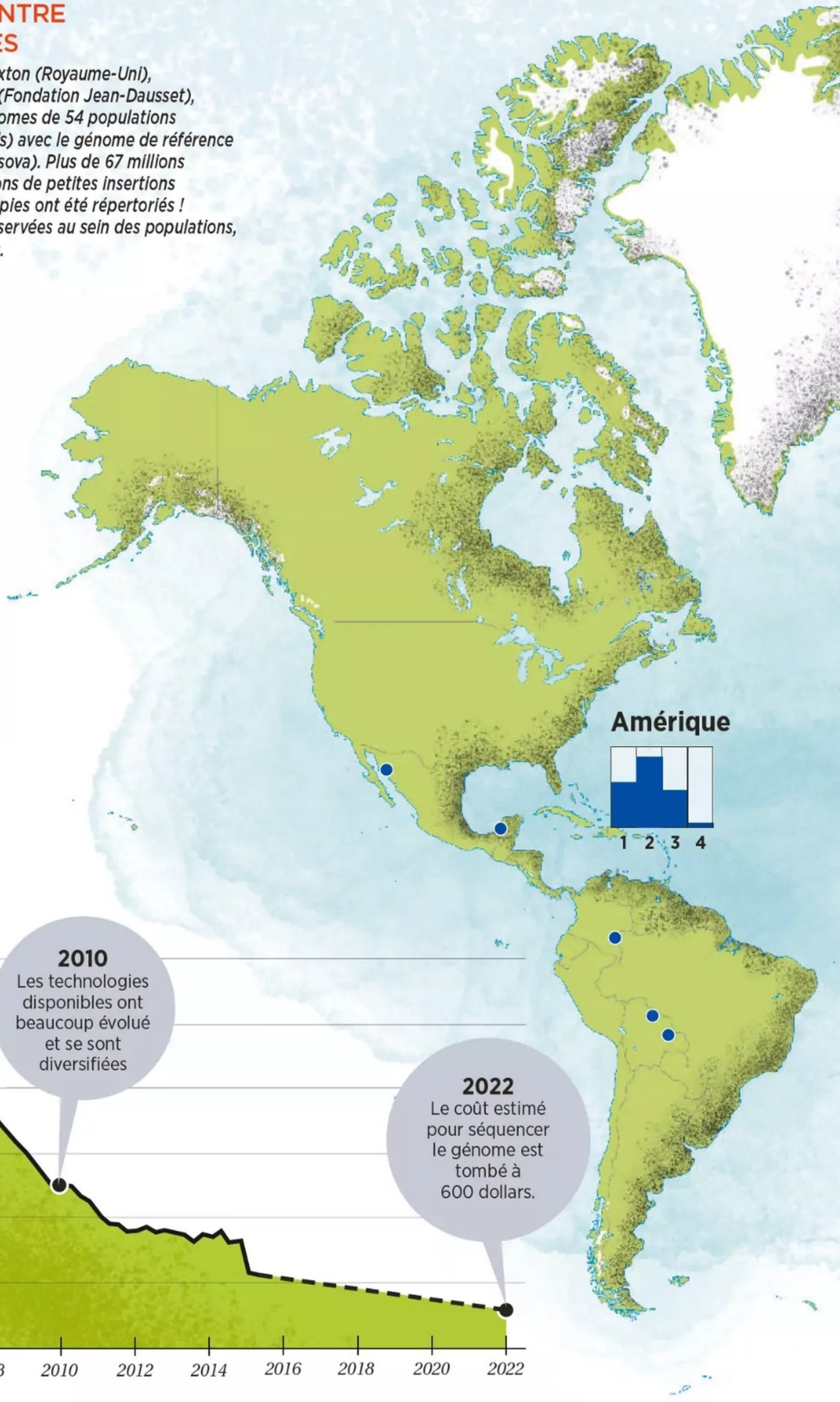
ACHONDROPLASIE (NANISME)

• Une mutation du gène FGFR3 (sa présence sur l'un des deux chromosomes 4 suffit). Dans 80 % des cas, elle survient lors de la fécondation.

PEU DE DIFFÉRENCIATION ENTRE LES POPULATIONS HUMAINES

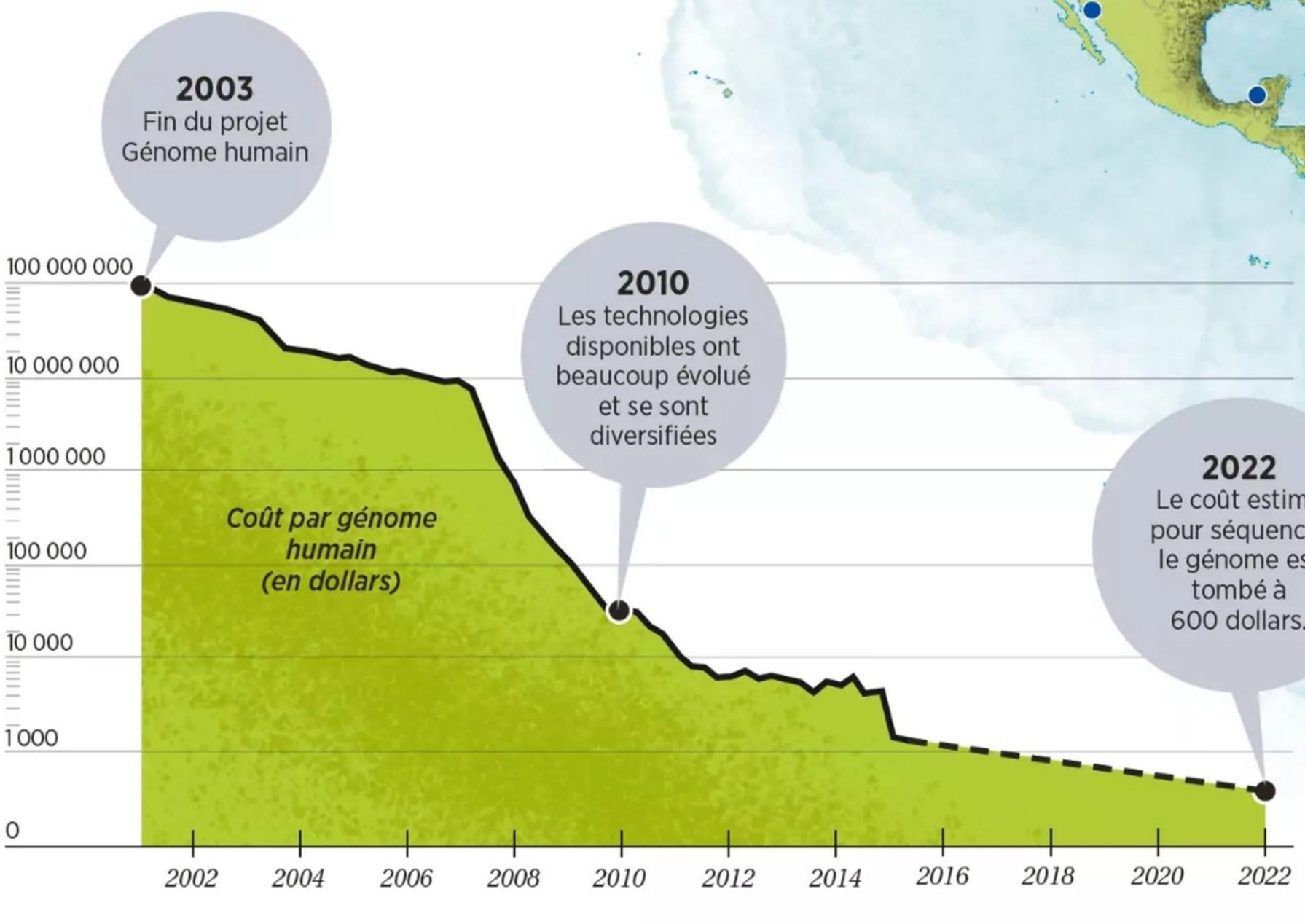
Des équipes du Wellcome Sanger Institute, à Hinxton (Royaume-Uni), et du Centre d'étude du polymorphisme humain (Fondation Jean-Dausset), à Paris, ont réalisé la comparaison entre 929 génomes de 54 populations humaines diverses (localisées par les points ronds) avec le génome de référence et trois génomes archaïques (Néandertal et Denisova). Plus de 67 millions de polymorphismes mononucléotidiques, 9 millions de petites insertions ou délétions et 40 000 variants en nombre de copies ont été répertoriés ! La plupart des variabilités génétiques ont été observées au sein des populations, avec peu de différenciation génétique entre elles.

A. Bergström et al., Science, 367, 6484, 2020.



SÉQUENÇAGE : PLUS PERFORMANT ET PLUS RAPIDE

Le prix des séquences de l'ADN a chuté de façon spectaculaire au cours de la dernière décennie, permettant de nombreuses autres applications.

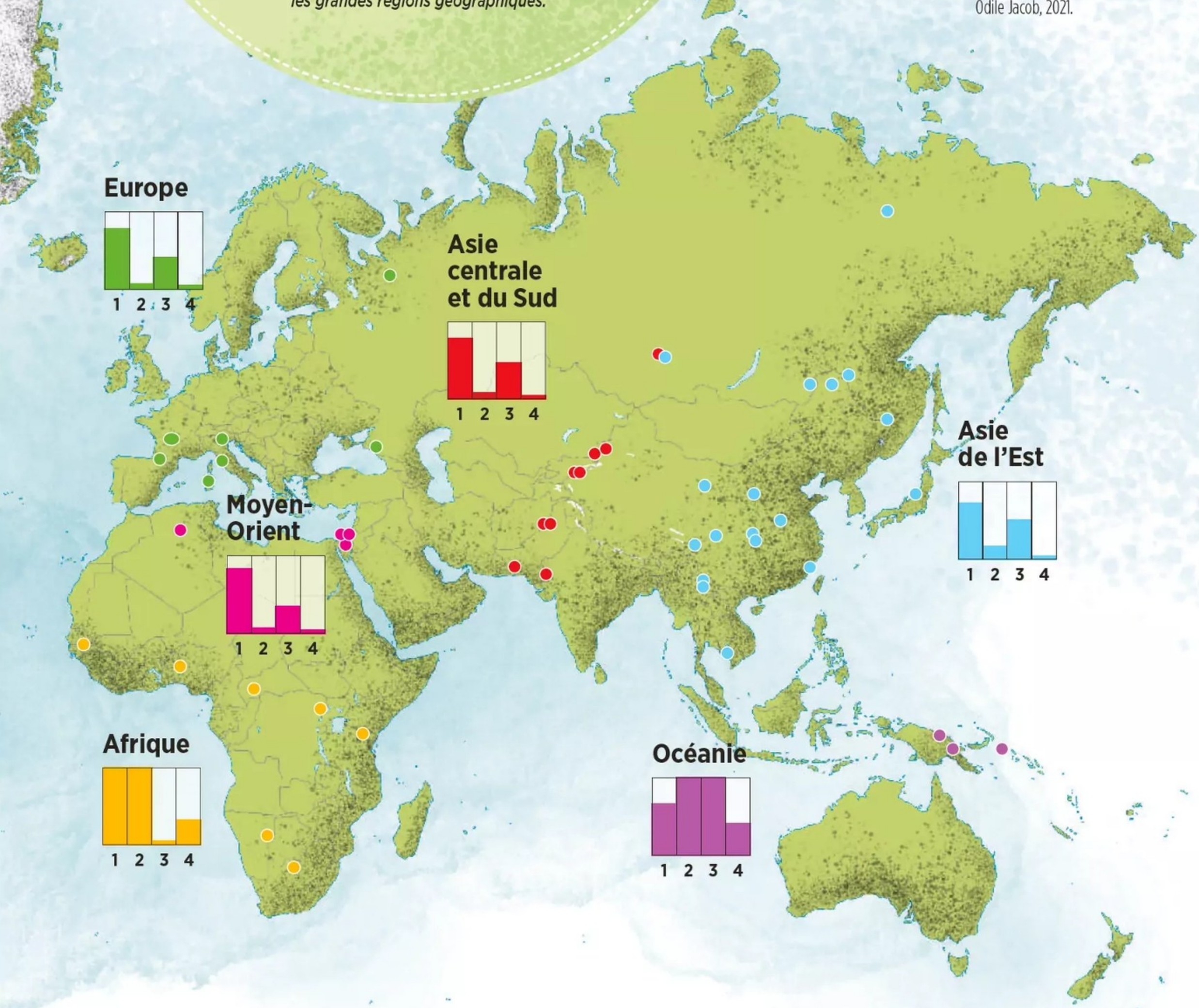


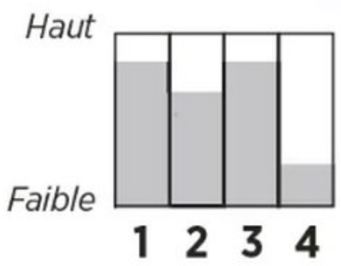
LES VARIANTS RARES DANS LES POPULATIONS OCÉANIENNES

Les populations d'Afrique centrale et australe, des Amériques et d'Océanie abritent chacune des dizaines à des centaines de milliers de variants génétiques rares et communs. La plupart de ces variants sont issus de nouvelles mutations plutôt que d'hybridations archaïques (Néandertal et Denisova). Sauf dans les populations océaniennes, où de nombreux variants rares dérivent d'un mélange avec Denisova. Bien que certains atteignent des fréquences élevées, aucun variant n'est fixé entre les grandes régions géographiques.

POUR EN SAVOIR PLUS

- Dominique Stoppa-Lyonnet et Stanislas Lyonnet, *Les 100 mots de la génétique*, Que sais-je ?, 2022.
- Lluis Quintana-Murci, *Le Peuple des humains*, Odile Jacob, 2021.





Comparaison des variations génétiques entre populations

1 • Variation totale *par rapport à la valeur la plus élevée (Afrique).*

2 • Variant rare et commun *par rapport à la valeur la plus élevée (Afrique/Océanie).*

3 • Variation dérivant d'un mélange archaïque *par rapport à la valeur la plus élevée (Océanie).*

4 • Variation commune partagée avec les génomes archaïques *Fraction de variation rare.*

NASKRECKI & GUYTON/NATURE PL - N. GONZAGUE/DIVERGENCE - Y. SHIMIZU.





Benjamin Roche
ÉCOLOGUE, IRD, MONTPELLIER
Directeur de recherche, il étudie les interactions entre processus écologiques et sociétaux dans la propagation d'agents pathogènes.



Sylvie Briand
MÉDECIN, OMS, GENÈVE
Directrice du département de prévention des épidémies et des pandémies à l'OMS.



Mieux évaluer le risque des zoonoses

Agents infectieux aptes à se transmettre de l'animal à l'humain, les zoonoses montent en puissance en ce début de XXIe siècle avec plusieurs émergences chaque année. Échaudés par les grippes aviaires et surtout la pandémie de Covid-19, chercheurs et organisations internationales travaillent de concert pour prévenir ces épidémies de plus en plus fréquentes. La baisse de la biodiversité, favorisée par les activités humaines et le changement climatique, est la principale cause de ces résurgences, qu'elles proviennent d'Afrique, d'Amérique ou d'Asie.

◀ *Une chauve-souris en fer à cheval de Lander* (Rhinolophus landeri) *en vol, dans le parc national de Gorongosa (Mozambique). Les chauves-souris pourraient constituer un réservoir animal du virus Ebola, un agent infectieux qui provoque chez l'humain des fièvres hémorragiques.*

La plupart des maladies qui ont touché les humains depuis des siècles proviennent des animaux. Prenons une pathologie humaine aussi commune que la rougeole. On sait depuis une dizaine d'années que celle-ci résulte d'une adaptation du virus de la peste bovine, même si l'époque où celle-ci s'est produite est encore discutée (1). L'exemple de la variole est lui aussi intéressant, car c'est autour de ce virus qu'est né le concept de vaccination, à la fin du XVIIIe siècle : c'est en injectant le virus de la vaccine – la variole de la vache – que le médecin anglais Edward Jenner (1749-1823) s'est rendu compte que l'on pouvait protéger les humains. Parfois, il faut du temps pour établir des liens entre maladie animale et maladie humaine : 80 ans, par exemple, pour comprendre l'origine du VIH, le virus du sida. Une étude publiée en 2015 a montré que le virus simiesque SIV circulait chez le chimpanzé et le gorille, et s'est adapté à l'humain en Afrique centrale au milieu du XXe siècle pour devenir le VIH (2). Parmi les principaux virus émergents, tels que le virus de Lassa ou Ebola, les chauves-souris seraient en cause. Quant au SARS-CoV-2, responsable de la pandémie de Covid-19, bien que la transmission initiale ne soit pas encore établie, beaucoup de données vont dans le sens d'une émergence naturelle à partir d'un réservoir animal.

Malgré un biais de surveillance certain – on détecte mieux les infections zoonotiques, notamment grâce aux nouvelles technologies –, l'augmentation des maladies émergentes ne fait pas de doute : on en compte quatre fois plus aujourd'hui qu'il y a quarante ans. Cette tendance résulte de l'accroissement de la densité de population, qui favorise la transmission, et d'une mobilité humaine en hausse, qui facilite la dissémination en dehors des zones d'émergence. Toute épidémie peut ainsi se transformer rapidement en pandémie. Or, on estime qu'il y a environ 1 500 000 virus inconnus, dont 500 000 à 800 000 peuvent toucher les humains (3).

Où se produisent les émergences ? Principalement dans les milieux à forte biodiversité, et là où les espèces cohabitent. L'activité humaine s'étant développée dans ces régions, la biodiversité a chuté et les émergences ont augmenté. C'est le cas d'Ebola en Afrique centrale, des coronavirus en Asie et au Moyen Orient, ou de la grippe au Mexique. Des programmes de recherche ont été proposés ces dernières années en réponse aux épisodes de grippe aviaire ou à la pandémie de Covid-19, afin de prévenir de telles zoonoses – qui représentent les trois quarts des maladies humaines émergentes sur Terre. L'initiative internationale Prezode (*), qui regroupe plus de 180 institutions et dix-huit gouvernements, en fait partie. Lancée en 2021, elle vise à créer des synergies afin de prévenir de futures pandémies. Elle s'inscrit dans le mouvement One Health (*) (« une seule santé ») qui concrétise une idée connue depuis un siècle, selon laquelle les santés humaine, animale et environnementale sont interdépendantes.

LES VIRUS ÉVOLUENT EN SE COMBINANT

Pour tenter de prévenir les zoonoses à venir, encore faut-il comprendre par quels mécanismes ces phénomènes se produisent. Un agent pathogène zoonotique est un agent infectieux, virus ou parasite, qui peut passer de l'animal à l'humain et de l'humain à l'animal. Beaucoup de pathogènes sont des zoonoses potentielles, mais le passage effectif dépend de multiples facteurs, en particulier du taux de contact avec le réservoir animal. Prenons la grippe aviaire, qui se transmet par les oiseaux sauvages et affecte les volailles domestiques. Si le risque est réel qu'elle s'adapte à l'humain puis qu'une transmission interhumaine ait lieu, les grippes aviaires ne sont cependant pas les plus dangereuses pour notre espèce. En effet, celles fortement pathogènes semblent avoir plus de mal à s'adapter à l'humain que celles qui sont faiblement pathogènes (ces

(*) **Prezode (Prévenir l'émergence des maladies zoonotiques et des pandémies)** est un programme à visée de recherche et opérationnel lancé en 2021 sous l'égide de la France. Porté par l'Inrae, le Cirad et l'IRD, il a été construit par plusieurs centaines d'acteurs à travers le monde.

(*) **One Health** est un concept apparu en 2004 visant à mettre en œuvre au niveau mondial des programmes faisant le lien entre santé humaine, animale et environnementale. Cette approche intégrée est particulièrement importante pour la sécurité alimentaire, la lutte contre les zoonoses et celle contre la résistance aux antibiotiques. Elle est portée par l'OMS, l'OMSA (santé animale), la FAO et le programme des Nations unies pour l'environnement.

dernières circulant davantage à bas bruit). En revanche, la situation se complique lorsque les épidémies touchent les élevages porcins, car les porcs peuvent être infectés à la fois par des virus de grippe aviaire et humaine. Or, les virus grippaux évoluant en se combinant, de tels réassortiments peuvent alors avoir lieu au sein de la population porcine et « produire » un virus très différent de celui qui circule habituellement, potentiellement plus néfaste et directement transmissible entre humains. La barrière entre espèces, censée nous protéger, n'est ainsi pas imperméable. Parfois, ce n'est alors qu'une question de temps avant qu'une zoonose se transforme en maladie humaine.

PLUS IL Y A D'ESPÈCES DIFFÉRENTES, PLUS LA TRANSMISSION EST ENTRAVÉE

Au premier rang des causes expliquant cette hausse des zoonoses : la perte de biodiversité et plus particulièrement la déforestation. Cette dernière est bien documentée à travers le monde. Il s'agit en effet d'un phénomène visible et quantifiable, notamment par imagerie satellite, dont les réseaux couvrent aujourd'hui la totalité du globe. Entre 1990 et 2000, la perte de surface forestière mondiale représentait ainsi environ 1,7 million de kilomètres carrés, soit trois fois la superficie de la France (4).

La méthodologie d'évaluation de la biodiversité a évolué. Pendant longtemps, on utilisait des méthodes dites « de capture-recapture » : on capturait des animaux que l'on marquait avant de les relâcher, et que l'on parvenait parfois à recapturer par la suite. À l'aide de modèles statistiques, on parvenait alors à estimer le nombre d'espèces dans chacun des écosystèmes étudiés (5). Aujourd'hui, s'ajoutent à cela des méthodes puissantes qui exploitent l'ADN environnemental. En prélevant des échantillonnages dans le sol, dans l'eau ou même dans l'air, on retrouve ainsi des fragments d'ADN d'espèces animales que l'on peut quantifier. Ces méthodes, en pleine expansion, commencent à donner des résultats sur la surveillance de la biodiversité et permettent de conclure à un taux d'extinction cent fois plus important que ceux estimés d'après les registres fossiles (6).

Le lien entre déforestation et biodiversité se comprend facilement : lorsque les surfaces forestières diminuent, les niches écologiques font de même, et les espèces doivent se déplacer, s'adapter – mais elles n'en ont pas forcément le temps – ou s'amenuisent. Le lien entre perte de biodiversité et émergence des maladies infectieuses, lui, s'explique par l'« effet de dilution ». Celui-ci a été mis en évidence pour de multiples maladies, telle la maladie de Lyme, aux États-Unis, qui se transmet via des tiques infectées par la bactérie *Borrelia burgdorferi*. La diminution de la population de grands prédateurs comme le loup – notamment via la chasse –, a entraîné une augmentation de certaines espèces de cervidés telles que le chevreuil et le cerf. Cette perte de régulation naturelle pose problème. De nombreux cervidés sont en effet de bons « hôtes » de la bactérie et de surcroît servent de repas aux tiques infectées. En conséquence, les hôtes intermédiaires se multiplient en même temps que les tiques. Ce foisonnement profite à la circulation des agents infectieux.

Aux méthodes de capture-recapture s'ajoutent celles qui exploitent l'ADN présent dans le sol, dans l'eau et même dans l'air

À l'inverse, avec beaucoup d'espèces différentes, la transmission est ralentie. La raison ? La population des organismes où l'agent pathogène peut se développer est régulée par les prédateurs. Ces espèces hôtes entrent aussi en concurrence avec d'autres espèces moins compétentes. Dans ces dernières, le pathogène ne pourra pas se développer et mourra. C'est le cas pour le virus de la fièvre du Nil occidental dont les vecteurs passerelles sont des moustiques qui permettent au virus de passer du cycle moustiques-oiseaux-moustiques aux mammifères. En Amérique du Nord, il a été constaté qu'une biodiversité élevée d'oiseaux diminuait la transmission du virus. Les oiseaux « hôtes » côtoyaient des oiseaux moins compétents, ce qui assurait une certaine régulation.

Ainsi, lorsque la biodiversité diminue, on perd une partie des espèces qui ne peuvent pas être infectées et qui constituaient des freins naturels

à la transmission. Plus précisément, les microbes sont généralement adaptés aux espèces les plus abondantes (parce que cela maximise leur transmission). En conséquence, les espèces les moins abondantes sont les moins compétentes, et comme ce sont elles qui disparaissent en premier, on se retrouve avec une proportion plus grande d'espèces qui peuvent transmettre. C'est alors que l'on aboutit à une augmentation de la transmission de ces maladies dans les écosystèmes. En résumé, dans un environnement plus divers, les pathogènes se répartissent sur les différentes espèces, chacune subissant moins de pression. Tout ce qui perturbe le fonctionnement d'un écosystème (déforestation, commerce de la faune sauvage, urbanisation, entre autres) est susceptible d'augmenter le risque d'émergence d'une épidémie.

Tout ce qui perturbe le fonctionnement d'un écosystème est susceptible d'augmenter le risque d'émergence d'une épidémie

Lorsqu'une épidémie ou une pandémie est déclarée, c'est-à-dire une fois que le virus est présent et se transmet dans la population, ce sont surtout les aspects médicaux qui sont importants : développer des vaccins plus rapidement, mettre au point et évaluer des thérapies. À propos du Covid-19, on s'est d'ailleurs rendu compte que certains aspects avaient été mal évalués ou n'avaient pas été envisagés, comme la fatigue des populations lors des confinements.

Avant la survenue de l'épidémie, les approches de type One Health comme celle de Prezode, qui consistent à surveiller, évaluer et réduire les risques, sont primordiales. La surveillance, l'évaluation et la prévention se font à plusieurs niveaux. Tout d'abord, des dispositifs de surveillance de la santé animale existent dans les régions où des virus animaux sont présents. C'est le cas dans les pays occidentaux, où des normes de sécurité extrêmement strictes ont été mises en place pour les grands élevages de volailles ; ces normes aboutissent à l'abattage en cas de foyer épidémique. En France, près de 5 millions de volailles ont ainsi été abattues depuis l'été 2022 à cause d'une flambée de grippe aviaire inédite en Europe (7). Le résultat de cette surveillance est que le contrôle sanitaire permet de préserver les populations, alors que le nombre de foyers infectieux dans les exploitations de volailles a doublé en un an. Mais cela entraîne des difficultés pour les producteurs, de sorte que la production se déplace, et pas n'importe où : dans des zones aux normes sanitaires moins contraignantes, telles que le Mexique ou l'Asie du Sud-Est. C'est pourquoi le contrôle des épidémies doit s'accompagner de mesures sociales de dédommagement des éleveurs, en particulier dans les pays en développement. Faute de quoi les petits producteurs évitent de déclarer les épidémies chez leurs animaux.

CE QUI SE PASSE DANS LE YUCATAN PEUT AVOIR UNE INCIDENCE GLOBALE

Afin de mieux prévenir les zoonoses, bon nombre d'écologues ont installé des laboratoires dans des « points chauds » du globe, c'est-à-dire des zones où la menace est la plus forte. Notre collègue Serge Morand, du CNRS, s'est installé en Thaïlande et l'un de nous (Benjamin Roche) a fondé un laboratoire international au Mexique, dans l'État du Yucatan, précisément pour cette raison. La péninsule du Yucatan déplore l'une des plus fortes pertes de biodiversité au monde – elle a perdu 50 % de sa jungle en trente ans –, et c'est aussi l'un des États les plus pauvres du pays. Par ailleurs, ses côtes touristiques sont reliées par dix vols quotidiens à la ville de Mexico, une mégalopole de 25 millions d'habitants elle-même connectée avec le reste de la planète. Ainsi, ce qui se passe dans le Yucatan peut *in fine* poser un problème pandémique global. Dans de tels points chauds, l'objectif est de parvenir à gérer les écosystèmes de manière à les rendre plus résilients face à l'émergence des zoonoses. Autrement dit, on tente d'élaborer des stratégies gagnant-gagnant entre protection de la biodiversité et émergence des maladies infectieuses. Mais il faut aussi assurer la sécurité alimentaire et les revenus des populations locales. C'est pourquoi il importe de construire ces stratégies de gestion des écosystèmes avec

tous les acteurs : agriculteurs, entreprises de l'agroalimentaire, professionnels du tourisme. Car si l'on ne parvient pas à mettre en œuvre des solutions durables avec toutes les parties prenantes, cela ne fonctionnera pas. Si l'on se contente d'édicter une loi qui interdit la déforestation, celle-ci se poursuivra le lendemain, mais de manière illégale…

CONSTRUIRE UNE COORDINATION INTERNATIONALE

Nous espérons faire en sorte que le Yucatan devienne la première zone au monde à bénéficier d'une stratégie combinant surveillance et prévention, qui aura été conçue et mise en place par les différentes parties prenantes. Nous y avons choisi quinze sites allant de zones entièrement déforestés à des zones intégralement préservées. Ce sont des sortes de ranchs expérimentaux où l'on pratique des techniques d'agroécologie et d'agriculture sylvo-pastorale. Autour de ces sites, nous capturons des rongeurs, chauves-souris, oiseaux et moustiques, dont nous étudions les pathogènes. Nous échantillonnons également les populations humaines qui vivent aux alentours. Le but est de repérer quels sont les réseaux de transmission entre les différentes espèces et les populations humaines. Nous travaillons avec des anthropologues, mais aussi avec des sociologues, afin de comprendre comment les groupes humains vivant sur place en viennent à être exposés à ce qui circule dans la faune sauvage.

D'ici la fin de cette année, forts de toutes nos études, nous serons en mesure de proposer un plan pratique préconisant à quels endroits il faudrait mettre en place tel type de conservation, et à quels endroits on peut laisser la situation en l'état, à condition d'augmenter la surveillance de l'interface animal-humain, car on sait qu'il peut y avoir une transmission interespèce de tel ou tel virus. Dans certaines zones, nous proposerons l'introduction d'espèces dites « sentinelles », réceptives à certains types de virus, afin d'examiner ce qui circule et de disposer de systèmes d'alerte précoce.



▲ *Échantillonnage de terrain dans la péninsule du Yucatan, au Mexique, par le laboratoire Eldorado. En haut, un pic à front doré* (Melanerpes aurifrons)*; en bas, un rat grimpant à grandes oreilles* (Ototylomys phyllotis).

AARON RODRIGUEZ BLANCO

Par ailleurs, il est essentiel de connecter entre elles ces différentes initiatives dans le monde, en les adaptant au contexte local, car ce que nous développons au Mexique ne sera pas directement applicable en Thaïlande ou en Afrique centrale. Il faut aussi partager les connaissances et construire une coordination internationale. C'est là que les initiatives comme Prezode prennent tout leur sens. Par exemple, nous avons démarré un groupe de travail entre l'OMS et Prezode, qui vise à mettre au point des indicateurs du risque d'émergence des zoonoses adaptés aux différentes régions. Ni les organismes de recherche ni l'OMS ne pouvant se substituer aux États, il s'agit de mesurer le risque dans les différents points chauds du globe, et de fournir des outils sur lesquels les politiques publiques peuvent s'appuyer pour prendre des décisions. Il s'agit aussi d'encourager les pays, partout sur la planète, à investir beaucoup plus dans les activités de prévention : par exemple, la fourniture de masques aux professionnels de santé, de gants, d'eau courante dans les postes de soins, de formations spécifiques, dans les zones à haut risque d'émergence, afin de contenir la flambée épidémique dès son origine. Les zones les plus menacées sont en général les plus reculées et les plus défavorisées, elles sont aussi celles où l'investissement a manqué. L'idée est donc non seulement de permettre d'investir plus, mais aussi de pousser l'aide internationale à soutenir ces pays qui en ont besoin. ■

(1) Y. Furuse *et al.*, *Virol. J.*, *7*, 52, 2010 ; A. Düx *et al.*, *Science, 368*, 1367, 2020.

(2) M. D'arc *et al.*, *PNAS, 112*, E1343, 2015.

(3) Rapport IPBES, « Biodiversité et pandémies » : https://ipbes.net/sites/default/files/2020-11/201104_IPBES_Workshop_on_Diversity_and_Pandemics_Executive_Summary_Digital_Version.pdf

(4) Rapport FAO, « Évaluation des ressources forestières mondiales », doi : 10.4060/ca8753fr, 2020.

(5) J.-D. Lebreton *et al.*, *Ad. Ecol. Re.*, *41*, 87, 2009.

(6) Rapport IPBES, doi : 10.5281/zenodo/6417333, 2019.

(7) https://www.efsa.europa.eu/fr/news/avian-influenza-unprecedented-number-summer-cases-europe



Entretien avec **Sylvia Serfaty**

PROFESSEURE À L'INSTITUT COURANT DE L'UNIVERSITÉ DE NEW YORK

“J'AIME LA PUISSANCE DE L'ANALYSE MATHÉMATIQUE”

Mathématicienne de renom naviguant entre Paris et New York, Sylvia Serfaty est spécialiste des équations aux dérivées partielles, qui modélisent quantité de phénomènes naturels et de physique mathématique. L'objectif des mathématiques n'est pas de résoudre ces équations ni de trouver des solutions explicites, mais de comprendre leurs propriétés fondamentales, en vue d'asseoir les théories sous-jacentes. Se sentant profondément analyste, elle a mis au point des outils permettant de passer de ces équations continues à un modèle discret de points en interaction.

BERNARD MARTINEZ POUR LA RECHERCHE

La Recherche **Vous êtes spécialiste d'un vaste domaine de l'analyse que l'on nomme équations aux dérivées partielles (EDP) et du calcul des variations. Pouvez-vous définir ce que représentent ces équations ?**

Sylvia Serfaty Ce qu'on apprend en général au lycée sont des équations différentielles ordinaires, qui relient une fonction et ses dérivées (par rapport à une seule variable). Les équations différentielles décrivent par exemple des phénomènes physiques simples : le principe fondamental de la dynamique – également connu sous le nom de deuxième loi de Newton –, selon lequel la force qui s'exerce sur un objet est égale au produit de la masse de cet objet et de son accélération, en est un exemple où la variable est le temps. Cela permet de décrire, par exemple, le mouvement des planètes ou celui d'un pendule. Toutefois, au cours des XVIII^{e} et XIX^{e} siècles, les physiciens ont commencé à vouloir comprendre d'autres phénomènes de la nature, comme la propagation du son ou le mouvement des fluides. Or, on se rend

compte que les équations qui modélisent ces phénomènes mélangent des dérivées par rapport à plusieurs variables – le temps et la position par exemple. Parmi les premières équations de cette nature qui ont marqué l'histoire des sciences, on trouve l'équation d'écoulement des fluides d'Euler (1757), celle de la propagation des ondes de d'Alembert (1746), ou encore celle de la diffusion de la chaleur de Fourier (1807). Elles sont omniprésentes dans les sciences, en particulier en physique. Au cours du XXe siècle, la théorie de ces équations s'est considérablement développée, au point qu'il s'est créé des lieux dédiés à leur étude : le laboratoire Jacques-Louis Lions, à Sorbonne Université, fondé en 1969, est l'un des plus gros laboratoires de mathématiques sur ce domaine et se consacre à ces équations ainsi qu'à leurs approximations numériques. Le Courant Institute, à New York, est aussi historiquement spécialisé dans l'analyse et les équations aux dérivées partielles.

Comment en êtes-vous arrivée à devenir mathématicienne ?

L'élément déclencheur s'est fait au lycée, en classe de première. Notre professeur nous avait donné un exercice particulièrement difficile à faire à la maison. J'ai tourné et retourné l'exercice dans ma tête pendant longtemps et j'ai fini par le résoudre, mais en trouvant une généralisation sous forme d'une inégalité fonctionnelle. C'est alors que je me suis rendu compte que j'avais bien aimé cette démarche de chercher à résoudre un problème, de buter, de revenir en arrière, d'errer et finalement de trouver. Durant ce cheminement, je n'avais pas vu le temps passer. Cela a été une sorte de déclic où je me suis dit : pourquoi ne pas essayer de faire de la recherche en mathématiques ? Le métier de chercheur était assez vague pour moi, j'en avais une idée un peu « romantique », mais ayant trouvé cette matière où j'avais une certaine facilité et un plaisir à chercher, je me suis dit, pourquoi pas ? Cela faisait rêver.

La concrétisation de ce rêve a-t-elle été facile ?

J'ai suivi les études classiques du système français : classes préparatoires aux grandes écoles – où il a fallu que je m'endurcisse, à cause de l'esprit de compétition de certains camarades et, parfois, du manque d'encouragements –, puis l'École normale supérieure (ENS). Là, les choses se sont ouvertes.

Vous vous étiez approchée de votre but ?

En arrivant à l'ENS, les choses ont été plus faciles. Mais j'ai eu un moment de doute : était-ce vraiment des mathématiques que je voulais faire ? La physique m'apparaissait alors un domaine dans lequel je pourrais peut-être être plus utile à la société, plus proche du concret. Finalement, les cours de physique que j'ai suivis m'ont confortée dans le choix de poursuivre en mathématiques. Tous les cours n'étaient pas extraordinaires, mais la démarche était là : on pouvait se référer à une définition, comprendre de quoi on parlait, et les notations étaient définies ! J'aimais bien l'algèbre mais, à ce niveau, cela commençait à être difficile pour moi. Pour être sûre de mon choix, j'ai tout de même fait mon stage d'analyse d'article de première année sur un sujet d'algèbre, qui portait sur la théorie des immeubles *[une théorie due au mathématicien belge Jacques Tits (1930-2021), liée à la compréhension des groupes de Lie d'un point de vue géométrique]*. Et, je n'ai rien compris… C'était difficile d'avoir une intuition, une représentation visuelle. Là encore, cela a clarifié la situation : je ferai plutôt de l'analyse au sens large.

Faites-vous une différence entre les algébristes et les analystes ?

Fondamentalement, je pense que nous n'avons pas le cerveau connecté de la même façon. Je crois que les algébristes font du Rubik's Cube dans leur tête ; ce sont comme des machines opératoires qui voient les structures et manipulent des objets discrets. Alors qu'un analyste, ou quelqu'un qui fait de la géométrie différentielle, voit du continu, de l'étendue. On compare des quantités : est-ce que telle quantité est petite ? Est-ce qu'elle est grande ? Qu'est-ce qui est négligeable ? Est-ce que le dessin est lisse ? C'est visuel.

Une nouvelle révélation pour vous ?

Oui, et cela s'est poursuivi par la suite. En suivant le cours d'analyse de Yann Brenier, tout était limpide et clair. L'objectif était d'introduire les équations aux dérivées partielles, mais aussi de l'analyse fonctionnelle *[branche de l'analyse qui étudie les espaces de fonctions]*. Il parvenait à

BIO

- **1975** Naissance à Paris.
- **1994** Entre à l'École normale supérieure, à Paris.
- **1999** Doctorat à l'université Paris-Sud (Orsay) ; recrutée au CNRS.
- **2001** Elle prend un poste d'*Assistant Professor* à l'université de New York (Courant Institute).
- **2004** Prix de la Société mathématique européenne.
- **2008** Professeure à l'université Pierre-et-Marie-Curie (aujourd'hui Sorbonne Université), à Paris.
- **2012** Première femme, avec Nalini Anantharaman, à recevoir le prix Henri-Poincaré, qui récompense les chercheurs dans le domaine de la physique mathématique.
- **2016** Professeure au Courant Institute.
- **2018** Conférencière plénière au Congrès international des mathématiciens à Rio de Janeiro (Brésil).
- **2019** Élue à l'Académie américaine des Arts et des Sciences.

présenter cela comme une sorte de promenade à l'intérieur du sujet, en racontant les concepts, les notions, les résultats que l'on peut démontrer, et à quoi cela sert. La puissance de l'analyse m'est alors apparue encore plus clairement. Et comme l'intuition me venait assez naturellement sur ces objets, je me suis dit pourquoi ne pas poursuivre dans cette direction et faire quelque chose en analyse, en y incluant de la géométrie et des systèmes dynamiques, que j'aimais bien aussi. J'avais quand même du mal à choisir ! Je me suis donc inscrite en DEA *[diplôme d'études approfondies, aujourd'hui Master 2]* d'analyse des équations aux dérivées partielles, à Orsay, tout en suivant des enseignements du DEA de mathématiques pures. Ce que j'ai préféré est un cours qui devait être introductif sur les EDP elliptiques, donné par Fabrice Bethuel. Là encore, les choses étaient

« Les algébristes font du Rubik's Cube dans leur tête. Les analystes, quant à eux, voient du continu, de l'étendue

claires et intuitives, alors que, dans d'autres cours, par exemple en mathématiques pures, il fallait que je me torture l'esprit pour essayer de comprendre. J'ai été séduite par cette espèce d'élégance et de simplicité que j'avais trouvée dans ce cours. Lorsqu'il a fallu choisir un sujet de thèse, après avoir fait un peu le tour, je suis retombée sur lui et sur des EDP qui parlent d'un problème physique, ce que je n'avais pas du tout anticipé au départ.

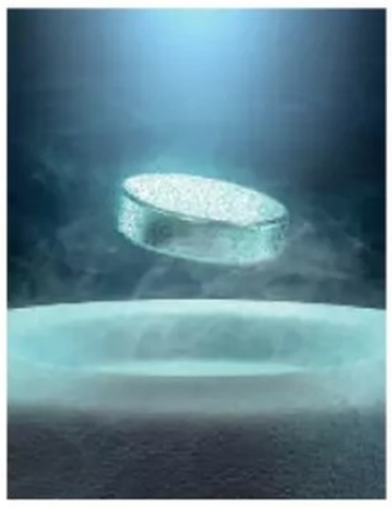
Finalement, vous êtes revenue à des problèmes de physique ?

Oui, mais vus sous l'angle des mathématiques. Plus j'ai avancé dans ma carrière, plus je suis revenue à la physique. Et maintenant, si les mathématiques ne sont pas suffisamment en prise avec une vraie problématique de physique, cela me laisse souvent indifférente. Si on fabrique une équation aux dérivées partielles à partir de rien (ce qu'on ne fait pas), c'est assez rare que cela soit à la fois succinct et complexe comme une équation issue de la physique. Prenons l'équation d'Einstein de la relativité générale, qui décrit la gravitation. Elle est très simple et s'écrit en trois mots symbole : membre de gauche égal membre de droite (*). Et pourtant, lorsqu'on déplie et déploie cette équation, il y a une infinité de théorèmes de mathématiques à démontrer. C'est sans fin : uniquement en changeant un petit paramètre, ou selon que l'on met de la masse ou non, etc. L'équation est magnifique. L'équation sur laquelle j'ai commencé à travailler durant ma thèse et qui modélise les supraconducteurs – l'équation de Ginzburg-Landau –, est riche de la même manière. J'ai travaillé dessus pendant plus de quinze ans et je n'en ai pas fait complètement le tour. Pourtant, c'est une équation qui s'écrit avec quelques termes seulement.

Pouvez-vous nous présenter plus précisément cette équation et quelle problématique vous avez abordée ?

J'ai travaillé sur les tourbillons de vortex en interaction coulombienne – l'interaction électrostatique qui s'exerce entre particules chargées. Le modèle de départ est l'équation mise au point par deux éminents physiciens, les Russes Lev Landau (1908-1968) et Vitaly Ginzburg (1916-2009) *[prix Nobel de physique 1962 et 2003 respectivement]*, pour décrire ces matériaux qui, refroidis à une température suffisamment basse, conduisent le courant sans dissipation d'énergie. On appelle ces matériaux des supraconducteurs. Cela a de nombreuses applications intéressantes. Le phénomène sur lequel je me suis penchée est celui de la formation de tourbillons – des vortex – dans les supraconducteurs : lorsque vous appliquez un champ magnétique à un matériau supraconducteur, le champ magnétique peut pénétrer dans le matériau via ces vortex. Ce sont des zones entourées de boucles de courant supraconducteur, exactement comme des tourbillons dans un fluide. D'ailleurs, lorsqu'on met en rotation un superfluide, comme de l'hélium refroidi à

(*) **L'équation d'Einstein** s'écrit de manière compacte : $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$ autrement dit le tenseur d'Einstein $G_{\mu\nu}$ qui contient la géométrie, c'est-à-dire la courbure de l'espace-temps –, est relié au contenu en énergie de l'espace-temps $T_{\mu\nu}$.



▲ *Le champ magnétique est expulsé du supraconducteur, créant une lévitation de l'aimant. C'est l'effet Meissner.*

très basse température, on voit apparaître des vortex similaires. Ces tourbillons sont donc des lignes mais, si vous regardez les choses en dimension 2 – vous coupez le matériau par un plan –, cela devient des points.

Ce sont ces points qui sont en interaction coulombienne ?

Exactement. Sur l'aspect mathématique, Fabrice Bethuel, Haïm Brézis et Frédéric Hélein avaient étudié une version simplifiée de l'équation de Ginzburg-Landau – dite sans jauge – au début des années 1990. Ils étaient parvenus à démontrer que, dans ces conditions un peu artificielles, les vortex vont se repousser avec une interaction coulombienne (logarithmique en dimension 2), ce que les physiciens savaient (1). Pierre-Gilles de Gennes – autre prix Nobel de physique, en 1991 –, notamment, avait travaillé là-dessus et écrit un livre très intéressant (2). Expérimentalement, on place le matériau supraconducteur dans un champ magnétique externe et on augmente progressivement ce champ. Qu'observe-t-on dans les expériences ? Lorsque le champ magnétique est d'intensité inférieure à un champ critique Hc1, le supraconducteur repousse le champ magnétique extérieur (c'est l'effet Meissner qui se traduit par la lévitation d'un aimant au-dessus d'un supraconducteur) et il n'y a pas de vortex. Dès qu'on atteint Hc1, il apparaît un premier vortex ; puis, à mesure que le champ augmente, de plus en plus de vortex apparaissent, s'organisent en réseau triangulaire, et finissent par occuper tout le domaine. Les vortex sont en fait les endroits par lesquels le champ magnétique pénètre et la supraconductivité commence à être détruite.

Pourquoi cette organisation spatiale ?

Les vortex sont soumis à deux effets antagonistes : l'interaction coulombienne, qui fait qu'ils se repoussent les uns les autres, et le champ magnétique, qui les confine à rester ensemble. Résultat ? Cette configuration triangulaire est appelée « réseau d'Abrikosov », du nom d'Alexei Abrikosov (1928-2017), élève de Landau qui avait prédit cette organisation spatiale (lire encadré p. 125) à partir de l'équation de Ginzburg-Landau – et qui reçut pour cela le prix Nobel de physique en 2003, conjointement avec Ginzburg.

Qu'avez-vous établi sur cette équation ?

L'équation sans jauge n'était pas très réaliste, notamment à cause des conditions imposées au bord, qui fixaient à l'avance le nombre de vortex. Nous nous sommes attelés, avec Étienne Sandier, avec qui j'ai travaillé plusieurs années sur ce problème, à lever cette simplification. Nous sommes parvenus à démontrer exactement ce comportement : l'existence d'un champ critique en dessous duquel il n'y a pas de vortex, et l'apparition progressive des vortex à mesure que la valeur du champ augmente, avec des caractérisations très précises. Nous avons écrit un livre sur ce sujet (3). Nous sommes aussi parvenus à dériver un problème en volume infini, qui a ramené la preuve mathématique de la formation du réseau d'Abrikosov à une question de théorie des nombres, elle-même malheureusement très difficile. D'ailleurs, cela fait un lien inattendu avec les travaux remarqués de la mathématicienne ukrainienne Maryna Viazovska, professeure à l'École polytechnique de Lausanne (Suisse), et de ses collaborateurs, sur l'empilement des sphères dures – travaux qui ont valu à Maryna Viazovska de recevoir la médaille Fields en 2022.

Quel est le lien avec l'empilement des sphères ?

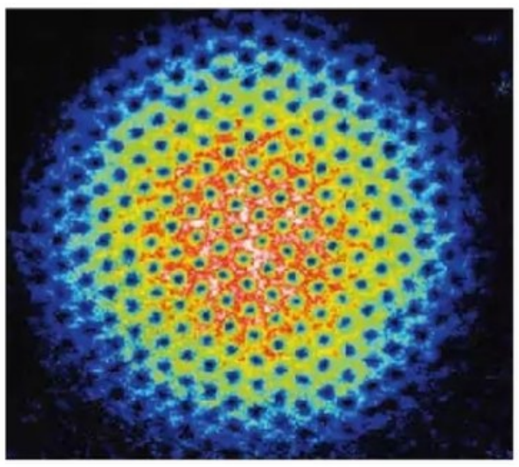
Pour le comprendre, il faut repartir un peu en arrière. En 2009, l'Américain Henry Cohn, du MIT, et l'Indien Abhinav Kumar avaient conjecturé que, si l'on examine une configuration infinie de points dont les interactions sont des sommes de fonctions de toutes les distances entre les points, et si l'interaction a une certaine propriété de monotonie (*), alors le réseau triangulaire en dimension 2, le réseau E8 en dimension 8 et le réseau de Leech en dimension 24 vont être optimaux (les mathématiciens disent « universellement minimisants »). Les réseaux E8 et de Leech sont des réseaux bien connus qui ont des propriétés particulières – il se passe des choses un peu « magiques » en dimension 8 et 24. En 2016, Maryna Viazovska a réussi à démontrer que le réseau E8 est le plus compact pour l'empilement des sphères dures en dimension 8 puis, avec Cohn et Kumar, ils ont prouvé que le réseau de Leech est l'empilement le plus compact en dimension 24. À partir de cela, ces mêmes mathématiciens sont parvenus

(*) **Une fonction monotone** est une fonction qui varie toujours dans le même sens (croissante ou décroissante) ; ici la propriété de monotonie nécessaire est que la fonction est monotone et ses dérivées également.

KTSDESIGN/SHUTTERSTOCK

Les vortex d'Abrikosov

Lorsque Lev Landau et Vitaly Ginzburg proposent en 1950 leur équation qui décrit les supraconducteurs, ils se restreignent à un paramètre petit – le paramètre de Ginzburg-Landau –, qui décrit bien le cas de matériaux comme le cuivre, mais qui n'est pas physique pour d'autres matériaux. En 1951-1952, Alexei Abrikosov, élève de Landau – il avait soutenu sa thèse en 1950 – s'attache à vérifier, avec Nikolay Zavaritsky, les prédictions de la théorie de Ginzburg-Landau sur les supraconducteurs. C'est lors de ce travail expérimental qu'Abrikosov s'aperçoit que le paramètre n'est pas physique et il s'attache à trouver une solution dans le cas où le paramètre n'est pas nécessairement petit. Il trouve alors la possibilité de l'existence d'un nouveau type de supraconducteur – les supraconducteurs de type II – dans lequel, au-dessus d'un champ critique, une partie du champ magnétique peut pénétrer dans le supraconducteur sous la forme de vortex. Par ailleurs, il montre que ces vortex ont une structure périodique qu'il trouve carrée ou triangulaire selon la valeur du champ magnétique. La prédiction de ces vortex périodiques remonte à 1953, mais la publication du résultat a été retardée jusqu'en 1957 (1), notamment parce que Landau n'était pas d'accord avec cette idée, comme Abrikosov le raconte lui-même dans son discours du prix Nobel qu'il reçut en 2003. Bien qu'il ait été publié en anglais, l'article attire peu l'attention et les physiciens sont d'abord dubitatifs sur l'existence d'un réseau de vortex macroscopique qui serait bien plus grand que la maille cristalline du matériau. Il faudra encore attendre la confirmation expérimentale, presque dix ans plus tard, pour que le réseau de vortex d'Abrikosov triangulaire devienne à la mode (2). Dans certaines conditions particulières, et avec certains matériaux, on observe aussi une structure carrée (3). On trouve également ces réseaux d'Abrikosov dans l'hélium superfluide ou dans les condensats de Bose-Einstein : un ensemble d'atomes refroidis à l'aide d'un piège magnéto-optique et qui se comporte comme un superatome. Ph. P.



▲ *Réseau d'Abrikosov dans un condensat de Bose-Einstein.*

PETER ENGELS, JILA

(1) A. A. Abrikosov, *Sovjet Physics – JETP, 5,* 1174, 1957.

(2) D. Cribier *et al., Phys. Lett., 9,* 106, 1964 ; U. Essman et H. Träuble, *Phys. Lett., 24A,* 528, 1967.

(3) Y. De Wilde *et al., Phys. Rev. Lett, 78,* 7273, 1997.

à démontrer la conjecture initiale en dimension 8 et 24 – ce qui, à mon avis, est encore plus important que le problème de l'empilement des sphères. Mais pas la dimension 2, qui est en fait notre problème du réseau d'Abrikosov mentionné plus haut…

Il reste donc des problèmes ouverts sur cette équation ?

Oui, notamment ce problème en dimension 2. Si l'on parvenait à démontrer la conjecture de Cohn et Kumar pour la dimension 2, on aurait, grâce à notre travail, une preuve rigoureuse que le réseau d'Abrikosov est celui qui minimise l'énergie dans les supraconducteurs. Une anecdote amusante au passage : notre long article avec Étienne Sandier qui démontrait tout cela a été refusé à la publication en 2011 par la prestigieuse revue *Annals of Mathematics,* et par *Inventiones Mathematicae*; il nous était reproché de ne pas avoir résolu le problème jusqu'au bout, autrement dit de ne pas avoir résolu cette conjecture pour la dimension 2. Il a finalement été accepté dans une revue plus spécialisée en 2012 (4).

Vous avez ensuite poursuivi sur d'autres équations ?

Outre les résultats déjà mentionnés, et grâce à ces quinze années de travail sur l'équation de Ginzburg-Landau, nous avons mis au point des outils qui ont permis de passer d'un problème d'EDP continu à un problème discret – l'interaction entre les points. Autrement dit, l'EDP devient secondaire et, ce qui est important, ce sont les points et leur interaction. Or, ces outils peuvent être utilisés pour bien d'autres problèmes discrets. C'est là que je me suis intéressée au modèle du gaz



« Il y a souvent un obstacle de langage : les articles mathématiques sont difficiles à lire pour les physiciens et réciproquement

de Coulomb, d'abord en dimension 2, puis en dimension quelconque. Le gaz de Coulomb, c'est un modèle très étudié en mécanique statistique, de n points en dimension quelconque qui interagissent par l'interaction coulombienne ou, dit autrement, l'interaction électrostatique. Ce modèle décrit assez bien des situations d'étude de plasmas en astrophysique, dans les étoiles par exemple. Cela ressemble beaucoup aux vortex d'Abrikosov avec une compétition entre l'interaction coulombienne – électrostatique – et une force de confinement, mais avec en plus une agitation thermique. Cela a aussi d'autres applications que la physique statistique ou l'astrophysique, en lien avec la théorie de l'approximation notamment. Tout d'abord, en ajoutant une température au modèle, la forme de l'énergie d'interaction entre les particules ressemble beaucoup à ce qu'on trouve dans la théorie des matrices aléatoires, une branche des probabilités où les éléments des matrices sont tirés aléatoirement (ces matrices ont de nombreuses applications en physique théorique – chaos quantique, systèmes intégrables, gravité quantique, théorie de jauge supersymétrique).Il existe toute une communauté de physiciens qui ont étudié les gaz de Coulomb dans le cadre de la mécanique statistique, mais les mathématiques sous-jacentes sont difficiles : les points peuvent être n'importe où dans l'espace – ils ne sont pas confinés sur un réseau prédéterminé – et les interactions sont à longue portée.

Qu'avez-vous montré sur les gaz de Coulomb ?

Avec Étienne Sandier, nous avons mis à profit cette analogie pour appliquer les outils développés pour l'étude des vortex dans l'équation de Ginzburg-Landau à ces problèmes de gaz de Coulomb. Cela fonctionne parfaitement bien. Ces outils ont apporté une approche différente de celles qui étaient employées précédemment dans ce domaine de la mécanique statistique. Ils permettent de formaliser proprement la limite de « volume infini », à laquelle on aboutit lorsque l'on fait tendre le nombre de particules vers l'infini. On retrouve exactement la même énergie que celle que nous avions dérivée pour les vortex, à savoir l'énergie qui préfère les arrangements de points en réseau triangulaire en dimension 2, E8 en dimension 8, et Leech en dimension 24. Mais, cette fois, il y a à ajouter les effets d'agitation thermique, que l'on peut appeler « effets entropiques ». Avec Thomas Leblé, nous avons formalisé cet effet entropique dans la limite de volume infini. Le résultat est qu'il y a une compétition entre l'effet énergétique, qui favorise les configurations très régulières, et l'effet entropique, qui favorise les configurations très aléatoires ou agitées, et qui est d'autant plus grand que la température est grande. Les configurations observées résultent par conséquent de cette compétition entre ces deux effets, en fonction de la température. Nous sommes également parvenus à généraliser tout cela à une classe d'interac-

BERNARD MARTINEZ POUR LA RECHERCHE

tion plus large que celle de Coulomb : celle des interactions de Riesz (on parle alors de gaz de Riesz), qui sont des puissances inverses plus générales de la distance (5).

Quel est votre rapport avec la communauté des physiciens ?

Il y a une indifférence de la part des physiciens expérimentateurs vis-à-vis de ce que nous faisons, c'est certain. Ils veulent de la théorie pour expliquer leurs expériences dans l'immédiat, mais ne se soucient pas de fondements mathématiques pour des choses qui, pour eux, sont déjà connues. Et les canaux de communication sont limités. C'est un peu dommage car nous avons par exemple obtenu des résultats beaucoup plus précis sur les champs critiques et les vortex que ce que l'on trouvait dans la littérature physique. Mais, avec certains physiciens théoriciens, notamment ceux qui s'intéressent à la mécanique statistique et aux matrices aléatoires, les contacts sont beaucoup plus naturels, fréquents et fructueux. Nous avons des conférences en commun. Les physiciens obtiennent des résultats formels, des « conjectures », que les mathématiciens s'efforcent de démontrer rigoureusement, puis le travail des mathématiciens les amène parfois à formuler de nouvelles conjectures, et ainsi de suite. Il arrive même que les mathématiciens soient en avance. Finalement, cela dépend donc beaucoup des sous-communautés. Il y a souvent un obstacle de langage : les articles mathématiques sont difficiles à lire pour les physiciens et réciproquement. C'est pourquoi il faut s'efforcer d'écrire plusieurs versions de ses résultats, incluant des versions à vocation plus pédagogique.

Vous naviguez professionnellement entre les États-Unis et la France, est-ce par choix ?

Après ma thèse, j'ai eu la chance d'être recrutée dans la foulée au CNRS, mais, assez vite, on m'a proposé un poste au Courant Institute de l'université de New York. C'était l'occasion de tenter l'aventure et d'aller voir ce qui se passait ailleurs, car je n'avais jamais trop bougé auparavant. Cela a été une période très riche – je suis restée six ans –, car le Courant Institute est un lieu très dynamique, où il y a beaucoup de visiteurs, de rencontres et d'activité scientifique sur les sujets qui m'intéressent. Les conditions de travail sont également très bonnes. Et puis est arrivé un moment où la France m'a manqué, et je suis revenue comme professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie *[aujourd'hui Sorbonne Université]*. Après neuf années, je suis repartie aux États-Unis – mon époux est américain et également professeur au Courant Institute. Toute l'année 2022-2023, nous serons en France, mais repartirons en fin d'année universitaire. L'idéal serait de pouvoir revenir, à terme. Par ailleurs, d'après ce que j'ai entendu aux Assises des mathématiques, qui se sont tenues à l'automne 2022, la situation de la recherche en France se détériore.

Les mathématiques sont le domaine des sciences avec le moins de femmes. Comment ressentez-vous cette inégalité de genre ? Avez-vous des idées pour rétablir un équilibre ?

En classes préparatoires, j'ai ressenti parfois que certains professeurs, y compris femmes, ne nous prenaient pas autant au sérieux que les garçons. Heureusement, il y a une exception qui a été très importante pour moi : mon professeur de mathématiques en mathématiques supérieures, Stéphane Hoguet, qui était quelqu'un de formidable (malheureusement disparu trop tôt, en 1995) et m'a beaucoup encouragée. C'est d'ailleurs quelque chose que j'essaie de reproduire. À l'entrée à l'ENS, tout a changé. D'abord, parce que nous étions une promotion exceptionnellement riche : six filles sur quarante. Et, dans mes camarades de promotion, plusieurs font de belles carrières : par exemple Laure Saint Raymond (académicienne et professeure à l'Institut des hautes études scientifiques), ou Nalini Anantharaman (nommée au Collège de France). Quant à cette inégalité, on la retrouve dans toutes les sciences et dans beaucoup de métiers, même si elle est exacerbée en mathématiques. Il n'y a pas de solution miracle, et je ne crois pas aux quotas. En revanche, il faut veiller collectivement à ce que la discipline soit accueillante pour les femmes. Les femmes, mais aussi les minorités et les hommes, peuvent se sentir mal à l'aise ou simplement découragés par certains préjugés sexistes mais aussi les volontés de domination scientifique. Rendre la discipline plus accueillante bénéficierait en fait à tout le monde. ■

Propos recueillis par Philippe Pajot

POUR EN SAVOIR PLUS

- Gauthier Leterrier et Maryna Viazovska, *Empilons des sphères dans toutes les dimensions*, *La Recherche*, n° 566, 2021 (bit.ly/3HQMFGj)

(1) F. Bethuel, H. Brezis et F. Hélein, *Ginzburg-Landau Vortices*, Birkhäuser Boston, 1994.

(2) Pierre-Gilles de Gennes, *Superconductivity of Metals and Alloys*, Taylor Francis, 1999 pour la première édition.

(3) É. Sandier et S. Serfaty, *Vortices In The Magnetic Ginzburg-Landau Model*, Springer, 2008.

(4) É. Sandier et S. Serfaty, *Communications In Mathematical Physics, 313*, 635, 2012.

(5) Th. Leblé et S. Serfaty, *Invent. Mathemat., 210*, 645, 2017.

Des moules pour aider à la transition plastique

En 2018, Anne-Leïla Meistertzheim, docteure en biologie marine, co-fonde Plastic@Sea, pour œuvrer sur le terrain en faveur de la transition plastique. Son projet Mussel Plast, financé par l'ADEME, l'Agence de la Transition Ecologique, utilise les moules comme bio-indicateur de la pollution plastique en mer et en eau douce. Une avancée majeure pour quantifier les micros et les nano-plastiques dans les rivières, les fleuves et les océans.

2021. La loi AGEC (loi Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire) et la loi Climat et Résilience fixent un cap et des objectifs chiffrés pour lutter contre la pollution plastique : afin d'atteindre, à l´horizon 2040, la fin des emballages plastiques à usage unique, il faudra les avoir réduits de 20 % d'ici décembre 2025 ... tout en faisant en sorte qu'ils soient recyclables à 100%. Un sacré défi : depuis 70 ans, le plastique a envahi nos vies et notre environnement, au point de devenir un indicateur de l'Anthropocène. Matière malléable à l'envi, il est partout chez lui. Dans nos appartements qu'il submerge jusqu'à nos océans qu'il empoisonne, ainsi que le rappelle Anne-Leïla Meistertzheim, docteure en biologie marine et co-fondatrice de Plastic@Sea : *« La matière plastique nous a permis de fabriquer des objets plus résistants, plus légers et peu coûteux. Mais lorsque cette même matière, stable dans le temps, a été utilisée pour réaliser des objets à usage unique, l'intention de départ a été dévoyée et elle est devenue un poison pour l'environnement. »*

PLASTIC@SEA AU SERVICE DE LA TRANSITION PLASTIQUE

Pendant des années, Anne-Leïla Meistertzheim a étudié l'impact des activités humaines sur les organismes marins. En 2018, désireuse de prendre de l'avance sur le temps long de la recherche, elle fonde Plastic@Sea. Sa mission ? Apporter des solutions opérationnelles aux problématiques de terrain rencontrées par ses interlocuteurs. Des interlocuteurs venus d´horizons variés, soucieux de l'impact du plastique sur la biodiversité : des industriels, en quête de solutions alternatives respectant les critères d'éco-conception ; des producteurs et des transformateurs voulant s'assurer de la biodégradabilité et de la non-toxicité de leurs plastiques ; des aquaculteurs et des producteurs de produits de la mer, en première ligne de la pollution plastique, qui ont besoin d'évaluer les impacts de cette pollution pour savoir ce qui passe du ventre de la mer à nos assiettes ; des institutionnels enfin, comme l´Agence de l'Eau ou l'ADEME, l'Agence de la Transition Écologique, auxquelles Plastic@Sea apporte son expertise et une méthodologie afin de les aider à suivre l'impact de déchets terrestres sur le milieu aquatique, de leur entrée dans l'environnement à leur devenir ultime. Autant d'acteurs engagés dans la transition plastique, une transition qui nécessite en premier lieu la connaissance précise des caractéristiques physico-chimiques du plastique, qu'il soit d'origine biologique fossile, issu de dérivés du pétrole ou du gaz naturel, ou biosourcé, issu de la biomasse végétale ou animale. *« On ne parle pas de plastique au sens générique du terme, mais de types de plastique pour différents usages »* précise Anne-Leïla Meistertzheim. *Leur toxicité et la modification potentielle de leur biodégradabilité résident dans le fait que tous se composent d'un mélange complexe et dynamique de polymères et d'additifs, ces produits chimiques ajoutés par les industriels pour les rendre transparents, colorés, plus durs ou résistants au feu, et qui modifient leur structure physico-chimique. La clé de la transition plastique réside dans la*



possibilité d'adapter la matière plastique à un usage précis, guidé par les impératifs de l'économie circulaire. Dans les années qui viennent, il faudra pouvoir proposer des polymères innovants alternatifs, dont la biodégradabilité pourra être contrôlée en jouant sur leur physico-chimie et dont on anticipera, dès leur conception, le devenir et les impacts potentiels en fin de vie. »

LA FRAGMENTATION, UN PROCESSUS AU LONG COURS

Parvenue dans un environnement aquatique, la matière plastique est promise à diverses fortunes : selon sa densité, elle peut demeurer à la surface ou sombrer pour aller tapisser les fonds marins ; elle peut se sédimenter si ces organismes vivants décident de se servir des déchets plastiques comme embarcation ; enfin, sous l'effet de la lumière du soleil, des écarts de températures, des contraintes mécaniques et de l'activité biologique,

D'où viennent les microplastiques ?

- Des restes de macrodéchets, issus de la fragmentation de bouteilles, de jouets, de sacs et d'emballages.
- Des fragments de pneus libérés par leur abrasion sur les routes et entraînés par la pluie et le vent vers les rivières, les fleuves, la mer.
- Des fibres synthétiques relâchées dans les canalisations à chaque lavage par des tissus comme l'élasthanne ou le polyester.
- Des « larmes de sirène », ces billes (de 2 à 5 millimètres), utilisées par les industriels pour mouler des objets en plastique, éparpillées dans la nature durant le transport ou la fabrication.

elle peut se fragmenter pour devenir des micro et des nano plastiques et finir dans l'appareil digestif d'organismes vivants. La matière plastique peut aussi arriver déjà sous forme de particules de taille micrométriques ou nanométriques – soit des fragments de plastique inférieurs à cinq millimètres - issus de processus industriels ou de la dégradation de déchets plus conséquents (Voir encadré) Un processus de fragmentation au long cours pour une pollution plastique invisible, qui représenteraient 90 % des déchets plastique en mer ... et dont 80% proviennent des fleuves et des rivières : *« Si pour évaluer les temps de dégradation des polymères dans les milieux aquatiques,* souligne Anne-Leïla Meistertzheim, *il est nécessaire de comprendre les liens entre leurs propriétés structurales et/ou morphologiques et leurs processus de (bio) dégradation et de fragmentation, il est aussi capital de pouvoir localiser l'endroit précis où la matière plastique se fragmente pour devenir des microplastiques. »*

EN CHIFFRES

- La production mondiale de plastiques est passée de 1,5 million de tonnes en 1950 à **368 millions en 2019** (source: PlasticsEurope)
- Les microplastiques représenteraient plus de **90 % des déchets plastique en mer** (source : Fondation Tara Océan)

DE PLASTIC@SEA À MUSSEL PAST : LA MOULE, UN NOUVEL OUTIL POUR MESURER LES MICROPLASTIQUES

En 2019, Anne-Leïla Meistertzheim embarque à bord du deux mâts de la Fondation Tara Océan. Un laboratoire des mers versé dans la recherche scientifique, en route pour une première mission en eau douce, à travers neuf fleuves européens, du Tibre, en Italie, à l'Èbre, en Espagne, en passant par l'Elbe, le Rhin la Seine, le Rhône, la Loire et la Garonne. Six mois d'expédition pour évaluer la concentration des microplastiques et l'impact sur la faune. Très vite, ce que l'équipage composé de biologistes marins, d'océanographes et de chimistes recueille dans ses filets Manta – peu de gros déchets plastiques mais beaucoup de micro plastiques - vient infirmer l'une de leurs intuitions de départ : la fragmentation de la matière plastique commence dès les fleuves et les cours d'eau, qui les charrient ensuite jusqu'à la mer. Une découverte qui oblige les chercheurs à s'interroger sur les outils dont ils disposent pour capter et mesurer cette pollution invisible. Comment faire pour que les microplastiques inférieurs à 25 micromètres ne passent pas entre les mailles du filet ? C'est de cette crainte que va naître le projet Mussel Plast, un projet de recherche soutenu par l'ADEME qui consiste à utiliser la moule comme un bio-indicateur de la pollution plastique présente en mer et en eau douce. Utilisé aujourd'hui dans tous les réseaux nationaux d'observation et de quantification de la pollution dans l'eau pour étudier l'accumulation de certains polluants, le mollusque agit comme une sorte de bouche sur l'eau, capable de filtrer jusqu'à 25 litres d'eau par jour et de stocker sous sa coquille micro et nano-plastiques, ainsi que les produits chimiques embarqués. Un bio accumulateur et un bio indicateur de taille qui, en permettant de



mesurer les nano-plastiques, marque une étape essentielle dans la compréhension des mécanismes de fragmentation des plastiques dans l'environnement et dans la prédiction de l'évolution de leurs concentrations futures.

AGIR SUR LA TERRE FERME POUR NETTOYER LES MERS

Face à cette pollution invisible, quelles solutions envisager ? Nettoyer les fleuves et les mers ? Un projet « irréaliste », pour Anne-Leila Meistertzheim, au regard de l'immensité de la tâche et de l'infiniment petit de la majeure partie des déchets plastiques. Pour résoudre le problème, il faut remonter à sa source et revenir sur terre : *« La majorité des plastiques récoltés dans les échantillons d'eau des fleuves l'ont été sous forme de micro et de nano-plastiques. Cette pollution invisible, difficile à collecter, appelle d'importantes actions à terre pour en stopper le flux. Il faut agir bien en amont des fleuves et des océans... dans le panier d'achat de chacun, dans notre manière d'assurer la collecte et la gestion des déchets, de produire et de travailler en écosystèmes. Les lois donnent le ton, la feuille de route mais il faut adopter une approche transversale de la pollution plastique si on veut la saisir dans toutes ses dimensions. Nous sommes dans un moment où Plastic@Sea peut être une passerelle pour aider des mondes aux vues différentes à trouver des solutions communes qui fassent que, lorsque je me rends sur le terrain, je ne trouve plus de déchets plastiques. »*



Paléogénétique

La Conquête du cheval

Ludovic Orlando

Le spécialiste de l'ADN ancien livre les résultats des dix ans de recherche que ses collègues et lui ont consacrés aux chevaux, sous la forme d'une fresque historique captivante.

Notre histoire commune avec le cheval domestique moderne a commencé dans les steppes du Nord Caucase, il y a environ 4 200 ans. Cette découverte est venue en octobre 2021, dans un article qui a fait la couverture de la prestigieuse revue *Nature* (1). La publication marque alors l'aboutissement d'une dizaine d'années de recherches, qui auront mobilisé plus de 600 scientifiques autour du paléogénéticien français Ludovic Orlando. Son livre retrace cette double épopée : celle de la domestication du cheval moderne et de notre évolution commune jusqu'à aujourd'hui ; et l'aventure scientifique qui aura permis de reconstituer les différents chapitres d'une histoire plurimillénaire. Il le fait de manière magistrale. Car Ludovic Orlando n'est pas seulement un éminent paléogénéticien, c'est aussi un talentueux écrivain et vulgarisateur. Cet ouvrage, comme le précédent (*L'ADN fossile, une machine à remonter le temps*, Odile Jacob, 2021), est ainsi remarquable de clarté, et se lit comme un roman.



Toute bonne histoire contient des rebondissements. La recherche du berceau de la domestication du cheval moderne, indéniablement, n'en a pas manqué ! Kazakhstan (site de Botaï) ? Anatolie (Turquie) ? Europe centrale ? Péninsule ibérique ? Ludovic Orlando et ses collègues ont exploré de multiples sites, sur un vaste territoire (plus de 4 000 kilomètres de large), afin de percer le mystère. Une quête pour laquelle ils se sont retroussé les manches, et qui illustre toute la patience, la rigueur, la motivation et la persévérance que requiert, de manière générale, le travail de recherche : *« Il nous fallut effectuer plus de deux cents datations au carbone 14 et générer plusieurs centaines de milliards de séquences,* se remémore Ludovic Orlando. *Il n'y eut rien d'autre qu'un travail collectif de longue haleine, extrêmement méthodique, où l'ensemble des membres de mon équipe, chacun à son poste, répétait inlassablement les mêmes gestes pendant de longs mois et de longues années. »*

La recherche des origines de nos chevaux domestiques modernes ne constitue toutefois qu'une partie du récit que nous livre le spécialiste de l'ADN ancien. L'ouvrage se veut en effet une histoire mondiale du cheval, de la Préhistoire jusqu'à nos jours, racontée au prisme des recherches en archéologie moléculaire que ses collègues et lui ont menées. L'auteur nous emmène ainsi sur la piste des chevaux préhistoriques, qui présentent une incroyable diversité génétique ; sur celle des mulets (hybride génétique entre le cheval et l'âne), dont il décrypte les impressionnantes capacités de résistance ; aux origines du cheval arabe, dont les éleveurs du monde entier ont cherché à reproduire l'élégance, la grâce et l'endurance ; au Moyen-Âge, pour nous expliquer qu'une *« poignée de gènes suffit à rendre compte de la différence phénoménale »* qui sépare les races équines les plus imposantes des plus petites, et que cette information peut être obtenue indifféremment à partir d'un morceau de dent, d'une phalange ou d'un os du crâne. Les plateaux tibétains, les hautes latitudes sibériennes ou la préhistoire du continent américain font aussi partie des étapes de ce captivant voyage à travers le temps et l'espace. Une odyssée qui fascinera tout le monde, y compris les plus réfractaires à nos compagnons équins. **Vincent Glavieux**

Ludovic Orlando, *Odile Jacob, mars 2023, 288 p., 22,90 €.*

(1) P. Librado *et al.*, *Nature*, *598*, 634, 2021.

DR

Astrophysique

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'Univers



Le temps s'arrêtera-t-il un jour ? Que se passerait-il si vous vous faisiez aspirer par un trou noir ? Avez-vous un double quelque part ? Voici un échantillon des questions loufoques, mais existentielles, auxquelles s'amusent très sérieusement à répondre l'ingénieur en robotique Jorge Cham et le physicien Daniel Whiteson. Après le succès de leur premier recueil, *Tout ce que nous ne savons pas encore* (Flammarion, 2018), ils s'attellent à un nouveau défi : répondre aux questions sans réponse, dans le prolongement de leur podcast intitulé « Daniel et Jorge expliquent l'Univers ». Avec humour et légèreté, les auteurs traitent ainsi de sujets parfois peu connus du grand public. Voyage dans le temps, cerveau quantique, vie après la mort, hyperespace… Vous aurez enfin des réponses, même aux questions que vous ne vous posiez pas encore ! À coups de métaphores très visuelles – quoi de mieux pour comprendre la flèche du temps que de la comparer à la fois où vous avez raté votre café du matin et ne pouviez rien y faire ? – et de références à la pop culture actuelle, les auteurs proposent une vulgarisation accessible, impliquant directement le lecteur, en le mettant en situation. Le tout est accompagné des dessins de l'un des auteurs, Jorge Cham, eux aussi drôles et ludiques. Pas de faux espoirs cependant : la plupart de ces questions ne possédant pas encore de réponse catégorique, vous ne ressortirez pas de cette lecture avec des certitudes. Au contraire, vous aurez peut-être encore plus de questions mais, cette fois, vous comprendrez mieux pourquoi.

Mahaut de Lataillade

Jorge Cham et Daniel Whiteson, *Flammarion, février 2023, 352 p., 22,90 €.*

KARINE && OLIVER

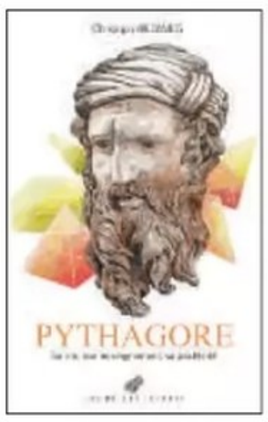


Histoire des sciences

Pythagore

Christoph Riedweg

Spécialiste du pythagorisme, le philosophe allemand nous livre un portrait pointilliste de ce sage incontournable de l'Antiquité.

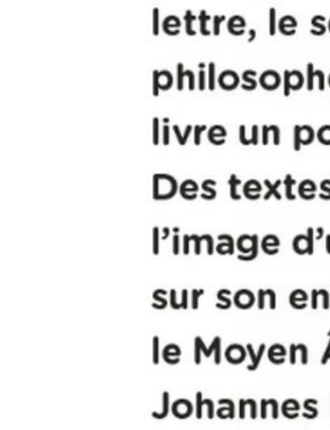


Pythagore… Du mathématicien, on connaît les triplets dits « pythagoriciens », ces nombres liés par la somme de leur carré ($3^2+4^2=5^2$, par exemple), comme dans ce qu'on appellera plus tard le théorème de Pythagore. Du philosophe, on connaît le néopythagorisme, courant empreint de mystique qui s'est scindé en multiples écoles, jusqu'à se fondre partiellement avec le néoplatonisme. De l'homme, on ne connaît presque rien : le sage de Samos (il est né vers -580 sur cette île grecque) n'a laissé aucun écrit et, dans l'école de pensée qu'il a fondée à Crotone (Italie) et qui pouvait être considérée comme une secte avant la lettre, le secret était de mise. Dans son ouvrage, Christoph Riedweg, philosophe allemand qui a beaucoup étudié le pythagorisme, nous livre un portrait pointilliste de ce sage incontournable de l'Antiquité. Des textes et témoignages, dont certains extraits sont cités, il ressort l'image d'un savant charismatique qui avait fait forte impression sur son entourage. Sa postérité se retrouve jusque bien après le Moyen Âge : dans l'harmonie des sphères de l'astronome allemand Johannes Kepler au XVII^e^ siècle, ou dans la franc-maçonnerie qui, par beaucoup d'aspects, peut être rapprochée de l'école de Crotone. Un livre savant, mais abordable.

Philippe Pajot

Christoph Riedweg, *Les Belles Lettres, février 2023, 338 p., 23 €.*

Démarche scientifique



La science à l'épreuve des mauvaises langues

Avec pédagogie et humour, Annabelle Kremer-Lecointre, enseignante en sciences de la vie et de la Terre, décortique dix idées reçues – *« une théorie scientifique, ce n'est qu'une idée » ; « la science, c'est la bombe atomique »* – afin de décrire les principes de la démarche scientifique. Grâce à des exemples clairs, comme les travaux qui ont conduit à définir l'âge de la Terre, elle rappelle que la science se construit par tâtonnement et par essais-erreurs, et qu'elle n'est pas une affaire de génie mais plutôt le fruit d'un travail collectif. Une joyeuse leçon pour débattre de science par le « bon bout de la raison », ponctuée par les dessins décalés d'Arnaud Rafaelian.

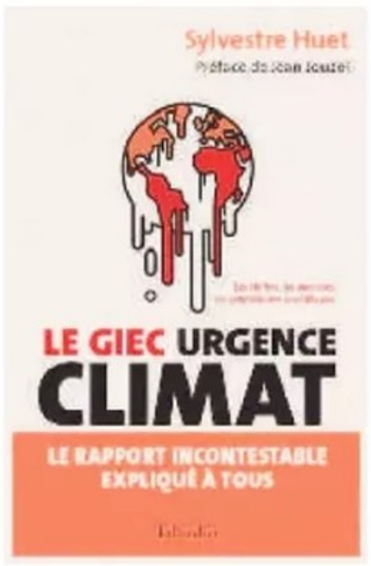
Mathias Germain

Annabelle Kremer-Lecointre, *Delachaux et Niestlé, février 2023, 208 p., 22,90 €.*

Environnement

Le GIEC, urgence climat

Avec pédagogie, le journaliste scientifique Sylvestre Huet décrypte le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).



Le nouveau livre du journaliste scientifique Sylvestre Huet se lit comme un prolongement bienvenu au dossier que nous consacrons aux paléoclimats (lire p. 16). Dans celui-ci, la communauté des « paléo » raconte les travaux de recherche menés à travers le monde, faisant ressortir notre connaissance de plus en plus fine des climats passés et le lien avec notre compréhension des climats d'aujourd'hui. Dans son livre, l'auteur raconte, avec la pédagogie d'une personne plongée dans ces sujets depuis plus de trente ans, la prise de conscience de la communauté scientifique, qui fut assez rapide, et celle, plus lente, des politiques et de la société civile. La création du GIEC, en 1988, politique par son origine et son principe de fonctionnement, mais scientifique par son mode de travail (ce sont des spécialistes de chaque sujet traité qui établissent une synthèse critique du changement climatique), est la première manifestation d'une telle prise en compte. Après un avant-propos qui revient sur le fonctionnement de l'institution, l'ouvrage se décline selon les différents groupes de travail qui composent le GIEC et le dernier rapport qu'ils ont produit.
La première partie détaille ainsi de manière graphique et synthétique les mécanismes physico-chimiques du climat (groupe 1). Celui-ci se réchauffant de manière indéniable, la deuxième partie se concentre sur les impacts, les adaptations et les vulnérabilités sur nos sociétés, l'eau, la sécurité alimentaire, la sécheresse, les événements extrêmes (groupe 2). La dernière partie, elle, aborde les mécanismes d'atténuation : que peut-on faire en pratique ? C'est le rapport du groupe 3 qui est ainsi résumé avec des discussions mêlant technologies, politique et relations internationales. Le livre présente un très bon condensé de la situation actuelle. C'est une lecture dûment recommandée à toutes celles et tous ceux qui, avant de lire quoi que ce soit, disent *« il n'y a pas de problème de climat »*. Il ne faut jamais arrêter de faire de la pédagogie sur ce sujet. L'enjeu est bien trop crucial. Ph. P.

Sylvestre Huet, *Tallandier, janvier 2023, 216 p., 23 €.*

Paléontologie



Dans la peau d'un dinosaure

Fini les idées reçues hollywoodiennes sur les dinosaures ! À moins d'être vous-même un expert du Crétacé, il est fort probable que votre imaginaire sur le sujet ait été alimenté quasi exclusivement par le film *Jurassic Park* et d'autres fictions des cinquante dernières années. Avec ce livre, le paléontologue Jean Le Loeuff rectifie le tir, en nous donnant accès à l'intimité de ces géants d'un autre temps et en tentant, pour la première fois, de répondre à la question : que se passait-il dans la tête des dinosaures ? L'ouvrage rassemble toutes les théories les plus récentes sur le comportement de ces mystérieux disparus, permettant de mieux comprendre la sociabilité et la sensibilité de ces animaux dont le règne a duré plus de 170 millions d'années. Comment voyaient les dinosaures ? Quel était leur sens de l'odorat ? Étaient-ils rusés ? Étaient-ils sensibles ? Vivaient-ils en meute ? Se blessaient-ils facilement ? Pour répondre à toutes ces questions, l'expert, par ailleurs directeur du Musée des dinosaures d'Espéraza (Aude), jongle entre les données archéologiques et les analogies avec les plus proches voisins encore en vie des dinosaures (les reptiles) et les survivants de la cinquième extinction de masse (les oiseaux). Bien que *« nul regard humain ne [les ait] contemplés, nulle oreille [n'ait] compris [leurs] harmonies »*, comme disait le vulgarisateur Camille Flammarion en 1886, voici une belle manière de se mettre dans la peau des dinosaures et de commencer à comprendre leur vision du monde. Pour les plus connectés, la lecture est disponible sous format hybride, et peut s'accompagner de dinosaures en réalité augmentée et de commentaires de l'auteur.

M. de L.

Jean Le Loeuff, *HumenSciences, février 2023, 224 p., 19,90 €.*

Santé

Des gènes, des synapses, des autismes



Mise en évidence dès les années 1970 à partir d'études sur des jumeaux, la composante génétique de l'autisme est restée dans l'ombre près de trente ans. Souvent au profit, en France au moins, de l'influence «contre-productive» de la psychanalyse, relève Thomas Bourgeron. L'académicien, responsable du laboratoire Génétique humaine et fonctions cognitives à l'Institut Pasteur de Paris, publie le récit scientifique de ses découvertes qui, en vingt ans, ont mis les gènes synaptiques au cœur des troubles autistiques. Son équipe découvre en 2003 les deux premières mutations monogéniques impliquées dans une forme d'autisme Asperger – donc sans déficit intellectuel. Il a pour cela l'intuition de s'intéresser à des gènes précis, jouant un rôle dans le fonctionnement des synapses qui permettent aux neurones de former des réseaux. Mais c'est la deuxième découverte, en 2006, qui va définitivement propulser la génétique sur le devant des causes explicatives des troubles du spectre autistique. Le gène *Shank3,* qui code aussi une protéine synaptique, concerne des personnes avec de très sévères troubles cognitifs. En vingt ans, plus de 200 gènes ont ainsi été identifiés au sein de collaborations internationales permettant d'expliquer environ 25% des cas d'autisme. Reste à élucider les 75% restants, probablement dus à des «cocktails» de mutations plus communes. Thomas Bourgeron nous emmène dans cette enquête scientifique pointue sur les traces des gènes et des synapses. Avec toute la technicité et la rigueur du généticien, il ouvre une nouvelle façon de percevoir «les» autismes, et d'envisager des traitements avec un rationnel scientifique solide.

Hugo Jalinière

Thomas Bourgeron, *Odile Jacob, janvier 2023, 320 p., 23,90 €.*

DR

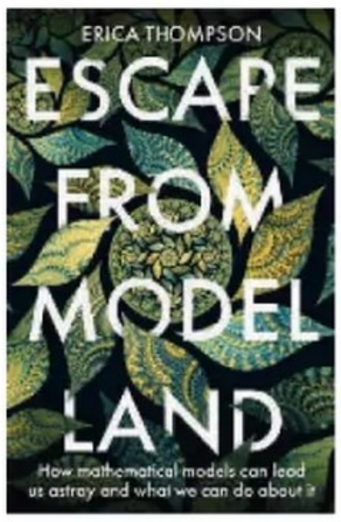
LU D'AILLEURS Mathématiques



Escape from Model Land

Erica Thompson

La statisticienne alerte sur les limites des modèles mathématiques et milite pour une utilisation plus responsable de ces outils d'aide à la décision.



Que ce soit pour anticiper la propagation d'une épidémie, lancer une alerte météo ou évaluer les effets économiques d'une nouvelle loi, les modèles mathématiques sont devenus incontournables dans la prise de décision. Pour le meilleur… mais aussi pour le pire, selon Erica Thompson. Spécialiste en science des données à la London School of Economics, elle explique les dangers qu'il y a à leur accorder une confiance absolue, et appelle à en faire une utilisation plus responsable. Usant d'habiles métaphores, elle décrit comment les scientifiques se sont enfermés dans un monde artificiel idéal (*«model land»*), qu'ils ont fini par confondre avec le monde réel, beaucoup plus complexe et imprévisible. Si l'on veut que les modèles soient utiles, soutient Erica Thompson, il faut reconnaître les limites de ce monde «parfait». Première limite: l'incapacité des modèles à représenter des «inconnues non quantifiables», des paramètres non pris en compte car trop difficiles à prévoir. Autre travers majeur: loin d'être des objets mathématiques objectifs, les modèles reflètent les valeurs et points de vue de leurs créateurs. Ainsi, durant la pandémie de Covid, si le recours au confinement était justifié sur le plan moral pour protéger le système de santé et les personnes les plus vulnérables, il n'empêche, souligne l'auteure, que les modèles qui ont permis de les justifier étaient partiaux: ils prenaient plus en compte les dommages du virus chez ces groupes que chez d'autres, sous-estimant en particulier les conséquences économiques pour ceux qui se retrouvaient sans emploi du jour au lendemain. Pour l'auteure, il est donc urgent que les modélisateurs reconnaissent l'influence de ces jugements de valeur et que les décideurs politiques affichent plus clairement leurs choix dans leurs interprétations des modèles. Erica Thompson milite en outre pour une plus grande diversité de modèles – la plupart sont issus d'institutions occidentales – et pour une pratique plus «juste»: les personnes impactées par les décisions prises grâce à un modèle devraient être consultées ou prendre part à sa conception. Sans quoi ces outils deviendront de puissantes armes de manipulation sociale.

Julien Bourdet

Erica Thompson, *Basic Books, novembre 2022, 256 p., 20 £.*

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

La chronique de Benoît Boutaud

La souveraineté énergétique, une affaire d'États

Les résultats très attendus d'une commission d'enquête de six mois réunissant une trentaine de députés de toutes tendances politiques vont être présentés en avril. L'objet de leur investigation ? Établir les raisons de la perte de souveraineté et d'indépendance énergétique de la France.

Les premières auditions réalisées par nos élus suggèrent un affrontement en forme de règlement de comptes durant lequel « pro » et « anti » quelque chose ont échangé des tirs nourris, faisant de l'une et l'autre des victimes collatérales. Elles mettent également en évidence les renoncements, les décisions baroques, le choc des temporalités énergétique et politique, ou les limites qu'il y a à considérer l'énergie comme un produit ordinaire. Les effets délétères d'une grande « dépression politique », due d'un côté à un projet européen qui n'aboutissait pas et, de l'autre, à une remise en cause sévère du rôle des États, peu propice à de lourdes décisions stratégiques sur le temps long, ressortent en revanche moins. Un effet ciseau qui a coupé court aux ambitions énergétiques des Trente Glorieuses, quand la France montrait des preuves manifestes de souveraineté (sortie de l'OTAN, programmes industriels, etc.).

Si cette bataille de la souveraineté est en train d'être perdue, c'est aussi, probablement, que les troupes ont manqué pour la défendre. La loi de Murphy (« tout ce qui est susceptible d'aller mal ira mal ») – qui n'a pas été votée par le Parlement… –, entrée fortuitement en vigueur récemment, a pourtant conduit au retour en grâce de l'idée de souveraineté, après une longue période durant laquelle il ne faisait pas bon être souverainiste.

Les Français et leurs gouvernants redécouvrent ainsi ce qu'ils sont en train de perdre.

Mais pour comprendre l'échec que représente cette perte de souveraineté, les députés devront d'abord expliquer clairement ce qu'ils entendent par souveraineté et indépendance, tandis que les gouvernements seront ensuite tenus d'en fournir les preuves.

Dans notre système politique, la souveraineté est indivisible. Elle appartient au peuple constitué en corps politique – la nation –, et est déléguée à une entité politico-administrative – l'État. Ce principe général pourra ou non être synonyme d'indépendance. Il me semble néanmoins opportun de considérer la souveraineté comme possédant une charge politique plus forte et plus intuitivement rattachable à l'organisation des États-nations, même si souveraineté et indépendance sont comme l'avers et le revers d'une même pièce. C'est ainsi qu'elle est exprimée dans la Charte des Nations unies ou notre Constitution. L'indépendance d'un pays est donc à la fois la cause et la conséquence de cette souveraineté. Le choix de l'intitulé de la commission d'enquête atteste de leur consubstantialité et de leur différence (« commission d'enquête visant à établir les raisons de la perte de souveraineté et d'indépendance énergétique de la France »). L'État détient cette autorité suprême dans un ordre international composé d'autres États, eux aussi souverains. Une capacité qui passe par la



DR

force et d'autres moyens, comme celui de se suffire à lui-même pour tout ce qui est nécessaire. En d'autres termes, il s'agit d'être autosuffisant en utilisant ce que sa terre et les capacités de son peuple lui permettent.
Voilà pour la théorie. Dans la pratique, la souveraineté est relative, même si elle est pleine et entière d'un point de vue juridique et se manifeste de façon bien réelle. L'indépendance ou l'autosuffisance sont tout aussi relatives. Ainsi, la souveraineté résulte en réalité d'une combinaison entre dépendance et indépendance sur la base d'une capacité d'autosuffisance, dans un contexte où les pays échangent sans cesse, se concurrencent, partagent des intérêts ou s'opposent. Ce sont ces différents niveaux qui permettent d'apprécier la souveraineté d'un pays, à l'aune de la souveraineté elle-même relative mais réelle de tous les autres pays. Et c'est bien la baisse importante de ce niveau d'indépendance dans l'énergie qui est l'objet de la commission.

L'Union européenne, focalisée sur le credo de l'ouverture au monde et de la concurrence, ignore certaines règles élémentaires en matière stratégique

PESER DANS LE RAPPORT DE FORCE

Les parlementaires peuvent l'évaluer à partir d'éléments basiques, comme la quantité d'énergie produite. Elle n'est toutefois qu'un maillon de la chaîne. Le diable de la dépendance est dans les innombrables détails qui régissent le fonctionnement des organisations animant la société :
réseaux interconnectés, importations de composants électroniques, de métaux rares, de savoir-faire, etc.
Il est tout autant dans l'existence d'interdépendances entre les pays, les uns ayant ce dont les autres manquent et réciproquement. Sacs à main ou cosmétiques versus antibiotiques ou électrons : on perçoit ainsi l'utilité de garder des moyens capables de peser dans ce rapport de force, qui s'apparente à un jeu de la barbichette où se manifestent la puissance et l'impuissance des États.
Être une superpuissance permet de concrétiser davantage sa souveraineté et de rendre plus virtuelle celle des autres. C'est ainsi que la Chine a pu investir dans des infrastructures aussi vitales que les réseaux électriques de plusieurs pays européens (Portugal, Italie, Grèce), au cœur d'une Union européenne focalisée sur le credo de l'ouverture au monde et de la concurrence, ignorant ainsi certaines règles élémentaires en matière stratégique. La France n'a guère fait mieux que ses partenaires du Vieux Continent pour préserver un niveau suffisant d'indépendance. Que l'on pense, par exemple, à la vente de la branche énergie d'Alstom à des intérêts américains. Les commissions, qu'elles soient d'enquête ou européenne, auraient tout intérêt à écouter davantage les géopoliticiens.
Tous ces éléments sont donc à mettre en balance pour voir si leur somme renforce ou grève la souveraineté.
Encore faut-il s'accorder sur le périmètre en question. La souveraineté se réfère toujours à un cadre politique et spatial délimité. De ce point de vue, la commission d'enquête fait face à un hiatus : elle est chargée d'investiguer un sujet dont une partie lui échappe, une part de la « perte » de souveraineté nationale étant due au fait que celle-ci a été déléguée légalement à l'Union européenne.
La souveraineté étant par principe indivisible, c'est sur la partie qui dépend de l'État français que les députés sont en capacité d'enquêter et le personnel politique d'agir. Pour l'autre partie, notre avenir est lié à celui des autres pays de l'Union avec lesquels nous partageons non pas de l'amitié mais des intérêts. Un avenir que les institutions européennes, récipiendaires d'une partie des souverainetés nationales, ont la responsabilité de défendre. Mais cette configuration ne nous exonère pas d'être vigilants. Bien au contraire.
Elle exige de faire attention à ce que cette part de souveraineté commune ne soit pas, à son tour, la victime collatérale de dissensions, autrement plus profondes, on peut le supposer, entre États qu'entre acteurs nationaux.
L'enjeu reste indéniablement de chercher le consensus entre les Vingt-sept et, avant cela, au niveau national, car c'est bien en France que se joue encore l'essentiel en matière de souveraineté.
La commission d'enquête reste par conséquent légitime. Peut-être ses préconisations seront-elles à leur tour légitimées politiquement par des mesures qui attesteront d'une souveraineté renforcée. On le sait, il n'y a pas d'amour, il n'y a que des preuves d'amour. Il n'y a pas non plus de souveraineté mais des preuves de souveraineté (qui sont peut-être aussi des preuves d'amour…). C'est ce qu'attendent désormais les Français et ce que les gouvernements devront impérativement produire. ■

Benoît Boutaud est chercheur en sciences humaines et sociales, spécialiste des questions énergétiques.

NUMÉRIQUE ET IA

La chronique de Christine Solnon

Des algorithmes pour expliquer les algorithmes

De nombreuses décisions sont prises ou recommandées par des algorithmes : choisir des vidéos, affecter des élèves à des établissements d'enseignement, accorder un prêt ou une remise de peine… Obtenir des explications sur ces décisions est fondamental afin d'avoir confiance et mieux accepter ces systèmes. C'est aussi un droit affirmé dans la loi pour une République numérique de 2016, et dans le Règlement général sur la protection des données de 2018. Mais si ces lois imposent d'expliquer, elles ne précisent pas comment le faire, ni ne définissent des critères pour juger de leur qualité.

Comment, dès lors, évaluer la qualité d'une explication ? Cela ne peut se faire qu'au regard de l'objectif de la personne à qui elle s'adresse : s'agit-il de comprendre la logique globale du système avant de l'utiliser ? De vérifier qu'une décision donnée est équitable et n'a pas exploité des informations non pertinentes (comme la couleur de la peau pour accorder un prêt, par exemple) ? De guider la prise de décision dans le cas d'une recommandation (une application proposant un diagnostic médical doit donner les raisons de ce diagnostic, afin de convaincre le médecin qu'il est correct) ?

Certains algorithmes sont naturellement explicables. Par exemple, les décisions d'un système à base de règles peuvent être justifiées en listant les règles utilisées. Mais de nombreux systèmes d'IA ne peuvent être expliqués en observant leur code, soit parce qu'il n'est pas accessible (pour des raisons de propriété intellectuelle, par exemple), soit parce qu'il ne permet pas de construire des explications intelligibles par un être humain.

C'est le cas, notamment, pour les réseaux de neurones profonds : ils possèdent un très grand nombre de paramètres (dont les valeurs sont fixées progressivement afin de faire correspondre au mieux le modèle à des données d'entraînement), et la connaissance des valeurs de ces paramètres ne permet pas de fournir des explications intelligibles. Ces IA fonctionnant en « boîtes noires » peuvent construire des explications en même temps que la décision. On peut, par exemple, entraîner un réseau de neurones à simultanément faire une prédiction et fournir une justification intelligible de cette prédiction sous la forme d'un ensemble de caractéristiques ayant influencé la décision. Mais comment vérifier leur sincérité ?

Afin que les utilisateurs puissent adapter leurs usages, la connaissance de divergences entre comportement déclaré et comportement effectif est fondamentale

Une possibilité est de concevoir des algorithmes en charge de construire des explications uniquement en observant les décisions prises. Prenons l'exemple d'une application qui affecte des élèves à des établissements d'enseignement

supérieur, chaque élève étant décrit par un ensemble de caractéristiques (notes, vœux, genre). Si un élève *x* souhaite avoir une justification de son affectation à un établissement *Y*, nous pouvons chercher les caractéristiques communes avec d'autres élèves que l'algorithme a affectés à *Y*. Nous pourrons justifier l'affectation de *x* à *Y*, en expliquant que c'est aussi le cas de tous les élèves ayant classé *Y* parmi leurs trois premiers vœux et ayant une moyenne en musique supérieure à 14/20. Si *x* souhaite contester cette affectation car il préfère un autre établissement *Z*, nous pouvons rechercher une explication «contrefactuelle» en identifiant ce qu'il faudrait changer dans les données décrivant *x* pour que l'algorithme l'affecte à *Z* plutôt qu'à *Y*: un élève dont la seule différence avec *x* est le genre et ayant été affecté à *Z* fournit une bonne raison pour contester l'affectation de *x* à *Y*.

La confrontation des explications fournies par l'IA avec celles construites par un système extérieur (observant les décisions prises) sert à vérifier que l'IA ne masque pas délibérément des explications contestables (à caractère discriminatoire, entre autres), ou que les considérations éthiques revendiquées par le concepteur d'un système sont effectivement mises en pratique dans le système. Ainsi, des chercheurs ont montré que les explications fournies par Facebook sur le choix des publicités montrées étaient souvent incomplètes et parfois trompeuses (1).



DR

La connaissance de divergences entre comportement déclaré et comportement effectif est fondamentale pour permettre aux utilisateurs d'adapter leurs usages.

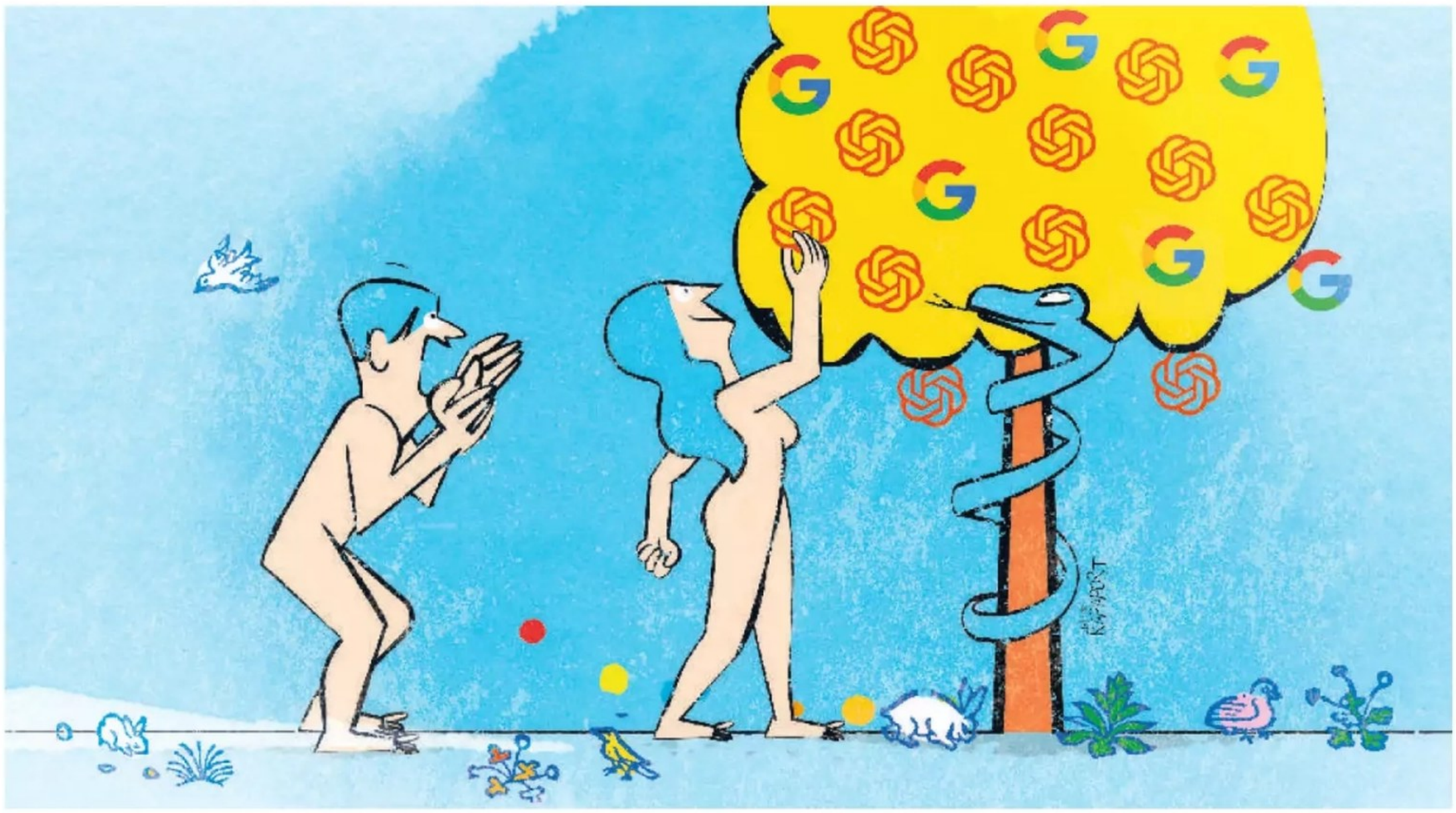
Force est de constater qu'elle est rarement disponible et il est donc très important de continuer les recherches sur l'IA explicable. ■

(1) A. Andreou *et al.*, doi : 10.14722/ndss.2018.23191, 2018.

Christine Solnon, professeure d'informatique à l'Institut national des sciences appliquées de Lyon (INSA).

LA CHRONIQUE DESSINÉE

Par Gilles Rapaport



▲ *Pour contrer ChatGPT, lancé fin 2022 par OpenAI, Google annonce l'arrivée en 2023 du chatbot Sparrow, conçu par sa filiale DeepMind.*

ÉTHIQUE

La chronique de Jean-Gabriel Ganascia

Les déroutants avatars de la philanthropie à l'âge numérique

Les sciences et les technologies modernes accroissent si considérablement la portée de nos actes que leurs conséquences ne se limitent plus à nos environnements immédiats. Les effets de nos gestes quotidiens, de nos ablutions, de nos modes d'alimentation, des façons de nous vêtir, de nos déplacements débordent la sphère étroite de nos circonvoisins… Qu'on en prenne conscience !

Nos modes de vie touchent tous nos contemporains sur la planète, même les plus éloignés. Au-delà, et ainsi que le philosophe Hans Jonas l'a montré dans *Le Principe responsabilité* (1979), ils se répercuteront sur les conditions de vie des générations futures. Par respect pour elles, nous devons donc tout faire pour préserver la planète afin de leur offrir un monde où ils pourront vivre dignement. Conscient de l'importance de ces enjeux, le secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies, António Guterres, appelle à un sommet du futur qui s'ouvrira en septembre 2023 ; il y invite les États à présenter des gestes crédibles en vue d'endiguer la crise climatique. Les documents préparatoires analysent les évolutions probables d'ici à la fin du siècle et les conséquences des politiques nationales sur ces évolutions.

Comment s'opposer à une telle initiative ? Il serait insensé de détourner le regard de ce qui adviendra si l'on n'y prend garde. En disconvenir relèverait, à l'évidence, d'une démission devant les responsabilités qui nous incombent à tous aujourd'hui. Se soucier du futur, non seulement de notre futur et de celui de nos congénères, mais aussi de celui de notre postérité, devient aujourd'hui un impératif moral. Mais, quel horizon fixer à notre bienveillance ? Jusqu'où doit-on se préoccuper du sort de notre postérité ? Deux à trois décennies ? La fin du siècle ? Deux siècles ? Un millénaire ? Dirigé par le philosophe Nick Bostrom et financé par le célèbre homme d'affaires Elon Musk, un laboratoire influent de la très vénérable université d'Oxford, au Royaume-Uni, l'Institut du futur de l'humanité (Future of Humanity Institute, ou FHI, en anglais) va bien plus loin. Il ne restreint pas ses investigations aux décennies, aux siècles ou aux millénaires à venir ; il étudie ce qui arrivera sur le très long terme, dans des millions d'années. Selon les chercheurs de ce laboratoire, à ces échéances, la Terre continuera d'exister et l'humanité conquerra d'autres planètes, dans d'autres systèmes stellaires, d'autres galaxies. Et, dans ce futur lointain, les vies humaines ne se compteront plus en milliards d'individus comme aujourd'hui, voire en dizaines de milliards comme peut-être demain, mais en milliards de milliards. Sachant que, pour ces philosophes d'obédience utilitariste – comme le sont en majorité ceux des universités anglo-saxonnes –, l'action s'évalue au regard de la quantité de plaisirs et de peines qu'elle occasionne, les vies de ces multitudes inouïes d'individus futurs engagent dès à présent notre responsabilité.

Dès lors, ils se sentent moralement obligés de tout mettre en œuvre pour faciliter l'existence probable, à long terme,



PIERRE KITMACHER

de ces myriades d'êtres humains. En dérive une doctrine éthique qualifiée de « long-termisme », puisqu'elle se préoccupe du bien-être de tous les individus sensibles : ceux, peu nombreux, qui vivent aujourd'hui, et surtout ceux, bien plus nombreux, qui vivront dans très longtemps.

Ces philanthropes s'inquiètent de l'avenir, et on ne saurait leur donner tort. Ils s'alarment de ce que, par ses actions inconsidérées, la génération actuelle mette un terme à l'essor prodigieux de l'humanité. Un jeune représentant du FHI, William MacAskill, compare l'âge présent de l'humanité à celui de l'adolescence, où tout se joue et où, s'il ne se comporte pas correctement, l'individu perd tout espoir pour son futur d'adulte (1). L'humanité vivrait ainsi, aujourd'hui, une période charnière où elle risquerait son salut. Pour le naïf, les effets dramatiques du réchauffement climatique, les possibles crises sanitaires, la pollution de l'eau et des sols, voire une guerre nucléaire ou une collision avec une comète géante, font craindre le pire. Nenni ! Selon les penseurs du long-termisme, le problème ne réside pas là. Sans doute, du fait de ces catastrophes, quelques dizaines, voire quelques centaines, de millions d'êtres humains périront. Mais le développement de l'humanité ne s'en trouvera pas entravé pour autant.

Le souci vient d'ailleurs.

La règle de trois du long-termiste : avoir beaucoup d'enfants, propager les « bonnes idées » partout et s'engager politiquement pour promouvoir les principes de cette vision.

FAÇONNER LE FUTUR TRÈS LOINTAIN AU MOYEN DE LA TECHNOLOGIE

Pour ces philosophes technophiles, seules les technologies, en particulier l'intelligence artificielle générale (branche de l'intelligence artificielle qui ne se restreint pas à la simulation de tâches intellectuelles spécifiques, comme le jeu de Go ou la traduction automatique, mais qui aspire à les reproduire toutes, comme un humain) autoriseront l'élan prodigieux au terme duquel l'humanité s'affranchira de toutes les contraintes matérielles, quittera la Terre, colonisera l'Univers et s'épanouira. Or, deux dangers guettent : la stagnation, conséquence éventuelle de crises environnementales et, à l'opposé, l'émancipation d'ordinateurs super-intelligents qui imposeraient leur volonté propre et prendraient l'ascendant sur l'humanité. L'astrophysicien Stephen Hawking (1942-2018) et Elon Musk appellent cela le « risque existentiel ». On doit tout mettre en œuvre pour empêcher tant l'un – à savoir le marasme – que l'autre – c'est-à-dire l'autonomisation de la technologie, qui poursuivrait ses finalités propres, sans plus se soucier de l'humanité. Les tenants du long-termisme s'y attèlent fermement en prônant des mesures qu'ils considèrent eux-mêmes comme étant d'« altruisme effectif » (« effective altruism » en anglais). Au plan collectif, ces mesures visent à façonner le futur lointain au moyen de la technologie, en évitant toute forme de récession. Nick Beckstead, un partisan de la cause, ancien du FHI, explique ainsi sans ciller que l'on doit privilégier les vies des habitants des pays riches à celles des habitants des pays pauvres, car la productivité des premiers et, surtout, son effet d'entraînement assureront la poursuite du progrès (2). Sur le plan individuel, cela se traduit par trois mesures concrètes à mettre en place : avoir une famille nombreuse pour augmenter l'humanité ; propager les « bonnes idées » partout ; s'engager politiquement et, dans ce cadre, promouvoir les principes du long-termisme.

Comme les effets de ces attitudes demeurent modestes et que les tenants du long-termisme aspirent à l'efficacité, un autre levier est particulièrement mis à contribution : les donations à la cause, surtout lorsqu'elles viennent de mécènes puissants comme Elon Musk. Afin de les faciliter, William MacAskill a créé le Center For Effective Altruism ; cette institution privée est chargée de centraliser et de gérer les fonds recueillis. On compte parmi les généreux bienfaiteurs, outre Elon Musk, Sam Bankman-Fried, le fondateur de la société de cryptomonnaies FTX, qui fait l'objet de poursuites judiciaires aux États-Unis après la faillite retentissante de son entreprise en novembre 2022. Discrimination selon la plus ou moins grande maîtrise des technologies, manque d'empathie pour les victimes du réchauffement climatique ou des crises sanitaires de tous ordres : décidément, en se fixant comme devoir moral de sauver l'humanité au long cours, les philanthropes de l'altruisme effectif et du long-termisme font preuve de bien peu de sentiments d'humanité ! ■

(1) William MacAskill, *What We Owe to the Future*, Basic Books, 2022.

(2) https://tinyurl.com/beckstead-shaping-far-future

Jean-Gabriel Ganascia est professeur d'informatique à Sorbonne Université.
Les vues exprimées dans cette chronique n'engagent que leur auteur.



▲ Le Trou noir, *de Gary Nelson, sorti en 1979, suit un vaisseau spatial dont la mission est chamboulée par la découverte d'un trou noir et d'un autre vaisseau, porté disparu depuis vingt ans.*

Passés en un demi-siècle du statut d'objets hypothétiques à celui d'astres avérés, les trous noirs n'ont entre-temps cessé d'inspirer le cinéma. Mais dans quelle mesure les représentations visuelles qu'on y trouve sont-elles en accord avec les découvertes de l'astrophysique ?

Les trous noirs sur grand écran



Étienne Ligout,
PHYSICIEN, ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE DE LYON
Après des études de physique à l'ENS de Lyon, au cours desquelles il a travaillé sur la signature de la gravité quantique, il se consacre désormais à l'épistémologie.

Les trous noirs, ainsi baptisés par le physicien américain Archibald Wheeler (1911-2008) en 1967, font leur apparition en fiction dès l'année suivante, quand Poul Anderson (1926-2001) publie *Kyrie*. La nouvelle de l'écrivain américain narre les mésaventures temporelles d'une nonne rattachée à un couvent lunaire et entretenant un lien télépathique avec un trou noir conscient. Si l'auteur exploite déjà certaines propriétés physiques de ces « cœurs de supernova » (notamment l'important décalage temporel expérimenté à leur voisinage par rapport à un observateur plus éloigné), l'allure de ces objets célestes y demeure pour le moins vague, ce qui constitue une difficulté inhérente au support littéraire. Cela n'empêche pas le concept de gagner rapidement en popularité : dès les années 1970, en plein âge d'or de l'étude théorique des trous noirs dans le cadre de la relativité générale d'Einstein (1), il s'invite même sur le grand écran. Pour tenter de concurrencer le phénomène *Star Wars*, Disney sort son propre space-opera, *Le Trou noir* (1979), qui offre la première représentation explicite d'un tel astre au cinéma. Le film se déroule en 2130 et suit l'équipage de l'USS Palomino, dont la mission initiale est chamboulée par la découverte d'un trou noir et d'un vaisseau fantôme orbitant autour, l'USS Cygnus, porté disparu depuis vingt ans. Malgré un accueil mitigé à sa sortie, *Le Trou noir* est aujourd'hui reconnu comme le précurseur de toute une série de films de science-fiction cherchant, à l'aide d'effets spéciaux et de simulations numériques, à donner une représentation visuelle concrète de ce type d'astre. Au fil du temps et des connaissances scientifiques accumulées sur les trous noirs, on constate d'ailleurs que leur perception en science-fiction a évolué.

CE QUI Y PÉNÈTRE N'EN RESSORT JAMAIS

D'un point de vue scientifique, les trous noirs correspondent aux corps célestes nés d'un effondrement gravitationnel ininterrompu, lors duquel de la matière se condense dans une région toujours plus réduite, jusqu'à piéger toute particule en son sein, y compris les photons

COLLECTION CHRISTOPHEL © WALT DISNEY - DR

(les particules de lumière). Comme la matière à l'origine du trou noir continue de s'effondrer sur elle-même, même après sa création, ce dernier s'apparente moins à un astre solide classique qu'à une région essentiellement vide ; ce qui y pénètre ne ressort jamais et finit inexorablement par être anéanti par une singularité gravitationnelle (c'est ce que prédit la relativité générale – soit notre meilleure théorie de la gravitation –, qui trouve ici ses limites). Cette région est délimitée par un horizon (des événements), au-delà duquel aucun corps ni signal ne peut plus réchapper, pas même la lumière.
S'il est donc entendu qu'un trou noir est bel et bien noir, qu'en est-il de sa forme ? Dans le film de Disney, le trou noir est littéralement un trou, soit un disque plat, dans lequel le gaz environnant est englouti en spirale, rappelant l'écoulement de l'eau dans un siphon. On trouve une représentation analogue dans le film *Star Trek* (2009), reboot de la série télévisée éponyme des années 1960. Réalisé par J. J. Abrams, le long-métrage montre des trous noirs gigantesques, représentés comme plats, qui forment des ponts entre réalités alternatives et sont traversables – ce qui n'est pas sans rappeler l'imagerie du jeu Portal, sorti deux ans plus tôt, en 2007.

CECI N'EST PAS UN DISQUE PLAT…

Or, contrairement à ce que pourrait laisser croire la dénomination trouvée par Wheeler (et qui a sans doute influencé les réalisateurs des deux films que nous venons de citer), un trou noir n'est pas un disque plat orienté selon une direction bien précise. Il s'agit plutôt d'une région tridimensionnelle délimitée par une surface sphérique (ou légèrement oblongue si le trou noir est en rotation).
Pour simplifier, considérons d'abord le cas d'un trou noir statique. Dans cette situation, il est une portion de l'espace circonscrite par une sphère qui constitue son horizon, et dont le rayon est proportionnel au contenu en matière et énergie piégé à l'intérieur ; ce rayon est connu sous le nom de « rayon de Schwarzschild », en l'honneur du physicien Karl Schwarzschild qui, le premier, étudia les propriétés de l'espace-temps autour d'un objet sphérique de ce type, en 1915. Peu importe d'où l'on regarde un tel trou noir, le profil observé sera donc celui d'un disque opaque.
Si maintenant le trou noir est en rotation – on l'appelle alors un trou noir de Kerr, d'après le mathématicien néo-zélandais Roy Kerr qui a trouvé

▼ Interstellar (2014), *de Christopher Nolan, décrit la mission tumultueuse d'astronautes à la recherche d'un monde habitable, car la Terre se meurt à la suite d'une crise alimentaire sans précédent. Ils explorent alors les planètes (ci-dessous, en noir, la planète Miller) orbitant autour d'un trou noir supermassif d'environ 100 millions de masses solaires, nommé Gargantua.*



la première solution générale des équations d'Einstein modélisant ce type d'astre en 1963 –, son aspect ne sera plus aussi symétrique. La surface de l'horizon s'allonge en effet dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation, de manière analogue à la surface de la Terre, qui est renflée en raison de sa rotation diurne : la force centrifuge est nulle aux pôles, mais s'intensifie à mesure que l'on se rapproche de l'équateur, expliquant cette forme oblongue. Notons toutefois que, à la différence d'un corps astrophysique classique, dont l'élongation n'admet en principe aucune limite, l'horizon d'un trou noir de Kerr reste quasi sphérique.
On trouve une illustration saisissante de cette propriété dans le célèbre *Interstellar* (2014), de Christopher Nolan. Le film narre la mission tumultueuse d'astronautes à la recherche d'un monde habitable, et qui explorent à cette fin les planètes orbitant autour d'un trou noir supermassif d'environ 100 millions de masses solaires : le bien-nommé Gargantua. Peu importe d'où les personnages le regardent, ce trou noir apparaît comme une tache opaque pratiquement circulaire. Or, comme l'indique l'astrophysicien Kip Thorne – principal consultant scientifique du film et prix Nobel 2017 pour sa contribution à la détection des ondes gravitationnelles – dans son livre sur la question (2), Gargantua effectue une rotation complète sur lui-même en une heure ; avec une circonférence d'environ un milliard de kilomètres, sa vitesse de rotation dépasse donc 90 % de la vitesse de la lumière. Ainsi, qu'ils soient immobiles ou qu'ils tournent, les trous noirs conservent l'aspect d'une région opaque délimitée par une surface que l'on peut considérer (au moins en première approximation) comme sphérique.

En fiction comme dans notre Univers, un trou noir n'est pas isolé. Il attire à lui la matière environnante

Mais si l'étude de la représentation visuelle des trous noirs se limitait à la forme de leur horizon, la chose serait en réalité bien ennuyeuse et ne poserait aucune difficulté théorique ou de modélisation, puisque tous se ressemblent et sont très bien compris de ce point de vue. L'aspect le plus fascinant de ce problème ne réside pas dans la représentation du trou noir en lui-même, mais plutôt dans ce qui l'entoure. En fiction comme dans notre Univers, un trou noir astrophysique est rarement isolé et attire à lui la matière environnante (essentiellement du gaz). Le trou noir de Disney figurait déjà cette idée, quoique d'une manière peu réaliste : la spirale gazeuse, qui pourtant devrait se tarir à mesure que ses constituants pénètrent à l'intérieur de l'horizon du trou noir, semble stable dans le film, et ce malgré la vitesse très rapide à laquelle le gaz est montré en train de chuter vers le corps céleste.
Le film de Disney reprend aussi une idée tenace : la matière attirée par le champ gravitationnel d'un de ces astres serait nécessairement condamnée à y sombrer. Or, il est également possible qu'elle se place en orbite autour de ce dernier. Focalisons-nous sur des orbites circulaires, qui sont pour l'essentiel celles exploitées dans les films que nous évoquons ici. La théorie de la relativité générale montre qu'il est possible d'orbiter un trou noir, à condition de se placer sur une orbite au rayon supérieur à ce qu'on nomme le rayon de plus basse orbite (circulaire). Ainsi, on peut se représenter le trou noir et son environnement proche comme suit : une région quasi-sphérique opaque au centre, qui constitue le trou noir à proprement parler, puis une zone quasiment vide entre l'horizon et le rayon de plus basse orbite, et enfin une région emplie de gaz en orbite autour de ce centre.

… MAIS UN DISQUE D'ACCRÉTION

Les trous noirs du type Kerr (en rotation) ont ici deux spécificités par rapport à ceux du type Schwarzschild (statiques). D'abord, la zone vide est moins étendue et se rétrécit à mesure que la vitesse de rotation de l'astre augmente. Ensuite, toujours du fait de cette rotation, le gaz n'orbite pas en tous sens, mais dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation : il se structure donc en un disque d'accrétion. En cohérence avec cette propriété, *Interstellar* dépeint une mince ceinture gazeuse tournoyant autour de Gargantua.
Le film fait néanmoins quelques entorses à la réalité scientifique en ce qui concerne la représentation de la couleur et de l'intensité lumineuse dudit disque d'accrétion ; ces écarts sont assumés par Thorne et Nolan, qui craignaient qu'un visuel plus réaliste apparaisse incompréhensible aux spectateurs. Du fait de son mouvement de rotation autour de Gargantua, le gaz est porté à des vitesses avoisinant celle de la lumière et se réchauffe pour atteindre la température de la surface du Soleil (soit environ 5 500 °C), expliquant les teintes jaunes et oranges du disque.
En revanche, le long-métrage montre avec justesse les régions du disque

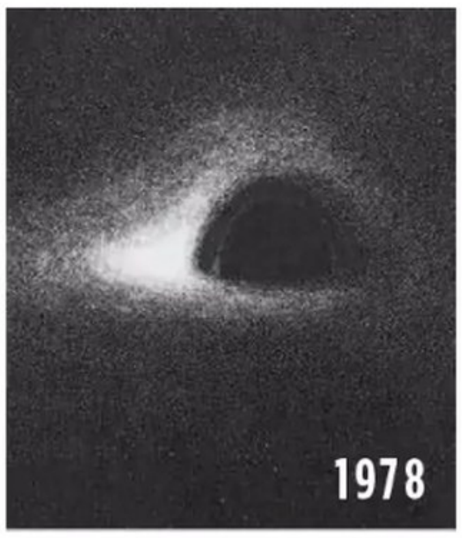
ALL ABOUT SPACE MAGAZINE / GETTY IMAGES

plus proches de l'horizon comme plus brillantes, ce qui s'explique aisément en raison de la vitesse et donc de la température accrue qu'acquiert le gaz dans ces régions par rapport au gaz en périphérie.
Par souci esthétique et de simplicité, Christopher Nolan a par ailleurs préféré supprimer, dans son film, un effet quelque peu contre-intuitif : l'asymétrie lumineuse et spectrale du disque. Comme l'avait déjà montré la première représentation réaliste d'un trou noir (sans rotation, en l'occurrence) enceint d'un fin disque d'accrétion, tracée à la main par l'astrophysicien français Jean-Pierre Luminet en 1978 (3), la partie du disque qui s'éloigne d'un observateur éloigné du trou noir voit sa luminosité atténuée par rapport à la partie qui se rapproche de cet observateur.
Cette asymétrie trouve son origine dans l'interaction de deux effets relativistes fondamentaux. D'une part, la distorsion de l'espace-temps au voisinage du trou noir tend à y distendre les durées par rapport à celles qui sont mesurées par un observateur lointain (dans le film de Nolan, une heure sur la planète Miller, en orbite autour du trou noir, équivaut à sept années sur Terre) et donc à diminuer les fréquences lumineuses. D'autre part, l'effet Doppler tend à augmenter la fréquence de la lumière qui s'approche du même observateur lointain, et à diminuer la fréquence de celle qui s'en éloigne. Du côté où la lumière se rapproche de nous, ces deux effets se compensent plus ou moins et le disque conserve une luminosité conséquente, mais prend une teinte bleutée en raison de l'augmentation de la fréquence lumineuse. Du côté où la lumière s'éloigne de nous, ces deux effets se renforcent au contraire, de manière à assombrir le disque et tirer ses teintes vers le rouge.

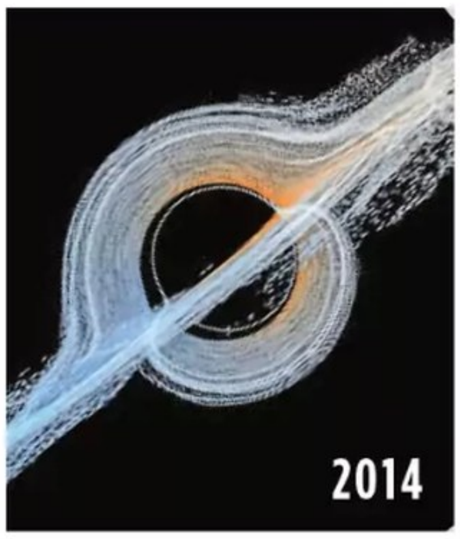
La lumière peut être déviée par un astre et ainsi nous parvenir autrement que par un chemin rectiligne

Après la sortie *d'Interstellar,* Kip Thorne et l'équipe de la société d'effets spéciaux Double Negative ayant travaillé sur le film ont publié un article technique (4) présentant l'allure de Gargantua lorsque ces effets sont pris en compte. Notons qu'un film moins connu, *High Life* (2018), réalisé par la Française Claire Denis et élaboré en collaboration avec le cosmologiste Aurélien Barrau, a pris soin de prendre en compte l'asymétrie lumineuse sans toutefois aller jusqu'à inclure l'asymétrie spectrale.
Il n'aura pas échappé aux lecteurs et lectrices les plus avertis que la description de l'apparence du disque d'accrétion développée jusqu'ici n'explique pas un point pourtant saisissant de ce visuel : la présence de gaz au-dessus et en dessous de l'horizon, alors même que le disque est pratiquement perpendiculaire au point de vue de l'image.
On s'attendrait en effet à ce que seul le gaz devant le trou noir (par rapport à l'observateur) soit visible, et le reste du disque masqué par ce dernier.
Mais ce serait oublier qu'en relativité générale, la lumière elle-même peut être déviée par un astre, et ainsi nous parvenir autrement que par un chemin rectiligne.
Au voisinage d'un trou noir, le champ gravitationnel est ainsi suffisamment fort pour incurver une partie des rayons lumineux provenant de l'arrière du disque dans notre direction. Ces rayons peuvent soit passer par-dessus l'horizon, soit par-dessous, d'où les deux régions additionnelles observées.
Ce phénomène serait aussi présent à partir d'autres angles de vue sur le trou noir et son disque, sauf si l'observateur les regarde « de dessus », c'est-à-dire parallèlement au plan de rotation du disque d'accrétion.
Un autre effet plus discret, mais non moins intéressant, est la présence d'un mince disque lumineux en

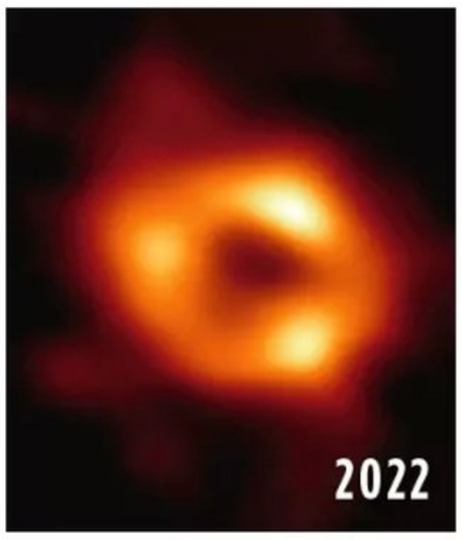
TELS QUE NOUS POUVONS LES VOIR



▲ *Première simulation d'un trou noir, par Jean-Pierre Luminet.*



▲ *Image du trou noir d'*Interstellar, *simulée de manière réaliste.*

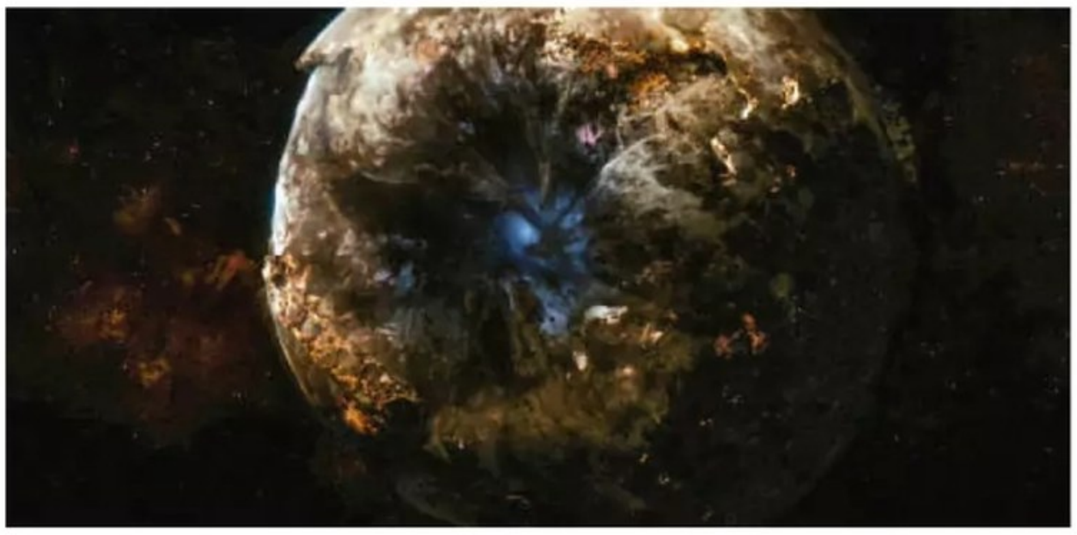


▲ *Première visualisation du trou noir de la Voie lactée Sagittarius A*.*

JEAN-PIERRE LUMINET - KIP THORNE ET AL./CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY - ESO / COLLABORATION EHT

Quand le trou noir se fait petit

Si la plupart des trous noirs sont pensés comme la vedette de leur film et montrés sous toutes leurs coutures, il arrive que la caméra se détourne d'eux le temps d'une scène, pour se focaliser sur leurs seuls effets destructeurs.
Dans une scène clé du *Star Trek* (2009) de J. J. Abrams, les Romuliens (ennemis jurés des Vulcains, l'espèce de l'iconique M. Spock) forent le manteau de la planète Vulcain afin d'y larguer une mystérieuse matière rouge, dont la caractéristique principale est de s'effondrer indéfiniment sur elle-même à la moindre perturbation.
En entrant en collision avec le noyau planétaire, la matière rouge se mue ainsi en un trou noir qui attire à lui la matière environnante et déstabilise peu à peu la structure interne de la planète. L'originalité de cette scène tient au point de vue qu'elle adopte, à contrepied du cahier des charges hollywoodien (censé fournir au spectateur l'expérience la plus spectaculaire possible) : le trou noir n'y est filmé à aucun moment, et toute l'action se déroule à la surface de la planète. L'influence gravitationnelle du trou noir ne tarde pas à s'y faire sentir : la terre tremble, les bâtiments (et bientôt le relief) se fissurent, une civilisation s'effondre.
En à peine six minutes (dans le film et la diégèse de l'histoire), Vulcain disparaît, entraînée par-delà l'horizon, ne laissant derrière elle que l'obscurité de l'espace.
Plus curieusement, le trou noir n'est toujours pas visible. La raison en est simple, sa taille !
On peut en effet montrer (en supposant que Vulcain est similaire en envergure et en masse à la Terre) qu'un tel trou noir aurait un rayon de l'ordre du millimètre, soit à peu près la taille d'un modeste petit pois. É. L.



▲ *Dans* Star Trek, *sorti en 2009, la planète Vulcain disparaît en quelques minutes, après la création d'un minuscule trou noir.*

COLLECTION CHRISTOPHEL © PARAMOUNT PICTURES

bordure du trou noir. Or, n'avions-nous pas dit que rien ne peut orbiter circulairement aussi près de l'horizon ? En réalité, ces rayons lumineux ne sont pas en orbite, mais seulement momentanément capturés gravitationnellement par le trou noir (de manière à effectuer un ou plusieurs tours de l'horizon) avant de s'en éloigner à jamais. *Interstellar* – et *High Life* dans une moindre mesure – fait ici encore figure d'exemple inégalé au cinéma, en incluant toutes ces déformations optiques dues à la gravité. Mais il est un type de mirage gravitationnel que *High Life* met davantage à l'honneur : la forte déformation du fond stellaire à proximité de l'horizon.

Dans une scène glaçante, Boyse, une prisonnière condamnée à perpétuité et envoyée (avec d'autres criminels) comme cobaye autour d'un trou noir, voit les étoiles et nébuleuses en arrière se déformer de plus en plus à mesure qu'elle se rapproche de l'horizon, avant de finir broyée (« spaghettifiée », techniquement) par la trop forte gravité. On peut mettre en parallèle ce visuel avec la simulation réalisée en 2014 par l'astrophysicien français Alain Riazuelo (5), qui nous montre encore une fois que la frontière entre la représentation cinématographique et la connaissance scientifique des trous noirs s'est largement réduite au cours de la dernière décennie.

À quoi pourrait ressembler un trou noir dans la fiction demain ? Sans doute sera-t-elle inspirée de la découverte de la fusion de trous noirs gigantesques, mise en évidence grâce aux ondes gravitationnelles détectées à maintes reprises par les interféromètres géants depuis 2016. De quoi raconter de nouvelles histoires… ■

(1) Kip Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, Champs Flammarion, 2022.
(2) Kip Thorne, *The Science of Interstellar*, W. W. Norton & Company, 2014 (non-traduit).
(3) B. Carter et J.-P. Luminet, *La Recherche* n° 94, p. 944, novembre 1978.
(4) O. James *et al.*, *Classical Quant. Grav.*, *32*, 065001, 2015.
(5) https://tinyurl.com/riazuelo-interstellar

Abonnez-vous à La Recherche

et recevez



4 numéros trimestriels
EN VERSION PAPIER

+



PLUS DE 25% DE RÉDUCTION

L'ACCÈS À LA VERSION NUMÉRIQUE
de ces 4 numéros

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à renvoyer sous enveloppe affranchie à : La Recherche, Service abonnements 45, avenue du Général Leclerc - 60643 Chantilly Cedex

La Recherche

OUI, je m'abonne pour 1 AN à La Recherche soit 4 numéros trimestriels en version papier et numérique pour 29 € au lieu de ~~39,60€~~*. Je réalise plus de 10 € d'économie.

PLRC 572

J'indique ci-dessous mes coordonnées : ☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Téléphone : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

Pour accéder à la version numérique de vos numéros, merci d'indiquer votre email :

..... @ .....

☐ J'accepte de recevoir par mail, des offres des partenaires de **La Recherche**.

Mon mode de règlement :

Je règle par :

☐ Chèque bancaire ou postal à l'ordre de **La Recherche**

☐ Carte bancaire N° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Date d'expiration |_|_| |_|_|

Signature obligatoire :

* Vous pouvez acquérir séparément chacun des numéros trimestriels de La Recherche au prix unitaire de 9,90 €. Offre réservée exclusivement aux nouveaux abonnés résidant en France métropolitaine. Service abonnements France : 01 55 56 71 15. Renseignements et tarifs pour l'étranger : 00 33 1 55 56 71 15. Les Éditions Croque Futur situées au 41 Bis Avenue Bosquet, Paris 7e et qui éditent La Recherche, sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre abonnement. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 7 ans à partir de votre désabonnement. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives post-mortem à l'adresse mail suivante : dpo@sciencesetavenir.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 Bis Avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sciencesetavenir.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

La Recherche

Sciences et Avenir / La Recherche: 41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris. Tél.: 0155355600 • E-mail rédaction: courrier@larecherche.fr • **Site Internet:** larecherche.fr • Pour joindre directement par mail un membre de la rédaction, libellez l'adresse sur le modèle: prénom.nom suivi de @larecherche.fr (sans accents).

Pour toute question concernant votre abonnement: Adresse: *La Recherche* 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex. **Tél.:** 0155567115. • **ABONNEMENTS: Tarif France:** 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 trimestriels 59 euros. **Tarif international:** nous contacter. **E-mail:** abo.recherche@groupe-gli.com • **Suisse:** Edigroup. Tél.: +41 (0)22860 84 01 • **Belgique:** Edigroup. Tél.: +32 (0)70233304.

La Recherche est publiée par Croque Futur • **Président et directeur de la publication:** Claude Perdriel • **Directeur général:** Philippe Menat • **Directeur éditorial:** Maurice Szafran • **Directrice éditoriale:** Dominique Leglu • **Rédacteur en chef:** Philippe Pajot • **Rédacteur en chef adjoint:** Vincent Glavieux • **Chef de rubrique:** Mathias Germain • **Première secrétaire de rédaction:** Dorothée Nolan • **Conception graphique, couverture:** Dominique Pasquet • **Directeur artistique:** Jean-Louis Gilabert • **Rédactrice en chef adjointe photo:** Andreina de Bei • **Service photo:** Claire Balladur, Isabelle Tirant • **Ont collaboré à ce numéro:** Bruno Bourgeois, Sophie Ceugniet, Mahaut de Lataillade, Mehdi Harmi, Sylviane Savatier • **Fabrication:** Sarah Rabbah, Zelda Laffon • **Activités numériques:** Bertrand Clare • **Directeur des ventes et promotion:** Valéry Sourieau • **Vente messageries VIP-diffusion:** Frédéric Vinot • Numéro vert: 0800 51 49 74 • **Directeur des abonnements:** Luc Bonardi • **Responsable gestion abonnements:** Magali Viette • **Responsable marketing direct:** Armelle Behelo • **Responsable administrative et financière:** Jaye Reig • **Responsables ressources humaines:** Mélanie Henou, Sandrine Martin • **Comptabilité:** compta@challenges.fr • **Diffusion librairies:** Pollen Difpop. Tél.: 0143620807 Fax: 0172718451 • **Régie publicitaire:** MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris. Tél.: 0144889770. Fax: 0144889779 • E-mail: pnom@mediaobs.com • **Pour joindre directement une personne,** composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directrice générale:** Corinne Rougé (93 70) • **Directeur commercial:** Christian Stefani (93 79) • **Directeur du pôle Sciences:** Emmanuel Lala (89 28) • **Studio/Maquette/Techniques:** Cédric Aubry (89 05) • **Imprimerie:** RotoFrance Impression (Lognes). Dépôt légal à parution. Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du trimestriel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél.: 0144074770. Fax: 0146346719). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire: 0924 K 85863. ISSN 0029-5671.

CRÉDITS DE COUVERTURE :
FOND : PRAWAT THANANITHAPORN / SHUTTERSTOCK
BAS : PIXABAY - PHOTO12/ALAMY/MANUEL MATA – WALTER MYERS / SCIENCE PHOTO LIBRARY – NOAA
PORTRAITS : ROBERTO RUIZ DE ZAFRA (JAVIER GARCIA MARTINEZ) – BERNARD MARTINEZ (SYLVIA SERFATY)

PEFC 10-31-1057 Certifié PEFC

ACPM DIFFUSION

Origine du papier : Suède
Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation PTot = 0,003 kg/tonne de papier.
Ce magazine est imprimé chez RotoFrance Impression (Lognes), certifié PEFC.





Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

LES 34 SCIENTIFIQUES QUI ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO

Sylvain Bernard, *géochimiste,* chargé de recherche CNRS, Paris
Pierre-Henri Blard, *géochronologue,* directeur de recherche CNRS, Nancy
Clara Bolton, *paléo-océanographe,* chargée de recherche CNRS, Aix-en-Provence
Alexis Bonnecaze, *informaticien,* professeur à l'université Aix-Marseille
Chérifa Boukacem-Zeghmouri, *professeure en sciences de l'information - communication,* université Claude-Bernard, Lyon
Benoît Boutaud, *chercheur en sciences humaines et sociales,* Karlsruhe (Allemagne)
Pascale Braconnot, *climatologue,* chercheuse CEA, Gif-sur-Yvette
Sylvie Briand, *médecin,* directrice du département de prévention des épidémies et des pandémies à l'OMS, Genève (Suisse)
Davide Raffaele Ceratti, *physico-chimiste,* chercheur postdoctorant à Sorbonne Université, Paris
Hannah Sophia Davies, *géodynamicienne,* chercheuse postdoctorante, Potsdam (Allemagne)
Jean-François Deconinck, *sédimentologue,* professeur à l'université de Bourgogne, Dijon
Mary Elliot, *paléoclimatologue,* professeure à Nantes Université
Jean-Gabriel Ganascia, *informaticien,* professeur à Sorbonne Université, Paris
Javier Garcia Martinez, *chimiste,* président de l'Union internationale de chimie pure et appliquée, Alicante (Espagne)
Pascale Gisquet-Verrier, *neuroscientifique,* directrice de recherche émérite CNRS, Saclay
Morgan Jouvenet, *sociologue,* directeur de recherche CNRS, Guyancourt
Jean Jouzel, *paléoclimatologue,* directeur de recherche émérite, Gif-sur-Yvette
Masa Kageyama, *paléoclimatologue,* directrice de recherche CNRS, Gif-sur-Yvette
Amaëlle Landais, *glaciologue,* directrice de recherche CNRS, Gif-Sur-Yvette
Denis Langlet, *professeur agrégé,* titulaire d'une thèse de biogéochimie des carbonates
Irène Langlet, *professeure de littérature contemporaine,* université Gustave-Eiffel, Champs-sur-Marne
Gaëlle Leloup, *climatologue,* docteure en modélisation du climat, Gif-sur-Yvette
Étienne Ligout, *physicien,* École normale supérieure de Lyon
Didier Paillard, *climatologue,* chercheur CEA, Gif-sur-Yvette
Catherine Ritz, *glaciologue,* chercheuse CNRS, Saint-Martin-d'Hères
Benjamin Roche, *écologue,* directeur de recherche IRD, Mexico (Mexique)
Stéphen Rostain, *archéologue,* directeur de recherche CNRS, Paris
Maria Fernanda Sánchez Goñi, *paléoclimatologue,* directrice d'études EPHE, Paris
Pierre Sans-Jofre, *géochimiste,* maître de conférences au Muséum national d'Histoire naturelle, Paris
Pierre Sepulchre, *paléoclimatologue,* directeur de recherche CNRS, Gif-sur-Yvette
Sylvia Serfaty, *mathématicienne,* professeure à l'université de New York (États-Unis)
Christine Solnon, *informaticienne,* professeure à l'Institut national des sciences appliquées, Lyon
Kevin Thiry-Atighehchi, *informaticien,* maître de conférences à l'université Clermont-Auvergne
Claire Waelbroeck, *paléo-océanographe,* directrice de recherche CNRS, Paris

DANS LE PROCHAIN NUMÉRO, RETROUVEZ NOTRE
GRAND DOSSIER « LE MONDE DE L'INFINIMENT PETIT »
SORTIE LE 15 JUIN 2023

148 pages
Trimestriel

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

L 13412 - 573 - F: 9,90 € - RD

• ALLEMAGNE 11.20 € • BELGIQUE 10.90 € • LUXEMBOURG 10.90 € • ITALIE 10.90 € • ESPAGNE 10.90 € • GRÈCE 10.90 €
• PORTUGAL PORT-CON 10.90 € • SUISSE 15.90 CHF • DOM/S 10.90 € • CANADA 16.50 $CAN • TOM/S 1320 XPF
• MAROC 102 MAD • TUNISIE 14.40 TND