POUR LA SCIENCE

ÉCOLOGIE : « Le chiffrage monétaire de la nature est vain »

Catherine Aubertin
économiste de l'environnement

Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

Archéologie
DÉJÀ DU BLÉ AU MENU AVANT L'AGRICULTURE

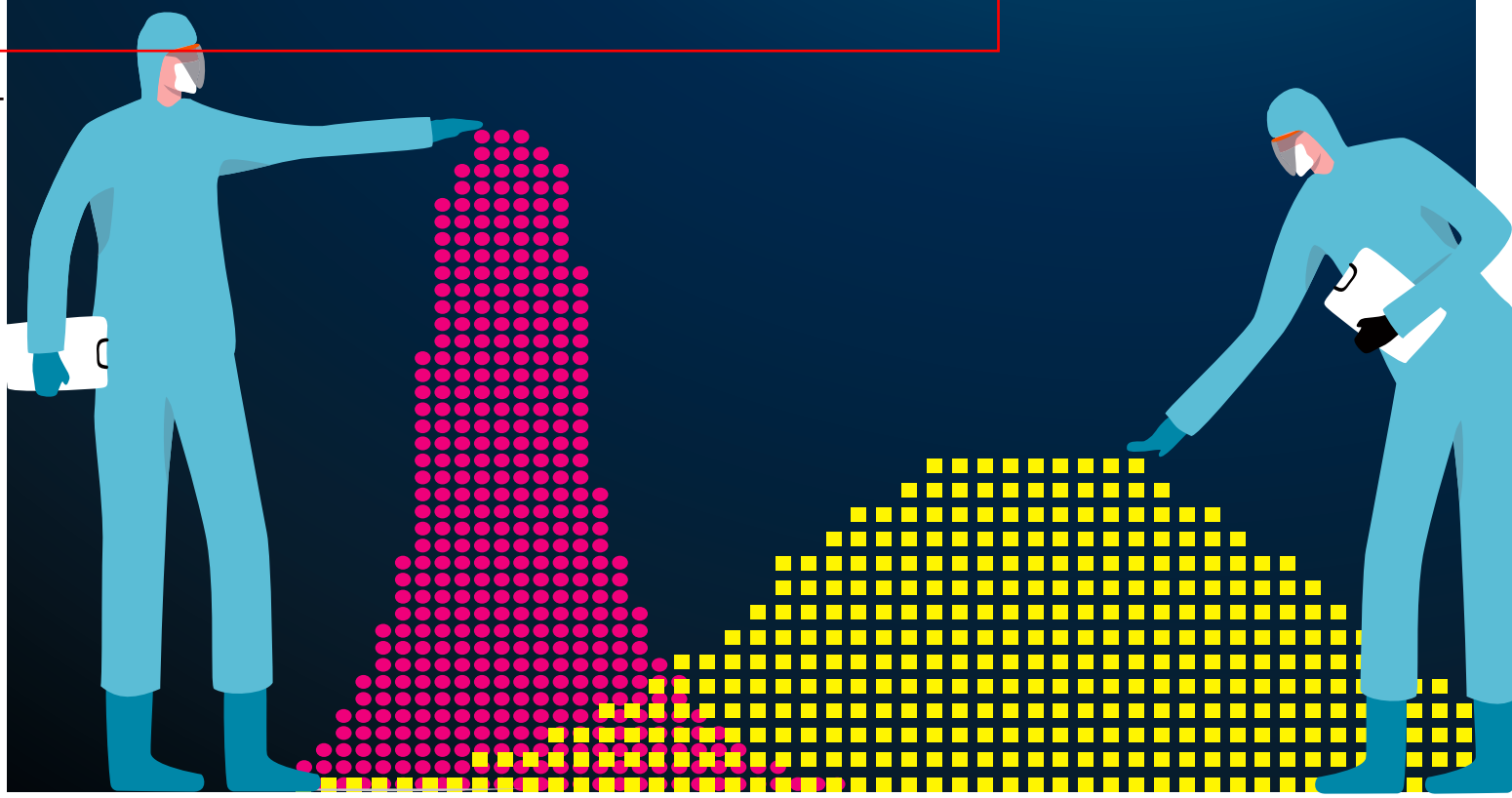
Mathématiques
LA CONJECTURE DE SYRACUSE CÈDE… UN PEU

Environnement
REFORESTATION : OUI, MAIS DE FAÇON RAISONNÉE !

11/21

MODÉLISER LES ÉPIDÉMIES

Ce que le Covid-19 a changé



L 13256 - 529 - F: 6,90 € - RD

Édition française de Scientific American **Novembre 2021 - n° 529**

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

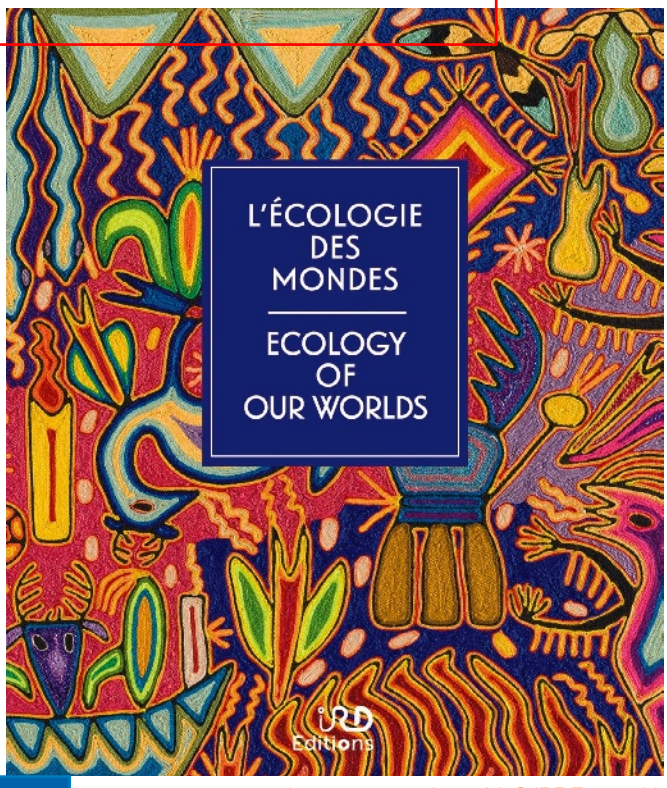
Éditions
Institut de Recherche pour le Développement
FRANCE

Un éditeur
pour le développement

www.editions.ird.fr

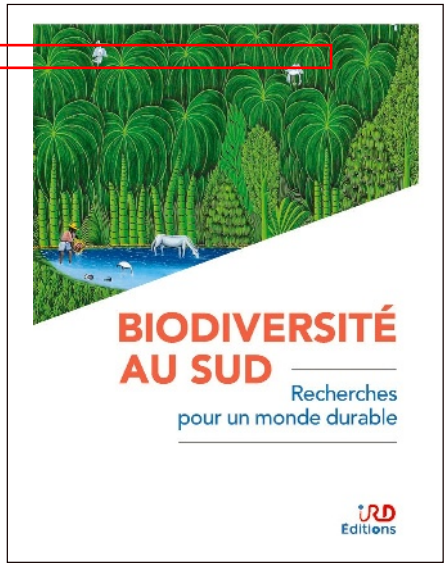
Découvrez notre catalogue et nos ouvrages sur la biodiversité

324 pages, 35 €
Version anglaise à paraître



144 pages couleur, 30 € (PDF gratuit)

204 pages couleur, 42 € (PDF gratuit)



72 pages couleur, 15 € (PDF gratuit)
Disponible en version anglaise

Pour la Science

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

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

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

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

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament, Ingrid Lhande
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Assistante administrative: Doae Mohamed
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Isabelle Bellin, Maud Bruguière, Laura Dietrich, Cécile Fauvelot, Sylvain Gandon, Sylvain Guiriec, Rémi Hackert, Aline Muyle, Patrick Petitjean, Christophe Pichon, Nora Scarcelli, Françoise Serre-Collet, Julien Varaldi

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

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

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres; Alicia Abadie
Tél. 04 88 15 12 47
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmut
President: Stephen Pincock
Executive vice president: Michael Florek

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

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

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

ÉDITO

Maurice Mashaal
Rédacteur en chef

BAPTÊME DU FEU POUR L'ÉPIDÉMIOLOGIE MODERNE

En comparaison avec les grandes épidémies du passé, la pandémie de Covid-19 est survenue dans un contexte inédit: grande mobilité des personnes à l'échelle régionale et planétaire, télécommunications aisées et instantanées, technologies numériques qui ont rendu supportables des confinements massifs et longs, disponibilité d'informations de toutes sortes, défiance vis-à-vis des institutions (y compris scientifiques) nourrie par les réseaux sociaux d'internet, etc.

Tout cela a contribué à mettre sur le devant de la scène cette science en constante évolution qu'est l'épidémiologie. Mais ce n'est pas seulement une mise en avant. La pandémie de Covid-19 a fortement stimulé les experts de ce domaine, qui ont vu leurs modélisations bousculées par l'urgence, la demande de la société et des autorités, la rapidité avec laquelle la situation évolue et les changements concomitants des politiques sanitaires.

Depuis l'arrivée du Covid-19, l'épidémiologie moderne vit ainsi une sorte de baptême du feu. Comme l'explique le spécialiste Samuel Alizon (*voir pages 22 à 27*), la modélisation des épidémies n'est pas seulement confrontée à de nouveaux défis, qui nécessitent de prendre en compte des aspects sociaux et biologiques jusqu'ici négligés. Elle connaît aussi un formidable essor, en profitant des grandes masses de données collectées par les autorités sanitaires ou obtenues grâce aux réseaux sociaux et ceux de téléphonie mobile. Avec des résultats suffisamment probants pour servir de guide à l'action politique.

L'une des approches de la modélisation consiste à considérer que l'épidémie se propage à travers un réseau, par exemple d'individus en contact. D'où l'intérêt des méthodes et concepts développés par les physiciens et les mathématiciens pour analyser le comportement de réseaux très divers. Et l'un de ces instruments est la théorie de la percolation, qui éclaire les phénomènes de contagion, mais aussi aide à concevoir des réseaux de communication décentralisés (*voir pages 28 à 36*). De la propagation d'un virus au sein d'une population à la propagation d'une information dans un réseau d'internautes, le lien est étroit. La pandémie de Covid-19 conduira-t-elle, par ricochet, à mieux comprendre les réseaux ? ■

SOMMAIRE

N° 529 / *Novembre 2021*

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- La présence humaine en Amérique remonte à 23 000 ans... au moins
- Ebola : une résurgence tardive
- Vers des opioïdes moins nocifs
- Un tsunami en laboratoire
- Des dromadaires sauvages sur gravures
- Une supernova atypique
- Remontage de fresques romaines à Arles
- Un subtil équilibre chromosomique

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
DISPUTES ENVIRONNEMENTALES
Le chiffrage monétaire de la nature est vain
Catherine Aubertin

P. 20
LES SCIENCES À LA LOUPE
La matière noire est-elle un nouvel éther?
Yves Gingras

Pour la Science.fr
LETTRE D'INFORMATION
NE MANQUEZ PAS LA PARUTION DE VOTRE MAGAZINE GRÂCE À LA NEWSLETTER
- **Notre sélection d'articles**
- **Des offres préférentielles**
- **Nos autres magazines en kiosque**

Inscrivez-vous www.pourlascience.fr

En couverture :
© Montage Pour la science avec : Shutterstock.com/CkyBe et Shutterstock.com/eamesBot

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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

GRANDS FORMATS

P. 38
ENVIRONNEMENT
POUR UNE REFORESTATION RAISONNÉE
Élise Buisson, Marie Ange Ngo Bieng et Thierry Gauquelin

Pour lutter contre le déclin de la biodiversité et le réchauffement climatique, on restaure des milieux forestiers dégradés. Ces projets doivent exploiter l'expertise acquise au cours des dernières décennies.

P. 56
BIOLOGIE MARINE
LES CORAUX PROFONDS SOUS PRESSION
Franck Lartaud et Lénaïck Menot

Plusieurs espèces de coraux se développent dans des eaux froides, à plusieurs centaines de mètres de profondeur, voire bien plus. Mais cela ne les protège pas de l'impact négatif des activités humaines...

P. 48
TECHNOLOGIE
L'OPTIQUE ADAPTATIVE, AU-DELÀ DES ÉTOILES
Tony Travouillon, Céline d'Orgeville et Francis Bennet

En équipant leurs télescopes d'un système qui corrige les effets des turbulences atmosphériques, les astronomes obtiennent des images d'une grande netteté. Cette technique pourrait aussi servir à la lutte contre les déchets spatiaux et à la cryptographie quantique.

P. 64
ARCHÉOLOGIE
DES CÉRÉALES AU MENU AVANT L'AGRICULTURE
Andrew Curry

Bien avant la domestication du blé ou de l'orge sauvages, des groupes humains moulaient déjà du grain pour produire de la bière, du pain et d'autres aliments riches en glucides.

P. 72
HISTOIRE DES SCIENCES

ÉDOUARD LARTET SUR LES TRACES DE L'HOMME FOSSILE
Nathalie Rouquerol

Édouard Lartet est de ces érudits du XIXe siècle dont nous n'avons pas toujours retenu le nom. Pourtant, il a posé l'un des premiers jalons de la longue histoire de l'homme.

À LA UNE

ÉPIDÉMIOLOGIE
P. 22
« AVEC LE COVID-19, LA MODÉLISATION DES ÉPIDÉMIES S'OUVRE AUX DONNÉES MASSIVES »
Entretien avec Samuel Alizon

Depuis le début de la pandémie, les modélisateurs s'activent pour décrire son évolution. Cette mobilisation a eu plusieurs conséquences majeures sur leur discipline. Le point avec l'un des acteurs clés du domaine en France.

MATHÉMATIQUES
P. 28
LA PERCOLATION, UN OUTIL POUR MODÉLISER LES RÉSEAUX
Kelsey Houston-Edwards

Inspirée à l'origine par des questions de physique, la théorie de la percolation permet d'étudier certaines propriétés des réseaux. Elle aide notamment à comprendre la propagation des épidémies, à concevoir un réseau de communication décentralisé ou à caractériser la diffusion des informations au sein d'un réseau social.

RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL

LA TENACE CONJECTURE DE SYRACUSE
Jean-Paul Delahaye

Cet énoncé arithmétique très simple passionne les mathématiciens amateurs et professionnels, mais nul n'a su encore la prouver. Pour autant, on progresse...

P. 86
ART & SCIENCE
Le chœur des autochtones
Loïc Mangin

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
Congeler à volume constant, c'est mieux
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Pourquoi des venins si toxiques ?
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Des pâtes reposées pour rester en forme
Hervé This

P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

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

ARCHÉOLOGIE

LA PRÉSENCE HUMAINE EN AMÉRIQUE REMONTE À 23 000 ANS... AU MOINS

Les préhistoriens ont retrouvé plusieurs pistes humaines entrecroisées sur les rives de l'ancien lac Otero, au Nouveau-Mexique.

Des traces de pas prouvent que des individus de notre espèce ont foulé le sol américain bien avant le dernier maximum glaciaire, il y a environ 21 000 ans.

Ce sont de simples empreintes de pieds humains, mais elles invitent à réécrire l'histoire du peuplement des Amériques. Un groupe d'individus les a laissées sur les bords du paléo-lac Otero, dans le parc national des White Sands, au Nouveau-Mexique, au milieu de traces de mammouths, de paresseux géants, de félins à dents de sabre et d'autres grands mammifères. Et, selon une étude menée par Matthew Bennett, de l'université de Bournemouth, en Angleterre, les plus anciennes de ces empreintes datent de 23000 ans... soit près de 2000 ans avant le dernier maximum glaciaire.

Or dans tous les scénarios du peuplement du continent américain pris au sérieux par les préhistoriens, c'est cette dernière période froide qui a permis à des populations eurasiennes de migrer vers l'Amérique. Ces groupes humains auraient en effet traversé la Béringie, c'est-à-dire l'isthme qui se forme entre l'Asie et l'Amérique lors des glaciations à cause de la baisse du niveau marin qui y est associée ; ils auraient ensuite atteint le sud du continent nord-américain soit en longeant la côte Pacifique soit par un corridor libre de glaces situé à l'est des Rocheuses.

> **Les datations des traces sont a priori très fiables**

Les préhistoriens ont longtemps été persuadés qu'aucune colonisation d'ampleur des Amériques n'avait pu avoir lieu avant que le corridor libre de glaces ne s'ouvre, il y a environ 14000 ans: c'est le scénario dit du *Clovis first*, du même nom qu'une culture archéologique devenue présente partout en Amérique du Nord il y a quelque 13500 ans. L'attachement des préhistoriens américains à ce scénario a longtemps été si fort que tout site ou fossile humain présenté comme plus ancien était rejeté à coup d'arguties techniques. Puis le «scénario béringien», suivant lequel un microclimat aurait permis à une population

© M. Bennet *et al.*

de survivre en Béringie pendant le dernier maximum glaciaire, avant de progresser vers le sud le long de la côte Pacifique à partir de 18000 ans avant le présent, a pris le dessus.

Les traces de pas imprimées sur les rives du paléo-lac Otero ouvrent donc une perspective spectaculaire: des humains ont foulé le sol américain deux millénaires avant le dernier maximum glaciaire; donc peut-être bien avant aussi...

Les empreintes de pas étudiées se trouvent sur sept sols anciens foulés à des dates successives. Selon les chercheurs, il s'agirait surtout de traces de pas d'adolescents et d'enfants, que l'on avait envoyés vers le lac chercher quelque chose. De l'eau peut-être? Quoi qu'il en soit, lorsque ces marcheurs foulèrent les rives du lac Otero, leurs pieds enfoncèrent dans le sol des graines d'une plante aquatique: la ruppie spiralée (*Ruppia cirrhosa*). Pour cette raison, Matthew Bennett et ses collègues ont pu en toute confiance attribuer aux sept paléo-sols les âges de ces grosses graines, âges qu'ils ont déterminés par la méthode du radiocarbone.

Ces chercheurs devaient cependant se méfier d'un éventuel «effet réservoir lacustre», en d'autres termes de la possibilité que l'accumulation dans l'eau du lac d'un carbone plus ancien que celui de l'atmosphère respirée par les marcheurs n'ait faussement vieilli les dates. Mais dans ce cas, l'effet réservoir devrait varier d'un lieu à l'autre, ce qui n'est pas le cas. Les chercheurs ont aussi daté par l'uranium/thorium des cristaux de gypse présents dans la pile sédimentaire et comparé leur chronologie avec celle de piles sédimentaires voisines terrestres et aquatiques. Tout converge: les datations des traces semblent très fiables.

Qu'en conclure? Le scénario béringien a ceci d'illogique qu'il est censé s'être produit après le dernier maximum glaciaire, alors qu'il a tout aussi bien pu se produire avant. En effet, la baisse du niveau marin a commencé bien avant le maximum de l'englacement il y a environ 21000 ans, de sorte qu'un pont terrestre reliait la Sibérie à l'Alaska déjà il y a 30000 ans. Dès lors, pourquoi des populations d'Extrême-Orient n'auraient-elles pas traversé plus tôt? ■

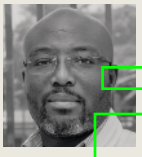
François Savatier

M. R. Bennett *et al.*, *Science*, vol. 373, pp. 1528-1531, 2021

VIROLOGIE

Ebola : une résurgence tardive

En janvier 2021, une épidémie de fièvre Ebola s'est déclarée en Guinée. La souche virale impliquée est la même que celle qui avait touché l'Afrique de l'Ouest entre 2013 et 2016. Elle serait restée en dormance chez un hôte humain. Les explications du virologue Alpha Keita.



Propos recueillis par Sean Bailly

ALPHA KEITA
virologue au Cerfig, à Conakry, et à l'université de Montpellier

Quelle est la situation épidémique en Guinée ?

Entre 2013 et 2016, la Guinée a été touchée par une sévère épidémie qui s'est étendue à plusieurs autres pays. C'était la première fois qu'Ebola sévissait en dehors de l'Afrique centrale. L'OMS a recensé 29 000 cas, dont plus de 11 300 morts. Avec mes collègues, nous avons mis en place un suivi des anciens malades, qui souffraient encore de différents maux. Certains revenaient des semaines ou des mois après leur sortie du centre de traitement en se plaignant de douleurs, de céphalées ou de troubles de la vue. En outre, certains de ces survivants souffraient aussi de dépression, notamment parce qu'ils étaient stigmatisés, perdaient leur travail, leurs amis, leurs familles. Il y avait une certaine méfiance vis-à-vis de ces personnes qui avaient survécu à une maladie considérée comme fatale.

Puis, en janvier 2021, une nouvelle épidémie s'est manifestée, avec 23 cas, dont 12 décès. Elle s'est terminée en juin.

Quel est le lien entre les deux épidémies ?

Nous avons mené une analyse génomique pour déterminer l'origine de la nouvelle épidémie. Nous avons réalisé un séquençage complet ou quasi complet de 11 génomes. Le virus de 2021 présentait dix mutations caractéristiques de celui de l'épidémie de 2013-2016. Il est donc probable que le virus provenait d'un réservoir humain plutôt que d'un réservoir animal.

En outre, le virus de 2021 présentait 10 à 12 nouvelles mutations. Considérant que cinq ans séparent les deux épidémies, c'est très peu ! En effet, pour survivre, un virus envahit les cellules de son hôte et il en détourne la machinerie pour se répliquer. Mais des virus à ARN, comme celui d'Ebola, sont très instables et les risques de mutations lors de la réplication sont assez élevés. Avec un rythme de réplication normal, le virus aurait dû avoir plus de mutations. On peut donc écarter l'hypothèse que pendant cinq ans le virus s'est propagé à bas bruit dans la population, en passant d'un hôte au suivant. Tout laisse penser qu'il était en dormance chez un hôte, un ancien malade ou quelqu'un qui était en contact avec un malade et qui n'a pas développé de symptômes. Il y a donc eu réactivation du virus, ce qui a entraîné sa résurgence.

Est-ce une surprise ?

Nous savions que le virus persistait parfois dans certains fluides (sperme, lait maternel) chez d'anciens malades. Notre suivi et d'autres études ont rapporté des persistances allant jusqu'à 500 ou même 700 jours. Nous avions aussi observé des cas de réactivation du virus pendant l'épidémie de 2013-2016 et dans d'autres en République démocratique du Congo.

Ce qui est exceptionnel ici est la durée de dormance : cinq ans ! Il reste à comprendre pourquoi le virus se réactive. Nous travaillons actuellement sur une piste : chez les anciens malades, la quantité d'anticorps ciblant le virus Ebola diminue au cours du temps, ce qui permettrait aux réservoirs de virus dormants de redevenir actifs.

Quelles sont les conséquences de votre étude ?

Il faut reconsidérer la politique de santé et le suivi à long terme des survivants. Il faut aussi communiquer auprès de la population pour éviter la stigmatisation des anciens malades. En particulier, la personne à l'origine d'une prochaine épidémie pourrait être un ancien malade, mais aussi une personne qui ne se sait pas porteuse du virus en dormance. C'est un problème global, tout le monde est concerné. Enfin, il est aussi urgent de développer des traitements capables d'éradiquer le virus en dormance. ■

A. K. Keita *et al.*, *Nature*, vol. 597, pp. 539-543, 2021

MÉDECINE

VERS DES OPIOÏDES MOINS NOCIFS

Entre 300 000 et 400 000 morts en un peu plus de vingt ans aux États-Unis. Le lourd bilan de la « crise des opioïdes » a conduit l'ancien président Donald Trump à déclarer l'état d'urgence sanitaire en 2017. Pourquoi tant de décès ? Si ces molécules ont révolutionné le traitement de la douleur, elles présentent aussi de graves effets secondaires qui peuvent, en plus de la dépendance, conduire à l'arrêt de la fonction respiratoire et à la mort. Quand un récepteur aux opioïdes, en particulier le récepteur μ, est activé, il déclenche des voies de signalisation, impliquant une protéine notée G, à l'origine de l'effet analgésique. Mais il enclenche aussi une autre voie de signalisation, celle de la β-arrestine, impliquée dans des problèmes respiratoires.

Rémy Sounier, de l'Institut de génomique fonctionnelle, à Montpellier, et ses collègues ont développé une méthode pour décrypter au sein du récepteur μ les mécanismes qui découlent de la fixation des opioïdes afin de tester différentes molécules. Les chercheurs ont combiné des essais pharmacologiques sur des cellules, une technique de spectroscopie par résonance magnétique nucléaire et des simulations numériques. Ils ont constaté que certains ligands activaient la voie d'intérêt, mais rendaient impossible la fixation de la β-arrestine. Il serait ainsi possible de développer des molécules qui activeront spécifiquement la voie antidouleur sans allumer celles conduisant aux effets respiratoires néfastes. La question de la dépendance est, quant à elle, bien plus complexe à résoudre car elle implique des interactions entre tous les récepteurs à opioïdes. ■

Les opioïdes sont des antidouleur efficaces. Ils présentent cependant des risques de dépendance ou d'entraîner des complications parfois mortelles. Les spécialistes tentent de concevoir des médicaments exploitant l'effet antidouleur sans les aspects néfastes de ces molécules.

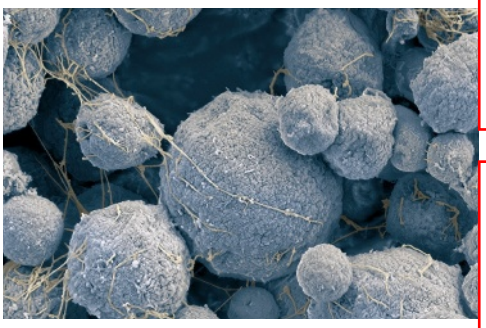
Noëlle Guillon

X. Cong *et al.*, *Molecular Cell*, en ligne le 24 août 2021

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

DE L'ADN SURPRENANT

Dans des échantillons de boue provenant de marécages de l'Ouest américain, Jillian Banfield, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont détecté de l'ADN tout à fait étrange. Il ne semblait provenir ni d'un virus, ni d'une bactérie, ni d'une archée (les archées sont des organismes unicellulaires qui constituent l'un des trois grands domaines de l'arbre du vivant). Les chercheurs ont surnommé leur trouvaille « borg », d'après une espèce d'extraterrestres de la série de science-fiction *Star Trek*, capable d'assimiler les individus au sein d'une conscience collective. En effet, ces brins d'ADN, longs de 600 000 à 1 000 000 de paires de bases, présentent certains gènes essentiels des archées de la variété *Methanoperedens*, qui utilisent le méthane comme source d'énergie. Les hypothèses sur leur origine sont nombreuses : ADN viral, une nouvelle forme de plasmide, reliquat d'un ancien microorganisme assimilé par les archées, etc. La prudence reste de mise, d'autant que l'étude doit encore être revue par des pairs. ■



Les « borgs », des grands brins d'ADN, seraient associés à des archées, des microorganismes unicellulaires *(comme ici sur cette image prise au microscope électronique)*.

William Rowe-Pirra

B. Al-Shayeb *et al.*, *bioRxiv.org*, 10 juillet 2021

EN BREF

L'écureuil, roi du parkour

Le rongeur passe son temps à sauter d'arbre en arbre. S'il saute depuis une position proche de la base de la branche, il s'assure un appui sur un support bien stable, mais il doit réaliser un saut plus long. En filmant des écureuils dans une expérience, Nathaniel Hunt, de l'université du Nebraska à Omaha, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que les animaux parviennent à estimer en quelques essais le meilleur endroit pour sauter, faisant un compromis entre rigidité de l'appui et distance.

Science, 6 août 2021

La Grande Tache rouge accélère

L'anticyclone le plus célèbre de Jupiter est connu pour sa taille et sa longévité. Depuis quelques années, son diamètre diminue et sa forme d'ellipse tend vers celle d'un cercle. Grâce au suivi régulier du télescope spatial *Hubble*, l'équipe de Michael Wong, de l'université de Californie à Berkeley, a montré que cette tendance s'accompagne d'une accélération des vents de sa périphérie. Ils ont gagné de 4 à 8 % entre 2009 et 2020 et soufflent à plus de 640 kilomètres par heure.

Geophys. Res. Lett., 29 août 2021

Résister aux coups de chaud

Lors d'une vague de chaleur, les coraux blanchissent et meurent. Erika Santoro, de l'université fédérale de Rio de Janeiro, au Brésil, et ses collègues ont inoculé à des coraux un cocktail de microorganismes qui améliore leur résistance à un éventuel choc de chaleur, et favorise leur reconstruction après une période de stress thermique. Les résultats en laboratoire sont encourageants. Reste à tester cette piste en conditions réelles, où les coups de chaud sont de plus en plus fréquents.

Science Advances, 13 août 2021

En haut : © Shutterstock.com/Victor Moussa ; en bas : © Science Photo Library/EYE OF SCIENCE

BIOLOGIE ANIMALE

LA RUSE DU SERPENT À SONNETTE

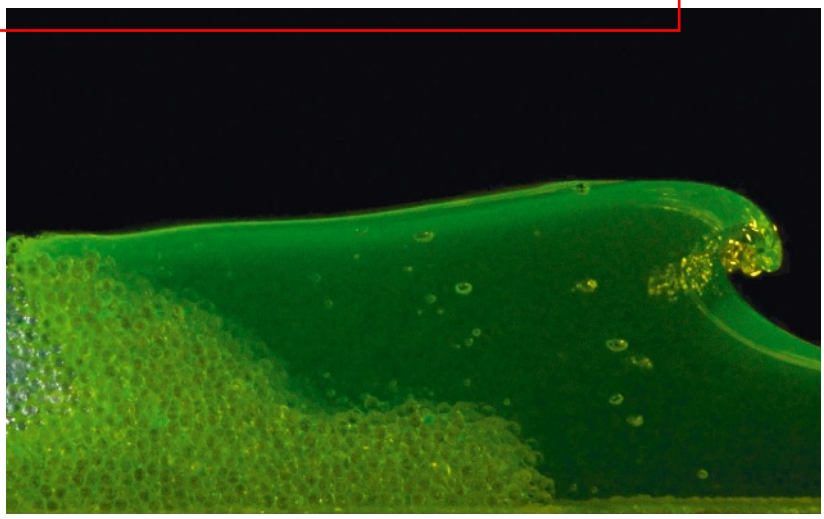
Le serpent à sonnette, ou crotale, est bien connu pour le bruit de crécelle qu'il produit en agitant la « sonnette » située au bout de sa queue pour signaler sa présence à d'éventuels intrus et les avertir de ne pas s'approcher trop près. Michael Forsthofer, de l'université Ludwig-Maximilians, à Munich, en Allemagne, et ses collègues ont montré que le reptile était capable de moduler la fréquence du son. En passant sans transition de 40 à plus de 60 hertz, le reptile donne l'impression d'être plus près qu'il ne l'est en réalité. Les chercheurs ont confirmé cette illusion en l'appliquant dans une simulation de réalité virtuelle. Le serpent se crée ainsi un périmètre minimal de sécurité de quelques mètres de rayon. Le crotale aussi a ses « gestes barrières » ! ■

Valentin Rakovsky

M. Horsthofer *et al.*, *Current Biology*, en ligne le 19 août 2021

GÉOSCIENCES

UN TSUNAMI EN LABORATOIRE



En partant de l'effondrement d'une colonne de grains *(à gauche)*, les chercheurs reproduisent un tsunami à petite échelle dans un bassin d'eau. Ils ont établi une relation entre la hauteur de la vague et le volume de grains immergé.

Des effondrements massifs de volcans lors d'éruptions ou de montagnes peuvent provoquer des tsunamis. Ce fut le cas en 2018 quand une partie du flanc du volcan indonésien Anak Krakatau s'est effondrée dans la mer ou en 563 sur le lac Léman. Certains sites volcaniques très actifs comme La Réunion, dans l'océan Indien, ou La Palma, de l'archipel des Canaries, dans l'océan Atlantique, ont été identifiés comme susceptibles de déclencher un tsunami. Comment prédire de la façon la plus robuste possible les caractéristiques des tsunamis produits par effondrement afin d'estimer le risque pour les populations locales ?

Manon Robbe-Saule, du laboratoire Fast, à Orsay (université Paris-Saclay), et ses collègues ont reproduit à petite échelle en laboratoire ce phénomène de tsunami en lâchant une colonne de matériaux granulaires dans un bassin d'eau. En collaboration avec des chercheurs du laboratoire Geops, à Orsay, et de l'université de Californie à Santa Barbara, l'équipe a mis en évidence une loi d'échelle reliant l'amplitude du tsunami au volume de matériau immergé, en fonction de la hauteur d'eau dans le bassin.

Les chercheurs ont voulu examiner la pertinence, dans les conditions géologiques réelles, de cette loi déduite d'une expérience à petite échelle. Ils ont comparé leurs données avec une dizaine de cas historiques de tsunamis dont certaines caractéristiques ont été mesurées. Résultat : leur modèle donnait de bons résultats, les écarts sur l'amplitude du tsunami étant inférieurs à 25 % dans la plupart des cas.

« L'actualité récente, avec l'entrée en éruption en septembre dernier du volcan Cumbre Vieja, sur l'île de La Palma, aux Canaries, illustre à quel point la menace est réelle », explique Cyprien Morize, du laboratoire Fast. « Cette activité récente pourrait déstabiliser tout le flanc ouest de l'île. S'il venait à s'effondrer, il pourrait produire une vague de plusieurs centaines de mètres de hauteur. » ■

Sean Bailly

M. Robbe-Saule *et al.*, *Scientific Reports*, vol. 11, article 18437, 2021

ÉCOLOGIE

LA VANILLE SAUVAGE MENACÉE

Vanille, pomme de terre, maïs, coton… L'équipe de 48 chercheurs réunis autour de Bárbara Goettsch, de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), a évalué les risques d'extinction en Méso-Amérique de certaines plantes sauvages appartenant au même genre que certaines plantes cultivées. Les chercheurs révèlent que, parmi une liste de 224 espèces sauvages, 35 % sont menacées d'extinction. Le genre le plus menacé est *Vanilla* dont les huit espèces de la région sont classées en danger ou en danger critique. Or, en termes génétiques, ce lien de parenté signifie que les espèces sauvages peuvent se croiser facilement et naturellement avec leurs parents domestiqués. Ces espèces représentent donc un précieux réservoir génétique pour produire de nouvelles variétés, plus productives et plus résilientes face au changement climatique, aux parasites ou aux maladies. ■

Isabelle Bellin

B. Goettsch *et al.*, *Plants, People, Planet*, pp. 1-21, 2021

© M. Robbe-Saule et al.

EN IMAGE

DROMADAIRES SAUVAGES SUR GRAVURES

La photographie ci-contre montre un chercheur en train d'examiner la gravure de dromadaire la mieux conservée du « Camel Site », dont on distingue bien les pattes et le corps. Situé dans le nord de l'Arabie saoudite, dans la province du Jawf, ce site, composé de trois éperons rocheux portant des gravures incomplètes, est menacé par l'érosion. Sur une base stylistique, on avait initialement proposé que la réalisation des œuvres remontait au début de l'ère chrétienne. Mais le site restait non daté par l'archéologie. Avec toute une équipe de collègues, Maria Guagnin, de l'institut Max-Planck à Iéna, et Guillaume Charloux, du CNRS et de l'unité de recherche Orient et Méditerranée, ont donc entrepris de l'étudier de près.

Les chercheurs ont commencé par photographier et par numériser les gravures. Elles sont étonnantes, car, outre deux à trois équidés (des ânes sauvages ?), au moins dix dromadaires probables y sont ou y étaient représentés en grandeur nature. Pour dater le site, les archéologues ont fouillé une zone comportant des vestiges d'occupation. Ils y ont mis au jour des silex, des restes organiques, des foyers et des fragments de gravures. Puis ils ont daté ces vestiges ainsi que les gravures par toute une série de techniques. Verdict : les œuvres ont été sculptées, en plusieurs étapes probablement, entre 5600 et 5200 avant notre ère, c'est-à-dire au cours du Néolithique d'Arabie et bien avant la domestication du dromadaire, *Camelus dromedarius*. Au Camel Site, ce sont donc des dromadaires sauvages, proies de taille importante, que les éleveurs-chasseurs du désert arabe ont représentés. ■

F. S.

M. Guagnin *et al.*, *Journal of Archaeological Science : Reports*, article 103165, en ligne le 15 septembre 2021

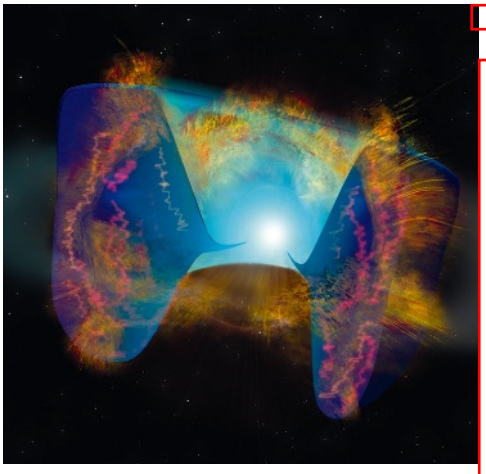
© Hubert Raguet/Mission archéologique franco-saoudienne du Camel Site/CNRS Photothèque

ASTROPHYSIQUE

UNE SUPERNOVA ATYPIQUE

En associant différents indices, Dillon Dong, de l'institut de technologie de Californie, et ses collègues ont identifié un type de supernova qui n'avait encore jamais été observé. Premier indice : une bouffée de rayons X en 2014 détectée par l'observatoire japonais *Maxi*, à bord de la *Station spatiale internationale*. Second indice : un signal radio très intense datant de 2017 et provenant de la même galaxie, recueilli par le radiotélescope *VLA*, au Nouveau-Mexique.

Selon les chercheurs, la source dans la galaxie aurait été composée de deux étoiles massives formant un système binaire très resserré. L'astre le plus massif a consommé son combustible plus vite, explosé en supernova et formé un objet compact (trou noir ou étoile à neutrons). Celui-ci s'est rapproché de l'autre étoile dans un mouvement de spirale. Puis, il y a environ trois cents ans, il a pénétré dans l'atmosphère de son compagnon en expulsant de grandes quantités de gaz. Quand l'objet compact a atteint le cœur de son partenaire, il y a perturbé les réactions de fusion qui assurent la stabilité de la seconde étoile. Cette dernière s'est alors prématurément effondrée sous son propre poids. Tandis que le cœur implosait, une partie de sa matière a formé un disque d'accrétion autour de l'objet compact, ce qui a



Les débris projetés à grande vitesse par la supernova ont percuté le gaz expulsé plus tôt. L'onde de choc est à l'origine des émissions radio intenses observées par *VLA*.

conduit à l'émission de jets de matière propulsée à une vitesse proche de celle de la lumière. Ces jets se sont accompagnés d'un rayonnement X, celui observé par *Maxi*. L'étoile a ensuite explosé en supernova. Ses couches externes ont été projetées assez vite pour rattraper le gaz expulsé il y a trois cents ans, et la collision a produit l'intense rayonnement radio enregistré par *VLA*. ■

S. B.

D. Z. Dong *et al.*, *Science*, vol. 373, pp. 1125-1129, 2021

BIOPHYSIQUE

DES NIDS FLUORESCENTS

En explorant la jungle vietnamienne, Bernd Schöllhorn, de l'université de Paris, Serge Berthier, de l'Institut de nanosciences de Paris, et leurs collègues ont découvert que les nids de certaines espèces de guêpes sont fluorescents. Ce phénomène consiste en l'absorption de lumière à une certaine longueur d'onde par des pigments et sa réémission quasi instantanée à une plus grande longueur d'onde. Dans le cas des nids de polistes vietnamiennes, les pigments absorbent des ultraviolets autour de 380 nanomètres de longueur d'onde et réémettent dans le vert à 540 nanomètres environ. Quel est ici, pour ces insectes, l'avantage évolutif de cette biofluorescence ? Elle pourrait leur servir à retrouver leur nid de nuit (la lumière réfléchie par la Lune comporte des ultraviolets). Mais Bernd Schöllhorn et ses collègues avancent une autre piste. Pendant leur

Nid de guêpes dans la jungle vietnamienne, éclairé avec une lumière blanche et une lampe à UV. Les ultraviolets sont convertis en lumière verte par fluorescence.

métamorphose, les larves sont très vulnérables au rayonnement ultraviolet. La couche fluorescente servirait alors de filtre protecteur en absorbant la lumière nocive et en la réémettant à une longueur d'onde moins agressive. ■

S. B.

W. Daney de Marcillac *et al.*, *J. R. Soc. Interface*, vol. 18, article 20210418, 2021

EN BREF

L'évolution des serpents revisitée

L'extinction de masse de la fin du Crétacé ayant fait disparaître presque tous les serpents, ceux d'aujourd'hui sont sortis d'une poignée d'espèces survivantes. Catherine Klein, de l'université de Bath, au Royaume-Uni, et des collègues sont parvenus à cette conclusion après avoir étudié l'évolution des vertèbres des serpents et analysé leurs différences génétiques. Les espèces ancestrales de tous les serpents actuels auraient été capables de creuser des terriers et de survivre longtemps sans nourriture.

Nature Comm., 14 septembre 2021

L'avantage du jeu à domicile

Grâce au grand nombre de matchs de football joués à huis clos pendant la pandémie de Covid-19, Dane McCarrick, de l'université de Leeds, au Royaume-Uni, et ses collègues ont étudié et quantifié l'effet de l'avantage de jouer à domicile. Avec ses supporters, souvent surnommés « le douzième homme », l'équipe locale marque et gagne un peu plus souvent. Dans un stade vide, l'effet est moins fort, mais il persiste.

Psychology of Sport & Exercice, 1er sept. 2021

Le cycle du mercure se précise

Le mercure est un polluant atmosphérique qui se retrouve dans les océans, pénètre dans la chaîne alimentaire et a de graves conséquences pour la santé humaine. On pensait que les eaux de pluie le transportaient de l'air dans les mers. Mais grâce à une analyse des isotopes de ce métal, Martin Jiskra, de l'université Paul-Sabatier, à Toulouse, et ses collègues ont montré qu'une grande part du mercure arrive directement dans l'océan par des échanges gazeux à sa surface.

Nature, 29 septembre 2021

En haut : © B. Saxton NRAO/AUI/NSF ; en bas : © B. Schöllhorn et S. Berthier

ÉVOLUTION

L'ALLIÉ VIRAL DU PAPILLON

Le papillon *Mythimna separata* a la vie dure. Il peut être infecté par un entomopoxvirus, le MySEV, et parasité par la guêpe *Cotesia kariyai*. Laila Gasmi, de l'université d'agriculture et de technologie de Tokyo, au Japon, et ses collègues ont cependant montré que le virus était un allié du papillon contre la guêpe. Chez les papillons infectés par le MySEV, la croissance et la survie des larves de *C. kariyai* sont drastiquement réduites par rapport aux mêmes larves chez les papillons non infectés. Une protéine, nommée PKF (*parasitoid killing factor*) et liée à un gène du virus, déclenche l'apoptose (la mort) des cellules des larves. Ce gène a même été transféré des virus vers le génome de différentes espèces de papillons au cours de l'évolution. Un avantage certain ! ■

Nicolas Butor

L. Gasmi *et al.*, *Science*, vol. 373, pp. 535-541, 2021

GÉNÉTIQUE

RECORD DÉNISOVIEN CHEZ LES NÉGRITOS PHILIPPINS

On pensait que les Papous et les Aborigènes avaient la plus grande proportion d'ADN dénisovien. Maximilian Larena, de l'université d'Uppsala, et une vaste équipe viennent de montrer que ce sont en fait les Négritos des Philippines. Les chercheurs ont collaboré avec la Commission nationale pour la culture et les arts des Philippines (NCCA), les communautés culturelles indigènes et de nombreux autres acteurs afin d'analyser 2,3 millions de génotypes provenant de 118 groupes ethniques des Philippines. Il en ressort que le degré d'hybridation avec les Dénisoviens varie d'une population négrito à l'autre, mais qu'il est inversement proportionnel au niveau de leur métissage avec les populations issues d'Asie du Sud-Est. Ce sont les Aetas Magbukons, des Négritos vivant sur la péninsule de Bataan, sur l'île de Luçon, qui ont le plus haut taux d'ADN dénisovien du monde : 5 %. ■

F. S.

M. Larena *et al.*, *Current Biology*, en ligne le 12 août 2021

ARCHÉOLOGIE

REMONTAGE DE FRESQUES ROMAINES À ARLES

La salle où les enduits peints sont restaurés, au Musée départemental Arles antique.

La maison de la Harpiste est une maison romaine découverte dans les années 1980 à Arles ouest, dans l'emprise d'une vieille verrerie. Outre une fraction de l'atrium, c'est-à-dire de l'espace central de la maison ouvert aux visiteurs, les archéologues ont mis au jour deux pièces aux fresques bien conservées sur plus de 1 mètre de hauteur et contenant assez de gros fragments de murs encore enduits et peints pour remplir 800 caisses…

C'est pourquoi, depuis avril 2021, l'Inrap et le Musée départemental Arles antique ont lancé un vaste travail de puzzle afin de reconstituer entièrement ces fresques. En examinant les fragments, les chercheurs se pénètrent de leurs formes et tentent de les assembler. « Pendant le remontage, une très bonne mémoire visuelle joue un rôle essentiel », souligne Julien Boislève, qui dirige le remontage. Une fois les panneaux reconstitués au mieux, le service de restauration du musée consolide les fragments et les assemble sur un nouveau support.

Pour le moment, seuls les décors d'une première pièce de 17 mètres carrés sont remontés. Les imitations en trompe-l'œil de panneaux de marbre, de colonnes et d'autres éléments architecturaux et l'emploi de vermillon à profusion identifient un décor de « deuxième style pompéien ». Les décors de la deuxième pièce – une pièce d'apparat – sont très riches ; ils représentent des personnages de grande taille, dont une harpiste, qui a donné son nom à la maison. Ces observations invitent à placer la construction de la maison de la Harpiste entre 70 et 50 avant notre ère, ce que corrobore le type des céramiques trouvées dans la demeure, qui a donc été construite avant ou pendant la guerre des Gaules. ■

F. S.

Actualité Inrap, 3 septembre 2021, https://bit.ly/3CZvRrt

© Rémi Bénali/Inrap

EN BREF

Des incendies fertilisent les océans

D'énormes incendies ont ravagé l'Australie en 2019 et 2020. Nicolas Cassar, de l'université de Bretagne occidentale, et ses collègues ont établi un lien entre les nuages de fumée et de cendres riches en fer et la formation d'exceptionnelles efflorescences algales dans l'océan à plusieurs milliers de kilomètres vers l'Est. La croissance du phytoplancton ayant probablement fixé de grandes quantités de carbone, il reste à faire le bilan carbone entre les incendies et cette activité marine.

Nature, 15 septembre 2021

Flambage sur fleurs

Le flambage, une déformation liée à une contrainte mécanique, est en général un problème pour une construction qui risque de s'effondrer. Chiara Airoldi, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont montré que ce phénomène structure à l'échelle nanométrique la surface des pétales de l'hibiscus, *Hibiscus trionum*. Il en résulte un effet iridescent, bien connu chez les plantes (et souvent le résultat de processus biologiques) pour attirer des pollinisateurs tels que les abeilles.

Cell Reports, 14 septembre 2021

Comment le lin vieillit

Pour étudier le vieillissement d'un matériau, on accélère souvent artificiellement le processus, au risque de le dénaturer. Dans le cas du lin, Alessia Melelli, de l'université Bretagne Sud, et ses collègues ont eu l'idée d'analyser, grâce à diverses techniques d'imagerie, du linge mortuaire tiré de sarcophages égyptiens vieux de 4 000 ans. Cela leur a permis de comprendre comment des défauts apparaissent dans des textiles en lin, évoluent et réduisent la qualité du tissu.

Nature Plants, 13 sept. 2021

BIOLOGIE ANIMALE

UN SUBTIL ÉQUILIBRE CHROMOSOMIQUE

Le sexe de nombreux organismes est déterminé par une simple paire de chromosomes. Chez l'humain, on les note X et Y: de façon générale, une paire de X engendre un individu de sexe féminin et une paire associant X et Y donne un individu masculin. Comme ces chromosomes portent aussi le matériel génétique codant certaines protéines essentielles au bon fonctionnement du corps, la différence du nombre de chromosomes X entraîne un déséquilibre dans l'expression des gènes qui peut être problématique. Chez l'humain, un mécanisme réduit alors au silence l'un des deux chromosomes X chez la femme. Chez d'autres espèces, le mécanisme diffère. Nicole Valenzuela et ses collègues, de l'université d'État de l'Iowa, aux États-Unis, ont étudié le cas de la tortue-molle à épines (*Apalone spinifera*).

Chez cet animal, les chromosomes sexuels sont notés Z et W. Les mâles ont une paire de Z, tandis que les femelles présentent l'association ZW. Or le chromosome Z contient un gène codant une protéine indispensable au bon fonctionnement de toutes les cellules de l'organisme. Les chercheurs ont constaté que, lors des premières étapes du développement embryonnaire, un mécanisme de surexpression double l'activité du chromosome Z chez les deux sexes. Chez la femelle, l'activité est ainsi comparable à celle des gènes des chromosomes non sexuels. Mais elle est alors excessive chez le mâle. Toutefois, chez ce dernier, elle diminue plus tard dans leur développement, en particulier dans un environnement où la température ambiante est fraîche. C'est la première fois qu'un lien est observé entre la température de développement de l'embryon et le processus de compensation de dosage. ■

W. R.-P.

Tortue-molle à épines *(Apalone spinifera)*.

B. Bista *et al.*, *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 376, article 20200101, 2021

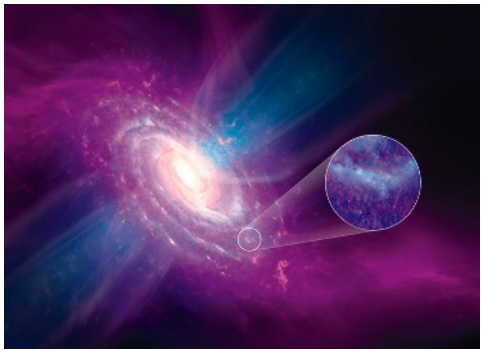
ASTROPHYSIQUE

MAL MÉLANGÉE, LA VOIE LACTÉE ?

Jusqu'ici, les modèles usuels considéraient que les différents composants de notre galaxie – le gaz d'hydrogène et d'hélium, les « métaux » (tous les autres éléments) et les poussières – étaient répartis de façon homogène. En particulier, la métallicité du Soleil était assez représentative (avec seulement une concentration un peu plus importante au centre de la Galaxie où le nombre d'étoiles est plus élevé). Mais Annalisa De Cia, de l'université de Genève, et ses collègues ont évalué la teneur en métaux au voisinage de 25 étoiles situées dans un rayon de 10 000 années-lumière du Soleil.

La distribution des métaux est bien plus hétérogène qu'attendue. La métallicité solaire, loin d'être la norme, ne serait atteinte que dans un tiers des cas observés. Elle descend jusqu'à 17 % de la métallicité solaire dans certains environnements, et la dépasse parfois ailleurs. Les modèles d'évolution qui faisaient l'hypothèse simplificatrice d'une composition chimique homogène sont à revoir. ■

V. R.



Vue d'artiste de la Voie lactée alimentée par des nuages d'hydrogène et d'hélium *(en magenta)*. Mais ces derniers ne se mélangent pas de façon efficace et homogène dans la Galaxie, comme cela est montré sur le zoom.

A. De Cia *et al.*, *Nature*, vol. 597, p. 206-208, 2021

En haut : © Shutterstock.com/Natalia Kuzmina ; en bas : © Unige/Mark A. Garlick

POUR LES FRANÇAIS LE PLAISIR DURE EN MOYENNE 27 MINUTES*

*Les lecteurs de magazines consacrent en moyenne 27 minutes par jour au plaisir de la **Presse Magazine.**

INFORMER. DÉCOUVRIR. APPROFONDIR.

PRIX RELAY DES MAGAZINES DE L'ANNÉE 2021

SYNDICAT DES ÉDITEURS DE LA PRESSE MAGAZINE

RELAY

LES MAGAZINES DE L'ANNÉE 2021

Découvrez chez RELAY et sur relay.com les magazines les plus talentueux et les plus audacieux de l'année.

Madame Bovary ACPM / ONE NEXT 2020

HISTOIRE DES SCIENCES

MAUVAISE ÉTOILE
Christophe Migeon
Paulsen, 2021
392 pages, 21 euros

Les récits de voyages des explorateurs et des savants ont toujours fasciné les lecteurs. Ceux relatant les expéditions dans des pays inconnus pour observer les passages de Vénus devant le disque solaire en 1761 et 1769, phénomènes exceptionnels, ont livré des aventures hors du commun.

Celles de l'académicien Guillaume Le Gentil de la Galaisière méritaient qu'on en fasse le récit. Si les héros en général réussissent à vaincre les aléas du sort, au contraire, Le Gentil fut en quelque sorte un anti-héros. Parti en 1760 pour Pondichéry afin d'observer le premier passage, il arrive au moment où les Anglais ont pris la ville. Qu'à cela ne tienne: à défaut d'observer Vénus, il va naviguer, relever les côtes, étudier vents et courants, collecter coquillages et plantes, noter les mœurs locales, en attendant le passage de 1769.

Las, au moment du second passage à Pondichéry redevenue française, une tempête obscurcit le ciel. Il regagne enfin Paris en 1771, où on le croyait mort. De fait, on l'a rayé de l'Académie et partagé ses biens!

L'auteur a fait de cette suite d'échecs un roman pseudo-picaresque qui nous fait prendre fait et cause pour le héros. Si le début de l'ouvrage est sauvé par des dialogues truculents, c'est à partir du moment où notre astronome prend la mer que le récit emporte le lecteur pour ne plus le lâcher. Se succèdent tempêtes, naufrages, guerres, maladies, potentats locaux aimables ou hostiles, colons de toute engeance, mais nature somptueuse, accueillante ou hostile, dans une atmosphère qui absorbe le savant comme le lecteur, suscitant l'empathie avec ce héros si mal servi par les muses.

DANIELLE FAUQUE
GHDSO, université Paris-Saclay

ÉPIDÉMIOLOGIE

COVID, LE BAL MASQUÉ
Antoine Flahault
Dunod, 2021
240 pages, 18,90 euros

L'OMS siège à Genève, où l'auteur dirige l'Institut de la santé globale. Il est donc aux premières loges pour comparer l'entrée des pays dans la danse, au bal du Covid-19. Antoine Flahault caractérise ici la façon dont chacun a su tester – plus ou moins vite, et plus ou moins précocement –, isoler et protéger ses citoyens. Ainsi, les écarts de mortalité entre la France et l'Allemagne s'expliqueraient selon lui par l'intense déploiement des tests outre-Rhin et par le zèle de nos voisins à s'isoler et alerter leurs contacts. Dans sa revue internationale, il ne propose pour autant ni classement ni véritable modèle, pas même celui des pays d'Asie: leur contrôle sanitaire poussé des populations a montré son efficacité contre l'épidémie, mais au prix fort des libertés individuelles et collectives.

Depuis novembre 2020, avec les vaccins, c'est l'image de la compétition sportive qui rend le mieux compte de la course au trophée, au détriment, selon l'auteur, d'une saine émulation dans la poursuite de l'intérêt commun. Au final, masques levés, l'auteur s'inquiète de ce qu'il déchiffre sur les visages, la souffrance des vieux confinés, des femmes une fois de plus brimées, sur qui pèse la gestion du quotidien, et surtout des jeunes, privés de leur présent et inquiets de leur avenir.

L'ouvrage se lit d'un trait, la plume est alerte, mais la chute n'est pas totalement convaincante. La méditation pessimiste sur le destin de l'humanité fait place *in fine* à l'énumération des leçons du Covid-19 pour maîtriser les pandémies. Mais une meilleure modélisation des épidémies permettra-t-elle vraiment d'améliorer les prévisions? L'information transparente et le débat citoyen seront-ils au rendez-vous? Au lecteur de se poser ces questions.

ANNE-MARIE MOULIN
Laboratoire Sphere, CNRS-Paris-Sorbonne

CHIMIE

ÉTONNANTE CHIMIE

Claire-Marie Pradier (dir.)

CNRS, 2021
328 pages, 22 euros

La chimie est une vaste science, un ensemble prodigieux de savoirs théoriques et expérimentaux, dont les champs d'application sont aussi étendus que son thème de prédilection : les transformations de la matière. En chimie, on analyse, on synthétise, on crée, on produit, on élucide et on résout… C'est ce que nous montre l'équipe dirigée par Claire-Marie Pradier et coordonnée par Olivier Parisel et Francis Teyssandier avec près de quatre-vingt-dix auteurs.

Les contributeurs sont parvenus à concentrer en quelque 300 pages 54 articles traitant du temps et de l'espace, de l'environnement, de l'énergie, de la modélisation comme de la synthèse, des applications médicales et de la chimie au quotidien. Le tout est entrecoupé de notices historiques. Chaque article est introduit par une citation dont certaines sont savoureuses. Les illustrations, schémas et graphes, souvent issus de publications scientifiques, sont nombreux. Les formules chimiques sont dessinées, sans craindre de perdre le lecteur. Chaque article se clôt par une bibliographie composée le plus souvent de sources primaires, réservées aux spécialistes. Un glossaire assez complet termine l'ouvrage.

Ainsi, à travers de très nombreux exemples, le livre donne une vision de ce que la chimie parvient aujourd'hui à créer, à interpréter, à expliquer, à prévoir sans jamais oublier de montrer d'où elle vient et comment, à travers quelques personnages clés de son histoire, elle s'est élaborée. Un ouvrage vivement recommandé, qui consolide la culture du lecteur, ouvre vers la connaissance et la science de demain et donne surtout l'envie d'en savoir davantage.

XAVIER BATAILLE
École nationale de chimie physique et biologie – lycée Pierre-Gilles-de-Gennes, Paris

PSYCHOLOGIE

HÉRITER DE L'HISTOIRE FAMILIALE ?

Barbara Couvert

Le Rocher, 2021
248 pages, 20 euros

Les phénomènes d'interférences transgénérationnelles sont maintenant bien repérés et exploités en psychothérapie. En hommage à Anne Ancelin-Schützenberger, pionnière en ce domaine, l'autrice les décrit avec précision dans ce nouvel ouvrage agréablement illustré de vignettes cliniques. L'innovation de Barbara Couvert est d'élargir sa recherche à une perspective scientifique qui accrédite les découvertes de la psychogénéalogie.

On peut distinguer deux axes dans cette quête de corrélation entre le fait psychique constaté cliniquement et les hypothèses contemporaines des neurosciences soulevées dans les laboratoires de recherche de l'Inserm et du Centre international de recherches et d'enseignement sur les meurtres de masse (Ciremm).

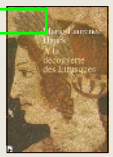
Le premier axe concerne les répercussions physiologiques de l'histoire vécue. Par exemple, les découvertes neuronales et hormonales démontrent l'impact des traumatismes sur la physiologie. Ces avancées concernent la régulation individuelle des émotions et s'appliquent à la somatisation, la mémoire corporelle, le post-traumatique, la résilience, l'épigénétique, etc.

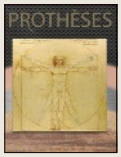
Le deuxième axe est celui de la transmission de ces effets d'une génération à l'autre. Même si la réalité des répétitions familiales, du syndrome d'anniversaire, des correspondances télépathiques et autres analogies est observable, il semble encore difficile de prouver scientifiquement ces phénomènes. S'appuyant sur les expériences récentes, Barbara Couvert bouscule la génétique traditionnelle en postulant que « des caractères acquis peuvent se transmettre à la génération suivante » tant dans le comportement que dans la physiologie.

Un apport intéressant au débat entre sciences humaines et neurosciences.

CHANTAL MASQUELIER
Psychologue clinicienne, Paris

ET AUSSI





À LA DÉCOUVERTE DES ÉTRUSQUES

Marie-Laurence Haack

La Découverte, 2021
368 pages, 23 euros

Les Étrusques ont achevé de se fondre dans la romanité au Ier siècle avant notre ère, mais ont dominé Rome jusqu'à la fin du VIe siècle avant notre ère, influençant profondément sa culture, donc la nôtre. L'autrice fait le tour de la question étrusque, passant en revue le mode de vie très familial, les structures sociales, la religion des Étrusques, le pillage de leur culture matérielle, l'énigme de leur origine, leur art, leur langue et leur écriture… et l'on finit par saisir pourquoi Étrusques et Romains sont à la fois proches et lointains.

LE CHARME DISCRET DES SÉRIES

Virginie Martin

Humensciences, 2021
228 pages, 16 euros

Tout est permis pour nous faire percevoir le monde d'une certaine façon. Voilà ce qui ressort de la lecture de ce décryptage de l'influence qu'ont sur nous les séries diffusées par des plateformes telles que Netflix ou MyCanal et des principales valeurs que les séries cultes propagent ou maltraitent. Politologue, l'autrice nous ouvre les yeux sur la « manière douce » par laquelle de plus en plus d'États et de grandes entreprises luttent pour leur influence en mettant en séries leurs idéologies, par ailleurs souvent contradictoires.

PROTHÈSES

Valérie Delattre et Ryadh Sallem (dir.)

CAP SAAA, 2021
254 pages, 40 euros

Très tôt au Paléolithique, les handicapés ont reçu de l'aide et des soins, puis dès le Néolithique cette assistance s'est étendue à la fabrication d'outils compensant une fonction corporelle déficiente. Plus de quarante auteurs se sont associés pour présenter une riche collection de cas préhistoriques et historiques, depuis ce manchot d'il y a 7 000 ans à Buthiers-Bulancourt, en France, jusqu'à la main du capitaine Danjou, relique vénérée de la Légion étrangère.

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

LE CHIFFRAGE MONÉTAIRE DE LA NATURE EST VAIN

Chiffrer les services et dégâts environnementaux se révèle sans effets. C'est le rôle de l'économie qui est à revoir.

En juillet 2021, l'Allemagne a connu de graves inondations, dont on peut chiffrer les dégâts. Mais de tels calculs ont-ils des effets sur les politiques environnementales des États ?

La question la plus fréquemment posée aux économistes de l'environnement concerne le prix à attribuer à la nature et aux conséquences de sa destruction. L'actualité fournit quelques chiffres. Le gouvernement allemand débourse 30 milliards d'euros pour reconstruire après les récentes inondations. L'État français est condamné par le Conseil d'État à payer 10 millions d'euros d'astreinte pour son inaction contre la pollution de l'air, tandis que l'Alliance européenne de santé publique chiffre le coût sanitaire de cette pollution à 3,5 milliards d'euros par an pour la seule ville de Paris. On attend, avec angoisse ou ironie, l'évaluation économique qui sera faite à partir du dernier rapport du Giec sur le changement climatique, publié en août…

Cela fait longtemps qu'économistes et ONG parlent la langue des chiffres pour alerter sur l'état de la planète. Un article pionnier de Robert Costanza et ses collègues paru dans la revue *Nature* en 1997 a nourri la polémique en calculant la valeur des services rendus par les écosystèmes : ces services gratuits représenteraient le double de la valeur du PIB mondial !

Les batailles judiciaires et politiques seront plus efficaces que les calculs économiques

Comment se font de tels calculs ? La boîte à outils des économistes repose sur de nombreux postulats. Il faut d'abord admettre que l'économie englobe la biosphère et peut la régir. La nature est vue comme un « capital naturel » qui produit des « biens et des services ». Sa destruction induit des pertes de valeur, sa protection des coûts. Les problèmes d'environnement sont alors vus comme des problèmes économiques : des défaillances du marché dues à une mauvaise définition des droits de propriété et de prix.

Ainsi, pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, la marchandise « tonne d'équivalent CO_2 » a été créée et se négocie sur le marché des crédits carbone. Il est aussi possible de substituer un service rendu par la nature par un équivalent monétaire attaché à un artefact. Dans cette optique, on remplacerait les abeilles, dont le service de pollinisation a été estimé entre 235 et 577 milliards de dollars, par des drones.

Il n'est pas besoin de recourir à l'éthique ou à des affirmations comme « la vie n'a pas de prix » pour noter la limite de l'exercice. Depuis trente ans, les alertes économiquement chiffrées n'ont guère suscité de réactions et n'ont pas conduit à modifier les indicateurs de richesse. Contre l'inaction des gouvernements, les batailles judiciaires et politiques seront sans doute plus efficaces que les calculs économiques.

La richesse des nations s'est construite sur l'exploitation de la nature et du travail. Elle se poursuit avec le recours croissant à l'artificialisation : urbanisation, intrants chimiques, manipulations génétiques, robotisation et numérisation… Mais étant donné les irréversibles dommages environnementaux annoncés, la substitution des fonctions naturelles par la technologie et le recours au marché ne sont plus tenables.

Aussi, c'est à un retournement radical qu'appellent désormais les rapports des économistes. Il ne s'agit plus de forcer l'environnement à entrer dans le marché, mais au contraire de replacer l'économie au sein de la biosphère et de lui assigner pour mission d'y restaurer les conditions d'une vie humaine solidaire de la nature. À la veille de la tenue des conférences de l'ONU sur le climat et la biodiversité, ces appels seront-ils entendus ? ■

© Nick_Raille_07/Shutterstock.com

Festival des idées Paris

18 – 20 nov. 2021

Gratuit — Programme & réservations sur
www.festivaldesidees.paris

6e édition

réparer le futur

Conférences, ateliers,
rencontres, tables rondes

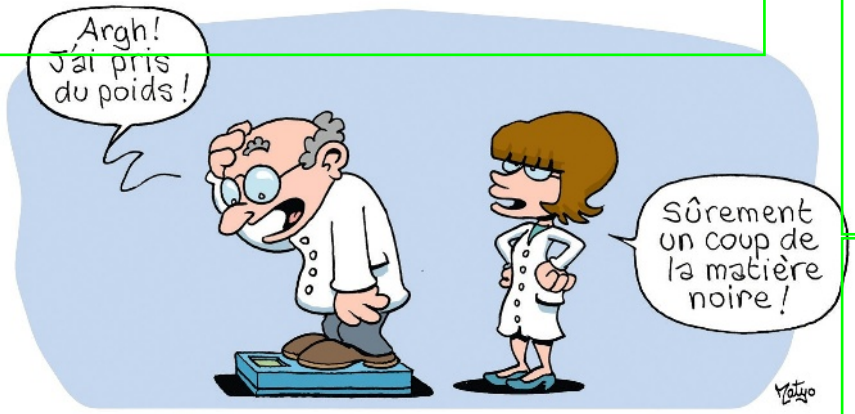
festivaldesidees
FdiParis
Festivaldesidees

Conception graphique : trafik.fr

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

LA MATIÈRE NOIRE EST-ELLE UN NOUVEL ÉTHER ?

Il n'est pas exclu que la matière noire postulée par les astrophysiciens soit une chimère, tout comme l'a été au XIXe siècle l'éther des physiciens.



Depuis plus de deux décennies, la plupart des physiciens sont convaincus de l'existence de la «matière noire». Les articles de vulgarisation affirment même que l'Univers «est» (et non pas «serait») composé de 85 % de cette matière mystérieuse et jusqu'à ce jour jamais détectée, bien qu'on la suppose omniprésente.

Cette propriété n'est pas sans rappeler celle de l'éther, milieu hypothétique dont les physiciens du XIXe siècle ont longtemps cherché à déterminer la densité et la rigidité, et à mesurer la présence à la surface de la Terre. Jusqu'à ce que, au début du XXe siècle, Albert Einstein juge l'hypothèse de l'éther finalement inutile, une fois mise au point sa théorie de la relativité restreinte qui unifie la mécanique et l'électromagnétisme. Notons au passage qu'Einstein n'a pas démontré que l'éther n'existe pas, mais plutôt qu'il n'avait pas besoin de cette idée (ni de cette substance…) pour expliquer les phénomènes.

Revenons à la matière noire. Son existence a été postulée dans les années 1930 par l'astrophysicien américano-suisse Fritz Zwicky car, selon les lois acceptées de la physique, les forces de gravitation dues à la quantité de matière visible dans les galaxies ne suffisaient pas à expliquer des faits bien établis, comme les vitesses de rotation des étoiles dans les galaxies et, plus tard, les lentilles gravitationnelles.

> **Pour l'heure, la matière noire ne sert qu'à sauver les théories en vigueur**

Pour «sauver les phénomènes», comme disaient les astronomes de l'Antiquité, il fallait donc combler ce manque gravitationnel en supposant la présence d'une autre matière, invisible celle-là, mais qui obéit aux mêmes lois de la gravitation que la matière ordinaire. Il suffisait alors que cette matière hypothétique soit répartie de telle façon qu'elle reproduise bien les observations.

Bien qu'une telle méthode puisse paraître curieuse et même arbitraire, elle n'est ni absurde ni originale. Par exemple, les astronomes du XIXe siècle l'ont utilisée : les lois de Newton ne réussissant pas à reproduire les positions des planètes connues, ils ont supposé l'existence d'une planète non encore observée et les calculs d'Urbain Le Verrier, fondés sur les lois de Newton, ont ainsi mené à la découverte de Neptune, en 1846.

Une telle démarche heuristique peut donc être fructueuse, mais rien ne l'assure. Ainsi, Le Verrier invoqua encore l'existence d'une planète (Vulcain) pour expliquer les anomalies de la trajectoire de Mercure ; mais on ne trouva jamais cette planète et Einstein (encore !) en fit disparaître le besoin avec sa théorie de la relativité générale, qui remplaçait les lois de Newton.

L'idée de matière noire semble tautologique, car elle ne sert pour l'heure qu'à sauver les théories en vigueur. Mais les physiciens des particules élémentaires ont accueilli avec enthousiasme cette hypothèse et pouvaient dès lors s'occuper à imaginer de quelles sortes de particules pouvait bien être composée cette matière exotique. Comme les astrophysiciens se sont contentés de fixer ses propriétés gravitationnelles, il reste en effet aux physiciens des particules un vaste terrain de jeu sur lequel s'agiter. Les théoriciens s'efforcent d'imaginer la nature de ses constituants, leur masse, leur spin, etc. Parallèlement, les expérimentateurs tentent de détecter dans leurs appareils ou de produire dans leurs accélérateurs ces particules plus ou moins exotiques responsables du complément de force gravitationnelle dont les astrophysiciens ont besoin.

Seul le temps dira si la matière noire finira comme Neptune ou comme Vulcain et l'éther. Dans le premier cas, les lois actuelles de la physique seront sauves. Dans le second, elles devront, encore une fois, être réécrites. ■

cité sciences et industrie

conférences

les récits

cycles thématiques,
tables rondes, projections

septembre 2021
— janvier 2022

© Gettyimages

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

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

en partenariat avec

avec le soutien de

Cycle *Les récits* : 30 rendez-vous, les mardis et jeudis, à l'auditorium de la Cité des sciences et de l'industrie, et sur YouTube. En novembre, ne manquez pas :

> Odyssée humaine : derniers rebondissements

les mardis de novembre à 19h

La découverte d'outils taillés, le génie bâtisseur des Néandertaliens, le rôle des femmes préhistoriques..., laissez-vous surprendre par vos ancêtres.

9 NOVEMBRE
***Denisova, Naledi, Flores*, la famille *Homo* s'agrandit**
Sylvana Condemi, paléoanthropologue (CNRS-Université d'Aix-Marseille)

16 NOVEMBRE
Les premiers outils, façonnés par Lucy ?
Sandrine Prat, paléoanthropologue (CNRS-MNHN)

23 NOVEMBRE
Grotte de Bruniquel : Néandertal bâtisseur
Jacques Jaubert, préhistorien (CNRS-Université de Bordeaux)

30 NOVEMBRE
Le rôle des femmes préhistoriques : nouveau regard
Marylène Patou-Mathis, préhistorienne (CNRS-MNHN)

> Les plus légers que l'air s'envolent vers de nouveaux horizons

mardi 3 novembre à 14h30

Ballons et dirigeables, dont l'origine est ancienne, offrent des possibilités de développement dans différents domaines.

Séance publique de l'Académie de l'air et de l'espace

14H30
Les nouvelles perspectives pour les dirigeables
Pascal Taillandier, chef de projets Dirigeables de l'Onera

15H30
Des ballons stratosphériques pour la science et la technologie
Vincent Dubourg, sous-directeur Ballons au Cnes

SAMUEL ALIZON
est directeur de recherche au CNRS au sein du laboratoire Mivegec à Montpellier. Il est membre de l'équipe Évolution théorique et expérimentale, qui travaille sur la modélisation des maladies infectieuses, notamment l'épidémie de Covid-19 depuis début mars 2020.

Avec le Covid-19, la modélisation des épidémies s'ouvre aux données massives

Depuis le début de la pandémie, les modélisateurs s'activent pour décrire son évolution. Cette mobilisation a eu plusieurs conséquences majeures sur leur discipline. Le point avec Samuel Alizon, un des acteurs clés du domaine en France.

© Samuel Alizon

Pourquoi étudier les maladies infectieuses quand on est un biologiste de l'évolution ?

Il existe beaucoup de liens entre l'écologie évolutive et l'épidémiologie. D'abord, il y a une grande similitude méthodologique et conceptuelle. Les outils utilisés en épidémiologie sont, au départ, des outils de la dynamique des populations servant à suivre des fluctuations dans les tailles de populations, qu'il s'agisse de mammifères ou de bactéries.

Il y a aussi des liens plus biologiques. Les maladies infectieuses sont principalement causées par des microbes – virus, bactéries, parasites – qui évoluent très vite. En vingt ans, on dénombre à peu près autant de générations du virus de l'immunodéficience humaine (VIH) au sein d'une personne porteuse que de générations d'*Homo sapiens* depuis son apparition. De plus, la vitesse d'évolution des microbes est plus élevée que dans d'autres circonstances, car ils affrontent des contraintes sélectives très fortes du fait des réponses immunitaires de leurs hôtes.

Cette évolution rapide peut modifier la manière dont les épidémies se propagent. On parle de « boucle de rétroaction ». La propagation des épidémies façonne des pressions de sélection sur les microbes et, en retour, leur évolution modifie la façon dont ils se propagent. Prenez l'antibiorésistance. La propagation d'une bactérie dans la population entraîne l'utilisation de traitements antibiotiques, lesquels engendrent une pression de sélection qui favorise la propagation de souches bactériennes antibiorésistantes. D'où l'importance d'étudier en même temps la propagation d'une épidémie et l'évolution du microbe qui en est responsable.

La modélisation des épidémies s'est-elle toujours appuyée sur cette approche évolutive ?

Non, il y a eu un va-et-vient des outils théoriques entre la dynamique des populations et l'épidémiologie. Une personne qui a beaucoup contribué à renforcer ce lien est Robert May. Ce physicien théoricien britannique d'origine australienne s'est pris de passion pour l'écologie théorique dans les années 1970. Il a apporté des contributions majeures à la dynamique des populations animales avant de contribuer à l'essor de l'épidémiologie mathématique moderne. Dans son étude sur le virus de la myxomatose en 1982, il a aussi été parmi les premiers à inclure l'évolution biologique en épidémiologie. Mais cela est vraiment rentré dans les mœurs dix à vingt ans plus tard.

En quoi consiste la modélisation des épidémies ?

Il y a principalement trois grandes raisons de modéliser. Souvent, le modélisateur se focalise sur l'une des trois, ce qui influe sur la démarche et les outils utilisés. La première raison est la description. À partir du moment où l'on suit une épidémie, où l'on représente, par exemple, une carte de France avec le nombre de cas, un modèle est sous-jacent. Cette partie descriptive met en jeu principalement des outils de la modélisation statistique. On essaye de décrire au mieux l'épidémie au vu des observations et en tenant compte du fait qu'une observation est toujours biaisée – on n'observe jamais le virus en train de se transmettre, on ne voit que des manifestations de l'épidémie.

La deuxième raison de modéliser est la compréhension. Un modèle commence d'ailleurs toujours par présenter ses hypothèses. Cela permet de dialoguer, de confronter les idées et les interprétations. Pour ce type d'approches, on s'appuie en général sur une modélisation plus mathématique. En pratique, on utilise souvent les connaissances issues d'une approche descriptive (et de modèles statistiques) pour façonner les équations reflétant les hypothèses de base.

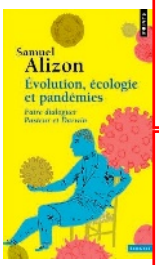
Cette partie est très utile pour s'affranchir des biais du cerveau. Par exemple, ce dernier a du mal à appréhender la croissance exponentielle, comme celle d'une épidémie qui doublerait en taille tous les trois jours. Le fait qu'il faille la même durée pour passer de 16 à 32 personnes infectées et de 160 000 à 320 000 est complètement contre-intuitif. Avec un modèle, cela devient trivial. De même, notre cerveau perçoit mal les interactions de phénomènes, comme la variation de la létalité de l'infection en fonction de l'âge, un ingrédient clé pour comprendre la dynamique hospitalière dans le cadre du Covid-19.

Ces modèles mathématiques aident à décortiquer les processus sous-jacents, à examiner sous quelles conditions on reproduit les tendances observées. Il y a donc toujours une question de recherche associée et, selon la question posée, on n'utilisera pas le même modèle. En fait, pour une même question on pourra élaborer des modèles différents, du fait de leurs hypothèses ou des techniques qu'ils mettent en jeu. C'est pourquoi il y a une vraie valeur ajoutée à avoir différentes équipes confrontant leurs approches. Si les analyses concordent, ce consensus donne plus de poids à l'interprétation. Si elles divergent, c'est une motivation pour mieux comprendre les processus.

On modélise aussi pour anticiper…

En effet, la prédiction est la troisième raison de modéliser même si on préfère parler de « scénarios », car personne ne peut prédire l'avenir. La propagation d'une épidémie dépend de trois composantes. La première est biologique. Elle inclut des paramètres classiques tels que la contagiosité ou la durée de l'infection, mais aussi des phénomènes plus variables tels que l'évolution du virus, de sa virulence, de son échappement au système immunitaire. Au

À LIRE



Samuel Alizon a récemment publié Évolution, écologie et pandémies, Seuil, 2020.

début de l'épidémie de Covid-19, cette composante était une inconnue majeure. En février 2020, on ignorait, par exemple, la proportion des personnes infectées qui décédaient, une information essentielle pour élaborer le moindre modèle.

La deuxième composante est physique: comment l'épidémie se propage une fois que l'on a pris en compte les contraintes biologiques. C'est la partie la plus « facile », parce que les lois de la physique s'appliquent assez bien au processus de contagion. Mais une troisième composante vient contrecarrer les prédictions: la composante sociale. Les comportements peuvent changer du tout au tout d'un jour à l'autre. Si demain le gouvernement confine le pays, ou si, à l'inverse, il relâche tous les gestes barrières, l'épidémie suivra des trajectoires diamétralement opposées. Prévoir l'état de l'épidémie à plus de deux semaines nécessite donc de prévoir les politiques de santé…

C'est pourquoi on explore différents scénarios. Celui de référence est en général la tendance actuelle. Puis on explore des scénarios qui dévient de cette référence. Nous sommes début septembre: que se passe-t-il si la rentrée a un effet que l'on ne voit pas encore à cause des délais entre l'infection et l'admission en réanimation?

On peut aussi produire des scénarios rétrospectifs. Notre équipe l'a fait dans deux cas: un scénario regardant ce qui se serait passé si l'on n'avait pas eu de vaccin ou si les vaccins avaient uniquement empêché les formes sévères, sans empêcher la transmission, et un scénario où le troisième confinement, qui a eu lieu début avril 2021, avait commencé deux mois plus tôt, suivant les recommandations du Conseil scientifique. Là encore, on ne modélise pas exactement ce qui se serait passé, de même qu'on ne modélise pas le futur. On explore une tendance en fonction d'hypothèses données.

Utilisez-vous les scénarios rétrospectifs pour vérifier vos prévisions?

Oui, notre équipe l'a fait sur nos scénarios prospectifs publiés depuis douze mois afin d'évaluer leur écart avec la dynamique hospitalière observée. Nous avons trouvé qu'en moyenne, notre modèle et nos hypothèses donnaient des tendances robustes sur cinq semaines, ce qui est assez satisfaisant sachant qu'à plus de deux semaines vous êtes à la merci d'un changement de politique sanitaire.

Nous avons aussi identifié pourquoi nos projections étaient trop pessimistes fin avril 2021, lors du troisième déconfinement. Le modèle fonctionnait, mais le problème venait des paramètres d'entrée, car, avec les données de l'époque, on supposait que l'épidémie décroissait moins vite qu'elle ne le faisait en réalité. Pourquoi? On ne peut que faire des conjectures, car, en France, on ne suit pas d'assez près l'épidémie pour avoir une réponse précise. Une hypothèse est que le troisième confinement a coïncidé avec le début des vacances scolaires et qu'une mesure de contrôle portant sur les écoles met plus de temps à se manifester. En effet, non seulement les chiffres hospitaliers ont un retard de deux semaines sur l'épidémie, mais comme les enfants font très peu de formes sévères, le décalage est encore plus important. D'ailleurs, deux semaines plus tard, le 16 mai, avec les chiffres mis à jour, le scénario a reproduit la tendance observée jusqu'à début juillet.

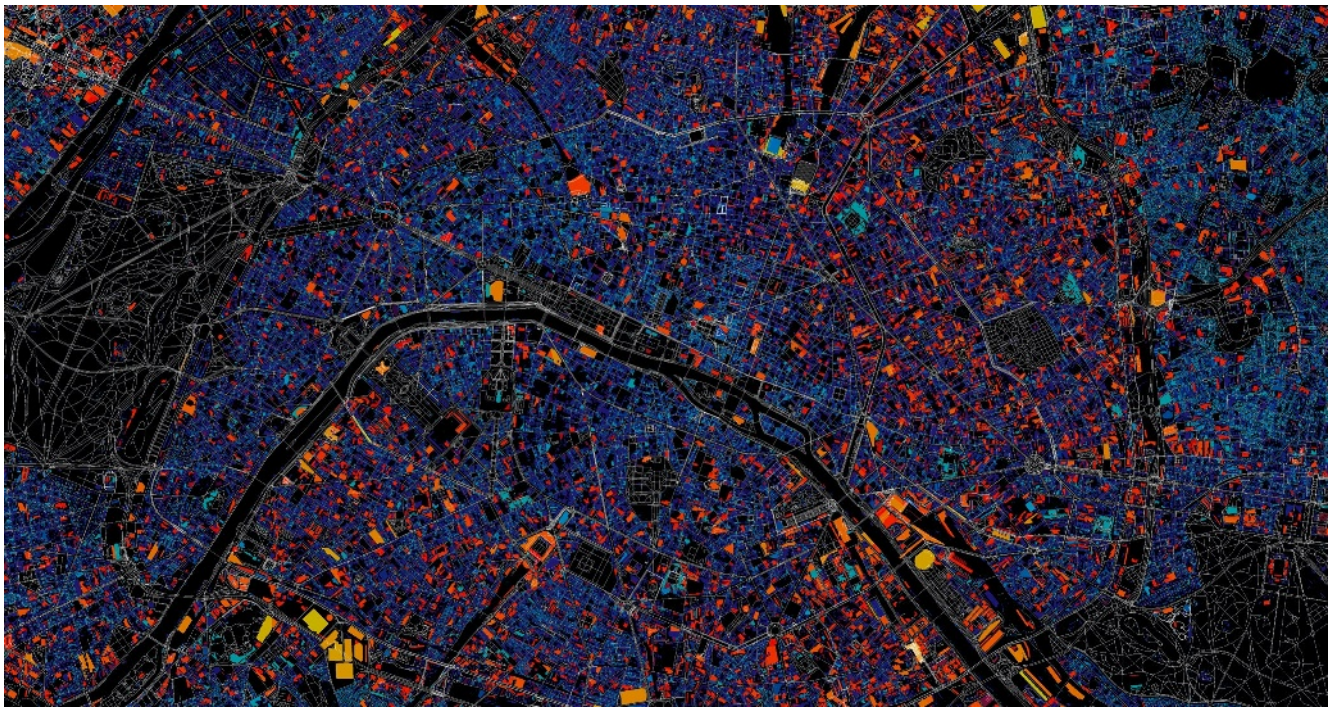
Quel type de données utilisez-vous dans vos modèles?

Nous utilisons principalement les données hospitalières, pour deux raisons. D'une part, l'échantillonnage est exhaustif: toutes les personnes hospitalisées à cause du Covid-19 sont comptabilisées, alors qu'on dépiste moins de la moitié des personnes infectées. D'autre part, les admissions en réanimation ont un délai de « seulement » deux semaines entre l'infection et l'observation, alors qu'il est d'un mois avec les décès. Certes, en théorie, les dépistages permettent un suivi au plus près de l'épidémie,

Des informations sur la mobilité aident à anticiper le nombre d'hospitalisations

car les symptômes apparaissent généralement quatre jours après infection. Mais pour s'affranchir des biais, il faut une réflexion statistique. Par exemple, le Royaume-Uni organise des campagnes de dépistage aléatoires où des milliers de personnes, avec ou sans symptômes, sont testées chaque jour, avec un plan d'échantillonnage réfléchi. Ainsi, même avec moins de tests qu'en France, on a une photographie bien plus précise de l'épidémie.

Mais nous avons aussi développé d'autres modèles avec des données plus originales, comme celles de Facebook. L'idée est d'utiliser ce qu'on appelle des « signaux précoces » pour suivre l'épidémie au plus près à l'aide de modèles statistiques: connaissant la dynamique hospitalière passée, avoir des



Grâce au projet collaboratif de cartographie OpenStreetMap, Olivier Thomine, à Aix-Marseille Université, a construit un modèle qui permet de simuler la transmission du SARS-CoV-2 sur le territoire français à l'échelle des bâtiments. Il répertorie d'abord sur le cadastre les bâtiments habités et leur affluence *(ici sur Paris, plus les couleurs sont chaudes plus il y a d'affluence)*, les écoles et les hôpitaux étant traités à part *(en cyan)*. Les simulations à Paris sont initialisées avec 15 personnes infectées *(la simulation pour Paris l'année dernière est disponible ici : https://bit.ly/3F6HL4l)*.

© Olivier Thomine

informations liées à la mobilité aide-t-il à anticiper le nombre d'hospitalisations dans une ou dans deux semaines ? L'intérêt est que l'initiative Data for Good de Facebook publie des données de colocalisation réelle entre deux personnes (par souci d'anonymat, il s'agit de personnes passant cinq minutes dans la même zone de 600 mètres carrés), alors que les opérateurs de téléphonie ne fournissent que la position de chaque utilisateur. Nous avons donc utilisé ces données afin d'estimer les liens entre tous les départements français. Plus des personnes de deux départements « interagissent », plus les départements sont liés.

Évidemment, l'approche est biaisée : seules sont comptabilisées les personnes qui ont laissé leur téléphone allumé avec Facebook et ont autorisé la collecte de données. On a essayé de s'en affranchir en vérifiant que l'on suivait à peu près le même nombre de personnes chaque mois. Cette approche nous a permis d'affiner considérablement les scénarios d'admission en réanimation aux échelles tant nationale que départementale, sur plus de deux semaines. On voit aussi que les données de colocalisation semblent plus informatives que celles de mobilité fournies par Google, mais aussi que la température ou même les dépistages.

D'autres équipes françaises explorent ces nouvelles pistes. Par exemple, celle de Vittoria Colizza, à l'institut Pierre-Louis, à Paris, a un accès privilégié aux données de téléphonie mobile d'Orange. Quant à celle de Simon Cauchemez, à l'institut Pasteur, à Paris, elle inclut les variations de température et d'humidité pour anticiper le nombre d'hospitalisations journalières. L'espoir est qu'en utilisant plus de données, on puisse améliorer la qualité des scénarios prospectifs à court terme.

Les progrès informatiques permettent-ils une autre sorte de modélisation ?

À côté des modélisations statistiques et mathématiques, on utilise en effet parfois une autre modélisation plus informatique où l'on crée des simulations avec des agents, un ensemble d'entités (ici des humains) interagissant selon certaines règles, dans un certain environnement. Ces simulations sont presque aussi anciennes que les premiers ordinateurs de bureau, mais elles ont pris une tout autre ampleur avec les progrès de l'informatique, comme récemment le calcul à haute performance. Par exemple, Olivier Thomine, actuellement au Laboratoire d'informatique et systèmes, à Aix-Marseille Université, a développé un modèle de résolution inégalée à l'échelle mondiale : il commence par extraire toutes les données d'OpenStreetMap, un projet collaboratif de cartographie qui a l'avantage, outre d'être libre, de contenir tout le cadastre. Puis il répartit 66 millions d'individus, avec chacun un bâtiment de résidence. À partir de là, il fait des simulations où, chaque jour, un individu visite deux bâtiments autres que le sien. Et s'il y rencontre des personnes infectées, il y a transmission avec une certaine probabilité. La simulation se poursuit sur une année et apporte un réalisme unique au niveau géographique pour un modèle national, puisque l'on travaille à l'échelle des bâtiments.

Attention, comme dans tout modèle, certaines hypothèses sont très simplificatrices. Mais cela nous permet d'explorer la dimension

spatiale des épidémies. On observe par exemple que la proportion de la population infectée dans une commune à la fin d'une vague épidémique tend à dépendre fortement de la densité de population. Plus généralement, ce type de simulation informatique peut être utilisé pour tester des résultats issus de modèles plus simples, comme la théorie des réseaux.

Comment la science des réseaux intervient-elle dans les modélisations ?

On fait l'hypothèse que la propagation d'une épidémie se fait sur un réseau sous-jacent (*voir l'article pages 28 à 36*). Cela peut correspondre à des contacts entre personnes (qui a serré la main de qui ?) mais aussi entre des villes (combien de personnes transitent chaque jour ?). C'est en quelque sorte un formalisme, une hypothèse supplémentaire du modèle comme lorsqu'on distingue les individus selon des compartiments décrivant leur état clinique – susceptibles, infectés, en réanimation, décédés… L'avantage de cette hypothèse forte de réseau est qu'elle donne accès à des outils et théorèmes mathématiques permettant d'obtenir des résultats plus généraux.

Dans un modèle sans structure de contact explicite, vous supposez que chaque individu peut être en contact avec n'importe quel autre individu. Si cela peut être le cas à l'échelle d'un quartier, on voit bien qu'à une échelle nationale c'est peu crédible. Avec une approche de réseau, vous pouvez faire en sorte que chaque personne soit plutôt en contact avec une dizaine de personnes par semaine en moyenne. Cela génère un réseau social sur lequel vous pouvez simuler votre épidémie et voir en quoi cette structure de contacts modifie les propriétés de l'épidémie.

Cela semble très séduisant sur le papier, mais il existe plusieurs obstacles. D'une part, il faut déterminer quels réseaux sont importants, ce qui dépend de la biologie. Dans le cas d'une infection respiratoire comme le Covid-19, à transmission majoritairement aéroportée, les lieux clos visités sont plus importants que le réseau de contacts lui-même. À l'inverse, dans le cas d'une infection sexuellement transmissible, c'est vraiment le réseau de contacts sexuels qui détermine la propagation. D'autre part, même si le réseau qui importe est connu, on a souvent une idée assez vague de sa structure exacte. D'autant que la plupart des réseaux sont très dynamiques : les liens se font et se défont.

Néanmoins, les réseaux peuvent se révéler utiles dans le cadre du Covid-19. Dans notre étude avec les données de Facebook, nous avons essayé d'expliquer la propagation de l'épidémie en utilisant ces données pour paramétrer un réseau de contacts entre 94 départements français. Pour décrire ce réseau, nous avons construit une matrice – un tableau de 94×94 cellules, chacune contenant un nombre réel compris entre 0 et 1, qui représentait le pourcentage de contacts entre les deux départements concernés et qui évoluait chaque jour. Ce réseau pondéré nous a permis de voir comment, au cours du temps, les contacts entre les départements changeaient.

La théorie des réseaux est extrêmement développée en physique. En biologie, l'engouement a été fort dans les années 1990 et au début des années 2000, quand la théorie a atteint l'épidémiologie. Beaucoup d'articles sont parus sur les réseaux « invariants d'échelle », par exemple, des réseaux très hétérogènes dont les propriétés décrivent bien le réseau de contacts sexuels : la majorité des individus ont peu de contacts et quelques individus en ont énormément. Cette composante physique des épidémies a donné de très beaux résultats théoriques, en montrant notamment que l'hétérogénéité des réseaux modifie la vitesse de propagation des épidémies. Mais depuis la fin des années 2000, on étudie surtout comment les composantes biologique et sociale des épidémies mettent à mal certaines prédictions généralistes, et les limites de la transcription des résultats de la physique à l'épidémiologie.

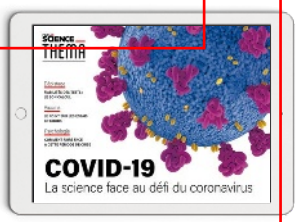
Le Covid-19 a-t-il accéléré cette prise de conscience ?

L'épidémie d'Ebola en Afrique de l'Ouest avait déjà mis la question sur le devant de la scène en 2014. Une équipe de l'université Northeastern, à Boston, aux États-Unis, avait annoncé, en se fondant sur un modèle de réseau qu'elle avait développé, que l'épidémie qui avait ressurgi quelques mois plus tôt risquait de se propager à l'ensemble de la planète et de causer des millions de morts. Cela ne s'est pas du tout réalisé. Le modèle négligeait le cycle de vie de l'infection ainsi que l'efficacité des mesures de prévention. Mais le Covid-19 a aussi fait ressortir l'importance d'inclure les composantes sociale et biologique en introduisant un net changement d'échelle. Des milliers d'articles ont été publiés sur le sujet. Tout le monde s'est pris de passion pour l'épidémiologie, ce qui est très bien, mais souvent avec beaucoup d'applications directes de résultats mathématiques ou physiques, au détriment des composantes sociale et biologique.

Avez-vous observé d'autres changements de la modélisation des épidémies, déclenchés par l'étude de la pandémie actuelle ?

La collecte de l'information a fait un bond. La modélisation dépend beaucoup des données. Sans données, on peut juste savoir à quelle vitesse double l'épidémie et produire

à lire



THEMA
Covid-19
La science face au défi du coronavirus

Comment fonctionnent les vaccins contre le Covid ? Les masques sont-ils efficaces ? Les tests de dépistage sont-ils fiables ? Que signifie le « taux de reproduction » *R* ? Le point sur l'épidémie dans ce n° 21 de la collection « Thema ».

À télécharger gratuitement
sur https://www.pourlascience.fr/sd/epidemiologie/thema-n021-20 430.php

un modèle de croissance exponentielle, comme début mars 2020. Plus on a de données, plus on peut affiner les modèles. Et, dans tous les pays, on a observé un développement considérable de l'acquisition des données de suivi de l'épidémie.

De plus, jamais auparavant la modélisation en épidémiologie n'avait eu un tel impact politique et médiatique. Dans la plupart des pays européens, les premiers confinements nationaux ont été décidés sur la base de modèles mathématiques ou informatiques. Certes, on était dans une situation inédite où le poids du biologique s'imposait de manière historiquement forte pour les pays occidentaux. Il n'en reste pas moins que ce constat provenait de modèles, ce qui était complètement nouveau.

Par ailleurs, la modélisation en épidémiologie est une science en constante évolution. Par exemple, certains outils couramment utilisés sont assez récents. Notamment, la technique dite « d'EpiEstim » pour estimer au mieux le R_0, le nombre moyen de personnes infectées par une personne porteuse de l'infection, a été développée par Anne Cori, chercheuse à l'Imperial College de Londres, lors de l'épidémie d'Ebola en 2014. Les modèles, même ceux purement analytiques, changent aussi.

On a aussi utilisé des outils théoriques récents qui avaient principalement été testés rétrospectivement, sur des épidémies passées. C'est le cas pour la phylodynamique, qui consiste à analyser les séquences génétiques des virus afin de comprendre l'histoire des épidémies. Car la manière dont les microbes se propagent laisse des traces dans leurs génomes. C'est un champ très jeune, dont les outils les plus populaires ont moins de dix ans. Le terme lui-même ne date que de 2004. La phylodynamique existe à peine en France, mais nous montons justement un groupement de recherche avec le CNRS et l'Inrae pour la développer. Les Britanniques, en revanche, sont bien avancés dans le domaine, ce qui explique leur avance considérable en termes de séquençage et de génomique.

Quels sont les grands enjeux de la modélisation des épidémies, à présent ?

Aujourd'hui, on comprend bien la dynamique hospitalière. On sait assez bien la modéliser pour peu qu'il n'y ait pas de changement brusque de politique de santé publique. Les principaux enjeux sont les inconnues biologiques que sont l'évolution virale et l'efficacité de la réponse immunitaire. Dans l'équipe, en ce moment, nous essayons de développer des modèles mathématiques avec des formalismes dits « d'équation aux dérivées partielles » qui, justement, capturent mieux les variations d'immunité, car pour l'instant les hypothèses à ce sujet sont un peu simplistes : on suppose soit que la personne est vaccinée soit qu'elle a été infectée, a guéri et est immunisée.

Un autre défi qui intéresse beaucoup la communauté est l'intégration des données dans les modèles statistiques : pour l'instant, en France, les modèles de description de l'épidémie s'appuient sur des données classiques (incidence de la maladie à l'hôpital, dépistage…). Le pays s'est mis doucement au séquençage des virus chez les personnes infectées par le SARS-CoV-2 afin de détecter les mutations associées aux variants, mais on n'injecte pas encore ces données dans les modèles, contrairement à d'autres pays comme le Royaume-Uni. On pourrait rajouter à cela les données de mobilité et les données environnementales, sachant que l'hétérogénéité géographique est encore difficile à suivre.

Mais la principale inconnue est probablement sociale. On ne se pose pas les mêmes questions de modélisation si on se lance massivement dans la prévention par des mesures sanitaires, si au contraire on restructure les capacités hospitalières pour augmenter les admissions en réanimation par an, ou si on table sur une troisième dose vaccinale pour augmenter l'immunité.

Et concernant les autres maladies ?

Pour le moment, les quelques modélisateurs en France commencent tout juste à se remettre de l'effort collectif produit en 2020 et 2021. Mais il y aura des ponts, c'est certain. Par exemple, l'approche de simulation sur OpenStreetMap, d'Olivier Thomine, pourra très clairement être transposée à d'autres maladies respiratoires, comme la grippe, voire à la transmission de maladies par des vecteurs comme le moustique-tigre. En fait, la modélisation des épidémies se nourrit en permanence des nouvelles approches. Là encore, les Britanniques ont de l'avance. Ils ont déjà commencé, *via* des numéros spéciaux de revues scientifiques, une rétrospective des approches des différentes équipes pour stimuler le dialogue et tirer les bilans sur l'épidémie actuelle. En France, la nouvelle agence ANRS-MIE tente d'impulser cela pour les maladies humaines en regroupant une trentaine de modélisateurs en épidémiologie, mais les moyens alloués sont dérisoires par rapport aux Anglo-Saxons.

Cela dit, un enseignement est déjà clair. L'interdisciplinarité est un élément crucial en épidémiologie : il est indispensable de maîtriser biologie, physique et enjeux sociaux. Cela illustre, en somme, ce que devrait être la santé publique : une institution profondément interdisciplinaire prenant en compte les différentes composantes de la santé, de l'individu aux populations.

Propos recueillis par
Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

C. Selinger *et al.*, **Predicting Covid-19 incidence in French hospitals using human contact network analytics,** *Int. J. Infect. Dis.*, vol. 111, pp. 100-107, 2021.

M. T. Sofonea *et al.*, **Memory is key in capturing Covid-19 epidemiological dynamics, Epidemics,** vol. 35, article 100 459, 2021.

M. T. Sofonea et S. Alizon, **Anticipating COVID-19 intensive care unit capacity strain : A look back at epidemiological projections in France,** *Anaesth. Crit. Care Pain Med.*, vol. 40(4), article 100 943, 2021.

G. Danesh *et al.*, **Quantifying transmission dynamics of acute hepatitis C virus infections in a heterogeneous population using sequence data,** *Plos Pathog.*, vol. 17(9), article e100 9916, 2021.

L'AUTRICE

KELSEY HOUSTON-EDWARDS
mathématicienne et journaliste
aux États-Unis

L'ESSENTIEL

> La connectivité dans un réseau est une propriété essentielle. Elle est définie par les liens entre les éléments du réseau.

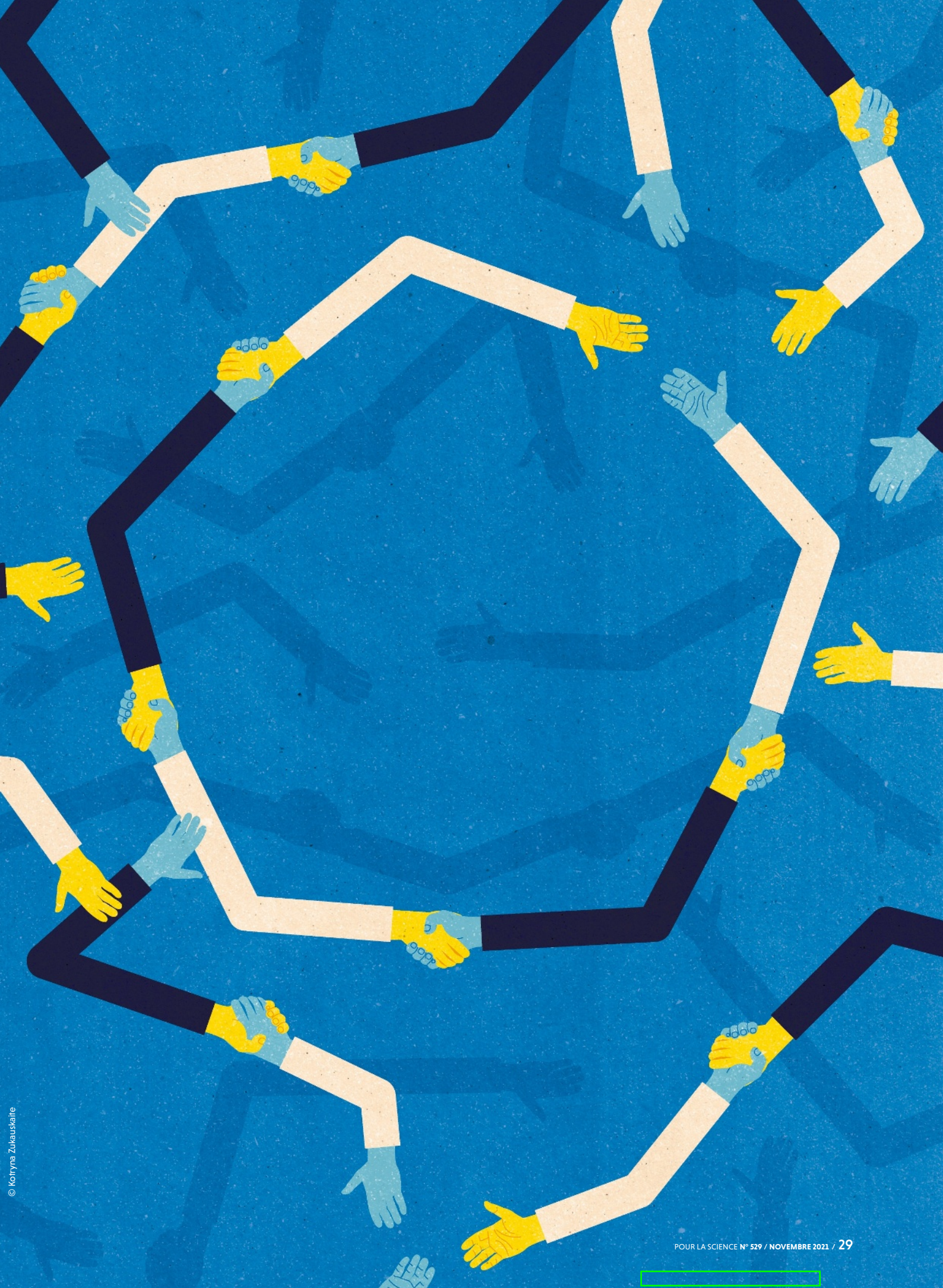
> Lorsqu'il y a suffisamment de liens, il y a « percolation » : il existe alors un chemin de connexions allant d'une extrémité à l'autre du réseau.

> La percolation apparaît en général subitement dès que la proportion de liens dépasse un certain seuil.

> La théorie de la percolation aide à étudier des réseaux de types divers, ordonnés ou non, dont les éléments (les nœuds) peuvent être fixes ou mobiles.

La percolation
un outil pour modéliser les réseaux

Inspirée à l'origine par des questions de physique, la théorie de la percolation permet d'étudier certaines propriétés des réseaux. Elle aide notamment à comprendre la propagation des épidémies, à concevoir un réseau de communication décentralisé ou à caractériser la diffusion des informations au sein d'un réseau social.

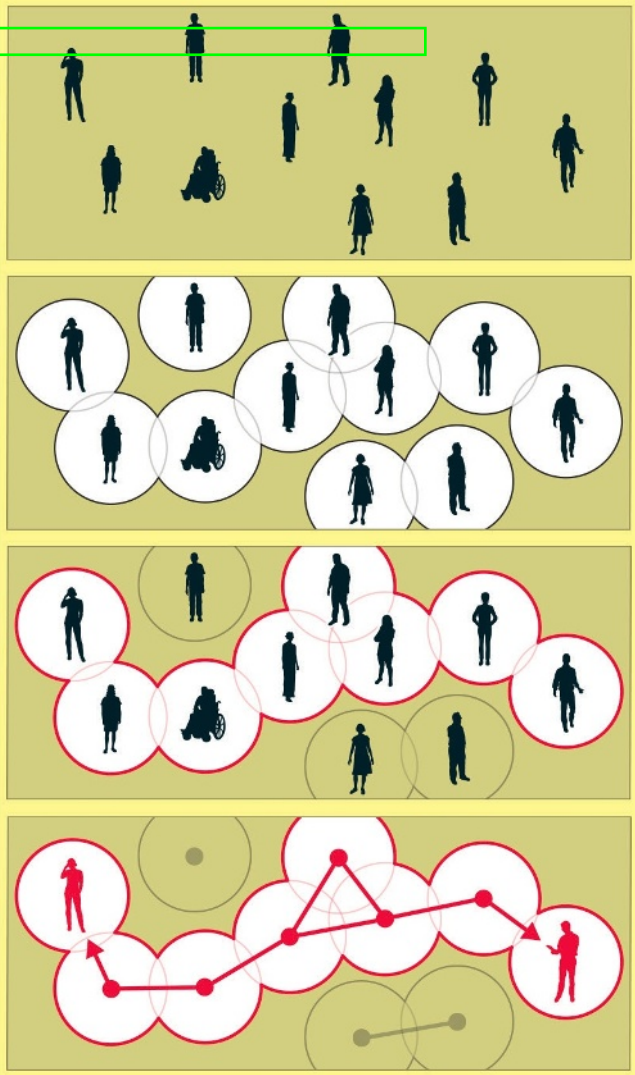


© Kotryna Zukauskaite

Quand vous appuyez sur «envoyer» après avoir rédigé un texto, il est facile de s'imaginer que le message va aller directement de votre téléphone à celui de votre ami(e). En réalité, il parcourt généralement un long trajet à travers le réseau cellulaire ou internet, qui sont des infrastructures susceptibles d'être endommagées par des catastrophes naturelles ou contrôlées par des États répressifs. Craignant la surveillance ou l'interférence de l'État chinois, les manifestants technophiles de Hong Kong avaient ainsi préféré éviter internet et utiliser des logiciels tels que FireChat et Bridgefy pour s'envoyer des messages directement par sauts de puce entre téléphones voisins.

Ces applications permettaient de faire passer discrètement un message de proche en proche jusqu'au téléphone du destinataire, qui était le seul à pouvoir visualiser le message. Un tel ensemble de téléphones liés, appelé «réseau maillé» ou «réseau spécial mobile» (RSM), permet un mode de communication flexible et décentralisé. Cependant, pour que deux téléphones donnés communiquent, ils doivent être liés par une chaîne d'autres téléphones. Combien de personnes dispersées dans Hong Kong doivent être connectées par le même réseau maillé pour avoir l'assurance que la communication à travers la ville est possible?

Communication dans un réseau maillé



UN CHANGEMENT ABRUPT

Une branche des mathématiques, la «théorie de la percolation», offre une réponse étonnante: quelques personnes peuvent faire toute la différence. À mesure que des utilisateurs rejoignent le réseau, des poches isolées de téléphones connectés apparaissent peu à peu. Mais une communication complète d'est en ouest ou du nord au sud apparaît tout à coup quand la densité d'utilisateurs dépasse un seuil bien précis. Ce changement rapide de la connectivité d'un réseau correspond à ce que les physiciens appellent une «transition de phase», le même concept que celui utilisé pour décrire des changements abrupts de l'état d'un matériau, comme la fusion de la glace ou l'ébullition de l'eau.

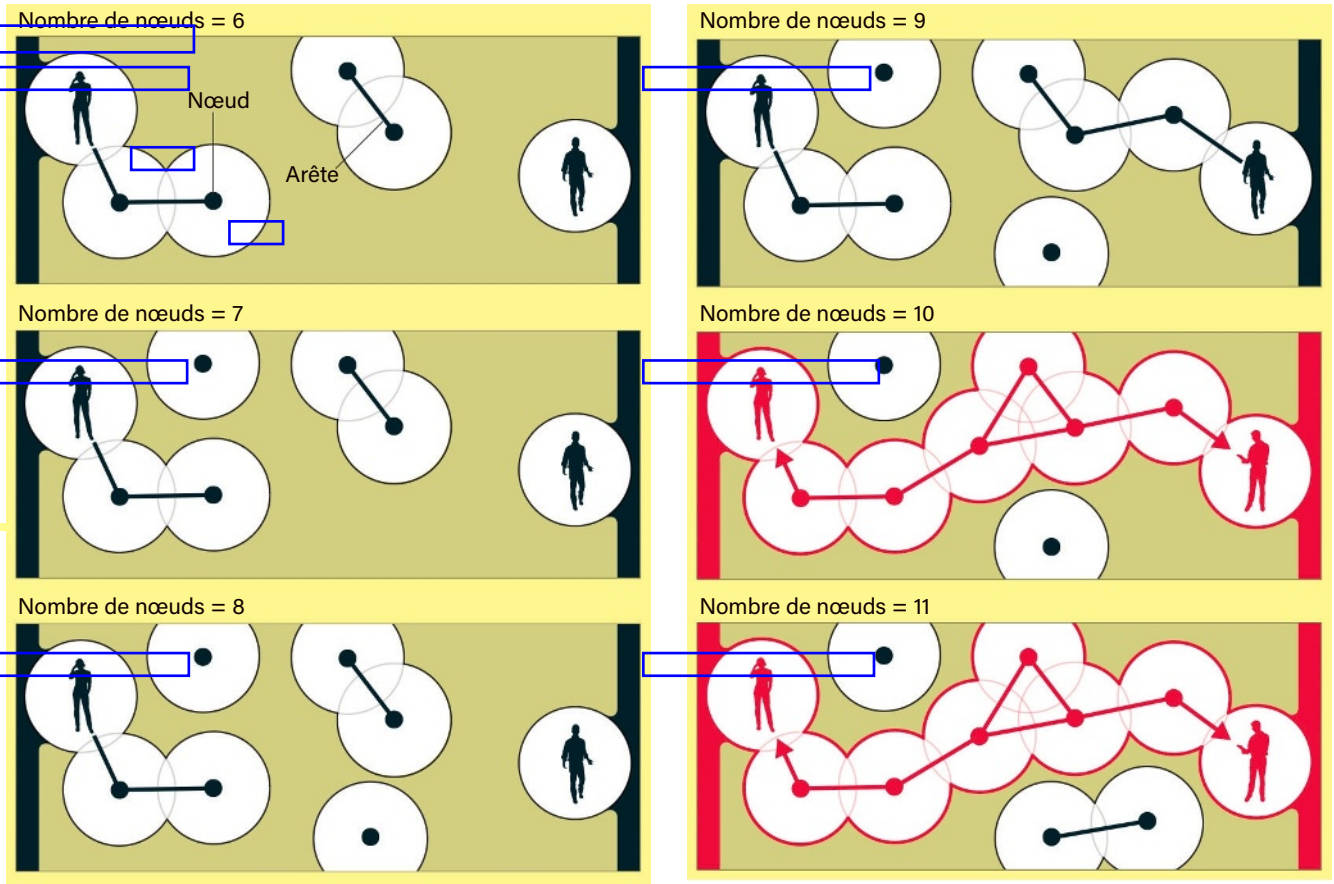
La théorie de la percolation examine les conséquences de la création ou de la suppression aléatoires de liens dans ces réseaux, que les mathématiciens conçoivent comme un ensemble de nœuds (représentés par des points) reliés par des «arêtes» (des traits). Chaque nœud représente un objet tel qu'un téléphone ou une personne, et les arêtes représentent une relation donnée entre deux de ces éléments. L'idée fondamentale de la théorie de la percolation, qui date des années 1950, est que quand le nombre de liens d'un réseau augmente progressivement, un amas global de nœuds connectés va émerger subitement.

À quel moment cette transition a-t-elle lieu? Telle est la question avec laquelle les scientifiques sont aux prises. Quel est l'équivalent, pour un réseau donné, du 0 °C qui voit fondre la glace, ou des 100 °C pour lesquels l'eau bout? À quel point un mème devient-il viral, un produit domine-t-il le marché, un séisme survient-il, un réseau de téléphones portables atteint-il une totale connectivité ou une maladie devient-elle une pandémie? La théorie de la percolation permet de mieux comprendre toutes ces transitions.

Les mathématiciens étudient généralement des réseaux idéalisés, géométriquement symétriques et d'extension infinie, parce qu'ils se prêtent mieux aux calculs théoriques. Les réseaux infinis sont généralement les seuls présentant des transitions de phase véritablement abruptes. Les réseaux réels ont une étendue limitée, sont souvent désordonnés et exigent

© Sauf mention contraire, les illustrations sont de Wee People font, ProPublica et Alberto Cairo

Transition de phase



Quand le nombre de nœuds dépasse un certain seuil, ici 10, il y a percolation *(en rouge)*.

des calculs complexes, mais eux aussi présentent des transitions, quoique plus douces. Tandis que le monde devient de plus en plus connecté par des couches complexes de liaisons qui transportent les gens, leur apportent de l'énergie au moyen de réseaux électriques, leur permettent de communiquer au sein de réseaux sociaux en ligne, leur transmettent parfois des virus, la théorie de la percolation ne cesse de gagner en pertinence.

ET LA CONNEXION DEVIENT GLOBALE

En 1957, les ingénieurs britanniques Simon Broadbent et John Hammersley ont initialement formulé la théorie de la percolation comme un problème purement mathématique. Ils ont transposé au niveau abstrait l'étude de la percolation en physicochimie, phénomène qui désigne l'écoulement d'un fluide à travers un milieu solide perméable, comme de l'huile ou du pétrole s'infiltrant à travers de la roche poreuse, ou comme l'eau traversant le café moulu dans une cafetière. Dans le réseau de percolation d'une couche rocheuse, les nœuds correspondent aux petits pores dans la structure, et les arêtes correspondent aux canaux ou fissures qui permettent au fluide de s'écouler entre les trous. Sans surprise, l'huile ou le pétrole s'écoulent plus loin quand la roche est davantage fracturée. Broadbent et Hammersley ont prédit que dans une roche idéalisée, le fluide gagne de petites régions seulement, mais s'infiltre dans la quasi-totalité de la roche dès que la densité de fissures dépasse un certain seuil.

Les géologues utilisent une version de la théorie de la percolation pour étudier la taille des amas de nœuds connectés dans des roches fracturées, ce qui est important pour l'extraction du pétrole par fracturation hydraulique, ou pour prévoir la survenue de séismes. Afin de modéliser les tremblements de terre, les sismologues considèrent des réseaux de percolation qui reproduisent l'échelle et la densité des fissures observées, et simulent les contraintes mécaniques en ajustant la probabilité que les fissures se connectent. À mesure que les contraintes et les liaisons augmentent, les amas grossissent jusqu'à ce que, brusquement et de façon imprévisible, un séisme frappe. Des versions modifiées des processus de percolation permettent aux fissures de se réparer et de se refracturer afin de simuler les secousses secondaires ou des changements à long terme.

La théorie de la percolation éclaire également des processus physiques et chimiques à beaucoup plus petite échelle, comme la polymérisation, c'est-à-dire le processus par lequel de petites molécules simples, les «monomères», se lient chimiquement pour former des molécules

beaucoup plus grosses, les polymères. Dans le cadre de la théorie de la percolation, chaque monomère constitue un nœud, et deux monomères voisins peuvent spontanément former une liaison, assimilée à une arête du réseau. Si la probabilité que deux monomères se lient augmente, le système finira par atteindre le seuil de percolation, et un unique polymère géant émergera. C'est ce processus qui est à l'œuvre quand de la gélatine en poudre dissoute dans de l'eau forme une gelée.

Les réseaux que l'on trouve dans de la roche fracturée ou dans les polymères liés sont extrêmement complexes. Il serait presque impossible de décrire précisément leur structure, mais Broadbent et Hammersley ont montré qu'on peut en faire une approximation sous forme de motifs répétitifs et qui se prêtent à l'analyse. L'exemple le plus simple est celui d'un réseau carré : les nœuds sont disposés aux points d'intersection d'un quadrillage, chacun étant connecté à ses voisins par quatre arêtes.

AMAS D'ÉLÉMENTS LIÉS

Pour voir comment un fluide se propagerait à travers un tel réseau, imaginons que chaque arête soit un tuyau, et que ce tuyau est soit ouvert, soit fermé. On peut choisir au hasard l'état de chaque tuyau en tirant à pile ou face. Le paysage résultant de tuyaux ouverts et fermés sera un réseau aléatoire, et il aura des amas « ouverts », dans lesquels tous les nœuds sont reliés par une série de tuyaux ouverts. Si vous versez de l'eau dans n'importe lequel des nœuds d'un tel amas, elle va couler dans tous les tuyaux ouverts et atteindre tous les autres nœuds de l'amas.

La théorie de la percolation s'intéresse à la connectivité du réseau, qui correspond à la grosseur des amas ouverts. Mais la « grosseur » est un concept ambigu et difficile à intégrer au formalisme mathématique. C'est pourquoi les mathématiciens remplacent souvent les grands nombres par des infinis. La question centrale devient alors : existe-t-il un amas infini ? « Pour nous, il est beaucoup plus facile de répondre à cette question binaire que de dire combien de gros amas de telle ou telle taille nous voyons », explique Benedikt Jahnel, mathématicien à l'institut Weierstrass d'analyse appliquée et de stochastique, à Berlin.

En fait, la probabilité qu'un réseau infini ait un amas infini est toujours égale soit à 0, soit à 1. Cela s'explique par le fait que le processus de percolation est soumis à un principe général de la théorie des probabilités appelé « loi du zéro-un », découvert par le mathématicien russe Andreï Kolmogorov dans les années 1930. Imaginez que vous lancez une pièce un nombre infini de fois. La loi du zéro-un s'applique à toute question relative aux résultats obtenus pour laquelle la réponse ne dépend pas d'un nombre fini de lancers (par exemple, la réponse à la question « Êtes-vous tombé sur face un nombre infini de fois ? » ne changera pas si vous changez un nombre fini de lancers, ce qui n'est pas le cas de la réponse à la question « Êtes-vous tombé sur face au troisième lancer ? »).

La loi du zéro-un nous dit que des changements finis ne peuvent pas perturber des phénomènes qui sont intrinsèquement infinis. Ainsi, la probabilité de trouver un amas infini dans un réseau infini ne peut pas changer légèrement, comme de 0,81 à 0,82 ; elle doit prendre une des deux valeurs extrêmes, 0 ou 1. Autrement dit, soit un réseau infini n'aura pas d'amas infini (probabilité nulle de trouver un amas infini), soit il aura un amas infini (probabilité égale à 1).

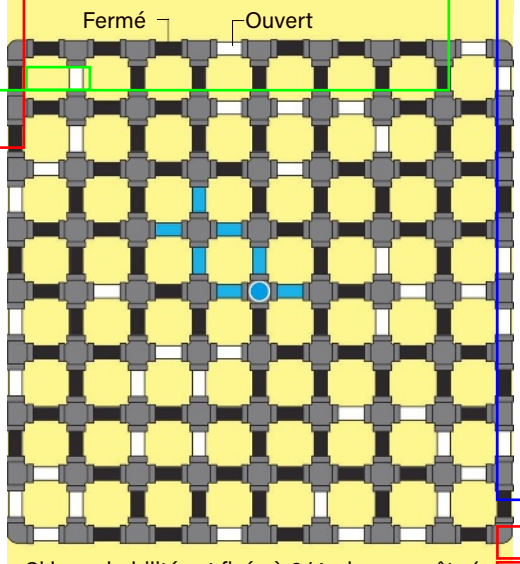
Ainsi, fermer un nombre fini de tuyaux ouverts, ou inversement, n'a pas d'effet sur l'existence ou non d'un amas infini de tuyaux ouverts. La probabilité de trouver un amas ouvert infini est égale soit à 0, soit à 1. Mais alors, est-ce 0 ou est-ce 1 ?

TROUVER LE SEUIL

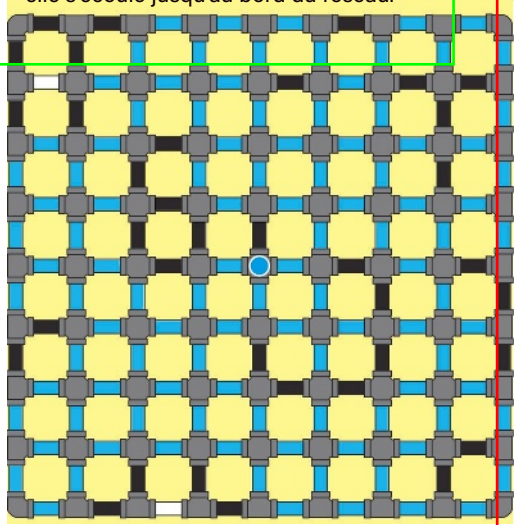
La réponse dépend du biais de la pièce avec laquelle vous tirez à pile ou face. Imaginez que vous ayez un bouton qui contrôle le biais. Quand vous tournez le bouton complètement vers la gauche, la pièce va toujours tomber sur « fermé ». Une fois que tous les tuyaux sont fermés, l'eau versée sur un nœud ne coulera nulle part, et la probabilité de trouver un amas infini sera nulle. À mesure que vous tournez le bouton dans le sens des aiguilles d'une montre, la probabilité que la pièce tombe sur « ouvert » augmente, et avec des lancers supplémentaires, il y aura de plus en plus de tuyaux ouverts. Quand le bouton est tourné complètement vers la droite, la pièce tombera toujours sur « ouvert », et finalement l'eau versée dans un nœud s'écoulera partout. La probabilité de trouver un amas infini vaut alors 1.

Percolation dans un réseau carré

Si la probabilité est fixée à 1/3, chaque arête (un tuyau) a une chance sur trois d'être ouverte *(en blanc)*. Dans cet exemple d'un réseau de 8×8 carrés, quand on verse de l'eau *(en bleu)* dans le nœud central, elle est bloquée après avoir atteint 6 autres nœuds.



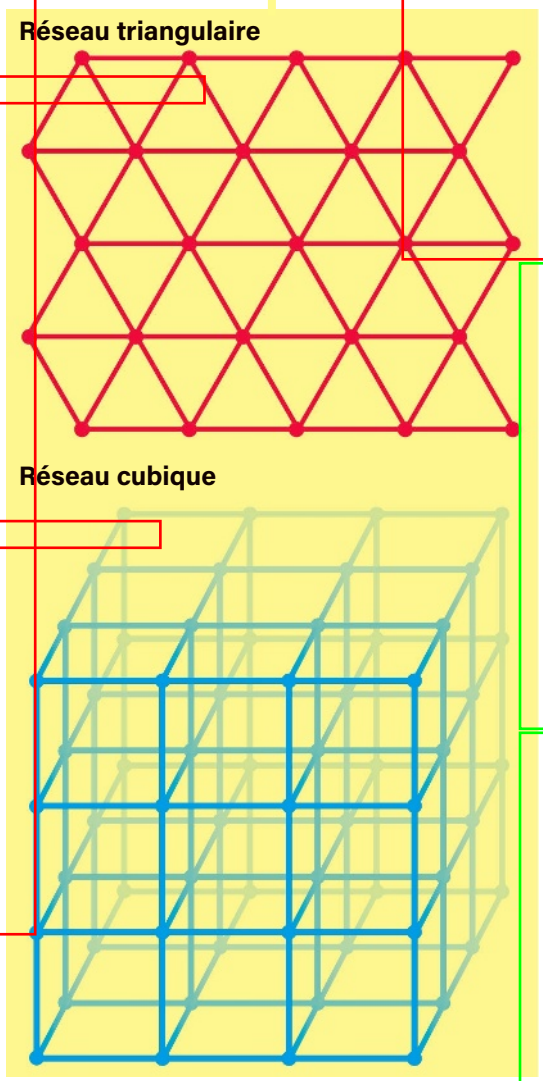
Si la probabilité est fixée à 3/4, chaque arête (ou tuyau) a trois chances sur quatre d'être ouverte. Dans cet exemple d'un réseau de 8×8 carrés, quand on verse de l'eau dans le nœud central, elle s'écoule jusqu'au bord du réseau.



Si vous tournez lentement le bouton dans le sens des aiguilles d'une montre, la probabilité que les tuyaux soient ouverts augmente progressivement, et l'on pourrait s'attendre à ce que la probabilité de trouver un amas infini augmente également lentement de 0 à 1. En réalité, ce changement a lieu abruptement, à cause de la loi du zéro-un, qui indique que la probabilité ne peut pas être comprise entre 0 et 1. Pour le réseau carré, la probabilité passe de 0 à 1 quand le bouton est exactement au milieu (c'est-à-dire quand la pièce n'est pas biaisée). La position critique du bouton est ce qu'on appelle le «seuil de percolation». Quelle que soit la forme du réseau, qu'il s'agisse par exemple du réseau triangulaire ou du réseau cubique (version tridimensionnelle du réseau carré), la question essentielle de la théorie de la percolation reste la même: quelle est la valeur du seuil? Quel doit être le biais de la pièce afin que suffisamment de tuyaux soient ouverts pour garantir un amas ouvert infini?

La réponse dépend de la forme exacte du réseau (infini), et elle n'a rien de trivial. Pour un réseau carré, le seuil est égal à 1/2 (autrement dit, dès que la probabilité qu'un tuyau soit ouvert est au moins égale à 1/2, il y a un amas ouvert infini). Même ce résultat, qui porte sur le plus simple des réseaux, a été très difficile à prouver: ce n'est qu'en 1980 que le mathématicien d'origine allemande Harry Kesten y est parvenu. Et malgré des décennies d'efforts, les seuils exacts de percolation ne sont connus que pour quelques réseaux excessivement simples. «Il y a une foule de travaux réalisés juste pour trouver le seuil», explique Robert Ziff, de l'université du Michigan. «Le nombre de systèmes différents que l'on a étudiés est stupéfiant.» Ce chercheur en physique statistique a créé une page Wikipédia qui répertorie les seuils de percolation pour des centaines de réseaux différents. Le seuil pour le réseau triangulaire vaut approximativement 0,347, une valeur déterminée analytiquement, mais la vaste majorité des nombres figurant sur cette page (notamment le seuil de percolation du réseau cubique) sont des approximations obtenues au moyen de simulations sur ordinateur.

Les exemples de réseaux ci-dessus sont de bons modèles pour la percolation dans les systèmes physiques tels que les roches fracturées, où les pores ont des positions fixes avec des fissures les liant entre eux aléatoirement. Mais d'autres exemples réels sont beaucoup plus compliqués. Dans les réseaux maillés FireChat et Bridgefy mentionnés plus haut, par exemple, la localisation des nœuds (les téléphones des manifestants de Hong Kong) changeait constamment. Les arêtes d'un tel réseau, c'est-à-dire ses connexions, se forment quand deux téléphones sont suffisamment proches l'un de l'autre, c'est-à-dire dans les limites de la portée de quelques dizaines de mètres des applications Bluetooth utilisées pour partager les messages. Ces réseaux sont décrits par un modèle différent, dit de «percolation continue», parce que les nœuds du réseau maillé peuvent se trouver n'importe où dans un espace continu.



PERCOLATION DANS DES RÉSEAUX DE NŒUDS MOBILES

Comme tout modèle mathématique, la version abstraite de ce réseau est fondée sur des hypothèses simplifiées. Les téléphones sont dispersés aléatoirement, sans imiter les amas naturels ou les motifs observés sur une carte des déplacements de personnes, et deux téléphones sont reliés en ne tenant compte que de la distance qui les sépare, et pas de la présence éventuelle de murs ou d'autres interférences. Le modèle met néanmoins en lumière le rôle central de la théorie de la percolation dans les réseaux maillés réels.

Il y a deux façons d'augmenter la connectivité de ce réseau à percolation continue: permettre une connexion directe à plus longue portée, ou ajouter davantage de téléphones (autrement dit, augmenter la densité des utilisateurs). On peut envisager ces modifications comme des «boutons» jouant un rôle similaire à ceux du réseau de tuyaux; en les tournant vers la droite, on augmente la connectivité. Et dans ces modèles, «il existe un point de bascule qui fait passer de la connectivité locale à la connectivité globale», explique Benedikt Jahnel.

Pour les concepteurs d'applications de réseaux maillés, trouver le seuil de percolation est un problème d'ingénierie pratique. Changer la puissance de l'appareil, qui contrôle la portée, est une façon de tourner le bouton. La question centrale, explique Ram Ramanathan, chercheur principal au sein de l'entreprise américaine de réseaux maillés goTenna, est: «Quelle est la puissance émettrice dont vous avez besoin pour avoir un réseau connecté?» La réponse serait

relativement simple s'il y avait une relation linéaire entre puissance et connectivité, si chaque petite augmentation de puissance amenait une petite augmentation proportionnelle de la connectivité. Mais l'existence d'un seuil de percolation signifie qu'il y a un risque que le réseau perde soudainement sa connectivité si les utilisateurs se déplacent. La puissance optimale est celle qui garantit que le réseau soit toujours connecté, mais sans gaspiller d'énergie.

L'autre « bouton » est la densité de téléphones. Les réseaux maillés à portée fixe ont besoin d'une densité critique d'utilisateurs, et ont de meilleures chances de permettre une connectivité étendue lors d'événements rassemblant beaucoup de monde, comme un festival de musique, un match de foot ou une grande manifestation.

Jorge Rios, PDG et cofondateur de Bridgefy, indique ainsi que son entreprise a observé des pics importants de nouveaux utilisateurs au Cachemire, au Nigeria, à Hong Kong et en Iran durant les périodes de troubles civils, quand les gens se sont tournés vers les réseaux maillés pour maintenir les communications au cas où le gouvernement couperait internet ou la foule saturerait les connexions cellulaires. Certains quartiers, comme Red Hook à Brooklyn, à New York, utilisent des réseaux maillés pour étendre l'accès à internet en installant des nœuds permanents au sommet des bâtiments. Une bonne partie du matériel nécessaire et de la technologie d'acheminement est encore en pleine évolution, mais on imagine aisément des applications futuristes audacieuses : par exemple, des véhicules autonomes pourraient communiquer directement, afin de partager de l'information sur le trafic ou les dangers de la route, sans nécessiter d'infrastructure supplémentaire.

RÉSEAUX ÉPIDÉMIQUES

Les réseaux utilisés pour modéliser l'écoulement d'un fluide dans une roche ou les communications directes entre téléphones reproduisent la structure spatiale de ces systèmes : deux nœuds sont connectés par une arête si les objets qu'ils représentent sont proches l'un de l'autre dans l'espace physique. Mais pour des réseaux qui suivent la propagation d'une maladie contagieuse d'un individu à l'autre, les liens sont aussi déterminés par la manière dont l'agent pathogène se transmet. Ces réseaux sont particulièrement enchevêtrés : une personne infectée qui passe une heure dans une boîte de nuit peut passer un virus à une autre personne qui va dans les jours suivants le transporter à l'autre bout du pays, ou même sur un autre continent.

Les modèles épidémiologiques les plus simples classent tous les individus en trois catégories (réceptifs, infectés et rétablis) et négligent cette structure complexe des connexions. Dans ces modèles, les personnes infectées transmettent la maladie à des personnes aléatoires de la catégorie réceptive, avec l'hypothèse que tous les individus de ce groupe (étudiants d'une résidence universitaire, habitants d'une ville…) ont le même risque d'être contaminés. Le taux de nouvelles infections des personnes réceptives dépend du taux de reproduction de base, c'est-à-dire du nombre moyen d'infections secondaires créées par une personne contagieuse, abrégé en R_0. Si R_0 est supérieur à 1, alors le virus gagne du terrain ; si ce nombre est inférieur à 1, l'épidémie régresse.

La structure d'un réseau épidémique dépend beaucoup de la maladie considérée

Cependant, en pratique, la façon dont les gens interagissent influe sur la propagation globale de la maladie. Par exemple, en 2003, l'épidémie de SRAS (syndrome respiratoire aigu sévère) avait initialement des valeurs de R_0 comprises entre 2,2 et 3,6, mais le nombre de cas sur cette période était « beaucoup plus bas qu'attendu sur la base d'un calcul simple », écrivait en 2006 Lauren Meyers, qui dirige aujourd'hui le Consortium de modélisation du Covid-19 à l'université du Texas.

Ce désaccord serait dû, selon elle, à l'hypothèse que « tous les individus réceptifs ont le même risque d'être infectés », hypothèse qui ignore la forme complexe des réseaux de contacts des personnes. En particulier, les valeurs de R_0 estimées pour le SRAS étaient fondées sur sa propagation rapide au sein d'immeubles d'habitation et d'hôpitaux, qui présentent des « taux particulièrement élevés de contacts rapprochés entre individus » par rapport à la population générale. Mais parce que les personnes infectées par le SRAS tombaient malades assez rapidement, elles étaient hospitalisées avant d'avoir pu infecter beaucoup de personnes.

Les arêtes d'un réseau épidémique expriment des relations particulières. Dans un réseau montrant la propagation potentielle du virus du sida, par exemple, deux personnes sont connectées par une arête si elles ont échangé des fluides corporels. Un réseau montrant la propagation potentielle du Covid-19 a une structure d'arêtes très différente, qui représente les contacts

rapprochés sans protection respiratoire. Les confinements ou les restrictions telles que la fermeture des commerces non essentiels et la limitation des voyages modifient cette structure des arêtes et, avec les masques et la distanciation physique, empêchent le virus de « sauter » d'une personne (ou nœud) à une autre. L'un des défis pour les épidémiologistes est de trouver des moyens de réduire suffisamment la connectivité du réseau.

Les réseaux épidémiques réels tels que ceux liés à la propagation du Covid-19 sont extrêmement complexes et difficiles à décrire avec précision. Même si l'on connaissait la structure exacte du réseau, il serait compliqué de l'analyser mathématiquement. On effectue alors des simulations numériques et des analyses massives de données pour prédire les nombres de cas futurs, évaluer l'impact d'une distanciation physique d'un mètre plutôt que de deux, quantifier le rôle des écoles et des restaurants dans la propagation du coronavirus, etc. Alessandro Vespignani, théoricien des réseaux complexes à l'université Northeastern (à Boston, dans le Massachusetts), qualifie ces recherches de « travaux de temps de guerre » : des travaux tactiques et parfois un peu brouillons, mais qui produisent les résultats numériques immédiats dont ont besoin les autorités et les services médicaux.

Par contraste, Alessandro Vespignani mène aussi des recherches « de temps de paix », lorsqu'il a le loisir de « développer le modèle, de calibrer différentes façons de modéliser les choses, de développer des approches scientifiques, de chercher comment améliorer les résultats ». Afin d'arriver à une compréhension théorique de la manière dont la forme de base et les caractéristiques structurelles d'un réseau ont un impact sur la propagation d'une maladie, les scientifiques se tournent vers la théorie de la percolation.

DANS UN RÉSEAU ÉPIDÉMIQUE, LE DEGRÉ VARIE BEAUCOUP

Les premiers outils de la percolation, développés avec des mathématiques pratiquées avec « un crayon et du papier », ne sont utilisables que dans les cas les plus simples, quand le réseau est artificiellement ordonné et symétrique. Mais malgré tout, « les mathématiques sont cruciales pour guider notre compréhension », note Alessandro Vespignani. Les épidémiologistes des réseaux réduisent le réseau à ses caractéristiques essentielles, en particulier sa distribution des degrés des nœuds. Le degré d'un nœud est le nombre d'autres nœuds auxquels il est relié. Dans le réseau carré, par exemple, tous les nœuds

sont de degré 4. Mais dans un réseau épidémique, le degré varie énormément, car certains individus ont de nombreux contacts et peuvent potentiellement contaminer de nombreuses autres personnes, tandis que d'autres individus sont pratiquement isolés.

TESTER L'INFLUENCE DES DEGRÉS

La distribution des degrés est spécifiée par la probabilité pour chaque nœud d'avoir tel ou tel degré. Dans les réseaux de contacts épidémiques, cela se traduit par la probabilité que quelqu'un contamine (ou soit potentiellement infecté par) un certain nombre d'autres personnes. Pour comprendre comment cet aspect joue sur le seuil de percolation, les épidémiologistes modélisateurs comme Lauren Meyers génèrent des milliers de réseaux échantillons qui sont, pour l'essentiel, aléatoires, hormis une caractéristique: ils ont tous la même distribution des degrés. Cette approche est une façon d'isoler la distribution des degrés afin de percevoir son rôle dans la structure du réseau. Si les propriétés des réseaux générés correspondent à celles des réseaux réels, alors la distribution des degrés ou toute autre caractéristique qui est intégrée au modèle sont probablement pertinentes pour la propagation de la maladie, explique Lauren Meyers. Si la correspondance est parfaite, «alors vos résultats mathématiques auraient exactement la même allure que vos simulations».

Les recherches montrent que le seuil de percolation pour un réseau chute si le réseau a une distribution des degrés plus étalée, ce qui signifie une plus large fourchette des degrés des différents nœuds. Ainsi, une maladie se propagera plus facilement dans un réseau comportant des individus très connectés et des personnes isolées que dans un réseau où tout le monde a à peu près le même nombre de contacts. Joel Miller, mathématicien épidémiologiste à l'université La Trobe, à Melbourne, en Australie, explique cette observation de façon heuristique: «Si j'ai dix fois plus de contacts que vous, j'ai dix fois plus de chances d'être infecté, et j'ai dix fois plus de chances d'infecter quelqu'un que vous, mon rôle est cent fois plus important dans la transmission de la maladie.»

La théorie de la percolation sert à modéliser d'autres phénomènes de «contagion», comme quand sur les réseaux sociaux d'internet un mème gagne lentement des vues et des partages avant de brutalement devenir viral. Elle peut s'appliquer aux modèles économiques pour montrer comment un produit particulier peut rapidement devenir dominant sur le marché quand suffisamment de consommateurs l'ont recommandé à leurs contacts. Les modèles électoraux, qui décrivent l'influence des personnes sur leur communauté, présentent également des effets de seuil.

BIBLIOGRAPHIE

M. Li *et al.*, **Percolation on complex networks : Theory and application,** *Physics Reports*, vol. 907, pp. 1-68, 2021.

R. M. Ziff, **Percolation and the pandemic,** *Physica A*, vol. 568, article 125723, 2021.

F. Bagnoli *et al.*, **Percolation and internet science,** *Future Internet*, vol. 11(2), article 35, 2019.

H. Duminil-Copin, **La percolation, un jeu de pavages aléatoires,** *Pour la Science*, n° 407, pp. 48-54, septembre 2011.

Contrairement aux réseaux infinis et bien ordonnés que les mathématiciens étudient classiquement, les réseaux dérivés d'exemples réels sont de taille finie et désordonnés. Les réseaux finis ne passent pas instantanément de liens restreints à de petites poches à une connexion généralisée à la manière des réseaux infinis; néanmoins, la transition est le plus souvent très rapide. Pour comprendre ces processus, les théoriciens des réseaux font des allers et retours entre les mathématiques et les simulations numériques. Les réseaux simples les guident pour construire des modèles numériques détaillés de réseaux réels, et les leçons qu'ils tirent de ces simulations influent à leur tour sur la manière dont ils modifient les modèles papier-crayon pour mieux comprendre le monde réel.

LA PANDÉMIE DÉPEND DE PLUSIEURS RÉSEAUX

De nombreux modèles importants de la propagation du Covid-19 intègrent des informations d'autres réseaux. Les systèmes scolaires, les itinéraires des trains, les emplois du temps du personnel hospitalier, etc. forment tous des réseaux, et chacun d'eux a une influence sur le cours de la pandémie. «Nous vivons dans ce système de réseaux interdépendants, et nous ne pouvons tout simplement pas réfléchir à l'un sans comprendre les conséquences que les autres ont dessus», commente Raissa D'Souza, théoricienne des réseaux complexes à l'université de Californie à Davis. Chaque réseau est un système complexe ayant son propre comportement émergent. De plus en plus, les spécialistes couplent ces réseaux pour créer des systèmes encore plus complexes. Mais il n'y a pas de cadre théorique clair pour étudier ces réseaux de réseaux. Comprendre comment leurs propriétés sont affectées par les propriétés des réseaux qui les constituent est l'un des défis de demain.

«Nous ne vivons ni dans une bulle ni dans un monde où tout se mélange. Nous vivons dans un monde avec des contacts, nous suivons des comptes Twitter, et c'est là par exemple que la percolation et d'autres modèles entrent en scène», dit Alessandro Vespignani. Parvenir maintenant à une meilleure compréhension de ces modèles mathématiques «peut faire la différence à l'avenir». Les réseaux de percolation sont facilement adaptables et offrent aux mathématiciens de nouveaux terrains de jeu et aux scientifiques des applications pratiques. Mais aussi divers soient-ils, ces modèles sont unis par une caractéristique étonnante: ils ont tous un point de bascule très abrupt, où l'ajout de quelques connexions a pour effet de relier d'un seul coup l'ensemble du réseau. À mesure que le monde devient plus connecté, la nécessité de comprendre ces transitions cruciales se fait plus urgente. ■

ON A MENÉ L'

, TOUS LES PAPIERS SE RECYCLENT.

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

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Pour une reforestation raisonnée

Restaurer des milieux forestiers dégradés ne se résume pas à planter des arbres. Et ne s'improvise pas… Pour lutter contre le déclin de la biodiversité et le réchauffement climatique, mieux vaut s'appuyer sur l'expérience acquise ces dernières décennies.

L'ESSENTIEL

> Chaque année, 10 millions d'hectares de forêt (notamment dans les milieux tropicaux) sont détruits sous la pression de l'agriculture, l'élevage ou l'exploitation du bois.

> Or les forêts sont un réservoir important de la biodiversité terrestre, ainsi que des puits de carbone considérables.

> Différentes stratégies de reforestation sont possibles, naturelles ou assistées. Une analyse méticuleuse de la situation locale est impérative pour mener à bien ces projets.

> L'expertise acquise lors de la reforestation pourrait servir dans l'industrie du bois afin de limiter l'impact négatif de ces plantations, ou dans les plans d'urbanisme pour créer des îlots de fraîcheur.

LES AUTEURS

ÉLISE BUISSON
maîtresse de conférences à l'IMBE (Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale) et Avignon Université (CNRS, IRD)

MARIE ANGE NGO BIENG
chercheuse au Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et au Catie (Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza) à Turrialba, Costa Rica

THIERRY GAUQUELIN
professeur émérite à l'IMBE et Aix-Marseille Université (CNRS, IRD)

© Getty Images/Jami Tarris

Dans cette pépinière, les semis sont préparés avant d'être installés en vue de la restauration d'une ancienne zone forestière.

Lors de sa création en 1910, le premier institut de foresterie des Philippines, situé à Manille, a lancé un vaste plan de reforestation des zones entourant son campus. Des dizaines d'espèces d'arbres, locales et exotiques, ont ainsi été plantées. Cependant, parmi ces dernières, l'acajou, *Swietenia macrophylla*, originaire d'Amérique centrale et du sud, a vite été à l'origine de problèmes environnementaux. Avec une production de graines annuelle, contrairement aux arbres indigènes, qui n'en donnent que tous les cinq ans ou plus, l'acajou a rapidement colonisé les espaces naturels. Or ses feuilles riches en tanins se décomposent mal et ne sont pas consommées par les animaux locaux.

Cet exemple de reforestation et d'autres se sont ainsi soldés par des échecs ou ont fait naître de nouveaux problèmes. Plus récemment, dans les Pyrénées, à partir des années 1960, lors d'un important programme de reboisement, d'anciennes forêts de hêtres (*Fagus sylvatica*) ont été remplacées par des épicéas (*Picea abies*). La substitution de feuillus par des résineux a modifié la composition de l'humus du sol, devenu plus acide et moins bon pour l'activité biologique. Afin d'en évaluer l'impact, l'un de nous (Thierry Gauquelin) et ses collègues ont étudié, en 2004,

À cause de la déforestation, plus de 10 millions d'hectares de forêts sont perdus chaque année dans le monde

un indicateur de cette altération : les populations de collemboles, un groupe d'arthropodes proches des insectes et essentiels dans le fonctionnement des écosystèmes forestiers (les collemboles participent à la dégradation de la litière et à l'enrichissement de l'humus). Les chercheurs ont mis en évidence une forte baisse de l'abondance et de la diversité de ces espèces.

Heureusement, tous les projets n'ont pas conduit à l'introduction d'espèces invasives ou à une diminution de la biodiversité locale. Certains ont eu des bilans très positifs. C'est le cas de la forêt atlantique de Rio de Janeiro, au Brésil. Au cours des XVI[e] et XVII[e] siècles, cet espace a été graduellement détruit par l'exploitation du bois et son remplacement par des fermes cultivant la canne à sucre et le café, ou par des pâturages pour le bétail. Dans la première moitié du XIX[e] siècle, comme la ville rencontrait de graves pénuries d'eau, l'empereur du Brésil Pedro II a demandé au major Manuel Gomes Archer de mener à bien un projet de restauration de la forêt, afin qu'elle puisse faciliter la formation de sources par pénétration de l'eau de pluie dans les sols. Ainsi, entre 1862 et 1874, 72000 plantules ont été installées sur une zone à présent intégrée au parc national de Tijuca. Ce projet, maintenant vieux de cent soixante ans, était pionnier car il a utilisé un grand nombre d'espèces différentes, principalement natives, et plantées de façon hétérogène.

DES EXPÉRIENCES POSITIVES ET NÉGATIVES

Grâce à ces divers exemples positifs et négatifs de reforestation, les stratégies de restauration de ces milieux forestiers se sont affinées ces dernières décennies. Les spécialistes ont notamment pris en compte le fait qu'il n'existe pas de solution unique applicable à toutes les situations. Dans chaque cas, pour garantir le succès d'un projet, il est impératif de procéder à une analyse en amont des conditions locales, des facteurs qui ont conduit à la destruction de la forêt primaire, etc. Une forêt primaire est une forêt qui n'a été ni exploitée ni défrichée par l'homme, ou qui l'a été par le passé et a eu le temps de retrouver un statut primaire.

Mais avant d'en venir aux méthodes de reforestation, il est important de rappeler pourquoi ces programmes de restauration sont essentiels. Comme dans le cas de Rio de Janeiro, une motivation possible est le rétablissement des services écosystémiques que fournit la forêt : l'approvisionnement en eau potable, mais aussi l'exploitation de bois et de produits forestiers non

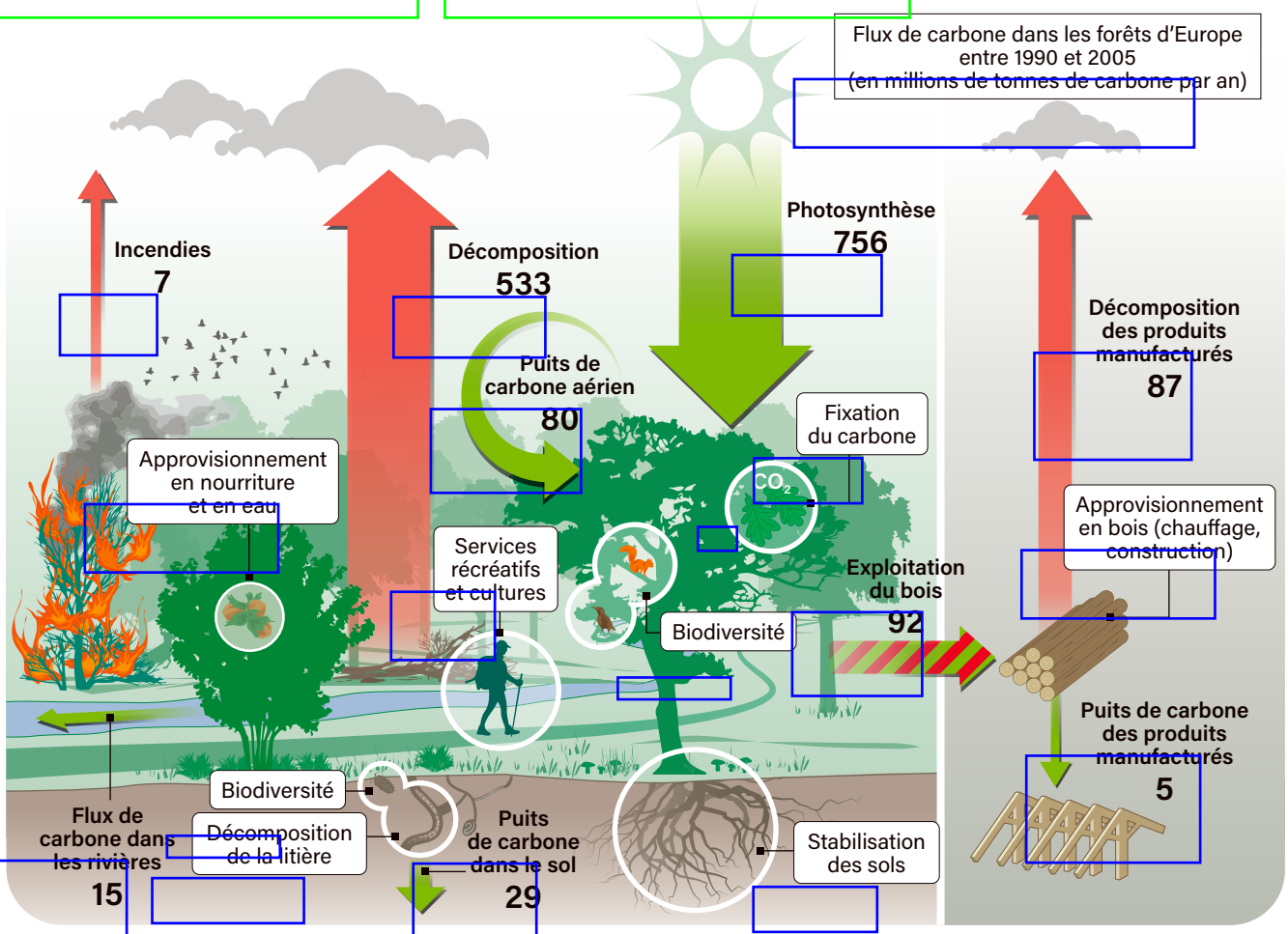
RISQUES D'INCENDIE DANS LES LANDES

Entre 1937 et 1947, lors de canicules et sécheresses exceptionnelles, près d'un tiers de la forêt landaise (300 000 hectares) a été détruite lors d'incendies. De nombreux facteurs ont exacerbé les risques : cette forêt est en fait une plantation monospécifique d'une espèce hautement inflammable, le pin maritime (*Pinus pinaster*). Cette espèce est autochtone (elle était là il y a huit mille ans) et parfaitement adaptée aux sols sableux de la région. Cependant, c'est son usage exclusif et automatique qui est problématique. Sa monoculture quasi industrielle a produit un système uniforme, composé d'arbres de même taille et organisés selon des alignements entre lesquels le vent s'engouffre sans entrave. Dans un projet de reforestation, il faut prendre en compte le risque d'incendie (parmi d'autres) surtout dans une région sèche. Il sera alors impératif d'introduire différentes espèces d'arbres et de prévoir une structure plus irrégulière pour ralentir le vent.

ligneux, de sources d'alimentation, d'un habitat pour de nombreuses populations, la formation et la stabilisation des sols, etc.

La reforestation (ou reboisement) est également une réponse à deux grands défis actuels auxquels l'humanité est confrontée : la préservation de la biodiversité et la lutte contre le réchauffement climatique. En effet, cette démarche consiste à repeupler de façon naturelle ou artificielle des aires anciennement forestières. À travers le monde, les pertes de surfaces forestières dues au déboisement induit par des perturbations humaines s'élèvent à plus de 10 millions d'hectares de forêt chaque année (à titre de comparaison, la France métropolitaine compte 17 millions d'hectares de forêts). La déforestation provoque une fragmentation et une destruction des habitats. Elle fait figure de principale menace pesant sur la biodiversité mondiale, à laquelle s'ajoutent le braconnage, la pollution, la surexploitation, les espèces invasives ou encore le changement climatique.

La déforestation est surtout forte sous les tropiques (en Afrique, en Amérique du Sud, et en Asie du Sud et du Sud-Est). Dans ces zones, les principales causes de déboisement sont l'agriculture et l'élevage, les plantations industrielles comme celles du palmier à huile et du soja, l'exploitation minière, l'installation d'infrastructures et, enfin, l'exploitation non durable de produits forestiers ligneux. Dans cette liste, il faut souligner la part non négligeable de la «déforestation importée», c'est-à-dire une déforestation liée à la consommation par les pays occidentaux de produits forestiers ou alimentaires en provenance des pays tropicaux (viande, huile de palme, hévéa, soja, divers fruits tropicaux, etc.). Cette déforestation importée est d'autant plus paradoxale que, depuis près de deux cents ans, dans une majorité de pays européens, la forêt gagne naturellement du terrain sans recours à des plantations artificielles. En France métropolitaine, la superficie forestière (qui avoisine les 30% du territoire) est ainsi en constante augmentation du fait de



FLUX DE CARBONE ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DES FORÊTS

Grâce à la photosynthèse et à l'absorption du dioxyde de carbone, les forêts jouent un rôle essentiel dans le cycle du carbone. Les chiffres indiqués ici correspondent aux flux du carbone (en millions de tonnes par an) en Europe sur la période 1990-2005. Les forêts fournissent aussi de nombreux services écosystémiques : source en aliments et en eau, stabilisation des sols, etc.

© Bruno Bourgeois

LES FORÊTS FRANÇAISES EN CHIFFRES

16,9 millions d'hectares
occupés par les forêts

31 %
du territoire

+ 80 000 à 100 000 hectares
par an principalement
à cause de la déprise agricole

180 espèces d'arbres
(l'essence la plus répandue
étant le chêne)

50 % de la superficie
correspond
à des peuplements
monospécifiques

1,3 milliard de tonnes
de carbone stockées
dans la biomasse

1 milliard de tonnes
de carbone stockées
dans le sol

Source : IGN,
L'inventaire forestier, édition 2020, https://inventaire-forestier.ign.fr/

la déprise agricole et pastorale qui a libéré de nombreux territoires pour la forêt. On estime que près de 80000 à 100000 hectares s'ajoutent chaque année au domaine forestier du pays.

LA BIODIVERSITÉ MENACÉE

Dans les zones tropicales, l'impact du déboisement sur la biodiversité est considérable. En effet, les forêts de cette partie du globe abritent plus de 50 % des espèces vivant dans les environnements terrestres. Elles représentent près de la moitié des écosystèmes forestiers du monde et 7% de la biomasse terrestre mondiale.

Les forêts tempérées jouent elles aussi un rôle important dans la conservation de la biodiversité, notamment au niveau des sols. Si la diversité du compartiment aérien est moins riche et spectaculaire que celle des forêts tropicales, les sols des forêts tempérées hébergent une foule de microorganismes, de vers de terre et d'autres invertébrés constituant la mésofaune du sol. La riche biodiversité du sol est sans doute moins emblématique que les mammifères ou les oiseaux, mais son rôle est tout aussi important, notamment pour le recyclage de la matière organique. Détruire ces forêts, c'est faire disparaître les niches écologiques abritant des organismes liés à ces milieux. La mésofaune meurt ainsi en même temps que les arbres et le couvert qu'ils procurent.

Récemment, l'épidémie de Covid-19 a souligné un autre danger de la déforestation. La perte d'habitats de nombreuses espèces forestières aurait des conséquences sur la prolifération de maladies (émergentes ou existantes), car elle conduirait à plus de contacts entre les espèces forestières et les humains.

Les forêts participent aussi à la régulation du microclimat local et à la réduction de l'impact des changements climatiques. Grâce à la photosynthèse, les arbres fixent des quantités considérables de dioxyde de carbone atmosphérique (CO_2) dans leur biomasse. Ils constituent ainsi ce que l'on nomme un puits de carbone. En s'appuyant sur de nombreuses études, les rapports du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) montrent que les forêts stockent globalement plus de carbone qu'elles n'en rejettent à l'échelle mondiale. À l'inverse, la déforestation, avec la coupe de bois ou les incendies volontaires, libère chaque année entre 4 et 8 milliards de tonnes de CO_2 (l'utilisation des énergies fossiles représente une émission d'environ 50 milliards de tonnes de CO_2 par an). Or ce composé volatil est un puissant gaz à effet de serre dont l'accumulation dans l'atmosphère, du fait de l'activité humaine, est l'une des principales causes du réchauffement climatique actuel.

Face à ce bilan sur la biodiversité et sur le changement climatique, la reforestation semble donc incontournable. Mais les erreurs du passé montrent qu'un reboisement mal pensé peut être catastrophique. Pour mener un tel projet, la première étape consiste à identifier les moteurs qui ont conduit à la dégradation de la forêt et à en estimer l'ampleur. Il faut d'abord agir sur ces causes pour espérer obtenir un résultat positif et durable. Ainsi, un projet de reforestation s'inscrit souvent dans un contexte socioéconomique qui implique les populations locales et différents acteurs (associations, gouvernements, industriels). Il doit composer avec un paysage qui peut être majoritairement forestier, ou tout aussi bien une mosaïque d'écosystèmes naturels ou déjà transformés par l'homme, ce dernier utilisant peut-être les espaces déboisés pour des activités de pâturage, par exemple.

L'analyse de la zone à restaurer permet alors de déterminer quelle stratégie mettre en place. Un facteur important est la résilience : dans quelle mesure la forêt en cours de restauration peut-elle se développer et se maintenir ? Si la résilience est potentiellement élevée, on opte pour une régénération naturelle. On laisse alors faire la nature avec un simple suivi de la zone pour s'assurer du bon déroulement du projet. Le reboisement est spontané avec la formation d'un couvert forestier, sans plantation ni semis. On parle de « dynamique forestière secondaire passive » car elle se fait sans intervention humaine.

UNE STRATÉGIE PEU COÛTEUSE

Au Costa Rica, pays tropical reconnu pour ses valeurs environnementales et notamment sa dynamique forestière positive depuis les années 2000, un tiers de la surface forestière est constituée de forêts secondaires dont la majorité est issue d'une régénération naturelle.

BIEN CHOISIR LES ARBRES

Dans un projet de reforestation, une question délicate est le choix des espèces d'arbres à planter. Il est important de privilégier les espèces locales, mais il faut aussi réfléchir en termes d'étapes dans le projet : faut-il d'abord des espèces résistantes à l'ensoleillement afin de créer un sous-bois ? Des espèces qui vont permettre de restaurer le sol ? Des espèces qui vont attirer des animaux pour disperser les graines ? Etc.

Le type d'écosystème à restaurer est aussi décisif pour choisir les arbres à planter. Par exemple, dans certaines régions du monde, les savanes et les forêts se retrouvent en mosaïque dans le paysage. Or les espèces d'arbres dans les forêts sont différentes de celles des savanes, même quand elles sont parfois du même genre ! Les espèces dans les savanes sont adaptées au feu, fréquent dans ce milieu, avec des écorces épaisses et de petites feuilles alors que les espèces des forêts sont plutôt tolérantes à l'ombre et ont donc de plus grosses feuilles et des écorces plus fines. En 2003, William Hoffmann et ses collègues, de l'université de Brasilia, ont ainsi comparé des espèces d'arbres appartenant au même genre (par exemple, deux espèces de légumineuses, *Hymenaea stigonocarpa*, trouvée en savane, et *Hymenaea courbaril*, trouvée en forêt). En moyenne, l'écorce représente 28,5 % du rayon de la tige des espèces de savane mais seulement 10,1 % du rayon de la tige des espèces forestières.

Cette dernière a de nombreux avantages : elle permet une dynamique forestière plus respectueuse des caractéristiques écologiques de la zone perturbée et elle est aussi la solution de reforestation la moins coûteuse.

Lors de la formation naturelle du couvert forestier secondaire, celui-ci suit un cycle spécifique avec une évolution de la composition en espèces et de la structure forestière, c'est-à-dire la façon dont sont agencées les différentes populations d'arbres. Ce cycle commence par l'installation d'espèces dites « pionnières » ou héliophiles. Ces espèces pionnières poussent en pleine lumière, elles ont une croissance rapide, produisent un grand nombre de graines et ont une courte durée de vie. Elles créent un sous-bois présentant des conditions favorables à l'installation dans un second temps d'espèces dites « d'ombre » ou « sciaphiles », à croissance plus lente et à plus grande longévité.

Le résultat est une forêt secondaire dont les caractéristiques peuvent ressembler à celles d'une forêt primaire. À partir de plusieurs études en 2016 et 2019, les membres du réseau international 2ndFor – 88 chercheurs de 18 pays spécialisés dans l'étude de la dynamique des forêts secondaires néotropicales – ont évalué la dynamique de récupération de ces forêts secondaires. Ces dernières gagnent vite en biomasse aérienne. En une moyenne de 66 ans, elles atteignent 90% de la biomasse aérienne des forêts primaires. La récupération de la biodiversité dépend des indices considérés. En termes de nombre d'espèces d'arbres, les forêts secondaires retrouvent 80% de la richesse spécifique d'une forêt primaire en environ 20 ans. La récupération de la composition d'origine est cependant plus difficile et aléatoire, et pourrait s'étendre sur plusieurs siècles !

La régénération naturelle n'est possible que sur des surfaces déforestées présentant des conditions environnementales favorables et compatibles avec une nouvelle évolution forestière secondaire : une bonne fertilité du sol, la disponibilité de graines dans le sol ou de leur agent de dispersion, la présence d'arbres semenciers dans des forêts voisines et, enfin, des conditions climatiques propices à la germination et à la croissance des espèces forestières. Par ailleurs, la taille de la surface déforestée influe sur les capacités de reboisement naturel et il en est de même pour le temps écoulé depuis la destruction du couvert primaire. La zone doit aussi être exempte de perturbations anthropiques (pâturages, incendies) ou climatiques (sécheresse, ouragans, etc.).

Exemple de reforestation secondaire naturelle, sans intervention humaine, sur des pâturages abandonnés au Costa Rica. Les espèces locales ont réinvesti l'espace.

© Marie Ange Ngo Bieng/Cirad/Catie

Les forêts tropicales abritent plus de 50% des espèces vivant dans les environnements terrestres

UN « COUP DE POUCE »

Dans certains paysages fortement anthropisés (avec une forte activité de surpâturage, d'extraction continue de bois, de feux de brousse), ou sur des sols fortement dégradés et sous certains climats défavorables à la régénération naturelle, il est parfois nécessaire d'assister la reforestation naturelle en accélérant la colonisation spontanée des arbres, on parle de dynamique secondaire active ou de restauration écologique. Par exemple, si l'installation initiale d'arbres est entravée par la présence de sols trop pauvres et peu profonds, elle peut être encouragée avec une première étape correspondant à une plantation d'enrichissement d'espèces natives locales tolérantes et à croissance rapide qui vont progressivement reconstituer un sol plus riche. D'autres actions, telle la protection des semis ou celle des arbres restants de la forêt précédente pour qu'ils constituent des semenciers, sont aussi des moyens d'aider la reforestation. Ce « coup de pouce » initial permet à la forêt de se redévelopper plus rapidement et se réinstaller par la suite dans sa dynamique naturelle.

Depuis 2017, au Costa Rica, le Cirad (Centre de recherche agronomique et de coopération

LA FAUSSE PISTE DE LA PLANTATION MASSIVE D'ARBRES

Ces dernières années, de nombreux programmes internationaux — la Convention sur la diversité biologique des Nations unies, le Défi de Bonn, le programme des Nations unies pour l'Environnement, qui a déclaré 2021-2030 comme la « décennie des Nations unies pour la restauration des écosystèmes » — ont mis l'accent sur la restauration écologique pour atténuer l'impact de la dégradation des écosystèmes dans le monde.

Alors que ces politiques sont ambitieuses et nécessaires, elles sont fortement axées sur la plantation d'arbres. En effet, comme les arbres sont des puits de carbone, planter massivement des arbres est apparu comme une des solutions envisageables pour lutter contre le changement climatique. En 2019, pour nuancer cette approche, un groupe de 46 scientifiques du monde entier (dont l'une d'entre nous, Élise Buisson) a cependant montré que la plantation massive d'arbres n'est pas la panacée. Les plantations monospécifiques ou pauvres en espèces sont en effet très sensibles aux insectes herbivores et aux maladies. Ces sites sont aussi moins résistants au changement climatique, à la sécheresse et aux incendies. Ces stocks de carbone sont donc vulnérables. De plus, les forêts de conifères des régions boréales et de hautes montagnes absorbent plus de lumière solaire et émettent plus de chaleur que les zones sans arbres couvertes de neige et au pouvoir réfléchissant plus élevé. Ces forêts exacerbent ainsi le réchauffement planétaire au lieu de l'atténuer. Enfin, les arbres consomment beaucoup d'eau et cela peut mener à une réduction de la recharge des nappes phréatiques.

Par ailleurs, de nombreux écosystèmes, avec peu ou pas d'arbres, tels que les savanes ou les tourbières, stockent déjà beaucoup de carbone dans leur sol. Planter des arbres dans ce type d'écosystèmes détruit les habitats d'un grand nombre d'espèces végétales et animales. De telles actions sont très dommageables pour la biodiversité et les services écosystémiques liés à ces milieux ouverts comme la production de biomasse pour le pâturage ou la recharge en eau des nappes phréatiques.

La restauration écologique doit faire partie des solutions pour lutter contre les changements climatiques, mais ne doit pas simplement se résumer à planter des arbres. Elle doit contribuer en restaurant des paysages constitués de mosaïques d'écosystèmes pouvant inclure des forêts, mais aussi des prairies, des savanes, des écosystèmes arbustifs et des zones humides.

internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes, avec la participation de l'une d'entre nous, Marie Ange Ngo Bieng) et le Catie (Centre d'Amérique centrale pour l'agriculture tropicale et les hautes études) analysent les modalités d'anciens projets de restauration et évaluent leur succès (en termes de récupération de biomasse et de biodiversité). C'est le cas du corridor forestier reliant le parc national Rincón de la Vieja et celui du volcan Cacao, restauré en 1986. Ce programme a débuté par la plantation de *Gliricidia sepium*, un arbre local de taille moyenne, dans des pâturages abandonnés. En enrichissant le sol, cette première plantation a favorisé l'installation ultérieure d'arbres à plus grande durée de vie.

En fonction de l'intervention dans la dynamique de l'écosystème, les opérations sylvicoles se révèlent parfois coûteuses. Il faut prendre en compte la main-d'œuvre (qui participe à l'introduction des semis, leur protection et leur suivi, ainsi qu'au nettoyage de lianes et d'espèces indésirables), l'achat de matériel forestier, de semis ou de graines, etc. Ce coût doit être examiné en regard du risque d'échec, jamais nul et, même s'il dépend du degré de perturbation initial, souvent difficile à évaluer. La réussite d'un projet repose en partie sur la chance et la survenue de facteurs non contrôlables – anthropiques et climatiques. Un projet bien préparé peut échouer car une sécheresse exceptionnelle peut provoquer une forte mortalité des semis.

Dans le cas d'une restauration assistée avec semis, la question qui se pose est celle du choix des espèces à planter. Elles doivent être adaptées aux conditions environnementales locales, mais de nombreux autres critères entrent en ligne de compte (*voir l'encadré page 42*). Une partie du choix se calque sur la dynamique de la régénération naturelle avec des espèces pionnières qui supportent mieux les milieux ensoleillés et qui sont couvrantes pour créer rapidement un sous-bois. Des espèces clés, c'est-à-dire jouant un rôle important dans l'écosystème, peuvent aussi être réintroduites, comme celles qui attirent les espèces animales frugivores. Ces animaux (oiseaux, chauve-souris, etc.) contribuent à disperser les graines et participent ainsi à la restauration. Un point essentiel dans l'élaboration d'un projet de reboisement est de considérer l'écosystème dans son ensemble (relations plantes-sol, plantes-animaux, etc.) et pas uniquement les plantes.

ADAPTER LA PLANTATION

L'hétérogénéité du site doit aussi être prise en compte pour planifier les plantations. Un site peut avoir des zones plus sèches ou plus pentues. Par exemple, en montagne, du fait de leur orientation, certains versants offrent des conditions plus froides et humides, tandis que d'autres, plus exposés, seront plus chauds et secs; les espèces d'arbres à planter sur ces différents versants sont ainsi différentes. Il faut donc adapter le plan de plantation et surtout ne pas planter partout la même espèce de façon ordonnée.

Dans certains projets, ce sont des îlots de plantation qui sont créés avec l'espoir que ces îlots s'étendent et constituent ainsi de véritables noyaux de colonisation. En 2012, à partir de tests expérimentaux, les chercheurs américains Jeffrey Corbin, de l'Union College, près de New York, et Karen Holl, de l'université de Californie à Santa Cruz, ont confirmé les bénéfices de cette stratégie. La densité et la diversité des espèces d'arbres colonisant les parcelles avec îlots sont supérieures à celles des parcelles sans plantations et reboisées naturellement. Les parcelles

avec îlots ont aussi une canopée plus hétérogène et une composition plus variée (deux éléments importants pour augmenter la biodiversité). Enfin, en réduisant la surface initialement plantée, cette stratégie réduit les coûts.

Régénération naturelle ou assistée, l'objectif reste le même, la restauration d'écosystèmes naturels de forêts. Mais on confond souvent la reforestation avec les activités de compensation carbone et les plantations alimentant l'industrie du bois. Ces dernières sont la plupart du temps constituées d'une seule espèce, au mieux de quelques-unes, à croissance rapide, plantées en alignements et dont les caractéristiques sont choisies en vue de leur utilisation (construction, pâte à papier, latex ou autres). Les arbres ont tous le même âge et la biodiversité y est faible (*voir les encadrés page 40 et ci-dessous*). Avec un petit nombre d'espèces (souvent exotiques), il est impossible de créer un système forestier fonctionnel et pérenne. Ces plantations ont peu voire aucun bénéfice pour la biodiversité.

Autre différence marquée entre forêts et plantations: les forêts naturelles et restaurées stockent le CO_2 atmosphérique dans les diverses parties des arbres (tronc, branches, racines et feuilles). Plus tard, une part plus ou moins importante de ce carbone se retrouve dans le sol à la suite de la décomposition de la litière. Le carbone y est alors beaucoup plus stable et susceptible de se conserver pendant plusieurs centaines d'années. Dans le cas des plantations pour la production, le stockage de carbone est efficace et rapide, jusqu'à 5 tonnes de carbone par hectare et par an, car on favorise des espèces à croissance rapide et commercialement rentables (eucalyptus, hévéa, teck, acacia), mais ce stockage est éphémère. Les arbres sont coupés, transformés en grande partie en pâte à papier, qui est ensuite rapidement brûlée. Tout ce carbone est à nouveau libéré dans l'atmosphère et le bénéfice de son stockage n'est alors que temporaire! Le carbone n'est en effet stocké durablement que si le bois est utilisé pour la construction d'habitations et de meubles.

L'activité industrielle tend aussi à convertir des terres historiquement non forestières en forêts ou plantations d'arbres. On parle alors de boisement ou d'afforestation. Ce choix contribue souvent à détruire ou prendre la place d'écosystèmes à forte valeur biologique. Cette stratégie d'afforestation est aussi proposée pour lutter contre le réchauffement climatique et piéger le CO_2 (*voir l'encadré page ci-contre*). Établir un nouvel écosystème où il n'était pas présent précédemment pose alors de nombreux problèmes. Puisqu'il n'y avait pas de forêt auparavant, il est difficile de choisir des arbres adaptés à cet environnement. Cela augmente donc potentiellement les risques d'échec.

En 2008, Shixiong Cao, de l'université Minzu de Chine, à Pékin, a montré que les programmes d'afforestation de pelouses naturelles et de steppes en milieux semi-arides ou arides au nord de la Chine pour lutter contre la désertification se sont soldés par des échecs. Principalement à cause du manque d'eau, seuls 15% des arbres plantés ont survécu. De plus, quand les arbres se sont maintenus, ils ont diminué l'humidité des sols, ce qui a entraîné une baisse du recouvrement végétal. Le sol nu a alors été soumis à une forte érosion par le vent.

Il est cependant indéniable que les besoins en bois de l'humanité sont en constante augmentation. Plutôt que d'exploiter des forêts naturelles en bon état, il paraît alors plus judicieux d'exploiter des plantations créées pour être productives. Cependant, tout comme nous devons changer de paradigme concernant l'agriculture intensive, nous devons aussi nous attacher à rendre les plantations d'arbres plus durables et plus résilientes au changement climatique.

Pour atteindre un tel objectif, les leçons de la reforestation sont utiles. Il faut commencer

EN IRLANDE, UN DÉCOR DE CARTON-PÂTE

Il est prévu en Irlande de planter 440 millions d'arbres d'ici à 2040 dans le cadre d'un plan national de lutte contre le changement climatique. Cependant, ces plantations sont composées à 70 % de conifères, notamment l'épicéa de Sitka (*Picea sitchensis*), un conifère introduit du Canada dont la croissance est rapide et parfaitement adaptée au climat océanique. Si, dans son environnement naturel, il bat des records de hauteur et de volume de bois, il risque de transformer les paysages irlandais en décor canadien de carton-pâte. Dans des situations de reboisement, les arbres donnent du bois de bien moins bonne qualité, tout juste bon pour la pâte à papier ou la caisserie, ce qui n'est pas le meilleur moyen pour fixer du carbone durablement. Dans le comté de Leitrim, dans le nord-ouest du pays, le mouvement de protestation contre la plantation de ces conifères non natifs Save Leitrim s'organise. Il souligne que les épicéas étouffent la lumière, la faune et leur mode de vie. Si des arbres doivent être plantés partout dans leur comté, ce devrait être des espèces indigènes – dont en grande majorité des feuillus, plutôt que des conifères. L'épicéa de Sitka est une culture commerciale. Au bout de trente à quarante ans, les arbres sont coupés, récoltés puis replantés sans réelle réflexion sur cette pratique et son impact sur le sol, la biodiversité et la séquestration durable du carbone.

© Shutterstock.com/mark_gusev

LA PISTE DE L'AGROFORESTERIE

L'agroforesterie consiste en l'association d'arbres, de cultures et d'élevage sur une même parcelle agricole, en bordure ou en plein champ. Elle inclut ainsi des pratiques agrosylvicoles (cultures et arbres), sylvopastorales (arbres et animaux), ou alors des systèmes avec les trois composantes (agro-sylvo-pastorales). En 2017, Michael den Herder, de l'Institut européen des forêts, et ses collègues ont estimé que l'agroforesterie représentait 15,4 millions d'hectares en Europe, soit près de 9 % des terres agricoles.

L'agroforesterie n'est pas de la restauration écologique à proprement parler puisqu'il ne s'agit pas de reconstituer un écosystème local de référence. Cependant, cette approche est un outil efficace de maintien de couverts forestiers dans le contexte actuel de pression intense sur les forêts. Elle offre une solution intéressante pour remplacer certaines pratiques agricoles (industrielles ou familiales) qui sont un facteur important de dégradation des forêts et de déforestation. Par exemple, en Afrique et au Mexique, l'agriculture sur brûlis consiste à brûler une parcelle forestière et la cultiver. Mais cette parcelle est souvent abandonnée après quelques années car sa productivité baisse. Quand cette approche est trop répétée, elle épuise rapidement les sols et empêche la régénération forestière sur le long terme.

L'agroforesterie apparaît alors comme une solution d'usage des terres permettant de concilier sur les mêmes surfaces une production agricole substantielle et un couvert forestier. Face aux défis globaux, cette approche fournit des ressources alimentaires tout en produisant des services écosystémiques, tels que le stockage de carbone, la protection des sols contre l'érosion, l'amélioration de la qualité des sols, la protection de la biodiversité, la régulation des maladies et des ravageurs, etc.

Au Cameroun, par exemple, le Cirad et l'Irad (Institut de recherche agricole pour le développement du Cameroun) ont montré que des systèmes incluant des cacaoyers offraient un compromis intéressant entre rendement en termes de production de cacao et divers services environnementaux. Les chercheurs du Cirad ont montré que la régulation des maladies et des ravageurs est directement liée à la présence des arbres dans ces systèmes de culture. Sur la parcelle agroforestière, la densité, l'organisation et la diversité des espèces d'arbres permettent de réduire la propagation de bioagresseurs du cacaoyer. La composante arborée est d'ailleurs essentielle à la mise en place de cet agrosystème. Le cacaoyer est en effet un arbuste issu du sous-bois des forêts tropicales, sa croissance et sa durabilité sont donc associées à la présence d'un ombrage fourni par la strate arborée.

Cependant, ces dernières années, la recherche agronomique a développé des variétés de cacaoyers plus productives et plus demandeuses en lumière. Leur utilisation entraîne la mise en place de nouveaux systèmes agroforestiers simplifiés. On rencontre donc différents types de systèmes agroforestiers tropicaux à base de cacaoyers : de véritables « agroforêts » tropicales à la structure complexe, avec une diversité d'arbres riche, un nombre de services écosystémiques élevé mais une production en cacao moyenne ;

Vue aérienne d'une exploitation d'agroforesterie. On y distingue différents types de plantes de faible hauteur entourés d'arbres qui fournissent de l'ombre.

L'agroforesterie répond au défi de la sécurité alimentaire, tout en produisant des services écosystémiques

et des systèmes agroforestiers simplifiés, comparables aux systèmes agroforestiers des régions tempérées, constitués seulement d'un ou deux types d'arbres d'ombrage disposés de façon régulière avec une faible densité. Ces parcelles offrent moins de services écosystémiques, mais ont une production en cacao plus élevée.

Dans le bassin méditerranéen, les dehesas espagnoles, les montados portugais, les arganeraies marocaines ont aussi des exemples de cet agro-sylvo-pastoralisme dont s'inspire aujourd'hui l'agroforesterie moderne. C'est une occupation raisonnée et optimale de l'espace au bénéfice de l'arbre, de l'animal et des cultures. La coexistence d'un arbre (chêne vert ou liège, arganier, olivier), d'un animal (porc ibérique, taureau ou chèvre) et d'une culture (céréales, légumineuses) constitue un écosystème fonctionnel et diversifié. Les arbres y sont assez espacés pour limiter la concurrence en eau et nutriments. Les cultures profitent de l'ombre de l'arbre et du sol particulier, qui s'élabore peu à peu sous son couvert du fait de l'apport chaque année d'une litière, qui, en se décomposant, libère de la matière organique et des éléments nutritifs.

Contrairement aux agrosystèmes « classiques », arbres et élevage ne sont donc pas antinomiques. Si dans le premier cas, on sépare les champs et les pâtures des haies et de la forêt paysanne, l'agroforesterie les associe et les intègre dans un même ensemble cohérent et fonctionnel. L'agrosystème « classique » est par définition un écosystème simplifié, mais, transformé en espace agroforestier, il acquiert un certain niveau de complexité. Dans ces systèmes d'agroforesterie parfois pratiqués depuis plus de quatre mille ans, on observe une biodiversité en partie façonnée par les interactions que les humains ont entretenues. On a donc une sorte de « coévolution » des différents acteurs de l'agroforesterie.

© Shutterstock.com/Alexandre Laprise

par limiter les plantations monospécifiques au bénéfice de plantations variées, combinant des essences aux traits de vie différents. Par exemple, dans les régions tempérées, il est possible de planter ensemble des arbres à feuillage caduc ou persistant, des résineux et des feuillus ou encore des espèces dont le système racinaire exploite des profondeurs différentes du sol. Il faut aussi étaler la réalisation de la plantation sur plusieurs années de façon à limiter au maximum le caractère régulier de celle-ci pour favoriser une structure plus complexe de cette plantation. Il est important de restreindre l'usage systématique d'espèces exotiques au profit d'espèces locales. Il peut être néanmoins intéressant d'étendre la sélection à des espèces venant d'une région un peu plus étendue. Ces espèces, en restant géographiquement proches, sont susceptibles d'être mieux adaptées au changement climatique sans pour autant être invasives et préjudiciables à l'équilibre des écosystèmes locaux.

UNE INDUSTRIE DU BOIS DURABLE

Toujours en vue d'une exploitation industrielle, il est important de ne pas négliger le sol et de veiller au mieux à sa préservation. Par exemple, le passage de gros engins en perturbe durablement la structure et la biodiversité, avec pour conséquence sa fragilisation et sa disparition. L'utilisation d'intrants (engrais, désherbants) doit aussi être bannie dans la mesure où on veut tendre vers la mise en place d'un fonctionnement biogéochimique autonome de l'écosystème.

La réflexion est aussi à mener à l'autre bout de la chaîne industrielle. Il faut mettre une priorité sur l'utilisation du bois issu des plantations pour fabriquer des objets à longue durée de vie. Le stockage de carbone est alors plus efficace en termes de durée : la construction ou encore l'immobilier en bois permettent un usage plus résilient que la pâte à papier ou la production d'objets à courte durée de vie tels les couverts en carton. Des plantations destinées à la production de produits à durée de vie plus importante permettront alors de planifier des cycles de récolte plus durables.

Les exemples du passé le confirment, la plantation d'arbres massive et irréfléchie est désastreuse pour la biodiversité et le climat. À l'inverse, la reforestation planifiée de zones déboisées a clairement montré ses bénéfices. L'expertise acquise par les chercheurs dans ce domaine peut servir l'industrie. Elle permet l'identification d'espèces natives adaptées aux besoins des plantations industrielles, à la production industrielle de leur semis, à l'évaluation de leur productivité en plantations plurispécifiques et à leur compétitivité commerciale par rapport aux espèces exotiques. Au Costa Rica, le Cirad et le Catie étudient des stratégies en vue d'une exploitation industrielle du bois (ou bois d'œuvre). Ces organismes évaluent actuellement la proportion d'espèces à bois d'œuvre (*Cordia alliodora, Trichospermum mexicanum, Xylopia frutescens, Heliocarpus appendiculatus* et *Schizolobium parahyba*, etc.) dans des forêts secondaires au Costa Rica et au Nicaragua. Augmenter la production de bois d'œuvre dans ces forêts secondaires est une façon d'augmenter leur persistance dans le temps (et donc la réussite du projet de reforestation) et en même temps de réduire la pression sur les forêts primaires.

D'autres activités, qui ne sont pas à proprement parler de la reforestation car elles n'ont pas pour objectif de restaurer des forêts, bénéficient aussi de cette expertise. Par exemple, l'agroforesterie (*voir l'encadré page ci-contre*) associe notamment des cultures diverses et des arbres. Des équipes du Cirad travaillent par exemple sur des plantations mixtes qui associent des espèces commerciales et des légumineuses au Brésil et au Congo. Grâce à leur fixation d'azote atmosphérique, les légumineuses permettent une fertilisation naturelle du sol et la réduction des apports d'engrais azotés.

Enfin, l'expertise de la reforestation s'invite depuis quelques années dans un milieu inattendu : les villes. Face au réchauffement climatique et aux projections de hausse marquée de température en milieu urbain, les spécialistes de la reforestation apportent encore une fois des éléments de réflexion. En 2020, par exemple, Anju Lis Kurian, de l'université Mahatma-Gandhi, au Kerala, en Inde, a montré que la plantation d'arbres en ville crée des îlots de fraîcheur capables d'améliorer le microclimat local. Climat, urbanisme, industrie et biodiversité, la reforestation, quand elle est menée de façon raisonnée, a fait ses preuves et il est donc urgent de l'utiliser comme levier dans tous ces domaines. ■

La plantation d'arbres en ville crée des îlots de fraîcheur capables d'améliorer le microclimat local

BIBLIOGRAPHIE

Climate change mitigation and adaptation in agriculture: Why agroforestry should be part of the solution, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 24 août 2021.

T. Gauquelin, **Des arbres et des forêts,** L'Harmattan, 2021.

P. Sist (dir.), **Vivre avec les forêts tropicales,** Museo-Cirad, 2021.

M. A. Ngo Bieng *et al.* (dir.), **Active restoration of timber production and other ecosystem services in secondary and degraded forests,** *Forest Ecology and Management*, vol. 493, 2021.

J. W. Veldman *et al.*, **Comment on « The global tree restoration potential »,** *Science*, vol. 366, n° 6463, 18 octobre 2019.

L'ESSENTIEL

> Les turbulences atmosphériques limitent le pouvoir de résolution des télescopes au sol.

> Pour corriger ces effets, les observatoires sont équipés de systèmes d'optique adaptative. Ceux-ci compensent en temps réel ces turbulences en déformant la surface d'un miroir dans le télescope.

> L'optique adaptative pourrait maintenant servir à suivre les débris en orbite autour de la Terre, voire à les dévier pour éviter certaines collisions catastrophiques.

> La cryptographie quantique pourrait aussi en bénéficier, grâce à une focalisation plus précise des lasers vers les satellites de télécommunication.

LES AUTEURS

TONY TRAVOUILLON
maître de conférences en astronomie et instrumentation spatiale à l'Université nationale australienne, à Canberra

CÉLINE D'ORGEVILLE
professeure en instrumentation pour l'astronomie et le domaine spatial à l'Université nationale australienne

FRANCIS BENNET
maître de conférences en instrumentation optique à l'Université nationale australienne

L'optique adaptative, au-delà des étoiles

En équipant leurs télescopes d'un système qui corrige les perturbations dues aux turbulences atmosphériques, les astronomes sont capables de scruter le ciel avec une netteté exceptionnelle. Cette technique pourrait aussi servir à la lutte contre les déchets spatiaux et à la cryptographie quantique.

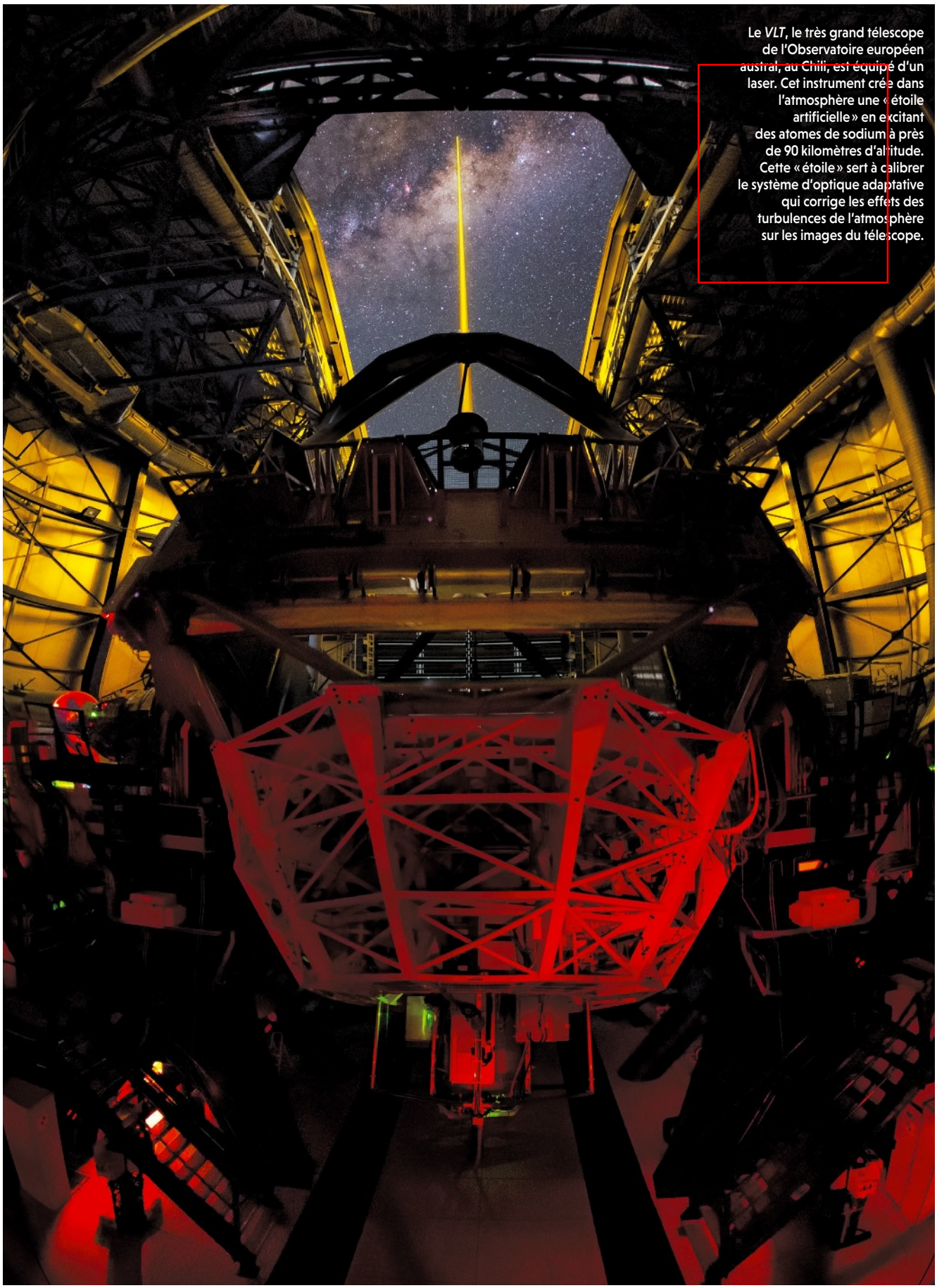
Tout le monde apprécie un bon tour de magie. C'est le genre de spectacle auquel assistent les astronomes quand ils «ferment la boucle de correction» du système d'optique adaptative qui équipe certains télescopes. L'image d'un objet cosmique, initialement floue, devient alors très nette et riche en nouveaux détails. Grâce à cette technique, les instruments d'observation compensent les perturbations causées par les turbulences de l'atmosphère. Cet outil a été une révolution dans le domaine de l'astronomie.

En 2020, notre équipe de l'Université nationale australienne, à Canberra, a fermé la boucle d'un système d'optique adaptative avec un objectif très différent. Il n'était pas question de scruter les détails d'un astre, mais ceux de débris spatiaux! Dans la salle de contrôle de l'observatoire du mont Stromlo, qui surplombe la ville, nous avions sélectionné, pour notre premier essai, un satellite météorologique. Sa silhouette caractéristique avec un corps large et de grands panneaux solaires en faisait une cible facile, idéale pour évaluer les performances de notre dispositif.

Pour certains d'entre nous, c'était la première fois qu'ils utilisaient un télescope pour observer autre chose qu'une étoile, une galaxie ou tout autre phénomène cosmique. Notre cible est l'un des milliers d'objets fabriqués par l'homme et mis en orbite autour de la planète. Or avec un essaim d'engins spatiaux (certains actifs, la plupart non) toujours croissant, les risques d'encombrer les orbites terrestres basses sont de plus en plus grands. Comment résoudre le problème des déchets spatiaux et préserver ces orbites pour des utilisations futures? Au cours des trente dernières années, les systèmes d'optique adaptative ont gagné en performance et les astronomes se sont alors rendu compte qu'ils pouvaient mettre à contribution leur expertise dans des projets de développement et de construction de systèmes de gestion des déchets spatiaux. Notre test s'inscrivait dans cette démarche.

AUX PRISES AVEC L'ATMOSPHÈRE

La couche gazeuse qui entoure la Terre nous permet d'y vivre, mais, pour les astronomes, elle est surtout une source de perturbations qui dégrade la qualité des observations.



Le *VLT*, le très grand télescope de l'Observatoire européen austral, au Chili, est équipé d'un laser. Cet instrument crée dans l'atmosphère une « étoile artificielle » en excitant des atomes de sodium à près de 90 kilomètres d'altitude. Cette « étoile » sert à calibrer le système d'optique adaptative qui corrige les effets des turbulences de l'atmosphère sur les images du télescope.

© Y. Beletsky (LCO) et ESO

Au lieu de filer en ligne droite, les photons venant d'étoiles lointaines voient leurs trajectoires déviées à cause du phénomène de réfraction. Quand la lumière passe d'un milieu à un autre caractérisé par des conditions distinctes (de densité, température, composition, etc.), elle change de vitesse et de direction. La réfraction explique, par exemple, qu'une paille dans un verre d'eau semble faire un angle à l'interface entre l'eau et l'air.

Dans le cas des observations astronomiques, l'atmosphère est un milieu turbulent comportant des masses d'air de températures différentes et en mouvement : quand la lumière passe de l'air chaud à l'air froid, elle change de trajectoire. Ces turbulences sont à l'origine du scintillement des étoiles et de la difficulté des astronomes à obtenir des images nettes et précises des objets situés au-delà de l'atmosphère.

Nous quantifions l'impact des turbulences de l'air avec un paramètre, la « qualité de la visibilité » (ou *seeing* en anglais), qui décrit la taille angulaire de la tache floue d'un astre vu par un télescope au sol. Plus l'atmosphère est turbulente, plus la qualité de la visibilité est médiocre. Dans un bon site, typiquement au sommet d'une montagne et avec une turbulence faible, la qualité de la visibilité est comprise entre 0,5 et 1 seconde d'arc. Cela signifie que n'importe quel télescope sera limité à une résolution de cet ordre et sera dans l'impossibilité d'observer des détails plus petits.

Or, dans l'absolu, les télescopes modernes sont capables de faire bien mieux en termes de résolution. D'un point de vue purement optique, la résolution d'un télescope est dictée par la « limite de diffraction », qui est proportionnelle à la longueur d'onde de la lumière collectée et inversement proportionnelle au diamètre du télescope qui collecte cette lumière. Les longueurs d'onde que nous pouvons observer ne dépendent que de la composition chimique et surtout de la température de nos cibles célestes, et nous n'avons aucun moyen d'agir sur ce paramètre.

La seule façon de construire des télescopes capables de résoudre des objets de plus en plus petits est donc d'accroître leur diamètre. Un télescope équipé d'un miroir de 2 mètres peut, par exemple, résoudre des objets de 0,05 seconde d'arc dans les longueurs d'onde optiques (ce qui équivaut à distinguer une grande pièce de monnaie située à 100 kilomètres). Mais même sur un site bénéficiant d'une visibilité de bonne qualité, l'atmosphère dégradera cette résolution d'un facteur 10.

On voit immédiatement l'intérêt de placer des télescopes dans l'espace, hors de portée des effets de l'atmosphère. Néanmoins, il reste d'excellentes raisons de construire des observatoires au sol. Les télescopes spatiaux sont limités en taille, parce que les fusées sont limitées en charge. Il est également difficile d'envoyer des humains dans l'espace pour les entretenir et les moderniser. Le plus grand télescope spatial, le *James Webb Space Telescope* (*JWST*), dont le lancement est prévu à la fin de l'année 2021, est composé d'un miroir primaire de 6,5 mètres de diamètre. Au sol, les plus grands miroirs de télescope font plus de 10 mètres de diamètre ; en cours de construction, l'*ELT* (pour *Extremely Large Telescope*), le télescope géant européen, aura un miroir primaire de 39 mètres. On peut en outre perfectionner les télescopes au sol tout au long de leur vie, en les équipant de nouveaux instruments à la pointe de la technologie. Mais pour tirer le meilleur parti de ces télescopes, nous devons activement soustraire les effets de l'atmosphère.

Les militaires américains ont utilisé l'optique adaptative dès les années 1970

Les principes de l'optique adaptative ont été posés au début des années 1950. Les militaires américains ont utilisé cette technique pour la première fois dans les années 1970, en particulier pour observer des satellites depuis le sol. Les astronomes, eux, ont dû attendre les années 1990 pour équiper leurs observatoires avec ce système.

L'optique adaptative repose sur trois éléments clés. Le premier est un capteur de front d'onde, c'est-à-dire une caméra numérique rapide qui cartographie en temps réel la distorsion des ondes lumineuses recueillies par le télescope. Parce que les mesures doivent suivre les changements rapides de l'atmosphère, le capteur doit établir une nouvelle carte plusieurs centaines de fois par seconde. Pour enregistrer assez de photons avec des temps d'exposition si courts, le capteur de front d'onde a besoin d'une source de lumière très brillante au-dessus de l'atmosphère. Or les astres du firmament sont en général trop faibles. Pour pallier ce problème, les astronomes créent tout simplement leurs propres « étoiles » artificielles en pointant un faisceau laser vers le haut.

Cette source lumineuse de référence (l'étoile guide laser) est la deuxième composante clé du système d'optique adaptative.

L'OPTIQUE ADAPTATIVE, COMMENT ÇA MARCHE ?

L'atmosphère de la Terre crée des distorsions indésirables sur les images obtenues par les télescopes au sol. Pour compenser ces effets atmosphériques, les astronomes utilisent des systèmes d'optique adaptative qui, à l'aide de miroirs déformables, corrigent les aberrations et produisent ainsi des images plus nettes.

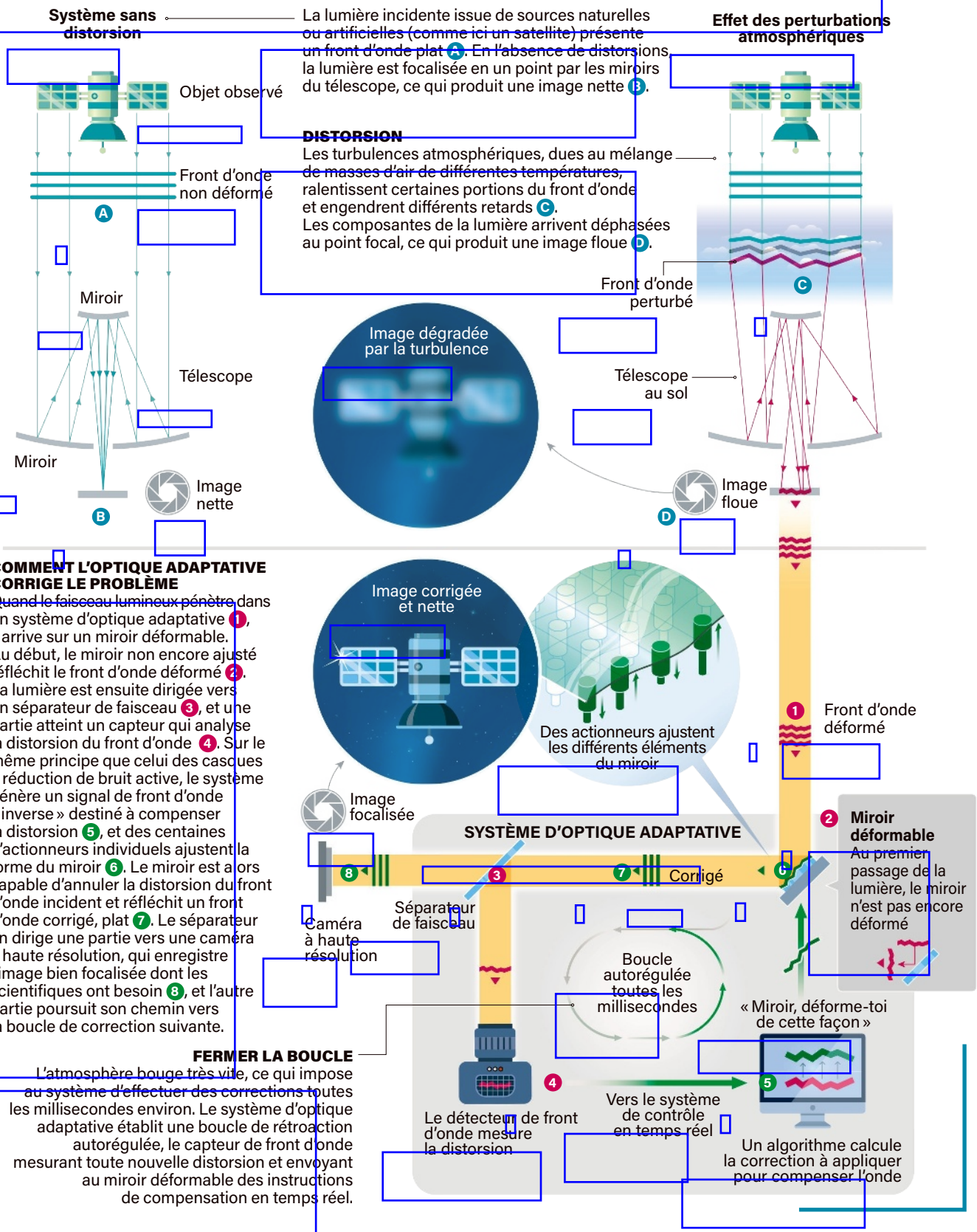
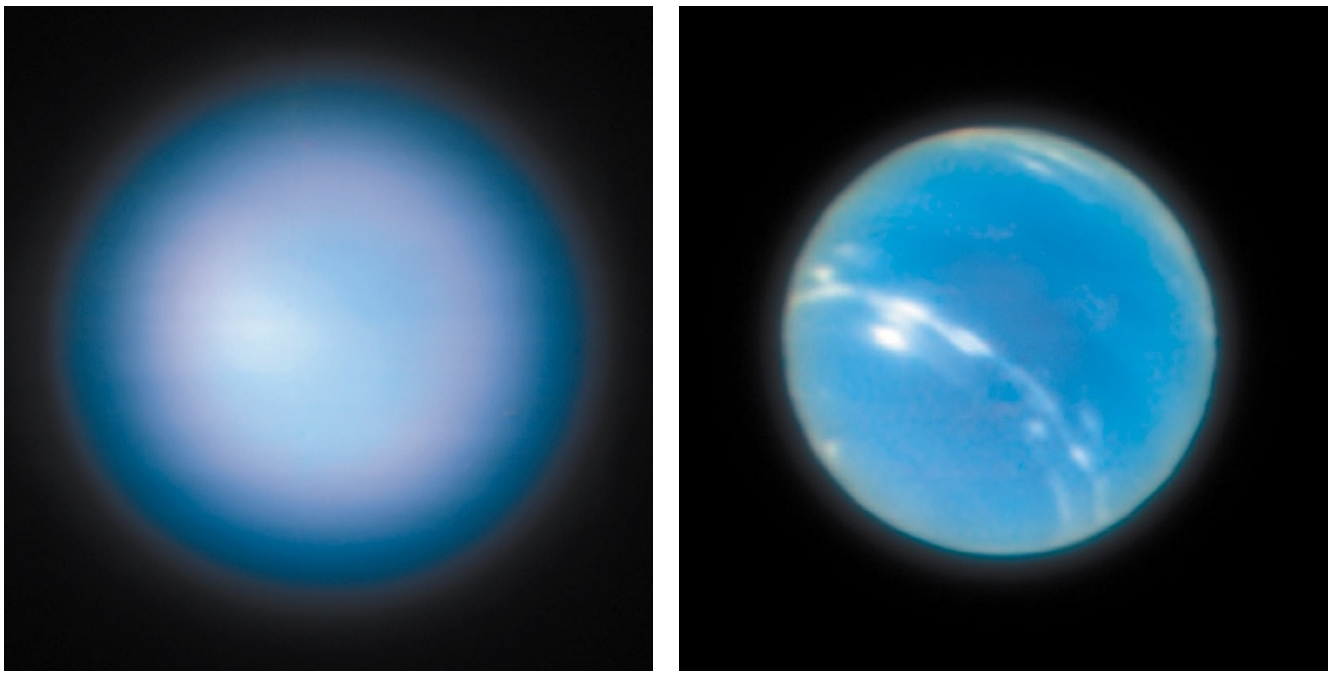


Illustration par SW Infographics



Deux images de la planète Neptune prises par le télescope *VLT*, la première avant la mise en route du système d'optique adaptative, la seconde après, illustrent l'efficacité de cette technologie.

P. Weilbacher (AIP) et ESO

L'atmosphère possède une couche riche en atomes de sodium de quelques kilomètres d'épaisseur à une altitude d'environ 90 kilomètres, bien au-dessus de la zone de turbulences à l'origine des distorsions. On excite les atomes de sodium à l'aide d'un laser émettant à une longueur d'onde bien choisie. Les atomes de sodium de la haute atmosphère absorbent la lumière orange vif du laser (de la même couleur que celle des lampadaires au sodium dans de nombreuses villes encore aujourd'hui). Puis ils réémettent ce rayonnement, ce qui produit une étoile artificielle orangée. Avec un laser couplé au télescope, l'étoile artificielle est toujours visible pour le capteur de front d'onde.

Ce dernier enregistre la forme du front d'onde émis par l'étoile artificielle. Il ne reste plus qu'à corriger les aberrations. C'est la tâche de la troisième composante majeure du système : le miroir déformable. Le miroir est constitué d'une mince membrane réfléchissante, sous laquelle se trouve un ensemble d'actionneurs (ou actuateurs), des mécanismes qui poussent ou tirent sur la membrane. La forme de la surface compense les distorsions de la lumière incidente, ce qui supprime de fait les défauts dus à l'atmosphère.

Les perturbations dues aux turbulences changent si vite que ces corrections doivent être réalisées toutes les millisecondes environ. C'est un incroyable défi, aussi bien mécanique qu'informatique. Les éléments déformables du miroir doivent pouvoir faire des milliers de mouvements chaque seconde, et ils doivent être appariés à un ordinateur et à un capteur de front d'onde capables de suivre un tel rythme. Il y a jusqu'à plusieurs milliers d'actionneurs, qui déplacent chacun sa portion de miroir déformable de l'ordre de quelques micromètres. On dit que l'on « ferme la boucle » quand s'établit ce processus continu et autorégulé de mise à jour des déformations.

Bien que la technique soit complexe à mettre en œuvre, les astronomes ont atteint une bonne maîtrise de l'optique adaptative. Tous les grands observatoires sont aujourd'hui équipés de ce système. Il en existe même des versions spécialisées pour des types particuliers d'observations. L'optique adaptative « classique » utilise une seule étoile guide et un seul miroir déformable, ce qui ne permet de corriger les turbulences que sur une zone relativement restreinte du ciel. Des systèmes plus complexes, telle l'optique adaptative multiconjuguée, s'appuient sur plusieurs étoiles guides et plusieurs miroirs déformables pour mesurer et corriger un plus grand volume de turbulences atmosphériques au-dessus du télescope. Cette approche ouvre des fenêtres d'observation dix à vingt fois plus larges qu'avec l'optique adaptative classique, mais avec un coût nettement plus important.

TRAQUER LES EXOPLANÈTES

Dans d'autres situations, par exemple quand les astronomes veulent étudier une cible individuelle telle qu'une exoplanète, le facteur crucial n'est pas la taille du champ, mais une résolution d'image aussi parfaite que possible. Dans cette situation, un système d'optique adaptative extrême utilise des capteurs de front d'onde et des miroirs plus rapides et de meilleure résolution. Le dispositif est en général couplé avec un filtre qui bloque la lumière de l'étoile hôte, afin de distinguer la faible lueur des exoplanètes en orbite autour d'elle.

Nous sommes maintenant entrés dans une ère où il est raisonnable de s'attendre à ce que tous les télescopes soient dotés de leur propre système d'optique adaptative. Et nous commençons à étendre l'utilisation de cette technique au-delà de l'astronomie.

UNE APPLICATION AU PROBLÈME DES DÉCHETS SPATIAUX

De façon ironique, une des nouvelles applications de l'optique adaptative n'est pas si récente, puisqu'elle faisait partie des raisons initiales qui avaient motivé les militaires à développer cette technique: l'observation de corps en orbite rapprochée autour de la Terre. Ce domaine de recherche, qui porte le nom de «connaissance de la situation spatiale» (CSS), inclut le suivi des satellites artificiels ainsi que celui des objets naturels (météoroïdes). Comme le nombre d'engins spatiaux et de débris en orbite croît, le risque de collision augmente, ce qui engendrerait encore plus de débris. Selon un scénario catastrophique, «le syndrome de Kessler», imaginé en 1978 par l'astrophysicien de la Nasa Donald Kessler, cette production de débris pourrait déclencher un effet en cascade qui rendrait certaines orbites complètement inutilisables.

Environ 34000 objets artificiels de plus de 10 centimètres sont actuellement en orbite autour de la Terre; seuls 10% sont des satellites actifs. La pollution spatiale s'accumule surtout aux altitudes les plus utilisées pour les activités humaines dans l'espace, essentiellement en orbite terrestre basse (entre 300 et 2000 kilomètres au-dessus du sol) et en orbite géostationnaire (aux alentours de 36000 kilomètres). On peut suivre les plus gros objets au moyen de radars, de télescopes optiques et de stations de poursuite laser. Mais il existe plusieurs centaines de milliers de morceaux de débris dont la taille est comprise entre 1 et 10 centimètres, auxquels s'ajoutent quelque 100 millions de débris de moins de 1 centimètre, dont la position est plus ou moins inconnue.

Les scènes de collision dans le film *Gravity* (2013) illustrent de façon spectaculaire ce qui se produirait si un gros débris spatial entrait en collision, par exemple, avec la *Station spatiale internationale*. La vitesse de ces débris est telle que ces projectiles peuvent perforer et provoquer des dégâts importants, mettant en danger la vie des astronautes, ou rendre inopérants des satellites. La Nasa rapporte qu'au cours des vingt dernières années, la *Station spatiale* a dû effectuer en moyenne une manœuvre d'évitement par an pour échapper à une collision avec des débris spatiaux qui volent trop près. Et la tendance est à l'augmentation, avec trois manœuvres en 2020.

Si la situation perdure, ces déchets spatiaux qui semblent bien lointains pourraient vraiment perturber notre quotidien: notre mode de vie repose pour une grande part sur des technologies spatiales. Les satellites sont nécessaires pour les communications par téléphones portables, pour la télévision et internet, bien sûr, mais aussi pour les systèmes de géolocalisation, les transactions bancaires, l'observation de la Terre pour les prévisions météorologiques, les secours d'urgence après les catastrophes naturelles, les transports et de nombreuses autres activités.

Il existe divers projets de nettoyage de l'espace, mais ces initiatives sont techniquement difficiles à mettre en œuvre, politiquement complexes à faire accepter et coûteuses. Des scientifiques, dont notre équipe à l'Université nationale australienne, explorent une autre piste. Ils développent des stratégies de gestion des déchets à partir du sol. Travailler depuis la terre ferme est plus facile et plus abordable, et peut reposer sur des techniques que nous maîtrisons déjà bien, comme l'optique adaptative.

Il existe des différences subtiles entre la façon dont nous utilisons l'optique adaptative pour l'astronomie et la façon dont nous l'appliquons à la CSS. La vitesse des satellites dépend de leur distance à la Terre. À une altitude de 400 kilomètres, la *Station spatiale internationale*, par exemple, se déplace à la vitesse de 8 kilomètres par seconde et effectue un tour complet en une heure et demie. C'est beaucoup plus rapide que le mouvement apparent du Soleil et des étoiles, qui mettent un jour entier à décrire un cercle au-dessus de nos têtes du fait de la rotation de la Terre.

DES CORRECTIONS BIEN PLUS RAPIDES QUE POUR LES ÉTOILES

À cause de cette vitesse élevée, quand les télescopes suivent les satellites, les turbulences atmosphériques apparentes changent beaucoup plus vite, et les systèmes d'optique adaptative doivent effectuer des corrections 10 à 20 fois plus rapidement que s'ils observaient des objets astronomiques. Nous devons aussi pointer le faisceau laser de l'étoile guide légèrement en avant du satellite pour sonder la région de l'atmosphère où le satellite se trouvera quelques millisecondes plus tard.

Dans ces conditions, l'optique adaptative sert à traquer et photographier des satellites et des débris en orbite terrestre basse, et à améliorer le suivi d'objets en orbites stationnaires basses, moyennes et géostationnaires. L'une des techniques qui nous permettent de suivre les objets spatiaux est le lidar (*light detection and ranging*, c'est-à-dire détection et télémétrie par ondes lumineuses). Nous projetons un laser de poursuite (à ne pas confondre avec le laser qui produit l'étoile guide) sur le ciel de façon qu'il soit réfléchi sur le satellite. Et nous mesurons le temps qu'il met à nous revenir afin de déterminer la distance précise entre le satellite et la Terre. Dans ce cas, le système

d'optique adaptative fonctionne «à l'envers»: il prépare le faisceau laser en déformant exprès sa lumière avant qu'il ne traverse les turbulences de l'atmosphère. Nous calculons les distorsions de telle sorte qu'elles annulent les effets des turbulences. Et le faisceau laser est bien focalisé lorsqu'il sort de l'atmosphère, comme s'il n'avait pas été perturbé.

En plus de suivre les débris spatiaux, nous espérons être capables de mettre à profit cette technique pour dévier des objets dont la trajectoire pourrait conduire à une collision. Nous voulons utiliser la pression de radiation exercée par la lumière quand elle est réfléchie sur un objet afin d'en modifier le mouvement. Pour que l'effet soit le plus efficace possible, nous avons besoin de l'optique adaptative afin de focaliser le faisceau laser précisément où nous voulons qu'il agisse. Des lasers d'une puissance de 10 kilowatts pourraient ainsi dévier les débris (les lasers de soudage ont typiquement une puissance de 50 kilowatts). Cette stratégie ne réduirait pas la quantité de débris en orbite, mais elle contribuerait à éviter les collisions entre débris, et peut-être retarder la réalisation du scénario catastrophe de Kessler. À terme, de tels systèmes pourraient être mis en œuvre tout autour de la Terre pour aider à gérer l'environnement spatial.

ÉPAULER LES TRANSMISSIONS QUANTIQUES

L'optique adaptative pourrait encore aider à une autre forme de sécurité, celle des communications. Pour éviter que des données sensibles ne soient interceptées et lues par un tiers, l'information est aujourd'hui chiffrée par des techniques qui reposent sur des problèmes mathématiques difficiles à résoudre en temps utile. Les systèmes de paiement en ligne et diverses autres applications utilisent de telles technologies de communications rapides et sécurisées. Mais ces méthodes fonctionnent uniquement parce que les ordinateurs actuels ne sont pas capables de résoudre assez vite les problèmes mathématiques sous-jacents. Or les ordinateurs quantiques, dont les performances ne cessent de progresser, seront bientôt en mesure de les mettre en défaut. Malgré le développement d'autres techniques de chiffrement innovantes pour sécuriser les données, personne n'a encore trouvé de protocole infaillible. La physique quantique pourrait apporter une solution.

La cryptographie quantique (ou distribution quantique de clé) repose sur les propriétés des photons, les particules de la lumière, et sur les lois de la physique quantique. L'élément central de tout système de chiffrement quantique est la «clé»: une suite de 0 et de 1 que les interlocuteurs se partagent pour chiffrer et déchiffrer leurs messages. Des générateurs quantiques de nombres aléatoires peuvent ainsi fournir des clés robustes (les générateurs classiques peuvent au mieux produire un pseudoaléa dont les clés peuvent être prédites). Ces clés sont générées à un rythme élevé, ce qui permet un usage unique. La difficulté pour deux interlocuteurs qui veulent établir une communication sécurisée est de s'échanger la clé sans qu'elle soit interceptée. La clé est transmise grâce à des photons. Or les lois de la physique quantique indiquent que si une personne tente de mesurer ce signal, il en modifie inévitablement la teneur. Les deux interlocuteurs se rendent alors compte que la clé a été compromise, ils l'éliminent et en réémettent une nouvelle jusqu'à ce qu'ils aient la certitude d'être les seuls détenteurs de la clé pour chiffrer leurs messages.

Les communications optiques pourront rivaliser avec celles par ondes radio

La clé peut être transmise par fibre optique ou à travers l'atmosphère grâce à un faisceau laser émis depuis un télescope optique et relayée par des satellites, qui renvoient ensuite le signal vers le sol. Or, comme dans le cas des débris spatiaux, les perturbations atmosphériques dévient la lumière du laser. Avec la technique d'optique adaptative, on peut corriger les effets des perturbations atmosphériques pour mieux cibler le satellite relais. En focalisant ainsi le faisceau, on est en mesure d'augmenter de façon considérable la quantité de données transférées par ce biais.

Cette stratégie permettra aux télécommunications optiques de concurrencer les grandes antennes paraboliques radio, en y ajoutant l'avantage d'être compatible avec une utilisation quantique. Il y a bien sûr d'autres obstacles à surmonter avant d'implémenter des télécommunications quantiques; par exemple, il est nécessaire de savoir stocker et acheminer l'information quantique sans perturber l'état quantique. Mais les chercheurs travaillent activement sur ces défis, et nous espérons parvenir à terme à créer un réseau global sécurisé grâce à la physique quantique. L'optique adaptative est un élément clé pour concrétiser ce rêve.

Ainsi, une technique auparavant réservée à l'étude du cosmos pourrait bientôt nous aider

à atteindre certains des grands défis technologiques de demain : le maintien de la sécurité dans l'espace et la sécurisation des communications. Mais, à leur tour, ces nouvelles applications feront progresser l'optique adaptative, pour le bénéfice de l'astronomie.

DE NOUVEAUX USAGES POUR LES TÉLESCOPES

Traditionnellement, à cause de son coût, l'optique adaptative était un investissement qui ne se justifiait que pour les plus grands observatoires. Mais la surveillance de l'espace et les communications gagneront beaucoup à utiliser l'optique adaptative même sur des télescopes de diamètre plus modeste. Dans cette situation, toutes ces communautés auront intérêt à s'entraider et à mutualiser leurs équipements. Les télescopes sous-utilisés trouveront une nouvelle vie quand ils seront équipés de systèmes d'optique adaptative. De leur côté, les contrôleurs de débris spatiaux sont à la recherche d'accès à des télescopes leur permettant de couvrir autant de latitudes et de longitudes que possible. Dans le cahier des charges de futurs observatoires, les astronomes pourraient envisager dès le début d'y ajouter des fonctionnalités permettant non seulement de faire de la recherche astronomique, mais aussi d'étudier la situation spatiale et de réaliser des communications sécurisées. Cette ouverture pourrait donner accès à de nouvelles sources de financement, dont des partenariats avec des entreprises privées.

Nous abordons une époque multidisciplinaire dans laquelle le ciel est une ressource commune. Alors que nous avons rendu plus nets les contours des objets célestes, nous floutons les lignes de démarcation entre les diverses activités susceptibles d'utiliser les télescopes comme principal outil. Les chercheurs et ingénieurs qui développent les systèmes d'optique adaptative élargissent désormais leurs cercles de collaboration et occupent une place centrale dans cette nouvelle dynamique.

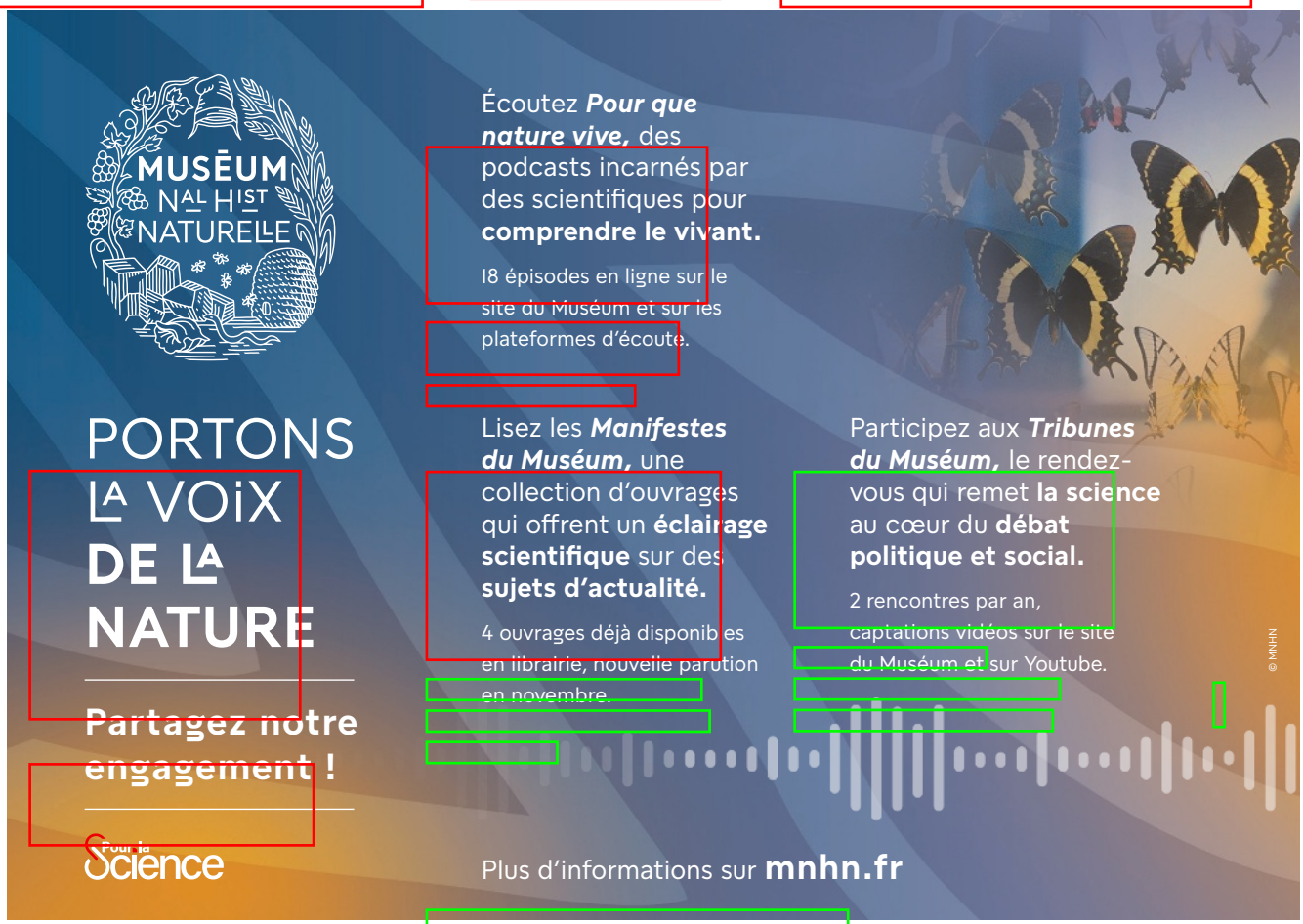
L'optique adaptative s'installe aussi dans de nouvelles applications… sans télescopes. L'une d'elles, maintenant assez répandue, est l'imagerie médicale et l'ophtalmologie, pour corriger les aberrations optiques produites par la traversée de tissus vivants et de l'œil. D'autres utilisations incluent l'optimisation de la focalisation du faisceau pour les outils laser industriels et même pour les lasers militaires antimissiles. Il n'a jamais été aussi passionnant d'explorer le potentiel de l'optique adaptative, que ce soit dans l'espace ou sur Terre. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Gisin, **« L'internet quantique est pour le physicien un défi fascinant »**, *Pour la Science*, n° 528, pp. 22-27, octobre 2021.

N. Martinez *et al.*, **Australia's first laser guide star : design and telescope integration at Mount Stromlo Observatory**, *Proc. SPIE, Adaptive Optics Systems VII*, vol. 11448, article 114481U, 2020.

J. C. Gonzalez Herrera *et al.*, **L'ELT, le plus grand œil de la planète**, *Pour la Science*, n° 511, pp. 32-41, mai 2020.



L'ESSENTIEL

> Une grande diversité de coraux dits « profonds » colonise les eaux froides.

> La pêche, la pollution par les plastiques, le réchauffement climatique et l'acidification des océans menacent ces espèces et la biodiversité qu'elles hébergent.

> L'espèce la plus répandue, *Lophelia pertusa*, est aussi la plus sensible.

> L'objectif des chercheurs est de fournir les bases scientifiques pour les protéger.

LES AUTEURS

FRANCK LARTAUD
maître de conférences au laboratoire Lecob, observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer

LÉNAÏCK MENOT
chercheur au laboratoire Environnement profond de l'Ifremer à Plouzané

Les coraux profonds sous pression

Les coraux ne sont pas réservés aux mers tropicales. Plusieurs espèces se développent dans des eaux froides, à plusieurs centaines de mètres de profondeur, voire bien plus, ce qui ne les protège pas de l'impact négatif des activités humaines. Comment aider à leur préservation ?

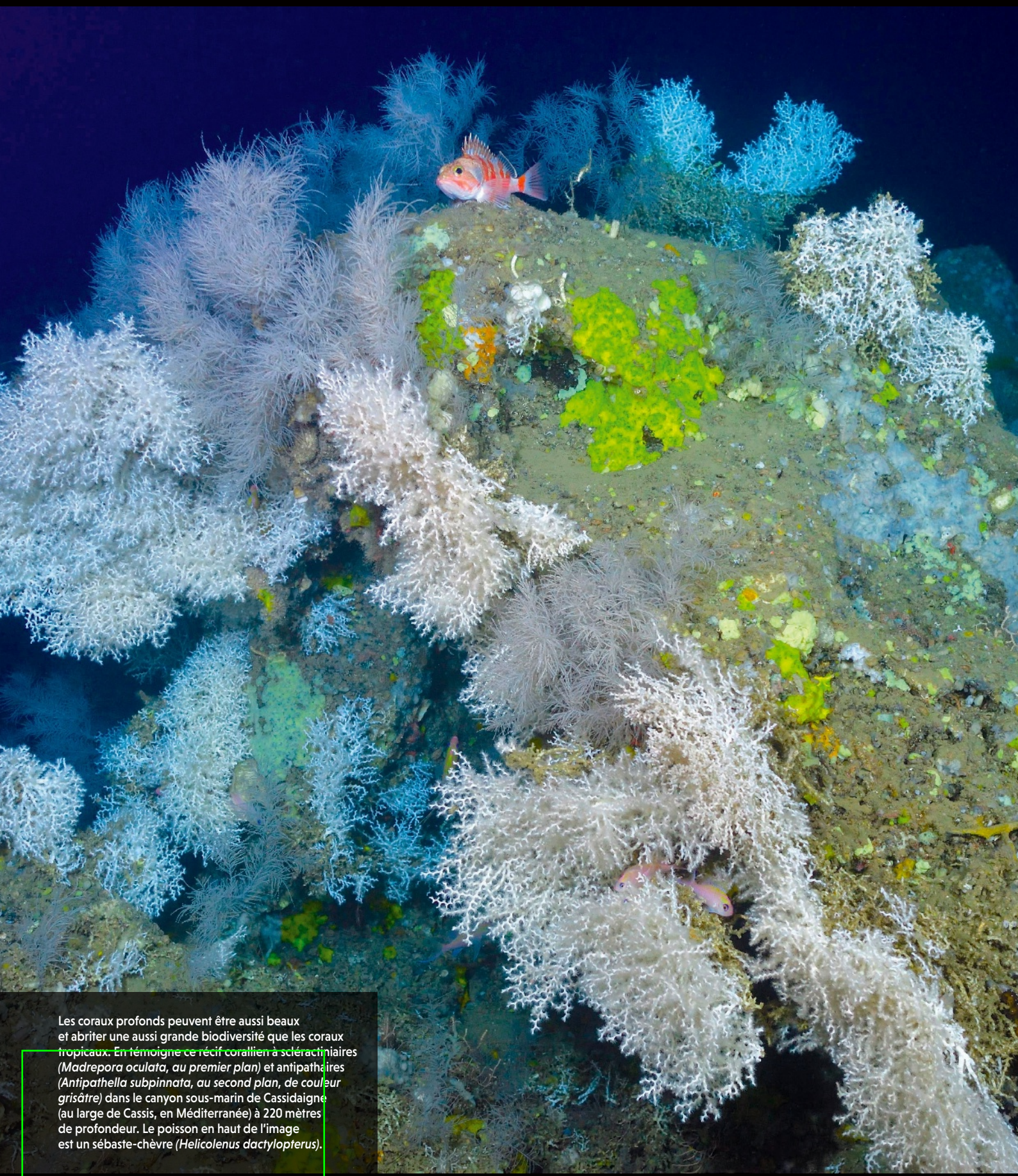
Quel paysage imaginez-vous quand on vous dit « corail » ? Très probablement des eaux chaudes et des lagons bleus sous les tropiques… Une paire de palmes, un masque et un tuba, et vous voilà prêt à explorer ces eaux peu profondes, entouré de poissons multicolores. Pourtant, le corail n'est pas limité à ces eaux chaudes. Plusieurs espèces tout aussi impressionnantes et qui hébergent une riche biodiversité vivent dans des environnements bien moins accueillants (*voir les photos ci-contre et pages 58-59*). Qualifiées de « coraux profonds » ou « coraux d'eaux froides », ces organismes vivent dans les mers des hautes latitudes ou dans les fonds océaniques, entre 200 et 4000 mètres de profondeur, à des températures inférieures à 15 °C.

Les zoologistes ont pris la mesure de leur importance écologique vers la fin du XX^{e} siècle presque en même temps qu'ils ont pris conscience des nombreuses menaces qui pèsent sur eux, à l'instar de leurs cousins tropicaux. Depuis, comme la plupart des équipes de recherche sur le sujet, nous travaillons à mieux préciser ces impacts et à anticiper la réponse de ces organismes pour fournir les fondements scientifiques de programmes de protection adaptés.

IL Y A CORAIL ET CORAIL…

Les coraux sont entrés dans le quotidien des hommes dès la Préhistoire, notamment en Europe avec le corail rouge, espèce patrimoniale de Méditerranée que l'on trouvait alors dès 5 mètres de profondeur. On attribuait un pouvoir magique à cet « or rouge ». Dans

© Ifremer/campagne Vidéocor1, 2017



Les coraux profonds peuvent être aussi beaux et abriter une aussi grande biodiversité que les coraux tropicaux. En témoigne ce récif corallien à sclératiniaires *(Madrepora oculata, au premier plan)* et antipathaires *(Antipathella subpinnata, au second plan, de couleur grisâtre)* dans le canyon sous-marin de Cassidaigne (au large de Cassis, en Méditerranée) à 220 mètres de profondeur. Le poisson en haut de l'image est un sébaste-chèvre *(Helicolenus dactylopterus)*.

l'Antiquité, il était récolté pour servir d'amulette, de médicament et de matériau de bijouterie et de décoration de luxe. Les coraux des mers chaudes étaient également utilisés comme parure ou comme instrument de cuisine dans les cultures précolombiennes des Antilles ainsi que dans l'Indo-Pacifique.

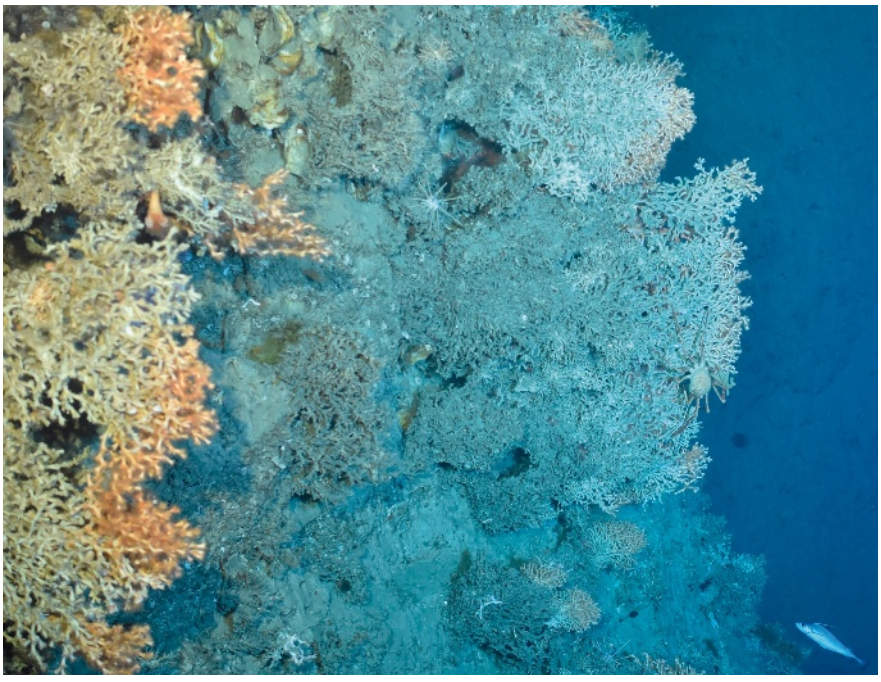
DES ORGANISMES DÉCOUVERTS TARDIVEMENT

Les coraux d'eau froide, eux, ont été découverts bien plus tard, par des pêcheurs norvégiens qui avaient remarqué que le poisson était plus abondant par endroits. Un naturaliste norvégien, Johan Ernst Gunnerus, les a dessinés pour la première fois en 1768 (*voir la figure page 60*). Depuis, l'intérêt scientifique pour ces espèces n'a fait que croître. Mais les difficultés d'accès à leur habitat ont longtemps limité les connaissances à quelques captures, réalisées au cours d'expéditions océanographiques à partir de la fin du XIXe siècle. Citons celles menées par les zoologistes français Georges Pruvôt et Henri de Lacaze-Duthiers, créateur en 1882 du laboratoire Arago (aujourd'hui observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer), où les campagnes scientifiques du Prince Albert Ier de Monaco, entre 1885 et 1915.

Ces premiers indices de coraux constructeurs de récifs vivant dans les profondeurs ont alimenté l'imaginaire populaire. Jules Verne, toujours au fait des progrès scientifiques, les a mentionnés dans son roman *Vingt Mille Lieues sous les mers*. Pourtant, ces coraux de mer profonde ont longtemps été mal vus car ils déchiraient les chaluts, ces immenses filets tirés par les chalutiers.

De leur côté, des chercheurs commençaient à décrire la biologie de ces curieux animaux. Ainsi, en 1948, le biologiste français Édouard Le Danois publia les premières descriptions d'assemblages d'espèces en fonction de la profondeur, dans le golfe de Gascogne (qui s'étend du large de la Bretagne jusqu'en Galice). Il y illustra en particulier cinq massifs coralliens qui dominent le paysage sous-marin entre 300 et 1800 mètres de profondeur.

Les recherches ont pris un véritable élan dans les années 1960 grâce à la soucoupe plongeante du commandant Cousteau. Les plongées se sont alors succédé en Méditerranée. Jean Vacelet, biologiste à la station marine d'Endoume, laboratoire de zoologie et biologie marine de Marseille, fit les premières observations *in situ* de bouquets de coraux jaunes, *Dendrophyllia cornigera*, à 150 mètres de profondeur en tête du canyon sous-marin de Cassidaigne, au large de Marseille (un canyon sous-marin est une vallée profonde et étroite qui entaille le talus continental; environ 300 d'entre eux incisent ainsi la façade atlantique française, et 35 la côte méditerranéenne).



SUR UN FLANC DE FALAISE

Cette photo a été prise en août 2021 sur un flanc de falaise à environ 900 mètres de profondeur dans le canyon de Lampaul, au large de Brest. On voit essentiellement des *Lophelia pertusa* (la teinte rosée correspondant aux tissus vivants de la colonie), quelques *Madrepora oculata* (plus petits, avec des polypes en zigzag), un petit nombre de *Desmophyllum dianthus* (gros polypes solitaires) fixés à la base des colonies de *Lophelia* ainsi que des huîtres (en jaune, collées sur le substrat dur ou sur la base des colonies) complètent la faune fixée. Des espèces mobiles viennent se réfugier dans ces massifs : on distingue notamment un poisson *Lepidion* (de la famille des morues), un crabe *Paromola cuvieri*, un oursin *Cidaris cidaris*.

De son côté, Daniel Reyss, biologiste au laboratoire Arago de Banyuls-sur-Mer, prit les premières photographies sous-marines de récifs coralliens à 300 mètres de profondeur. Il mit en lumière une myriade de colonies de *Madrepora oculata* recouvrant le flanc des falaises du canyon Lacaze-Duthiers, situé à près de 20 kilomètres au large de Banyuls-sur-Mer et qui s'enfonce jusqu'à 2000 mètres de profondeur.

DES ÉCOSYSTÈMES AUJOURD'HUI ACCESSIBLES

Depuis les années 2000, les écosystèmes coralliens de profondeur sont réellement devenus accessibles aux chercheurs grâce aux appareils submersibles de nouvelle génération. Plus maniables, plus autonomes, permettant d'aller plus profond, ces engins sont de plus équipés de bras préhensibles pour la collecte d'échantillons. Les campagnes d'exploration puis d'études *in situ* (suivis de croissance, de nutrition, analyse comportementale...) se succèdent alors dans l'Atlantique et en Méditerranée (*voir la photo page 62*), complétées par des expérimentations en aquarium.

On estime aujourd'hui que les eaux froides ou profondes, qui représentent 90% des fonds océaniques, abritent plus de la moitié des 5100 espèces de coraux connues. Par exemple,

EN GROS PLAN

Détails d'une branche de *Madrepora oculata* prélevée dans le canyon Lacaze-Duthiers à 300 mètres de profondeur. L'agencement des polypes se développant les uns au-dessus des autres permet à la colonie de s'étendre.

sur la façade Atlantique, dans le golfe de Gascogne, Inge van den Beld a identifié et cartographié près de 60 espèces au cours de sa thèse à l'Ifremer en 2017; en Méditerranée, Álvaro Altuna, de la Société culturelle d'investigation sous-marine (Insub, en Espagne) et Angelo Poliseno, de l'université de Munich, ont recensé 82 espèces dans leur synthèse sur les coraux profonds en 2019.

Les plongées dans les abysses de zones inexplorées révèlent fréquemment de nouvelles espèces. Et pour cause: l'espace de colonisation des coraux d'eau froide est bien plus vaste que celui des coraux d'eau chaude. L'essentiel des masses d'eau océanique est constitué d'eaux à faible température: au-delà de 200 mètres, elle avoisine 3 °C en moyenne et dépasse très rarement 15 °C.

L'installation et la dispersion de coraux dans les fonds océaniques sont par ailleurs favorisées par les courants qui y règnent, pourvoyeurs de nourriture *via* le zooplancton qu'ils déplacent, ainsi que par la présence de substrats rocheux sur lesquels les larves de coraux se fixent. Les dernières observations menées en 2021 par Andre Freiwald, de l'université de Brême, montrent une très vaste répartition des coraux d'eaux froides, qui va des milieux polaires, comme dans les fjords scandinaves ou de Patagonie, jusqu'aux eaux profondes équatoriales, dans les canyons sous-marins, les monts volcaniques immergés ou le long des dorsales océaniques (*voir la carte page 61*).

Ces coraux d'eau froide partagent de nombreuses similitudes avec leurs congénères tropicaux, tant du point de vue anatomique que fonctionnel. Si leurs polypes sont généralement de plus grande taille, ils créent le même type de structures tridimensionnelles complexes, qui servent de refuge, de nurserie ou de support de fixation à une grande diversité d'organismes. Ils sont capables d'édifier des récifs dont les dimensions n'ont rien à envier à ceux des tropiques. À titre d'exemple, un récif à *Lophelia pertusa* (nommé aussi *Desmophyllum pertusum*), le récif de Røst, situé au large de la Norvège, atteint 35 kilomètres de longueur et 3 kilomètres de largeur!

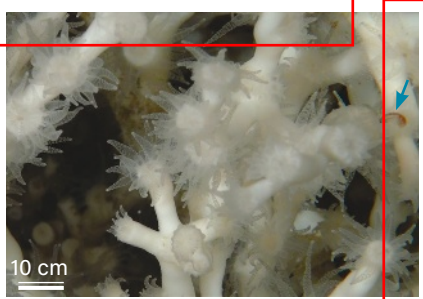
Nous profitons abondamment de ces oasis de biodiversité. En effet, de nombreuses espèces marines d'intérêt commercial

LES CORAUX, DES ANIMAUX CNIDAIRES

Cousins des méduses et des anémones de mer, les coraux appartiennent à l'embranchement des Cnidaires (du grec *knidê*, qui signifie « ortie »). Les cnidaires se caractérisent notamment par leurs cellules munies de minuscules harpons urticants, qui leur servent à capturer leurs proies ou à se défendre.

Pour l'essentiel, les trois principaux groupes de coraux se distinguent par leur squelette. Le squelette externe des sclératiniaires (plus de 1 500 espèces décrites), ou coraux durs, constructeurs de récifs, est en carbonate de calcium. Celui des antipathaires (environ 280 espèces connues), ou coraux noirs, est composé d'une protéine. Enfin, le squelette interne des alcyonaires (plus de 3 300 espèces), qui regroupent les gorgones et les coraux mous, est soit à base de protéines et de calcite, soit absent.

Les rameaux et les colonies grandissent par clonage, *via* la formation de petites unités génétiquement identiques appelées « polypes », à partir d'un seul et même polype ancestral. Mais les coraux se dispersent par reproduction sexuée : les polypes libèrent d'innombrables gamètes mâles ou femelles et, après fécondation, naissent des larves, les *planulas*. Celles-ci dérivent au gré des courants pendant des semaines ou des mois avant de trouver l'environnement adéquat et de se métamorphoser en un polype qui, par clonage et après quelques siècles, produira une colonie.



Le succès des coraux tropicaux constructeurs de récifs vient de l'association symbiotique avec la microalgue *Symbiodinium*, qui vit dans leurs tissus et leur fournit l'essentiel de leurs apports énergétiques grâce à la photosynthèse. En l'absence de lumière, les coraux profonds ont, eux, développé un habile système de capture de proies : leurs multiples polypes, dont les tentacules sont davantage déployés que chez les coraux tropicaux, forment un réseau assez inextricable, une sorte de mur de bouches qui leur permet de capter le zooplancton *(flèche bleue)* et les détritus organiques marins apportés par les courants.

© Olivier Dugornay/Ifremer (en haut) ; © Fondation Total-UPMC-Parc naturel marin du Golfe du Lion (en bas)

viennent s'y réfugier, s'y reproduire et s'y nourrir : grenadiers, grondins, sébastes, mostelles, empereurs, gambas, langoustines… Par ailleurs, les récifs coralliens constituent d'efficaces systèmes de stockage du carbone.

Cependant, les coraux profonds sont fragiles. Leur croissance est particulièrement lente, de l'ordre du millimètre au centimètre par an, c'est-à-dire cinq à dix fois plus lente que les coraux d'eau chaude. Et leur espérance de vie, extrêmement longue, leur confère un très faible taux d'évolution, donc d'adaptation aux changements. C'est d'ailleurs un corail profond, de type antipathaire (*voir l'encadré page 59*) et appartenant au genre *Leiopathes*, découvert au large de Hawaii, qui détient le record du monde pour un animal vivant : on estime son âge à 4 200 ans.

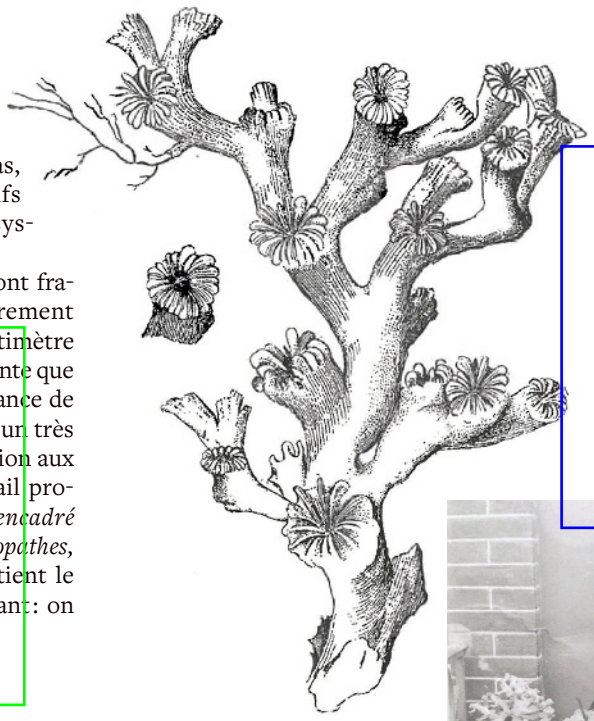
LES DÉGÂTS DE LA PÊCHE AU CHALUT

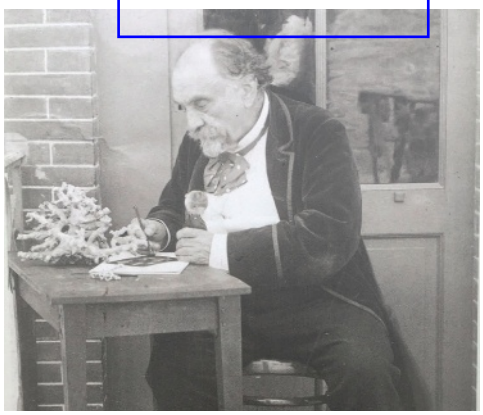
Les abondantes ressources halieutiques associées aux coraux profonds ont attiré de longue date les convoitises, ce qui fragilise encore plus ces organismes. On trouve ainsi nombre de filets de pêche et de palangres (longues lignes sur laquelle sont fixés des hameçons) accrochés dans les branches de coraux (*voir les photos pages 62 et 63*). La pêche est même rapidement devenue la première et la principale cause de destruction des récifs coralliens profonds, notamment en raison du chalutage.

Cela a conduit à des dégâts irréparables, particulièrement dans l'Atlantique : vers 2002, l'équipe de Jan Helge Fosså, de l'institut de recherche marine de Bergen, en Norvège, a ainsi montré qu'au large de ce pays, près de la moitié des coraux a été endommagée par la pêche. Il faudra des centaines voire des milliers d'années pour que ces récifs se reconstituent…

Après des décennies de dégradations, les inquiétudes soulevées par les scientifiques ont enfin été prises en compte par les autorités européennes : l'interdiction du chalutage au-delà de 800 mètres de profondeur a été votée en 2016, même si elle a du mal à être appliquée. Mais les dégradations physiques directes ne sont pas les seuls impacts. Le chalutage à plus faible profondeur, sur le plateau continental, au-dessus des canyons profonds, est lui aussi néfaste. Il provoque des sortes d'avalanches sous-marines de particules, qui recouvrent les récifs et dont les coraux peinent à se débarrasser. Leur croissance s'en voit sévèrement affectée.

À la pêche s'ajoutent d'autres problèmes. Le plus visible est la pollution macroscopique. Une stupéfaction saisit le biologiste devant la quantité de déchets qui jonchent le fond des mers, même à plusieurs milliers de mètres de profondeur. Les débris de notre quotidien, transportés





Le naturaliste norvégien Johan Ernst Gunnerus a réalisé cette première illustration d'un corail d'eau froide constructeur de récif en 1768. Ce corail est aujourd'hui nommé *Desmophyllum pertusum*, plus connu sous l'ancien nom *Lophelia pertusa*. La photo montre le zoologiste français Henri de Lacaze-Duthiers, pionnier du domaine, en train d'étudier et de dessiner, en 1895, des fragments de colonies de corail d'eau froide *Dendrophyllia ramea (gros morceaux en arrière-plan)* et *Madrepora oculata (petit morceau au premier plan)*.

par le vent ou les rivières, disséminés dans l'océan par les courants marins, finissent pour une bonne partie dans les milieux profonds, notamment au niveau des canyons sous-marins, poussés par des courants descendants.

LE PLASTIQUE RESPONSABLE DE RETARDS DE CROISSANCE

Ces déchets sont surtout des objets en plastique (pour 40 à 75 % suivant les zones géographiques), comme l'ont constaté Christopher Pham, de l'université des Açores, et ses collaborateurs dans une étude parue en 2014 et portant sur les eaux européennes. Ils sont de tailles et de natures diverses : emballages à usage unique, bouteilles, débris en PVC… Les déchets les plus gros, les « macroplastiques » (de taille supérieure à 5 millimètres) s'accumulent dans les récifs, piégés par la complexité architecturale du corail.

En survolant le fond du canyon Lacaze-Duthiers, nous trouvons près d'un morceau de plastique tous les 100 mètres linéaires. Nos collègues de l'université de Barcelone, de l'équipe de Miquel Canals, en ont observé même davantage dans les canyons catalans du cap Creus, de La Fonera et de Blanes.

Outre ces « gros déchets », les fonds marins sont jonchés d'une quantité considérable de petits débris mesurant moins de 5 millimètres et qualifiés de « microplastiques ».

Nos études écotoxicologiques menées à l'observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer

© Dessin : tiré de T. Bakken et al., Kgl. Norske Vidensk. Selsk. Skr., 2011(2), pp.109-128 ; photo de Henri de Lacaze-Duthiers : collection de la bibliothèque de l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer

montrent des effets inquiétants de ces débris de plastique sur l'espèce de corail profond la plus commune aujourd'hui, *Lophelia pertusa*. À l'aide d'aquariums développés par Autun Purser, de l'institut Alfred-Wegener à Brême, permettant d'imiter les conditions de courant *in situ*, nous avons d'abord étudié l'impact de ces macro- et microplastiques sur la croissance de *Lophelia pertusa* en conditions expérimentales.

Dans ces études, publiées en 2018 et 2019, nous avons constaté que, pour commencer, les macroplastiques accrochés dans les branches de coraux entravent la capture de proies. Cela limite l'accès des coraux à la nourriture et ralentit la croissance de ces organismes de 30 à 40%. Toutefois, au bout de six mois, ceux-ci semblent développer une stratégie d'évitement consistant à modifier leur orientation de croissance.

L'impact des microplastiques se révèle plus pervers encore, notamment à long terme. Les coraux *Lophelia pertusa* les confondent avec le zooplancton, source principale de leur alimentation, et les capturent. Dans un premier temps, ils s'épuisent à les rejeter, puis, au bout de quelques mois, finissent par arrêter de s'alimenter, probablement parce que la présence des plastiques dans leur estomac entraîne une fausse satiété. Des phénomènes similaires ont été observés pour d'autres organismes (des mammifères, des oiseaux, des reptiles ou des invertébrés) ayant ingéré des déchets plastiques.

Autrement dit, c'est tout l'état de santé du corail qui est affecté. Nous étudions cela entre autres en analysant son microbiote, le consortium de bactéries qui lui est associé. Là encore, les plastiques semblent être sources d'importants déséquilibres.

D'autres menaces d'envergure sont le réchauffement climatique et l'acidification des océans. Plusieurs équipes internationales ont montré que le réchauffement est déjà manifeste dans les profondeurs de l'océan, des modifications étant constatées jusqu'à 2000 mètres.

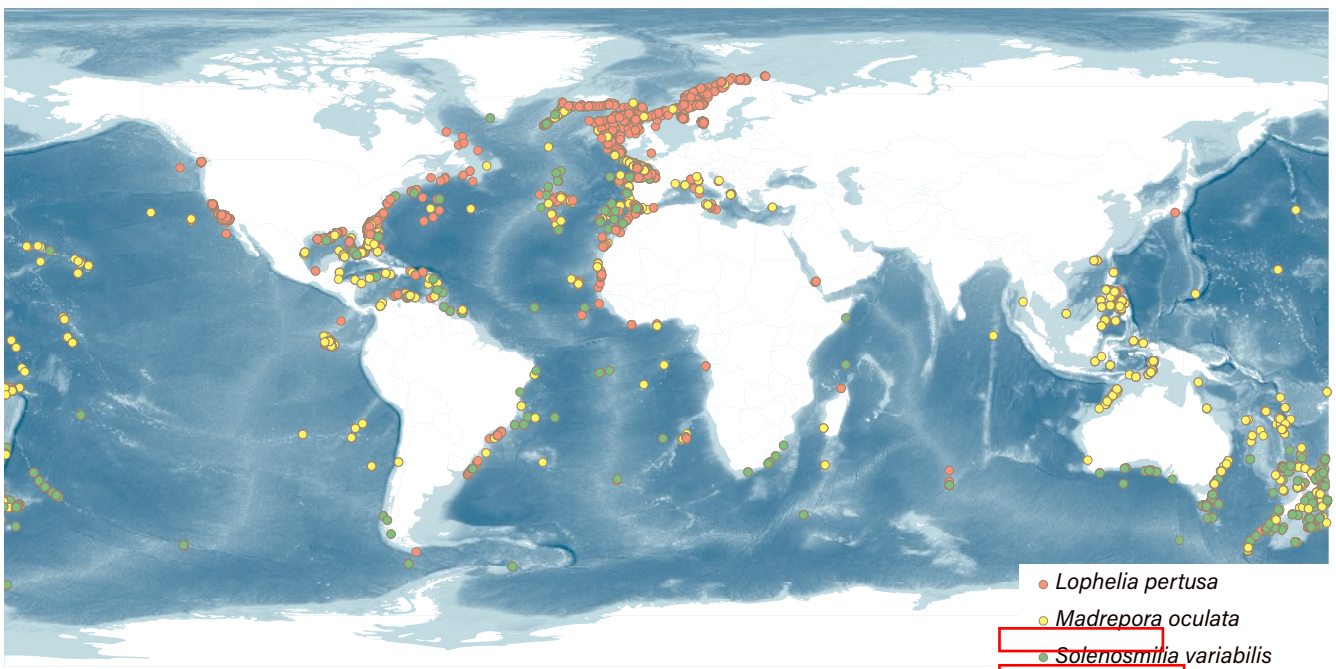
PARTOUT, LA BIODIVERSITÉ CORALLIENNE EST TOUCHÉE

Les modèles établis par l'équipe de Samuel Somot, du centre national de recherches météorologiques, à Toulouse, prévoient une hausse de la température plus importante en Méditerranée qu'ailleurs. Or les coraux profonds méditerranéens vivent déjà dans des eaux proches des températures maximales pour ces espèces (14 à 15 °C).

Les études en aquarium réalisées ces dernières années par Christine Ferrier-Pagès et Stéphanie Reynaud, du centre scientifique de Monaco, ont montré que certaines espèces, comme les coraux à rameaux *Dendrophyllia cornigera* et *Dendrophyllia ramea*, sont susceptibles de s'adapter à cette augmentation de température. Mais ce n'est pas le cas des principales espèces constructrices de récifs profonds, telles que *Lophelia pertusa* et *Madrepora oculata*, qui semblent nettement plus sensibles.

Récemment, nous avons par exemple observé en aquarium l'effet néfaste de la température sur la stabilité de leur microbiote : dès qu'elle s'élève, des bactéries opportunistes, voire pathogènes, entrent dans le corail. Parallèlement, le comportement alimentaire et les capacités de

Cette carte montre la distribution des trois principales espèces de coraux d'eau froide constructeurs de récifs. Elle couvre une grande partie des mers.



© Lénaïck Menot, d'après données OBIS 2021 et fond de carte GEBCO Compilation Group (2020) GEBCO 2020 Grid

Quelles que soient les zones géographiques, les canyons sous-marins subissent un fort impact anthropique, notamment avec l'accumulation de déchets qui s'accrochent aux colonies, comme ici des filets de pêche A, des lignes de palangres B et divers déchets plastiques C et D.

stockage d'énergie sont affectés, ce qui ralentit la croissance des colonies, donc leur capacité à créer de nouveaux habitats. Pour les coraux méditerranéens vivant à 13 °C, une hausse de température à 17 °C entraîne rapidement la mort des espèces récifales. Et les coraux vivant dans le golfe du Mexique à des températures plus basses sont affectés dès 15 °C, comme l'a établi Sandra Brooke, de l'université de Floride.

Par ailleurs, le réchauffement des eaux en surface atténue les plongées d'eau dense. Or celles-ci sont un facteur d'oxygénation, de saturation en carbonate de calcium, d'apport en nourriture et constituent un efficace système d'évacuation des sédiments qui s'accumulent sur les colonies. Ces cascades d'eau dense sont des phénomènes locaux primordiaux. Elles se forment grâce au refroidissement et à l'évaporation des eaux de surface. En leur absence, le développement des coraux est fortement restreint, comme le montre notre étude publiée en 2020, dans laquelle nous avons suivi, entre 2010 et 2018, la croissance de colonies de *Lophelia pertusa* et de *Madrepora oculata* dans le canyon Lacaze-Duthiers.

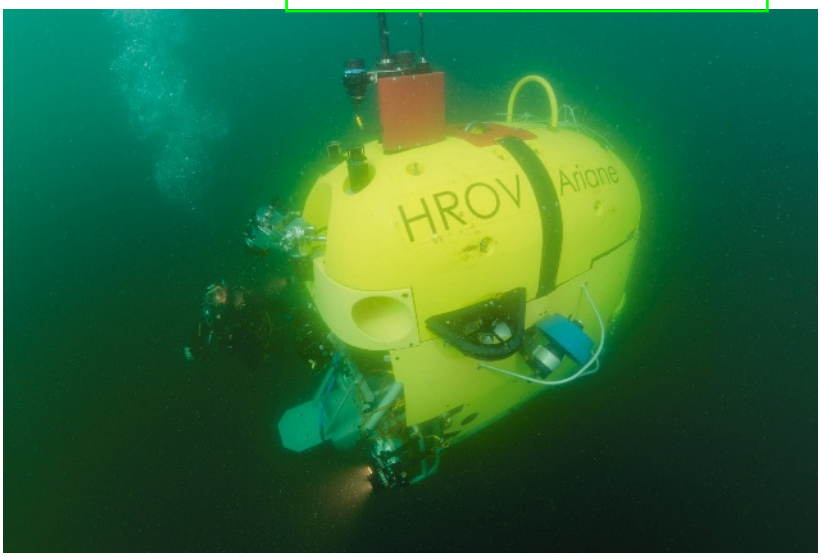
Ainsi, parce qu'elle est une mer quasi fermée, présentant des eaux profondes à des températures élevées (13 à 14 °C), la Méditerranée est particulièrement sensible au changement climatique, ce qui fait craindre une rupture de l'état d'équilibre installé depuis la fin du dernier maximum glaciaire, il y a 15 000 ans.

Quant à l'acidification des océans, elle perturbe les capacités de calcification des coraux ou fragilise leur squelette, comme l'ont montré en 2015 Sebastian Hennige et Murray Roberts, de l'université Heriot-Watt, en Écosse, et leur équipe. Toutefois, les études sur l'effet de l'acidification ont été menées en aquarium à pression atmosphérique, ce qui ne permet pas d'anticiper la réponse du corail dans les conditions naturelles. Par exemple, nous ne connaissons pas encore l'effet de la pression sur la saturation en aragonite, composé fondamental dans la minéralisation du squelette.

L'un des objectifs du projet de recherche *Ardeco* (pour *Assessing resilience of deep corals*, soit « Évaluer la résilience des coraux profonds »), lancé en 2021, sera d'ailleurs de reconstituer au plus près les conditions physico-chimiques de l'habitat naturel des coraux profonds, grâce à la création d'aquariums pressurisés. Ce projet, mené en collaboration avec Océanopolis (à Brest), réunit des chercheurs de l'Ifremer et de Sorbonne Université (à Paris et à l'observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer).

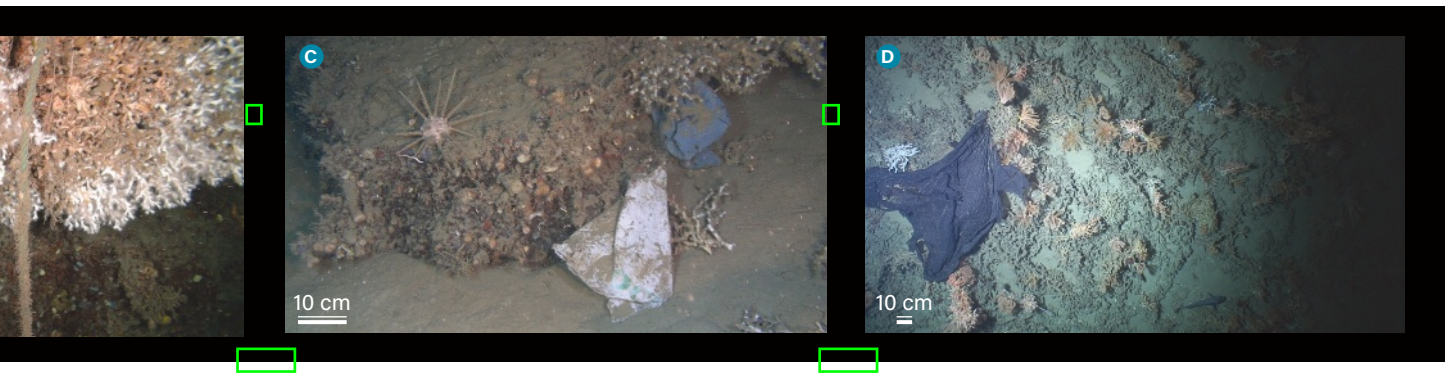
UN CHANGEMENT DES PAYSAGES SOUS-MARINS

En attendant les résultats de l'ensemble des recherches en cours, on peut d'ores et déjà affirmer que toutes les espèces ne réagissent pas de la même façon aux diverses menaces anthropiques. Par exemple, *Madrepora oculata* ne semble pas affectée par la pollution par les plastiques, et *Dendrophyllia cornigera* paraît s'accommoder du réchauffement des eaux. Mais la plupart des études montrent que la



En août 2021, le robot submersible *Ariane* a effectué une vingtaine de plongées dans le canyon de Lampaul, au large de Brest, dans le cadre de la mission *Chereef*. L'objectif est d'explorer les récifs coralliens situés entre 800 et 2 000 mètres de profondeur, et de déployer un observatoire profond pour suivre la dynamique de l'environnement (température, courantologie, turbidité...) et les traits biologiques des coraux profonds.

© Olivier Dugornay/Ifremer



principale espèce constructrice de récifs, *Lophelia pertusa*, est aussi la plus sensible aux modifications de l'environnement et aux stress associés. Autrement dit, on peut s'attendre à un changement des paysages sous-marins, avec la régression des récifs à *Lophelia pertusa* et de leur riche biodiversité au profit de coraux plus petits et abritant une faune moins abondante.

Cette perspective ressemble à ce qui se produit déjà dans les eaux tropicales de surface, où les coraux récifaux branchus régressent, laissant la place à des coraux plus massifs et moins attractifs pour la biodiversité. Aujourd'hui, ce sont donc tous les paysages récifaux coralliens, d'eau chaude comme d'eau froide, qui sont touchés et soumis à des modifications drastiques à cause des activités anthropiques.

COMMENT PROTÉGER CES ESPÈCES SENSIBLES ?

Nous autres scientifiques sommes en première ligne pour alerter et conduire les autorités à faire évoluer la législation afin de préserver la biodiversité et les fonctionnalités de ces habitats coralliens. Au-delà de l'interdiction du chalutage en eau profonde par l'Union européenne, nos travaux doivent maintenant permettre de mieux comprendre l'écologie de ces organismes. Nous étudions les caractéristiques biologiques des espèces dominantes dans une zone géographique donnée, la façon dont celles-ci répondent aux changements environnementaux locaux (cycles de reproduction, croissance, habitudes alimentaires), ainsi que l'évolution des interactions des différentes espèces de coraux.

Nos moyens d'expérimentation actuels, en aquarium et *in situ*, nous permettent de caractériser les impacts anthropiques sur le corail profond. Nous sommes désormais en mesure de mener des suivis temporels, grâce à des submersibles, conduits tous les ans sur des zones ateliers. Ainsi, depuis dix ans, nous avons effectué plusieurs missions dans le canyon Lacaze-Duthiers dans le cadre d'une chaire soutenue par la fondation Total et dirigée par Nadine Le Bris, de l'observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer.

Nous avons lancé, à bord du navire océanographique *Thalassa*, équipé du robot sous-marin *Ariane* (*voir la photo page 62, en bas*), un tel suivi cet été et pour les six prochaines années dans le canyon de Lampaul, en Atlantique, à 300 kilomètres au large de Brest. Une équipe composée notamment de chercheurs de l'Ifremer et de l'observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer y étudiera les habitats de coraux d'eau froide dans le cadre des campagnes scientifiques *Chereef* (pour *Characterization and ecology of cold-water coral reefs*) avec le soutien du projet européen *Life Marha*, qui a pour mission de rétablir et de maintenir le bon état de conservation des habitats naturels marins.

Par ailleurs, plusieurs outils juridiques aident à préserver ces coraux et leurs habitats et à mettre en place des plans de conservation. Les espèces sensibles comme *Lophelia pertusa* ou *Madrepora oculata* sont ainsi inscrites sur les listes rouges des espèces menacées de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). Elles sont également répertoriées dans le cadre de plusieurs conventions internationales et de directives européennes, elles-mêmes favorisées par la mise en place d'aires marines protégées.

Au-delà de ces outils, la sensibilisation du public est primordiale. Car la garantie de préserver ce patrimoine naturel passe d'abord par la découverte et l'émerveillement du plus grand nombre devant ces écosystèmes. En comprenant l'impact de ses propres actions, y compris dans ces milieux les plus reculés des grandes profondeurs, chacun peut se sentir concerné et agir. Nous pouvons par exemple modifier nos habitudes alimentaires et privilégier des produits issus d'une pêche durable, limiter nos achats d'objets en plastique et de vêtements en textiles synthétiques, rejeter moins de déchets, ou encore réduire notre empreinte carbone pour lutter contre le réchauffement climatique. C'est à ces conditions que les générations futures pourront continuer d'admirer ces récifs coralliens et profiter de leurs bienfaits. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Chapron *et al.*, **Long term monitoring of cold-water coral growth shows response to episodic meteorological events in the NW Mediterranean,** *Deep-Sea Research Part I*, vol. 160, article 103255, 2020.

L. Chapron *et al.*, **Macro- and microplastics affect cold-water corals growth, feeding and behaviour,** *Scientific Reports*, vol. 8, article 15299, 2018.

F. Lartaud *et al.*, ***In situ* growth of reef-building cold-water corals : the good, the bad and the ugly,** *Deep-Sea Research Part I*, vol. 121, pp. 70-78, 2017.

I. M. J. van den Beld *et al.*, **Cold-water coral habitats in submarine canyons of the Bay of Biscay,** *Frontiers in Marine Science*, vol. 4, article 118, 2017.

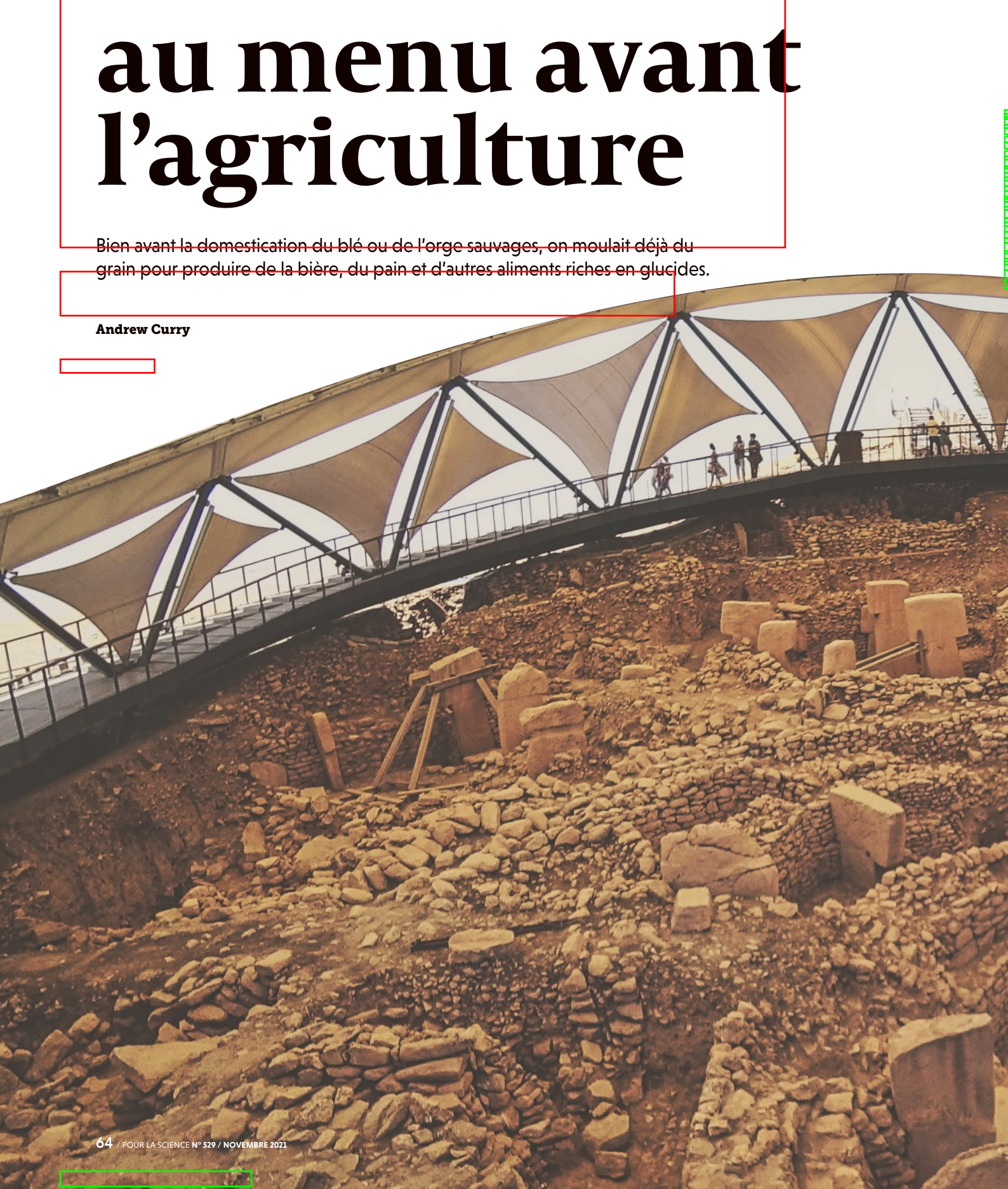
A. Freiwald, **Les coraux venus du froid,** *Hors-Série Pour la Science*, n° 104, pp. 14-21, août-sept. 2019.

© Fondation Total-UPMC-Parc naturel marin du Golfe du Lion (photos A, B, C) et Ifremer/ROV Victor 6000, BobEco, 2011 (photo D)

Des céréales au menu avant l'agriculture

Bien avant la domestication du blé ou de l'orge sauvages, on moulait déjà du grain pour produire de la bière, du pain et d'autres aliments riches en glucides.

Andrew Curry



Depuis les ruines de Göbekli Tepe, en Turquie, la vue porte par temps clair sur une cinquantaine de kilomètres, jusqu'à la frontière syrienne, au sud. Les piliers en forme de T et les enceintes circulaires à moitié enterrées dont est parsemé ce site archéologique, qui date de 11 600 ans, passent pour les vestiges des plus anciens temples de l'humanité ; ils sont en tout cas antérieurs aux plus anciennes céramiques du Moyen-Orient.

Les constructeurs de ces monumentales structures vivaient juste avant la révolution néolithique, cette transition majeure dans l'histoire humaine au cours de laquelle on a commencé à cultiver des céréales et à élever des animaux. L'absence de traces de céréales non sauvages à Göbekli Tepe suggère cependant que ses habitants n'étaient pas encore passés à l'agriculture. Les nombreux ossements retrouvés prouvent par ailleurs qu'il s'agissait de chasseurs accomplis. Les archéologues ayant mis au jour des traces de grands banquets, ils suggèrent que des clans nomades de chasseurs-cueilleurs de toute la région se retrouvaient de temps en temps pour de grandes fêtes à la grillade, festins de viandes qui les auraient amenés à bâtir les impressionnantes structures en pierre découvertes (*voir les figures pages 66 et 67 à gauche*).

Toutefois, cette vision est en train de changer à la suite des travaux de chercheurs et chercheuses telles que Laura Dietrich. Au cours des quatre dernières années, cette archéologue de l'Institut archéologique allemand, à Berlin, a mis

© Gettyimages/mlenny/Libre de droits

Göbekli Tepe (en turc « colline-ventre ») est un site préhistorique du sud-est de la Turquie sur le point culminant de la chaîne de montagnes du Germuş à 750 mètres d'altitude. Ce tell, c'est-à-dire cette colline archéologique, d'environ 15 mètres de haut et 300 mètres de long, s'est formé à la faveur d'occupations répétées de chasseurs-cueilleurs. On y a découvert ce qui passe pour les plus anciens temples de l'humanité : des enceintes ovales murées et semi-enterrées, parsemées de sortes de menhirs en forme de T portant des représentations d'animaux.

L'ESSENTIEL

> Bien avant les premiers paysans, les chasseurs-cueilleurs du Proche-Orient produisaient déjà des semoules, du pain et de la bière à partir de céréales récoltées dans la nature.

> Tout indique que, contrairement à ce que l'on croyait, les humains exploitent les végétaux riches en amidon depuis très longtemps.

> La cuisine expérimentale restitue les méthodes anciennes de préparation d'aliments à base de céréales, dont l'importance durant la préhistoire aurait incité à cultiver ces végétaux.

L'AUTEUR

ANDREW CURRY
journaliste scientifique à Berlin, en Allemagne

Article initialement publié sous le titre « The Ancient Carb Revolution » dans la revue *Nature* (vol. 594, pp. 488-491, 24 juin 2021), https://www.nature.com/articles/d41 586-021-01 681-w
© 2021 Springer Nature Limited

en évidence que les constructeurs de Göbekli Tepe consommaient aussi des cuves entières de gruau et de bouillie, produits à partir de grains moulus et transformés à une échelle quasi industrielle. Ainsi, les humains se sont nourris de céréales bien plus tôt qu'on ne le pensait, et même avant les premiers signes de domestication de ces plantes. Les travaux de Laura Dietrich s'inscrivent dans un effort scientifique croissant qui vise à examiner de plus près le rôle des céréales et des autres féculents dans le régime alimentaire des populations préhistoriques.

Les chercheurs utilisent un large éventail de techniques, qui va de l'étude des microtraces créées par les outils à l'analyse de résidus d'ADN contenus dans les récipients. Certains reconstituent expérimentalement les repas d'il y a 12000 ans par les méthodes de l'époque. Si l'on considère un passé encore plus lointain, des indices suggèrent que les humains consomment des végétaux riches en amidon depuis plus de 100000 ans. L'ensemble de ces découvertes met à mal l'idée longtemps dominante que les populations anciennes vivaient surtout de viande – une vision qui a encouragé le régime paléo, populaire aux États-Unis et ailleurs, dans lequel il est recommandé d'éviter les céréales et autres féculents.

Ces recherches récentes comblent une grande lacune dans la compréhension des régimes alimentaires préhistoriques. « Nous nous rapprochons de la masse critique de données nécessaire pour conclure qu'à cet égard nous avons manqué tout un pan de la réalité », pointe Dorian Fuller, archéobotaniste à l'université de Londres.

UN « JARDIN DES PIERRES »

Les découvertes de Laura Dietrich relatives aux festins de Göbekli Tepe ont commencé dans le « jardin des pierres ». C'est ainsi que les archéologues du site surnomment l'endroit où ils déversent, sur les débris produits par les fouilles, les meules en basalte, les auges en calcaire et les autres pierres taillées découvertes. Au cours des deux dernières décennies, cet amas de pierres taillées a lentement grossi, à mesure que se poursuivaient les fouilles. « Personne ne s'en préoccupait », se rappelle Laura Dietrich. Puis, en 2016, elle commença à répertorier ces artefacts (*voir la photo page 67*), et leur nombre la stupéfia. Le « jardin » couvrait une surface comparable à celle d'un terrain de football; il contenait plus de 10000 meules et près de 650 plats et autres récipients façonnés dans la pierre. Certains de ces récipients pouvaient contenir jusqu'à 200 litres de liquide.

« Aucun autre site du Proche-Orient n'a livré autant de meules, même ceux de la fin du Néolithique, qui datent d'une époque où l'agriculture était déjà bien établie, explique Laura Dietrich. Et Göbekli Tepe comporte aussi tout un éventail de pots de pierre de toutes les tailles imaginables. Pourquoi tant de récipients en pierre? » Selon elle, ils servaient à moudre du grain afin de produire de la bouillie et de la bière. Les archéologues affirment depuis longtemps que ces cuves en pierre prouvent la consommation cérémonielle de bière à Göbekli Tepe, mais ils considéraient cela comme un plaisir rare.

À Göbekli Tepe comme ailleurs, trouver des réponses à partir de pierres n'a rien de facile. Prouver la consommation de viande est archéologiquement bien plus facile que de mettre en évidence un repas à base de céréales ou d'autres plantes. Les os se fossilisent en effet bien plus

© N. Becker/Institut archéologique allemand ;

facilement que les restes d'un repas à base de plantes, tant les restes végétaux sont fragiles. C'est bien pourquoi les travaux archéobotaniques sont si longs et difficiles : les chercheurs utilisent des tamis, de fins filets et des seaux pour laver et séparer les débris archéologiques, en exploitant le fait que graines, morceaux de bois carbonisé et autres microfragments organiques flottent, au contraire des particules de terre et des pierres.

La plus grande part de ce qui surnage relève des ingrédients de base et consiste en particules qui ne sont pas entrées dans un récipient. En identifiant et en comptant les graines d'herbe, les grains de céréales et les pépins de raisin mélangés au sol, les archéobotanistes sont en mesure de déterminer ce qui poussait naturellement dans les environs d'un site. La présence de quantités inhabituelles d'une certaine espèce végétale indique que cette plante a pu être exploitée, voire cultivée, dans le passé.

Certaines des plus anciennes preuves de la domestication de plantes sont par exemple ces grains de petit épeautre (*Triticum monococcum*) découverts dans un site proche de Göbekli Tepe, dont la morphologie et la génétique diffèrent légèrement de celles des variétés sauvages. À Göbekli Tepe même, les grains retrouvés semblent tous provenir de formes sauvages, ce qui suggère que le site est antérieur à la domestication des céréales ou que celle-ci en était encore à ses débuts (les archéologues estiment que des siècles sont nécessaires avant que la sélection ne modifie la morphologie des grains).

Prouver directement que des grains étaient cuisinés est plus difficile. Pour établir ce que mangeaient les gens, les archéologues exploitent des indices négligés jusque-là, tels les fragments carbonisés de nourriture. Dans le passé aussi, il arrivait qu'on laisse cuire trop longtemps le gruau ou la bouillie, que l'on fasse tomber du pain dans l'âtre ou qu'on le brûle par mégarde au four. « Quiconque a cuisiné sait que ça brûle parfois », pointe Lucy Kubiak-Martens, archéobotaniste qui travaille pour BIAX Consult, société de conseil en archéologie biologique et en reconstruction environnementale sise aux Pays-Bas.

On examinait rarement ces restes de repas jusqu'à récemment tant ils sont difficiles à analyser. « C'est un matériau difficile ; il est fragile et affreux, explique Andreas Heiss, archéobotaniste de l'Académie autrichienne des sciences, à Vienne. La plupart des chercheurs s'en sont tenus à l'écart. » On nettoyait les tessons de poterie incrustés de restes alimentaires comme s'il s'agissait de vaisselle sale, ou alors on les jetait ; quant aux miettes carbonisées de « probable nourriture », elles étaient soit stockées sur étagère, soit jetées, parce qu'on les pensait impossibles à étudier.

DU LABORATOIRE À LA CUISINE

Pour faire évoluer cette situation, la première étape à franchir était de retourner à la cuisine. C'est ce qu'a fait Soultana Valamoti, de l'université Aristote de Thessalonique, en Grèce : cette archéobotaniste est en effet passionnée de cuisine. Elle a passé les premières années de sa carrière à trimballer seaux et tamis d'un site de fouille à l'autre à travers la Grèce, tout en recherchant dans les réserves des musées des restes de végétaux. Cet inventaire l'a convaincue que les restes de nourriture brûlée représentaient une mine inexploitée d'indices, à condition qu'elle parvienne à identifier ce qu'elle voyait.

Alors, il y a plus de vingt ans, Soultana Valamoti décida de transformer son laboratoire en cuisine expérimentale. Après avoir moulu et fait bouillir du blé pour obtenir du boulgour, elle le carbonisa au four afin de

Göbekli Tepe A avait une certaine organisation urbaine : de nombreuses maisons rectangulaires, dont les toits servaient de terrasses, entouraient les constructions spectaculaires, interprétées comme des temples (B, une restitution possible, de l'architecte Dieter Kurapkat). En C : l'archéologue Laura Dietrich en train de travailler dans le « jardin des pierres » de Göbekli Tepe.

© J. Notroff, sur reconstruction architecturale de D. Kurapkat (B) ; Laura Dietrich/Institut archéologique allemand (C)

Dans un foyer découvert en Jordanie sur le site de Shubayqa 1, les archéobotanistes ont mis au jour des miettes de nourriture ressemblant à du pain. Shubayqa 1 relève de la culture natoufienne, une culture préhistorique du Levant datant de 14 500 à 11 500 ans avant le présent.

simuler un ancien accident de cuisson. Elle compara ses échantillons à d'autres provenant d'un site de Grèce du nord vieux de plus de 4 000 ans, et put montrer que les blés calcinés récents et anciens se ressemblaient, ce qui faisait remonter la préparation de céréales par cuisson à l'âge du Bronze.

Elle poursuivit ses expériences au cours de la décennie suivante. À partir de 2016, une subvention du Conseil européen de la recherche lui permit de créer une collection de référence de plus de 300 types d'échantillons carbonisés anciens ou expérimentaux.

CARBONISATIONS CONTRÔLÉES

À cette fin, à partir de variétés anciennes de blé et d'orge, elle prépare et cuit de la pâte à pain, du gruau, du boulgour et du trahana (une sorte de semoule au lait caillé traditionnelle en Grèce), avant de carboniser chaque échantillon dans un four en conditions contrôlées. Ensuite, elle observe avec un grossissement, de 750 à 1 000, ses croustillantes préparations afin d'identifier les changements de structure cellulaire associés aux différentes cuissons. Qu'elles soient bouillies ou fraîches, moulues ou entières, séchées ou trempées, les céréales, à fort grossissement, ont toutes un aspect différent. La cuisson du pain laisse par exemple des bulles révélatrices, tandis que faire bouillir des céréales avant de les carboniser gélatinise l'amidon, explique Soultana Valamoti. « Et nous pouvons voir tout cela au microscope électronique à balayage. »

En comparant des échantillons anciens et récents, Soultana Valamoti a pu dépasser le stade de la simple identification des espèces végétales et reconstituer les plats à base de céréales et les modes de cuisson de l'Antiquité grecque. Nombre d'indices suggèrent que l'on mange du boulgour en Grèce depuis au moins 4 000 ans. En faisant bouillir de l'orge ou du blé, puis en le séchant afin de pouvoir le stocker et le réhydrater rapidement plus tard, les Anciens « profitaient de la chaleur du soleil pour traiter toute la récolte d'un coup, explique-t-elle. Ils pouvaient ainsi l'utiliser tout au long de l'année. C'était la restauration rapide du passé. »

D'autres chercheurs s'intéressent aussi aux accidents de cuisson du passé. Les miettes alimentaires carbonisées « nous fournissent des indices directs sur l'alimentation », explique Amaia Arranz-Otaegui, archéobotaniste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. « Leur étude est révolutionnaire, car elles constituent une source d'information sans précédent. »

Dans le passé, prouver de façon tangible que nos lointains ancêtres mangeaient des végétaux était difficile. « Nous nous sommes toujours doutés que l'amidon faisait partie du régime alimentaire des hominines anciens et des premiers *Homo sapiens*, mais nous n'en avions pas la preuve », souligne Lucy Kubiak-Martens.

L'étude de notre ADN suggère en effet que les humains consomment de l'amidon depuis longtemps. Des généticiens ont par exemple rapporté en 2016 que notre ADN possède

© Alexis Pantos

davantage de copies du gène produisant les enzymes permettant de digérer l'amidon que l'ADN de tous les autres primates. « Les humains en ont jusqu'à vingt copies, tandis que les chimpanzés en ont deux », indique Cynthia Larbey, archéobotaniste à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni. Cette évolution de nos gènes a influencé le régime alimentaire de nos ancêtres et influence aujourd'hui le nôtre. « Cela suggère que les régimes alimentaires riches en amidon représentent un avantage sélectif. »

Afin d'essayer de trouver des indices archéologiques de cette évolution génétique, Cynthia Larbey s'est intéressée à des restes de foyers datant de 120 000 ans et découverts en Afrique du Sud. Elle y a prélevé des miettes végétales carbonisées, certaines de la taille d'une cacahuète, puis a identifié à l'aide de la microscopie électronique à balayage la présence de tissus cellulaires de plantes amylacées – l'indication la plus ancienne que des humains ont cuisiné des plantes riches en amidon. « De 120 000 à 65 000 ans avant le présent, ils ont consommé des racines et des tubercules qui en contenaient, précise-t-elle. Les traces de leur préparation sont remarquablement cohérentes, particulièrement en comparaison avec les restes des animaux consommés. Au fil du temps, les humains changent de techniques et stratégies de chasse, mais ils continuent de cuisiner et de consommer des végétaux. »

La vieille idée que les chasseurs-cueilleurs ne consommaient pas de glucides est fausse

Les anciens humains avaient probablement un régime alimentaire diversifié, s'appuyant sur des plantes riches en amidon et en calories lorsque le gibier devenait rare ou difficile à chasser. « La possibilité de trouver des glucides pendant leurs déplacements vers de nouveaux écosystèmes leur a fourni des aliments de base cruciaux », souligne Cynthia Larbey.

Nombre d'indices suggèrent que les Néandertaliens aussi consommaient des végétaux. En 2011, Amanda Henry, paléoanthropologue aujourd'hui en poste à l'université de Leyde, aux Pays-Bas, a publié son étude de plaques dentaires de Néandertaliens datant d'il y a 46 000 à 40 000 ans, découverts en Belgique et en Iran. Les microfossiles de plantes qui y ont été piégés et préservés ont révélé que les Néandertaliens cuisinaient et mangeaient des aliments riches en amidon, notamment des tubercules, des céréales et des dattes. « Les plantes sont omniprésentes dans notre environnement, fait remarquer Amanda Henry, et il n'est donc pas surprenant que nous les exploitions. »

En mai 2021, Christina Warinner, paléogénéticienne à l'université Harvard, et ses collègues ont fait savoir qu'ils avaient extrait de l'ADN bactérien de plaques dentaires néandertaliennes, dont celle d'un fossile serbe vieux de quelque 100 000 ans. Or certaines des bactéries mises en évidence sont spécialisées dans la transformation de l'amidon en sucres, ce qui confirme l'idée que les Néandertaliens étaient déjà adaptés à un régime riche en végétaux. Les plaques dentaires des premiers humains modernes présentent un profil bactérien similaire, ce qui illustre qu'ils consommaient aussi des végétaux riches en amidon.

Ces découvertes vont à l'encontre du cliché selon lequel nos ancêtres ne se seraient nourris que de steaks de mammouth grillés au feu. C'est une idée qui a pénétré la culture populaire, les partisans du régime paléo soutenant que nous devrions éviter de consommer céréales, pommes de terre et autres féculents parce que nos ancêtres chasseurs-cueilleurs n'étaient pas adaptés, sur le plan de l'évolution, pour en manger. Il est au contraire clair aujourd'hui que les humains du passé ont cuisiné et consommé des glucides pratiquement dès qu'ils ont su faire du feu. « La vieille idée que les chasseurs-cueilleurs ne consommaient pas de glucides est fausse », assène Dorian Fuller.

DES CUISINIERS INVISIBLES

Pour mieux saisir la cuisine préhistorique, encore faut-il s'intéresser aux cuisiniers eux-mêmes. La démarche s'inscrit dans le cadre d'un intérêt de plus en plus grand des archéologues pour les activités ménagères et la vie quotidienne. « Pour l'essentiel, nous essayons de rassembler le plus d'information possible sur des gens qui n'ont pas d'histoire », explique Sarah Graff, archéologue à l'université d'État de l'Arizona à Tempe.

Lorsque les archéologues tombaient sur des restes végétaux, ils les considéraient souvent comme des « écofacts » accidentels – c'est-à-dire comme des objets issus de la nature tels que graines, pollen, bois brûlé, qui renseignent sur le type de plantes poussant dans une région. Aujourd'hui, les restes alimentaires sont de plus en plus considérés comme des illustrations d'activités demandant un certain art, du savoir-faire et démontrant des intentions. « Il faut

considérer les préparations alimentaires comme des artefacts plutôt que comme des écofacts, estime Dorian Fuller. Pour préparer de la nourriture, il faut en effet chauffer, laisser fermenter ou tremper… ce qui apparente sa fabrication à celle des céramiques.»

Or comme les chercheurs collaborent de plus en plus, ils ont l'occasion de comparer les vestiges de nourritures provenant d'époques et de cultures différentes. Ce fut le cas par exemple lorsque des archéologues découvrirent en Autriche des restes carbonisés de forme inhabituelle dans plusieurs sites néolithiques datant de plus de 5000 ans.

C'était comme si le contenu liquide de grandes jarres ou de pots de terre avait été chauffé jusqu'à ce qu'une croûte se forme à l'intérieur et commence à se carboniser. Les archéologues ont d'abord pensé que ces curieuses croûtes brûlées s'étaient formées au sein de jarres servant à stocker les céréales, lors d'un incendie. Mais un examen au microscope électronique à balayage a révélé que les parois cellulaires des grains étaient anormalement minces: le signe, selon Andreas Heiss, qu'un autre processus avait été à l'œuvre. Après comparaison des croûtes autrichiennes avec celles trouvées en fouillant d'anciennes brasseries égyptiennes, Andreas Heiss et Soultana Valamoti conclurent que ces croûtes étaient des résidus de maltage, une étape cruciale du brassage. Ainsi, ces anciens paysans autrichiens brassaient de la bière. «Nous avons abouti à une conclusion complètement différente des hypothèses précédentes, commente Andreas Heiss. Plusieurs éléments de preuves se sont emboîtés et tout s'est mis en place.»

DU PAIN IL Y A 14 500 ANS !

Le pain semble remonter encore plus loin dans le temps. Dans les restes de foyers d'une station de chasseurs-cueilleurs vieille de 14 500 ans découverte en Jordanie (*voir la photo page 68*), Amaia Arranz-Otaegui a découvert des miettes carbonisées de «nourriture probable». Après en avoir pris des images au microscope électronique à balayage, elle les montra à sa collègue Lara González Carretero, qui travaille sur les traces de cuisson du pain sur le site néolithique turc Çatalhöyük au service d'archéologie des musées de Londres. Les deux chercheuses eurent un choc: les bulles visibles sur les croûtes jordaniennes étaient caractéristiques et prouvaient qu'il s'agissait de miettes de pain. La plupart des archéologues supposaient que le pain n'est apparu qu'après la domestication des céréales, soit quelque 5000 ans après l'accident culinaire en question. Il semble donc que les premiers boulangers de Jordanie utilisaient du blé sauvage.

Il s'agit là d'indices cruciaux sur les origines de la révolution néolithique, lorsque les humains ont commencé à se sédentariser et à domestiquer des céréales et des animaux, ce qui s'est produit à différentes époques dans diverses régions du monde. Avant l'avènement de l'agriculture, une miche de pain était un produit de luxe qui nécessitait un travail long et fastidieux de récolte des céréales sauvages. Autant de difficultés qui ont peut-être contribué à déclencher des changements cruciaux.

L'archéologue Laura Dietrich reproduit ici la mouture de grains d'épeautre sauvage sur l'une des meules provenant de Göbekli Tepe *(ci-dessus)*. En étudiant de près l'effet de cette activité sur les meules en basalte utilisées, elle a montré que c'était surtout une semoule assez grossière *(en haut à droite)*, convenant à la cuisson de bouillie ou au brassage de bière, que l'on produisait en abondance à Göbekli Tepe.

Les recherches d'Amaia Arranz-Otaegui suggèrent que, au Proche-Orient du moins, le goût pour le pain pourrait être l'un des facteurs qui ont poussé les gens à essayer de cultiver des céréales, afin d'assurer un approvisionnement constant. «Ce que nous observons en Jordanie a de plus larges implications sur la transition vers l'agriculture, l'une des plus grandes questions de l'archéologie, commente Amaia Arranz-Otaegui. Cela montre en tout cas que les chasseurs-cueilleurs consommaient des céréales.»

Une prochaine étape de la recherche archéobotanique concerne aussi la question des «bars à salades» préhistoriques: les chasseurs-cueilleurs mangeaient-ils également des aliments non cuits? Les chercheurs s'efforcent d'en trouver des traces, notamment celles de légumes verts à feuilles, une composante du régime alimentaire préhistorique souvent négligée. Les traces de légumes crus étant bien plus rares dans les archives archéologiques que celles de graines et de céréales cuites, Lucy Kubiak-Martens les qualifie de «chaînon manquant» des régimes alimentaires anciens.

«À partir de restes carbonisés, on ne peut pas prouver que des feuilles vertes étaient consommées, explique-t-elle. Toutefois, vous seriez surpris par la quantité de légumes verts présente dans les coprolithes humains [excréments fossilisés].» En 2019, Lucy Kubiak-Martens a obtenu une subvention afin d'examiner des

© Laura Dietrich/Institut archéologique allemand

coprolithes humains vieux de 6300 ans, qui se sont conservés dans certaines zones humides des Pays-Bas. Elle espère révéler ce que les paysans préhistoriques de sa région avaient à leur table.

RECRÉER DES REPAS ANCIENS

La volonté de restituer les régimes alimentaires préhistoriques conduit certains chercheurs à adopter des mesures extrêmes. C'est le cas avec Göbekli Tepe, qui a livré très peu de restes organiques susceptibles de livrer des indices sur les repas à base de végétaux. Laura Dietrich a donc tenté une approche innovante, avec beaucoup d'huile de coude : récréer les instruments utilisés pour cuisiner, plutôt que les préparations culinaires elles-mêmes.

Dans son laboratoire de plein air installé dans une rue très arborée de Berlin, elle explique sa procédure, chronophage et physiquement exigeante. Cela commence par la prise d'images sous 144 angles différents d'une réplique de meule – un bloc de basalte noir de la taille d'un petit pain qui tient très bien dans la paume de sa main (*voir la photo ci-dessus*). Puis, après avoir passé huit heures à moudre quatre kilogrammes d'épeautre (*voir la photo page ci-contre*), Laura Dietrich photographie à nouveau la pierre. À partir des deux séries de photos, un logiciel produit ensuite des modèles tridimensionnels permettant d'apprécier l'évolution de la surface de la pierre. Ses essais montrent que la mouture de grains ne laisse pas les mêmes traces sur les meules selon qu'elle vise à produire une farine fine destinée à du pain ou une semoule grossière idéale pour préparer du gruau ou brasser de la bière.

Aujourd'hui, après avoir manipulé des milliers de meules, elle est souvent capable d'identifier au toucher à quoi elles servaient. « J'apprécie du bout des doigts le type de lissage des pierres, explique-t-elle. Les doigts peuvent percevoir des changements à l'échelle nanométrique. » En comparant l'usure de ses répliques modernes à celle des pierres empilées dans la rocaille de Göbekli Tepe, Laura Dietrich a montré que la farine à pain, finement moulue, constitue l'exception. Dans une étude publiée en 2020, elle avance que, dans la région, on broyait les céréales grossièrement, juste assez pour briser la couche extérieure dure du son et faciliter leur cuisson et leur consommation sous forme de bouillie, ou leur fermentation en bière.

« UN PEU AMER, MAIS BUVABLE »

Pour tester cette hypothèse, Laura Dietrich a demandé à un tailleur de pierre de sculpter une réplique de cuve en pierre de 30 litres provenant de Göbekli Tepe. En 2019, elle et son équipe ont réussi à y cuisiner du porridge à l'aide de pierres chauffées, tout en enregistrant et chronométrant chaque étape du processus. Les chercheurs ont aussi brassé dans une cuve ouverte une bière de type néolithique à partir de grains germés moulus à la main – ce que l'on nomme du malt. Le résultat était « un peu amer, mais buvable – si vous aviez soif au Néolithique. »

Les meules et les autres outils de transformation de végétaux découverts à Göbekli Tepe nous livrent une vision de la vie en ces lieux il y a 12000 ans. Il est clair que les bâtisseurs de Göbekli Tepe ne faisaient pas leurs premiers essais avec les céréales sauvages, mais qu'il s'agissait bien de véritables protoagriculteurs, familiarisés depuis longtemps avec les possibilités de la cuisson des céréales. « J'ai vu beaucoup de meules à grains, mais celles de Göbekli Tepe sont les meilleures que je connaisse, témoigne Laura Dietrich. Les habitants de Göbekli Tepe savaient ce qu'ils faisaient et ce que l'on peut tirer de céréales. Ils avaient dépassé depuis longtemps la phase des expérimentations. »

Les expériences menées par Laura Dietrich et ses collègues changent la vision de Göbekli Tepe et de la période pendant laquelle le site a été construit. Dans leurs premières interprétations, le site était un peu comme la maison de fraternité d'une université américaine : des chasseurs s'y rassemblaient lors de célébrations occasionnelles pour griller de la viande d'antilope, qu'ils consommaient en buvant des cuves entières de bière tiède. « Personne n'avait vraiment envisagé la consommation de plantes à grande échelle », souligne Laura Dietrich.

Dans une étude publiée à la fin de 2020, Laura Dietrich suggère donc que l'interprétation « barbecue et bière » est fausse. À Göbekli Tepe, le grand nombre d'instruments de transformation de céréales suggère que, bien avant l'agriculture, les céréales étaient déjà un aliment de base quotidien, et pas seulement un ingrédient dans la préparation occasionnelle de boissons fermentées. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. M. Valamoti *et al.*, **Deciphering ancient "recipes" from charred cereal fragments [...]**, *J. of Arch. Science*, vol. 128, article 105347, 2021.

L. Dietrich et M. Haibt, **Bread and porridge at Early Neolithic Göbekli Tepe [...]**, *J. of Arch. Science Reports*, vol. 33, article 102525, 2020.

L. Dietrich *et al.*, **Cereal processing at Early Neolithic Göbekli Tepe, southeastern Turkey**, *PLoS One*, vol. 14(5), article e0215214, 2019.

A. Arranz-Otaegui *et al.*, **Archaeobotanical evidence reveals the origins of bread 14,400 years ago in northeastern Jordan**, *PNAS*, vol. 115(31), pp. 7925-7930, 2018.

M. Heun *et al.*, **Site of einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting**, *Science*, vol. 278, pp. 1312-1314, 1997.

© Laura Dietrich/Institut archéologique allemand

L'ESSENTIEL

> Dans les années 1830, le jeune avocat se prit de passion pour la paléontologie à la suite de la découverte, dans des couches stratigraphiques anciennes, de fossiles d'animaux près de son domaine gersois.

> Convaincu par cette découverte que l'histoire de l'humanité était bien plus ancienne que ne le suggérait la Bible, il partit en quête de fossiles humains.

> Mais le hasard voulut qu'il mette au jour en 1836 le premier primate fossile européen jamais exhumé : la mandibule d'un petit singe.

> Vingt ans plus tard, dans une petite grotte à Aurignac, en Haute-Garonne, il trouva les traces d'une sépulture près de débris animaux éteints, preuves de leur ancienneté.

L'AUTRICE

NATHALIE ROUQUEROL
préhistorienne spécialisée en histoire de la préhistoire, ancienne directrice du musée de l'Aurignacien, à Aurignac

Édouard Lartet
sur les traces de l'homme fossile

Édouard Lartet est de ces érudits du XIXe siècle dont nous n'avons pas toujours retenu le nom. Pourtant, il a posé l'un des premiers jalons de la longue histoire de l'homme.

Évoquer Édouard Lartet, c'est ouvrir une fenêtre sur un milieu social et scientifique tour à tour local, national et international. De l'avocat, notable gersois, au professeur titulaire de la chaire de paléontologie au Muséum national d'histoire naturelle de Paris se déploie une trajectoire originale, dans ce XIXe siècle où peu de naturalistes sont professionnels. À part le cénacle des académiciens et professeurs (souvent les mêmes), beaucoup sont des personnalités passionnées issues de divers milieux instruits.

Connu de tous les préhistoriens, mais peu du grand public, comme fondateur de la préhistoire après son contemporain Jacques Boucher de Perthes, ce personnage, dont on célèbre cette année les 150 ans de sa mort, méritait une enquête approfondie. Apparaît alors au grand jour son rôle majeur dans la reconnaissance définitive de l'existence de nos ancêtres et les combats multiples qu'il a dû mener contre les adversaires de la haute antiquité de l'homme. Car l'histoire humaine se libérait de fait du texte biblique et de ses quelques milliers d'années seulement.

Dans cet engagement de toute une vie, Lartet a été servi par son sérieux, son caractère réservé et respectueux, son attachement à la vérité et à la probité, ses intuitions et son travail acharné, mais aussi par une chance insolente.

Édouard Lartet (1801-1871)

© Collection privée, cliché N. Rouquerol

Pliopithecus, le singe fossile découvert par Édouard Lartet, ici sur une reconstitution d'Alice B. Woodward publiée en 1912 dans *Evolution in the Past*, de Henry Knipe.

© Cliché E. Buffetaut

La géologie « positive » – c'est-à-dire déchargée d'une encombrante métaphysique – s'installe dans le paysage scientifique des années 1830. Elle s'institutionnalise précisément au moment de la révolution de Juillet, en 1830, et de la fuite de l'ultraroyaliste Charles X qui venait de dissoudre la Chambre des députés nouvellement élue au suffrage censitaire. Les fondateurs de la Société géologique de France réclament à Louis-Philippe, son successeur sur le trône, la liberté pour l'étude de la nature.

La paléontologie française des vertébrés s'enorgueillit alors surtout des travaux de Georges Cuvier, professeur au Muséum – par ailleurs homme politique de premier plan –, avec ses ouvrages illustrés de planches, authentiques nouveautés où les mammifères fossiles sont étalés à chaque page. Pour les « invertébrés », les naturalistes disposent des travaux de Jean-Baptiste Lamarck, d'une remarquable utilité pour tous les géologues, les coquilles étant des marqueurs privilégiés. Tous deux (et d'autres) enseignent au Muséum depuis sa transformation, en 1793, à partir du jardin du Roi.

Ces disciplines sont donc bien jeunes, mais dynamiques, et leurs défenseurs sont portés par la curiosité, mais aussi par le besoin de connaître, dans un but économique, les richesses naturelles enfouies. Deux écoles principales se distinguent : les partisans de l'évolution par la transformation des espèces, comme Lamarck, puis Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, et, à l'opposé, les tenants de la fixité des espèces, leur immutabilité issue de la Création une, unique et initiale, tels Cuvier puis Henri de Blainville, son successeur.

AVOCAT GERSOIS EN STAGE À PARIS

Le siècle avait un an lorsque naît Édouard Lartet dans une métairie du domaine d'En Poucouron, à Saint-Guiraud, dans le Gers. Il est le dernier enfant d'une fratrie qui comptera un médecin, un avocat et un magistrat. Brillant élève, il est titulaire d'un diplôme de droit et s'inscrit comme avocat stagiaire au barreau de Paris. Il séjourne en effet dans la capitale à peu près deux ans, cohabitant avec son frère avocat à l'extrémité ouest de l'île de la Cité, derrière le Palais de Justice. Il exerce un temps cette profession, mais il reste, dit-on, marqué par les galeries du Muséum qu'il visite souvent et les cours dispensés par les maîtres naturalistes du moment.

Dans sa région natale affleurent de nombreux terrains miocènes, c'est-à-dire vieux de 23 à 5 millions d'années, comme on le datera plus tard, bien visibles à l'occasion des fréquents chantiers de modernisation des routes et chemins. Du reste, les ingénieurs des ponts et chaussées sont d'intéressants contacts pour les paléontologues. Mais peu de gens s'intéressent à ces portions de défenses fossiles, les « cornes du diable » (*voir l'encadré page ci-contre*). Pourtant, d'imposantes dents à « collines » ou des os et des mâchoires d'une longueur et d'une épaisseur insolites sortent de terre.

Le château qu'habite Lartet jeune adulte, propriété de 230 hectares héritée par son frère aîné médecin, est situé à Ornézan, village du Gers bordé au nord par Sansan, autre petit village au nom comme sorti d'un conte de fées. Plusieurs de ses habitants sont ouvriers agricoles chez les Lartet. C'est ainsi qu'une grosse dent à collines, trouvée au sommet d'un mamelon de Sansan, est apportée par l'un d'eux.

À une lieue et demie de son domicile s'ouvre alors un chantier unique, d'une richesse inouïe, qui, à Paris, stupéfie les professeurs rapidement contactés. Ceux-ci deviennent destinataires de nombreux envois de caisses en bois (de centaines de kilos) contenant une faune fossile en partie inconnue : voici le *Dicrocerus elegans*, petit cervidé dont les interminables troupeaux, assoiffés par la chaleur tropicale, s'abreuvaient au bord des marécages miocènes, il y a quinze millions d'années (une durée que Lartet ne pouvait mesurer) ; *Amphicyon major*, carnivore puissant aux caractères félins et pourtant plantigrade ; pas moins de quatre espèces de rhinocéros (*Hoploaceratherium tetradactylum*, *Lartetotherium sansaniense*, *Aceratherium* [*Alicornops*] *simorrense*, *Brachypotherium brachypus*) avec ou sans cornes, à trois ou à quatre doigts, et aussi des proboscidiens dont le plus grand de tous, *Deinotherium giganteum*, ou *Archaeobelodon filholi* et bien d'autres quadrupèdes comme *Sansanosmilus sansaniense* qui inaugure la canine « dent de sabre », *Anisodon grande*, que Lartet surnommait le « pangolin géant », un étrange périssodactyle (chalicothère) lointainement apparenté aux chevaux et aux rhinocéros ; mais encore des oiseaux, des reptiles, des graines aussi.

À LIRE

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *Espèces*, après parution dans son n° 40, pp. 48-54, juin 2021, https://especes.org.

Deux molaires à collines (crêtes ou lophides) de *Gomphotherium angustidens*, nommé initialement par Cuvier « mastodonte à dents étroites », puis par Lartet *Mastodon simoghorensis* (nom antique de Simorre, dans le Gers), ici montées sur du plâtre.

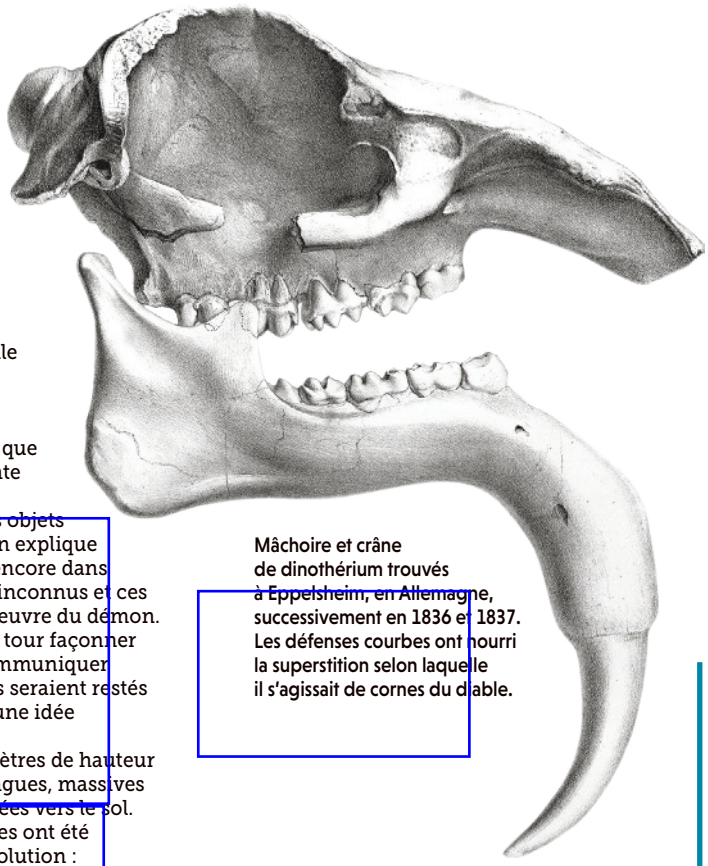
© Collection Lartet, université Paul Sabatier, Toulouse, déposée au musée de l'Aurignac (Aurignac, Haute-Garonne).

LES CORNES DU DIABLE EN TERRE DE GASCOGNE

En 1783, près du village d'Alan en Haute-Garonne, le chasseur attaché au palais des Évêques du Comminges avait vendu au trésorier des États du Languedoc, M. Philippe de Joubert, deux demi-mâchoires trouvées non loin du village, chacune armée de cinq dents énormes. Ces magnifiques spécimens furent ensuite vendus au marquis de Drée – dont la collection est entrée au Muséum. Ainsi, Cuvier, le professeur d'anatomie comparée, avait pu les reproduire dans ses *Recherches sur les ossemens fossiles de quadrupèdes* (1812) ; il attribuait ces molaires à un tapir fossile gigantesque. Mais le chasseur avait brisé en deux parties ces imposantes mandibules pour les transporter plus facilement, dit-on. S'agissait-il seulement de les déplacer plus aisément ?

Averti de trouvailles diverses, Lartet se rend aussi souvent que possible sur les lieux, espérant répondre à la demande pressante du professeur Blainville et trouver des débris du dinothérium. Malheureusement, il revient souvent déçu car, entretemps, les objets ont été cassés, voire détruits. Dépité, l'avocat-paléontologue en explique la raison dans *Notice sur la colline de Sansan* : « On retrouve encore dans nos campagnes la croyance traditionnelle que ces ossements inconnus et ces coquilles pétrifiées enfouies dans nos terrains anciens sont l'œuvre du démon. Le diable, jaloux des créations du bon Dieu, aurait voulu à son tour façonner des formes animales, mais il ne serait point parvenu à leur communiquer la vie et le mouvement ; les débris de ces ébauches imparfaites seraient restés ensevelis dans les profondeurs du sol. » Avatar christianisé d'une idée qui remonte à Empédocle (v^e siècle avant notre ère).

Il se trouve que le dinothérium (géant de près de quatre mètres de hauteur au garrot) possède deux incisives à la mâchoire inférieure, longues, massives et en arc de cercle, deux défenses, donc, curieusement incurvées vers le sol. Fréquentes en Gascogne et parfois seuls vestiges fossilisés, elles ont été accusées d'être les cornes du diable « lui-même ». Une seule solution : s'armer de courage et les briser au plus vite.



Mâchoire et crâne de dinothérium trouvés à Eppelsheim, en Allemagne, successivement en 1836 et 1837. Les défenses courbes ont nourri la superstition selon laquelle il s'agissait de cornes du diable.

Cette faune inattendue fait rapidement la renommée du jeune passionné, à tel point que le professeur Blainville lui « passe commande » des fossiles qu'il souhaite étudier, les pattes du *Deinotherium*, par exemple, que personne n'a encore trouvées, ni en France ni ailleurs. Puis Blainville demande à Lartet de se mettre en quête de… l'humain.

Un peu subventionné, le paléontologue gersois organise autant de campagnes de fouilles que possible pendant les saisons agricoles creuses. Par tombereaux entiers, il fait rapporter ossements et sédiments à tamiser, extrait au petit marteau les fossiles de leur gangue tenace et accumule ses objets d'étude dans la tour du château médiéval restauré. Il se forme « sur le tas », bientôt aidé par l'ancien secrétaire de Cuvier et paléontologue pointu, le discret Charles Laurillard avec lequel il entretient une correspondance très formatrice et technique.

À l'autre bout du monde, un Écossais, Hugh Falconer, directeur du jardin botanique de Saharanpur (appartenant à la Compagnie des Indes), travaille à l'introduction de la culture du thé sur les pentes de la chaîne de basses montagnes située au piémont sud de l'Himalaya, les Siwaliks. Passionné de paléontologie lui aussi, herborisant sans doute, il arpente la région avec quelques collègues ou amis. Les fossiles y sont nombreux, inconnus souvent, telle cette extravagante tortue terrestre (*Testudo atlas*, aujourd'hui dans le genre *Gigantochelys*) dont le périmètre de la carapace avoisinerait six mètres.

Pendant l'été 1836, au cours de l'une de ces courses paléontologiques, Falconer collecte un petit astragale. Sa forme l'intrigue, il le met dans sa poche où il ne prend pas beaucoup de place et y reste. Il a bien une idée quant à son propriétaire, mais n'est pas tout à fait sûr et préfère attendre avant d'en parler.

LE RENDEZ-VOUS DES SINGES

Le 18 novembre 1836, Falconer sort enfin l'astragale de sa poche, effectue des comparaisons et vérifie avec le talus d'un animal actuel : il est convaincu que le petit os est bien celui d'un singe fossile. Il prépare alors, avec son compagnon de fouilles, Proby Cautley, une lettre qu'ils envoient en Grande-Bretagne pour qu'elle soit lue aux membres de la Société géologique de Londres. Il ajoute dans le colis le talus avec lequel il a fait le rapprochement.

Au même moment, d'autres Britanniques explorent la même zone. William Baker et Henry Durand, deux ingénieurs de l'armée du Bengale

H.-M. Ducrotay de Blainville, Ostéographie, tome 3, 1839-1864 © N. Rouquerol

chargés des canaux, partageant cette même passion, découvrent une mâchoire inédite qui, à n'en pas douter, appartenait à un singe, «a gigantic ape». S'agirait-il du yéti, l'abominable homme des neiges popularisé au XXe siècle?

Une semaine après, le 26 novembre, Baker et Durand s'empressent d'annoncer, dans la revue savante locale, le *Journal of the Asiatic Society of Bengal*, la découverte de l'hémimandibule d'une gigantesque espèce de quadrumane, un primate donc, et de grande taille (semnopithèque).

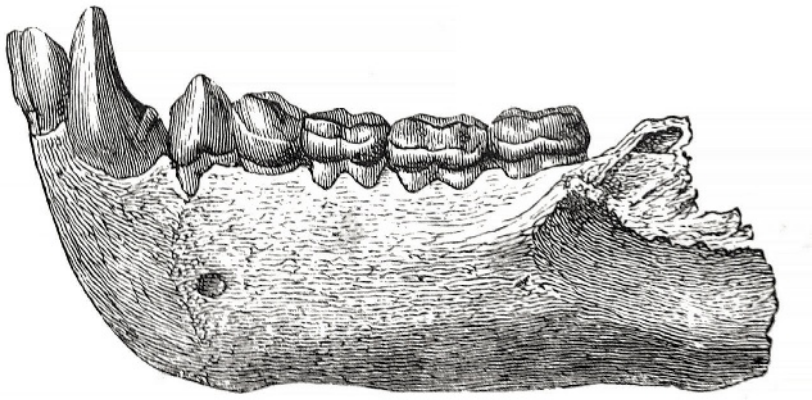
UNE MANDIBULE À PEINE PLUS GRANDE QUE CELLE D'UN CHAT

En France, les travaux des champs étant au point mort, Lartet a mobilisé une équipe de villageois fouilleurs pour continuer les recherches à Sansan et, le 2 décembre 1836, un ouvrier lui pose dans la main, à l'instant extraite du sol, une toute petite mâchoire, à peine plus grande que celle d'un chat. La dentition est complète, les condyles sont fracturés. La mandibule du premier primate fossile européen vient de sortir de la terre gersoise. Pour Lartet, l'animal se rapproche du gibbon.

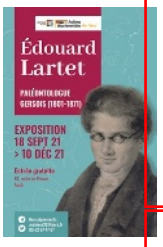
L'hypothèse de la date du 2 décembre est plausible à la lecture des correspondances échangées avec Jules Desnoyers, bibliothécaire au Muséum et historien. L'autre interprétation possible – car une lettre s'est perdue en chemin entre Ornézan et le Muséum – est que la découverte du petit singe de Sansan (*Pliopithecus antiquus*) ait eu lieu entre le 2 et le 13 décembre 1836.

Les coïncidences sont souvent troublantes: entre le 18 novembre, donc, et au plus tard le 13 décembre 1836, soit en moins d'un mois, l'humanité prenait connaissance, autant dire presque simultanément, de l'existence, en Europe comme au sud de l'Himalaya, de primates fossiles de l'Ancien Monde. Ainsi, il est correct de dire que Lartet a découvert le premier singe fossile d'Europe. Falconer est le grand perdant de l'histoire, car sa lettre, datée du 18 novembre 1836, n'a été lue aux membres de la Société britannique que six mois plus tard. Quant à Baker et Durand, s'ils ont été les premiers à publier, ils n'ont pas été les premiers à découvrir.

En réalité, la priorité des découvertes de primates fossiles doit être donnée à Falconer, puis à Baker et à Durand, et enfin à Lartet. Mais en ce qui concerne les publications, la première parue est celle de Baker et Durand, la deuxième celle de Lartet, la troisième celle de Falconer et Cautley. Ces circonstances n'ont pas empêché Lartet et Falconer, de retour en Angleterre, de devenir de grands amis. Les deux savants confrontaient, vigoureusement parfois, des points de vue différents sur leurs sujets communs, les rhinocéros ou les grands proboscidiens, par exemple.



Mâchoire de *Pliopithecus antiquus* trouvée sur la colline de Sansan (longueur 5,5 centimètres).



À VOIR

À l'occasion du 150e anniversaire du décès d'Édouard Lartet, retrouvez sa vie et son œuvre au fil de l'exposition Édouard Lartet, paléontologue gersois (1801-1871), jusqu'au 10 décembre 2021 aux Archives départementales du Gers, à Auch. Outre des objets emblématiques issus de plusieurs collections publiques et privées, d'importants documents biographiques, dont un magnifique fonds de correspondances récemment versé, éclairent la carrière du paléontologue gersois.

Le 17 janvier 1837, en France, soit moins d'un mois après la découverte de primates fossiles en Europe, grâce aux conseils avisés et à l'entregent de Desnoyers, l'Académie des sciences dévoile cette information de la plus haute importance. La nouvelle gersoise fait sensation et Étienne Geoffroy Saint-Hilaire, professeur de zoologie et tenant du transformisme, prend la mesure de sa signification au moment même où il travaille sur les primates vivants: c'est une révolution pour l'histoire du passé de notre propre espèce.

En effet, les primates fossiles ne peuvent plus être considérés comme d'existence récente, issus du dernier jour d'une Création d'il y a quelques milliers d'années seulement, comme le croyait encore le sens commun. C'est une révolution de la pensée, en particulier parce que Cuvier, dont l'influence restait forte, avait écrit que l'on n'avait jamais trouvé de singes fossiles.

Pour sa part, Lartet était alors en quête de l'humain fossile, toujours introuvable. Le pliopithèque de Sansan lui apportait donc une indication importante et un encouragement: puisque ce mammifère, très proche de l'homme, avait trouvé atmosphère et environnement propices à son développement, alors sans nul doute, l'humain avait pu, lui aussi, survivre au même moment. Las, ce dernier n'a jamais été trouvé à Sansan, mais ailleurs... et c'est un autre épisode fameux de la carrière si riche d'Édouard Lartet.

ET L'HOMME?

En 1856, comme si l'histoire avait décidé d'offrir une répétition vingt ans après la découverte des singes fossiles, le paléontologue est invité à venir examiner une précieuse relique chez M. Fontan, un collectionneur de Saint-Gaudens: «Et enfin, écrit celui-ci, je viens de découvrir une mâchoire inférieure de singe [sic] que j'aurais bien voulu vous soumettre.» Voici, s'il en était besoin, une confirmation capitale de l'existence de singes fossiles avec un primate plus grand et proche de l'humain que le petit pliopithèque de Sansan.

A. Gaudry, Les Enchaînements du monde animal dans les temps géologiques, 1878-1890 © Cliché E. Buffetaut

Le géologue et paléontologue écossais Hugh Falconer (1808-1865) découvrit des ossements fossiles de singe la même année qu'Édouard Lartet, mais au sud de l'Himalaya.

Mais Lartet ne désarme pas et cherche le moyen de démontrer que la Terre avait aussi été peuplée d'aborigènes antédiluviens. Or, depuis plusieurs décennies, dans le nord de la France, Jacques Boucher de Perthes a collecté une impressionnante quantité d'instruments en silex. Il les nomme «haches taillées», sans parvenir à convaincre les autorités scientifiques de leur ancienneté. En effet, le poids de la tradition, de l'Église avec son influence politique, et de quelques très conformistes académiciens bloque toute avancée.

Pourtant les indices s'accumulent. Les grottes du midi de la France et, parmi elles, celles de l'Ariège à Massat, livrent au fils de Fontan divers outils en silex, des harpons en bois de renne, et même la gravure d'un profil d'ours sur le même matériau. Or, le renne ne vit plus en France depuis la fin de la période glaciaire. Lartet, paléontologue chevronné, sait que la faune froide, qui compte le renne et le bœuf musqué, l'ours, l'hyène et le lion des cavernes, le mammouth et le rhinocéros laineux, a migré de longue date ou s'est éteinte. Sa présence dans les grottes signe donc l'ancienneté de ces niveaux archéologiques. Malgré son intime conviction d'ancien juriste, manque le moyen de la démontrer. Car les grottes souffrent alors d'un présupposé tenace, à savoir que tout ce qu'elles contiennent proviendrait d'inondations torrentielles; c'est pourquoi leur contenu aurait été déplacé, roulé, mélangé, remanié, et ne fournirait plus aucune date d'occupation fiable. Certes, les cas existent, mais ne sont pas la règle.

L'avocat-paléontologue a soudain une idée. Excédé par l'opposition perpétuelle d'adversaires de plus ou moins bonne foi, en mars 1860, il tente d'emporter l'adhésion de tous par une démonstration dont il vient de tester et vérifier les moindres détails: les restes squelettiques de cette mégafaune sont gravés de multiples incisions. Ainsi la lame en silex taillé a attaqué les os de l'ours, du rhinocéros ou du bison, pour retirer la viande, la peau, récupérer les tendons, etc. Il fallait donc que des populations soient face à ces espèces disparues, les aient chassées, dépecées, pour façonner les beaux harpons de Massat. Pour être irréprochable dans ces affirmations, lui-même a vérifié sur des os frais avec une «hache» («biface» selon le terme actuel) offerte par Boucher de Perthes. Puis il a comparé avec la trace laissée par un couteau ou une scie en métal. Résultat: le profil de l'incision est en «v» avec une pierre taillée et en «u» avec une lame métallique.

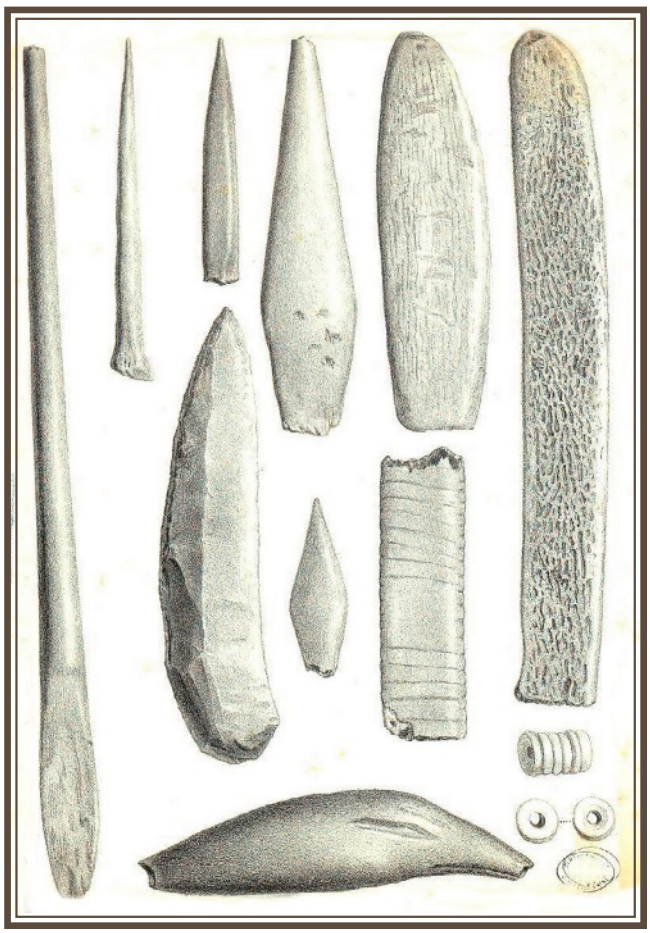
DES FRAGMENTS HUMAINS À AURIGNAC

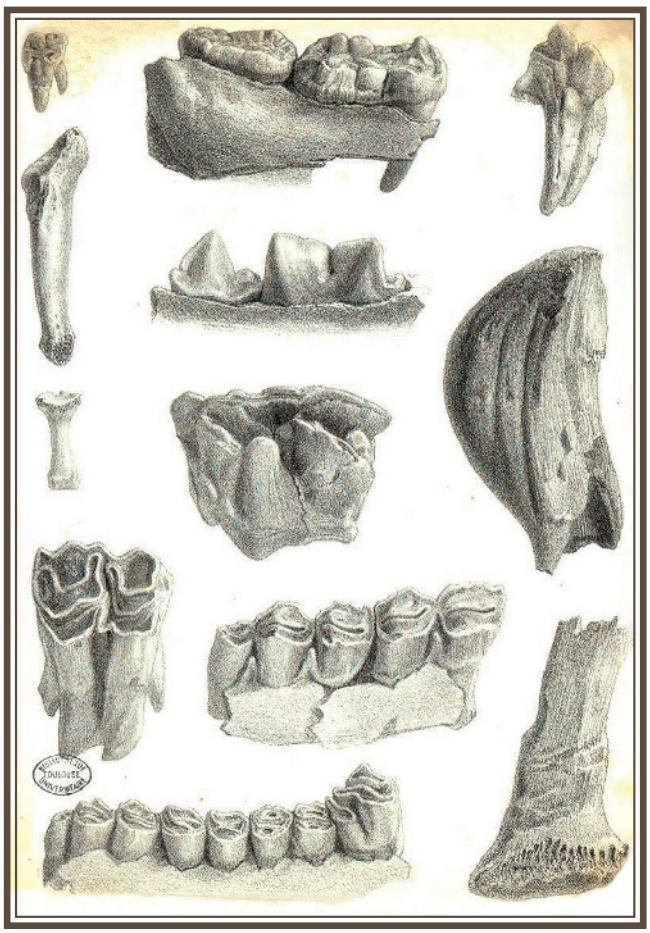
La réaction à cette publication téméraire et irréfutable est brutale: censure de l'article dans le compte rendu de l'Académie des sciences. Lartet, d'ordinaire patient et réservé, est furieux, mais non découragé. Aussi organise-t-il, la même année, une tournée d'automne des cavités du piémont pyrénéen.

Après un voyage de quelques semaines, avec un détour par Massat pour voir les grottes de la montagne du Ker décrites par Fontan, le paléontologue-archéologue s'arrête à Aurignac, bourgade du piémont, située non loin de la plaine de la Garonne. Il y a quelques années déjà, un correspondant, Joseph Vieu,

La mandibule du premier primate fossile européen vient de sortir de la terre gersoise

© Wellcome Collection, Public Domain Mark





travaillant aux ponts et chaussées, lui avait signalé des vestiges d'un lointain passé trouvés fortuitement.

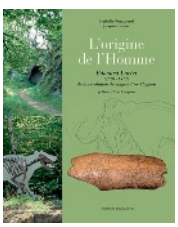
Les informations recueillies sur place sont étonnantes. Il y a huit ans en effet, les restes de dix-sept individus ont été exhumés d'une petite cavité rocheuse, puis enterrés de nouveau dans une fosse commune. Après le recueil sur place des détails, le paléontologue trouve quelques ouvriers et entreprend une fouille. Se confirme dès les premiers coups de pioche (le temps n'est pas encore venu de l'usage du pinceau) la présence de fragments humains, au contact de débris d'une faune éteinte. Mieux encore, à la base du talus devant la cavité, subsiste un sédiment cendreux contenant des pointes de trait, des lissoirs, des pièces gravées d'encoches en os, en bois de renne; également des dents d'ours, des os fracturés d'herbivores puis rongés par les hyènes et quantité de petits instruments en silex. Bref, un véritable campement, ou bien – pense Lartet – les reliefs de repas funéraires organisés par un groupe d'aborigènes «pré-historiques» lors de l'ensevelissement de leurs proches.

Tout l'hiver, penché sur ses feuillets, Lartet rédige soixante-dix pages de description de ses résultats, sous le titre *Nouvelles recherches sur la coexistence de l'homme et des grands mammifères réputés de la dernière période géologique* (Annales des sciences naturelles). Mais surtout, il y ajoute la synthèse d'une minutieuse enquête dans la littérature européenne. Il ose enfin la première chronologie des époques préhistoriques. Celle-ci est fondée sur les extinctions successives de ces mammifères des temps glaciaires et aussi sur l'évolution des formes d'outils qu'il a constatée. Qui oserait encore contester la réalité de nos ancêtres chasseurs de renne, de cheval et d'aurochs, aux prises avec le grand ours, fuyant le terrible lion, récupérant l'ivoire du mammouth rare dans le Sud-Ouest, dégustant avec gourmandise la moelle de rhinocéros? S'il reste encore quelques factions d'une arrière-garde vindicative, les derniers sceptiques se rendent. L'heure de la reconnaissance se profile. Nous sommes en 1861.

HOMME OU SINGE?

Ces années du milieu du XIXe siècle sont passionnantes. Se joue, d'une part, une révolution de la pensée scientifique, psychologique, philosophique et morale: le temps subitement s'étend infiniment. Chacun se découvre un passé immensément long et apparenté à une lignée qui se perd dans la nuit des origines. C'est la chute d'Adam et Ève. D'autre part, au

Les preuves de l'ancienneté de l'humanité que Lartet a obtenues par la fouille de l'abri d'Aurignac: à gauche, des instruments en bois de renne ou en os et en silex, une canine d'ours creusée; à droite, une molaire, un métapode et une phalange d'humain, et enfin la faune disparue *(de haut en bas, molaires d'ours des cavernes et dents de lion, de mammouth, de rhinocéros laineux, de bison ou d'aurochs, de cerf mégacéros, et base d'un bois de renne).*



À LIRE

Nathalie Rouquerol a récemment publié avec Jacques Lajoux L'origine de l'Homme, Édouard Lartet (1801-1871) de la révolution du singe à Cro-Magnon, Loubatières, 2021.

É. Lartet, Nouvelles recherches sur la coexistence de l'homme et des grands mammifères réputés de la dernière période géologique, Ann. Se. Nat, Zool., vol. 4(15), pp. 177-253, 1861 © Nathalie Rouquerol

même moment, en 1859, Charles Darwin publie *L'Origine des espèces*, autre virage intellectuel et scientifique définitif: tous les êtres vivants descendent de quelques ancêtres primordiaux dont l'évolution et la diversification (spéciation) sont dues à la sélection naturelle. La réception du grand texte outre-Manche provoque un scandale, en France, une méfiance grandement répandue, et aussitôt un dévoiement. Autre concomitance, l'anthropologie physique est une discipline nouvellement institutionnalisée. Son objet est l'étude comparative, classificatoire et hiérarchisante de tous les peuples, de leur morphologie, de leur mode vie. Dans ce contexte, que faire de l'homme antéhistorique? Où placer ce «primitif» sur l'échelle? Est-il proche du singe? Est-il une sorte d'humanité inférieure? On mesure tout l'enjeu, y compris politique, de la période dont l'incidence marquera le XXe siècle.

L'HOMME PRÉHISTORIQUE EST CIVILISÉ ET ARTISTE

Poser à Lartet ces questions, c'est se heurter à des réponses sans appel sur les caractéristiques culturelles de ces populations. De fait, servi de nouveau par la chance, par son réseau de relations londonien, sans doute aussi grâce à ses qualités d'humaniste, le paléontologue-archéologue-préhistorien bénéficie en 1863 du soutien du collectionneur britannique Henry Christy. D'une famille de banquiers, propriétaire de plusieurs manufactures de chapellerie et de tissage, quaker, abolitionniste, Christy a délaissé les affaires pour parcourir l'Europe et le continent américain, lors de voyages où il se passionne pour les populations traditionnelles, leur culture et leur sort. Christy et Lartet se lancent dans une exploration de grande ampleur: destination la Dordogne où, dit-on, se trouvent des grottes et sites en nombre. Ainsi commence la renommée du Périgord comme «capitale de la préhistoire», jamais démentie depuis.

Plusieurs chantiers sont ouverts simultanément, les moyens de Christy le permettent. Tout de suite, les résultats sont stupéfiants: l'homme préhistorique est partout. Dans la grotte des Eyzies, voici de nouvelles preuves d'une parenté culturelle avec Massat et ses jolis harpons, tout comme à l'abri de la Madeleine de Tursac. Dans le vallon de Gorge d'Enfer, ce sont les mêmes «têtes de flèche» que celles d'Aurignac. Au Moustier, à quelques kilomètres, des outils de la même forme que les «haches» du nord de la France. Preuve encore, nouvelle et éclatante, d'une chronologie préhistorique et de la présence, à plusieurs centaines de kilomètres de distance, de cultures semblables. Lartet en profite pour affiner sa première ébauche chronologique de 1861.

Se confirme dès les premiers coups de pioche la présence de fragments humains près de débris d'une faune éteinte

Puis vient le témoignage le plus émouvant: des œuvres d'art sculptées ou incisées sur des portions de bois animal, sur des côtes d'herbivores refendues. Des profils de renne, de chevaux, et même d'un mammouth gravé sur une lame d'ivoire... de mammouth. Les positions sont artistiquement étudiées en fonction du support. Ainsi, non seulement existent des cultures variant avec le temps, mais encore, la plus récente, celle de Massat, des Eyzies et la Madeleine, voit un déploiement d'œuvres expressives, traduction de l'environnement animal de ces peuples. Lartet, au faîte de sa carrière, est récompensé de sa ténacité et peut, en être sensible, affirmer le degré de civilisation de nos ancêtres. Quelle victoire! Couronnement ultime, Lartet étudie la faune de l'abri si célèbre de Cro-Magnon et ses restes humains, fouillé par son fils Louis (1868).

Pourquoi la postérité a-t-elle occulté ce parcours tout aussi fondateur que celui du fantasque Boucher de Perthes? Ce dernier bénéficiait des conseils de Lartet, sans lesquels la préhistoire naissante se serait égarée dans une voie incertaine, du pain béni pour les adversaires. Sans doute pour plusieurs raisons. D'abord, le caractère réservé de Lartet, son amour de la science sans l'ambition d'une carrière, et une origine hors du cercle népotique du Muséum. Mais surtout, parmi ses élèves, quelques-uns trop pressés, tel Gabriel de Mortillet, devenu conservateur du musée de Saint-Germain-en-Laye, de mettre en doute – fautivement – la première typochronologie de Lartet. Enfin, dernière raison, vient la guerre de 1870, la moitié du pays est envahi, l'Empire s'effondre, le monde va changer. Il était temps de rendre justice à cet attachant personnage et à son rôle central dans les fondements d'une discipline universellement reconnue aujourd'hui. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Rouquerol et J. Lajoux, **L'origine de l'Homme, Édouard Lartet (1801-1871). De la révolution du singe à Cro-Magnon,** Loubatières, 2021.

A. Mille *et al.*, **Le Secret de l'archéobélodon, deux siècles d'enquêtes sur un fossile mythique,** MNHN et Belin, 2015.

S. Peigné et S. Sen (dir.), **Mammifères de Sansan,** *Mémoires du MNHN*, n° 203, 2012.

L. Ginsburg (dir.), **La faune miocène de Sansan et son environnement,** *Mémoires du MNHN*, n° 183, 2000.

K. A. R. Kennedy et R. Clochon, **A canine tooth from the Siwaliks : First recorded discovery of a fossil ape,** *Human evolution*, vol. 14-3, pp. 231-253, 1999.

É. Lartet, **Notice sur la colline de Sansan, suivie d'une récapitulation des diverses espèces d'animaux vertébrés,** Portès, 1851.

RENDEZ-VOUS

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

LA TENACE CONJECTURE DE SYRACUSE

La conjecture de Syracuse-Collatz est une affirmation arithmétique très simple. Elle passionne les mathématiciens amateurs et professionnels, mais nul n'a su encore la prouver. Pour autant, on progresse…

L'AUTEUR

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

Le célèbre mathématicien hongrois Paul Erdős a écrit que les mathématiques n'étaient pas mûres pour la résolution de la conjecture de Syracuse-Collatz. Il n'est pas certain qu'il ait eu raison : même si aucune preuve définitive n'en a pour l'instant été donnée, il ne fait aucun doute que l'on avance vers une solution et, en tout cas, il devient de plus en plus probable que cette conjecture soit vraie.

La question est : « Partant d'un entier $n \geq 1$, par exemple 13, et appliquant le calcul "si n est pair, le diviser par 2 ; si n est impair, le remplacer par $3n+1$; puis recommencer", finit-on toujours par arriver à 1 ? » Pour 13, on a :
$13 \to 40 \to 20 \to 10 \to 5 \to 16 \to 8 \to 4 \to 2 \to 1$.

Il est parfois très long d'arriver à 1, même en partant d'un petit nombre. On a ainsi, dans le cas de 27 : $27 \to 82 \to 41 \to 124 \to 62 \to 31 \to 94 \to 47 \to 142 \to 71 \to 214 \to 107 \to 322 \to 161 \to 484 \to 242 \to 121 \to 364 \to 182 \to 91 \to 274 \to 137 \to 412 \to 206 \to 103 \to 310 \to 155 \to 466 \to 233 \to 700 \to 350 \to 175 \to 526 \to 263 \to 790 \to 395 \to 1\,186 \to 593 \to 1\,780 \to 890 \to 445 \to 1\,336 \to 668 \to 334 \to 167 \to 502 \to 251 \to 754 \to 377 \to 1\,132 \to 566 \to 283 \to 850 \to 425 \to 1\,276 \to 638 \to 319 \to 958 \to 479 \to 1\,438 \to 719 \to 2\,158 \to 1\,079 \to 3\,238 \to 1\,619 \to 4\,858 \to 2\,429 \to 7\,288 \to 3\,644 \to 1\,822 \to 911 \to 2\,734 \to 1\,367 \to 4\,102 \to 2\,051 \to 6\,154 \to 3\,077 \to 9\,232 \to 4\,616 \to 2\,308 \to 1\,154 \to 577 \to 1\,732 \to 866 \to 433 \to 1\,300 \to 650 \to 325 \to 976 \to 488 \to 244 \to 122 \to 61 \to 184 \to 92 \to 46 \to 23 \to 70 \to 35 \to 106 \to 53 \to 160 \to 80 \to 40 \to 20 \to 10 \to 5 \to 16 \to 8 \to 4 \to 2 \to 1$.

Le problème intrigue les mathématiciens, tant amateurs que professionnels, depuis plus de quatre-vingts ans et de nouvelles approches pour sa résolution sont régulièrement proposées (*voir l'encadré 1 pour son histoire*). Nous verrons quelques idées nouvelles qui nourrissent l'espoir de résoudre cette énigme que le mathématicien d'origine britannique Richard Guy, en 1983, classait parmi les sujets auxquels il ne faut surtout pas s'intéresser sous peine d'y perdre son temps… ou pire d'y perdre la tête ! Vous êtes prévenus.

ORBITE ET REFORMULATION

Pour tout entier $n \geq 1$, on note $n_0 = n$, et pour $k \geq 0$: $n_{k+1} = n_k/2$ si n_k est pair, $n_{k+1} = 3n_k + 1$ sinon. Avec cette notation, le calcul à partir de 13, dénommé « orbite de 13 », s'écrit : $13_0 = 13$; $13_1 = 40$; $13_2 = 20$; $13_3 = 10$; $13_4 = 5$; $13_5 = 16$; $13_6 = 8$; $13_7 = 4$; $13_8 = 2$; $13_9 = 1$. La conjecture de Collatz est alors l'affirmation que pour tout n il existe un entier k tel que $n_k = 1$, ou encore que l'orbite de tout entier $n \geq 1$ passe par 1.

Si la conjecture était fausse, que cela signifierait-il ? Partant d'un entier $n \geq 1$ quelconque, *a priori* trois cas sont possibles :

(a) Cas standard : il existe un entier k tel que $n_k = 1$. Au-delà de ce k, on a donc $n_{k+1} = 4$; $n_{k+2} = 2$; $n_{k+3} = 1$; la suite tourne alors en rond

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

1 UNE CONJECTURE DIABOLIQUE

Lothar Collatz (1910-1990) était un mathématicien allemand qui, outre une carrière universitaire brillante, fut pendant des années le chroniqueur anonyme d'une rubrique de mathématiques récréatives publiée dans l'hebdomadaire allemand *Die Zeit*. Il introduisit en 1937 la conjecture qui porte aujourd'hui son nom et qui est la suivante :
« Quel que soit l'entier $n \geq 1$, en le divisant par deux s'il est pair ($n \rightarrow n/2$) ou en le remplaçant par $3n + 1$ ($n \rightarrow 3n + 1$) s'il est impair, et en recommençant (exemple : $6 \rightarrow 3 \rightarrow 10 \rightarrow 5 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1$), on arrive toujours à 1. »

Cette conjecture porte le nom de « conjecture de Syracuse », « conjecture de Collatz », ou plus simplement « conjecture $3x + 1$ ».

En 1960, le mathématicien Shizuo Kakutani écrivait : « Pendant un mois, tout le monde à l'université Yale a travaillé dessus, sans résultat. Un phénomène similaire s'est produit lorsque je l'ai mentionnée à l'université de Chicago. On a plaisanté en disant que ce problème résultait d'une conspiration visant à ralentir la recherche mathématique aux États-Unis. »

Année après année, des calculs de plus en plus massifs et astucieux ont été tentés ; ils ont tous confirmé la conjecture. Des centaines d'articles l'abordent, mais il faut se méfier, car de fausses preuves ont été maintes fois proposées, que bien sûr on trouve sur internet. C'est ainsi qu'en moins d'une heure j'ai réuni douze preuves de la conjecture, ou plutôt douze documents prétendant en présenter la solution.

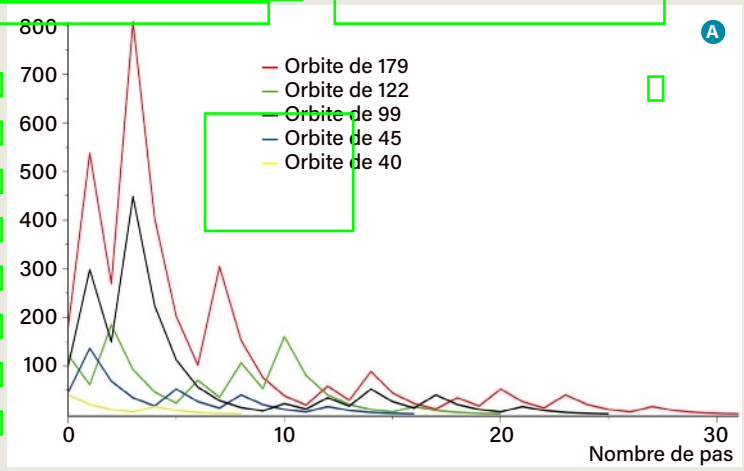
Aucun d'eux cependant n'a été publié dans une revue reconnue de mathématiques procédant à des expertises sérieuses des articles qu'on lui envoie. Chacun doit savoir que l'illusion d'avoir une solution naît facilement — ces douze articles l'attestent — et que la seule façon de faire reconnaître un résultat concernant la conjecture est de le faire publier dans une revue spécialisée de mathématiques.

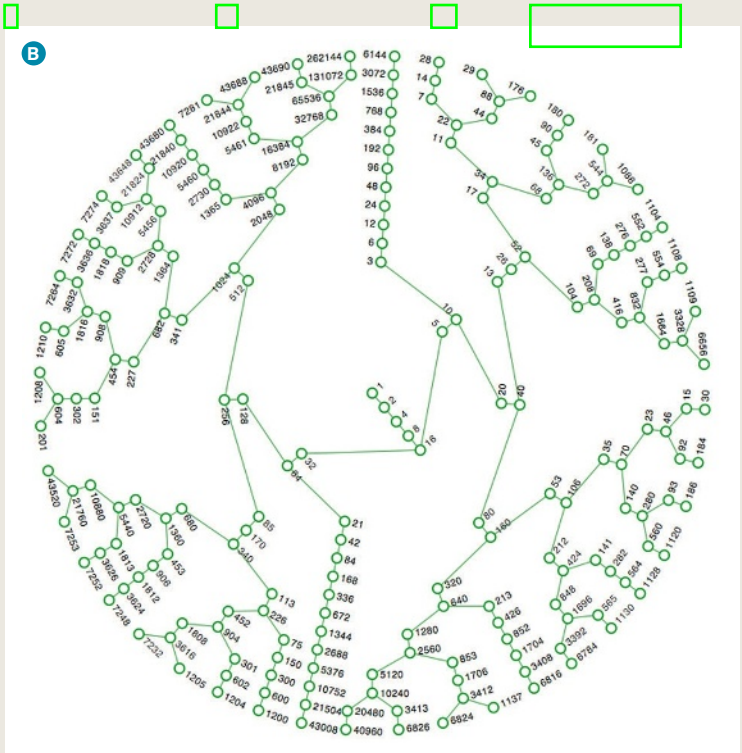
Notons que si l'on remplace $3n + 1$ par $3n - 1$, on trouve facilement plusieurs cycles, dont les deux suivants :
(5, 14, 7, 20, 10) ;
(17, 50, 25, 74, 37, 110, 55, 164, 82, 41, 122, 61, 192, 91, 272, 136, 68, 34).

Il faut donc tenter de comprendre ce qui est spécifique à $3n + 1$. Terence Tao, qui pourtant a travaillé sur le sujet et a récemment fait avancer le sujet *(voir le texte)*, met en garde : « C'est l'une des plus dangereuses conjectures connues. Elle est réputée pour sa capacité à faire perdre une quantité massive de temps aussi bien aux mathématiciens amateurs qu'aux professionnels. »

Sur le schéma A, on a représenté les suites (ou « orbites ») que l'on obtient en partant de 122 *(en vert)*, 179 *(en rouge)*, 45 *(en bleu)*, 99 *(en noir)*, 40 *(en jaune)*.

Sur le graphique B, tous les chemins mènent à 1 : en suivant les flèches, on retrace le calcul d'un grand nombre d'orbites, toutes allant vers 1. Si l'on pouvait faire un dessin infini et que la conjecture de Collatz était vraie, tous les entiers seraient présents et appartiendraient chacun à un chemin aboutissant au centre.





© Pour la Science (graphique A) ; Jason Davies (graphique B)

2

QUELQUES PROPRIÉTÉS DES ORBITES

Ces graphiques proviennent de l'étude numérique de la conjecture de Collatz ; ils visualisent des propriétés des orbites que l'on ne soupçonnerait pas.

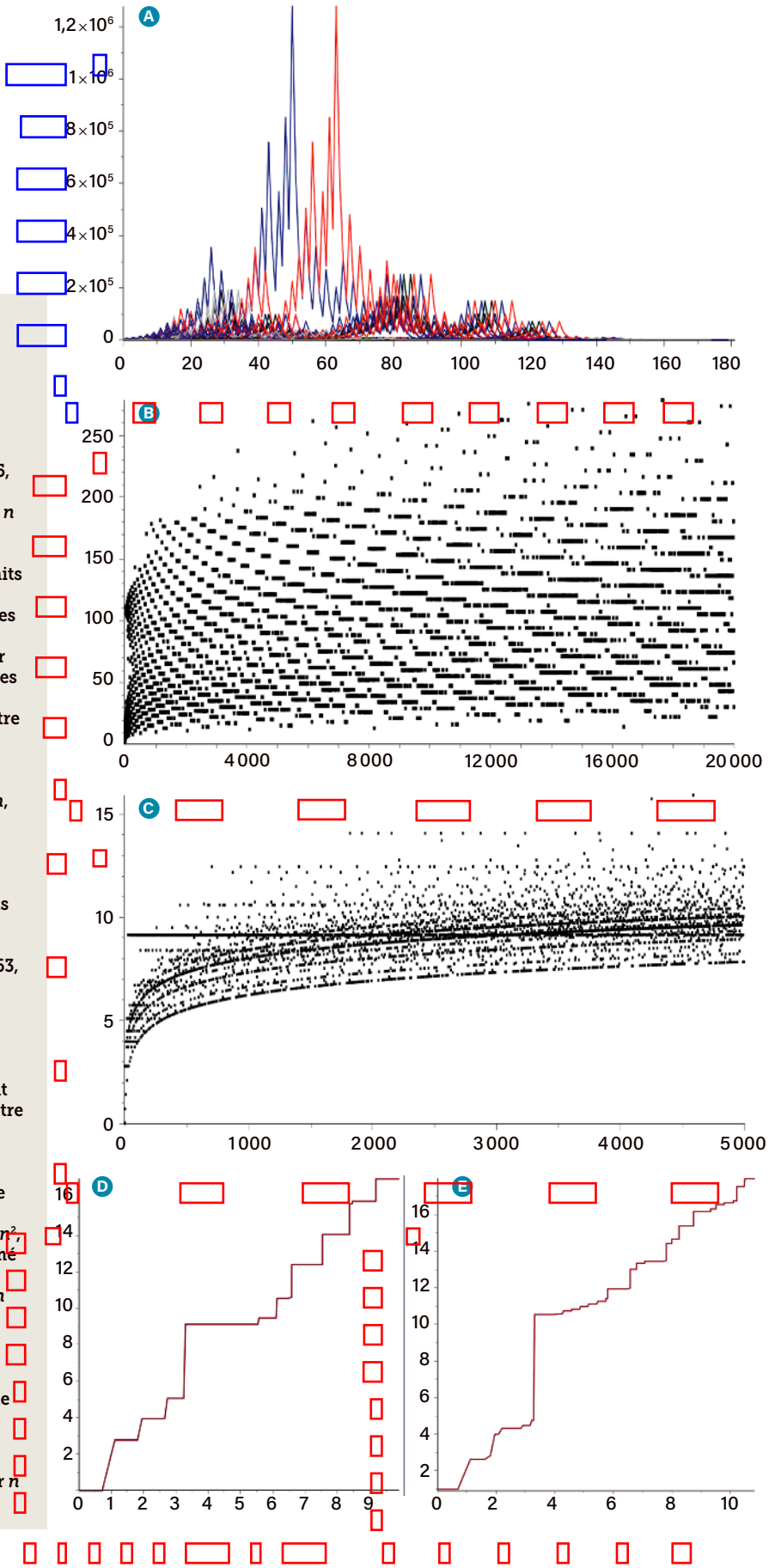
A : 2 000 orbites. On a superposé les 2 000 premières orbites. Certaines orbites s'élèvent très haut ; les deux pointes de même forme correspondent aux entiers 1 819 et 1 915, dont les orbites montent jusqu'à 1 276 936.

B : Longueur des orbites. Pour chaque entier n entre 1 et 20 000, on a calculé la longueur h de l'orbite de n et on a placé le point de coordonnées (n, h) sur le dessin. Les petits traits horizontaux proviennent du fait que souvent des n ayant des valeurs proches produisent des orbites de même longueur. Par exemple 100, 101, 102, 103 donnent des orbites de longueur 25 ; de même, 164, 165, 166 donnent des orbites de longueur 111.

C : Maxima atteints. Pour chaque entier n entre 1 et 5 000, on a calculé la valeur maximale m atteinte par l'orbite de n et on a placé le point $(n, \log(m))$ sur le dessin. On observe que le maximum m augmente en moyenne avec n, ce qui n'est pas étonnant. Plus surprenante est la ligne horizontale à la hauteur 9,13. Elle correspond à des orbites pour lesquelles le maximum est 9 232 dont le logarithme est 9,13. Ce maximum est atteint pour $n = 27$, puis ensuite assez souvent. Ainsi, entre 0 et 100, le maximum d'une orbite est 9 232 pour les entiers suivants : 27, 31, 41, 47, 54, 55, 62, 63, 71, 73, 82, 83, 91, 94, 95, 97.

D : Records de hauteur. Pour chaque entier n entre 1 et 20 000, on a calculé la valeur maximum m atteinte par l'orbite d'un entier inférieur à n. Ce m est le record de hauteur jusqu'à n. Ce record est évidemment croissant et reste constant quand n augmente, sans battre le record. Les échelles pour n et pour m sont logarithmiques : pour chaque n on a dessiné le point $(\log(n), \log(m))$. Le fait que la courbe monte approximativement comme une droite de pente 2 signifie que, en gros, le maximum de hauteur atteint avant n augmente comme n^2, ce que les calculs de David Bařina ont confirmé bien au-delà de 20 000.

E. Records de longueur. Pour chaque entier n entre 1 et 50 000, on a calculé la valeur maximum m de la longueur (nombre de pas) d'une orbite d'un entier inférieur à n. Ce m est le record de longueur jusqu'à n. L'échelle pour n est logarithmique et en racine carrée pour m : on a représenté les points de coordonnées $(\log(n), \sqrt{m})$. La courbe semble proche d'une droite de pente 3/2, ce qui signifie que le record de longueur pour n est approximativement $(1{,}5 \log(n))^2$.



© J.-P. Delahaye/pour la Science

indéfiniment, prenant de façon cyclique les valeurs 4, 2, 1, 4, 2, 1, 4, 2, 1, ...

(b) Existence d'orbites infinies: pour certains n, l'orbite de n ne prend jamais deux fois la même valeur et donc tend vers l'infini quand k tend vers l'infini.

(c) Existence de cycles nouveaux: pour certains n, l'orbite de n prend deux fois une valeur autre que 4, 2 ou 1, et alors elle tourne en rond, puisqu'une fois qu'elle est revenue à une valeur déjà prise, les calculs redonnent les mêmes résultats.

Pour prouver la conjecture de Collatz, il faut démontrer que les cas (b) et (c) ne se présentent jamais. On peut prouver qu'elle est fausse en trouvant un entier initial n qui donne une suite n_k tendant vers l'infini quand k tend vers l'infini, ou en trouvant un n qui donne un cycle autre que (4, 2, 1).

La première chose à tenter est bien sûr de trouver des entiers n pour les cas (b) ou (c), ce qui indiquerait que la conjecture est fausse.

DONNÉES RÉCENTES

David Bařina, de l'université de Brno, en République tchèque, détient aujourd'hui le record de vérification. Pour aller très loin dans la vérification de la conjecture, on ne se contente pas de prendre les entiers les uns après les autres en calculant l'orbite jusqu'à arriver à 1. On élabore d'abord une série d'astuces qui accélèrent les calculs. Voici trois exemples de telles astuces.

– On veut vérifier la conjecture jusqu'à un certain entier Max, par exemple 1000000. Si l'on démontre que pour tout entier n avec $1<n\leq$Max, l'orbite de n passe en dessous de n, cela suffira. En effet, partant d'un $n\leq$Max, l'orbite de n passera par un entier n' plus petit que n; à partir de ce n', on sera certain d'arriver à un entier n'' plus petit que n', etc. On sera donc assuré que l'orbite de n passe par des valeurs de plus en plus petites, donc finit par atteindre 1.

– Si un entier positif est pair, soit $n=2m$, alors son orbite passe au-dessous de n, car dès le premier point calculé de l'orbite, on tombe sur $n_1=m<n$. D'après notre raisonnement précédent, pour vérifier la conjecture jusqu'à Max, il suffit donc de ne mener de calcul que pour les nombres impairs.

– Si un entier est de la forme $n=4m+1$, avec n entier, les premières valeurs de son orbite sont $n_1=12m+4$ (car n est impair), $n_2=6m+2$ (car n_1 est pair), $n_3=3m+1<n$ (car n_2 est pair) et donc l'orbite passe sous son point de départ. Comme pour les nombres pairs, on peut donc sauter tous les nombres de la forme $4m+1$.

Ainsi, parmi les quatre classes de nombres $\{4m\}$, $\{4m+1\}$, $\{4m+2\}$, $\{4m+3\}$, seule la quatrième doit être étudiée. L'utilisation de ces trois petites astuces fait donc déjà gagner 75% du calcul de vérification.

La méthode de David Bařina va bien au-delà de ces trois astuces et, grâce à elle, il a vérifié la conjecture jusqu'à $452\times2^{60}=5{,}211\times10^{20}$. Cela ne serait possible par un calcul sans accélération qu'en utilisant une partie importante de tous les dispositifs de calcul sur Terre. En effet, le calcul d'une orbite exige plusieurs milliers d'instructions en moyenne pour les nombres considérés, et donc, pour arriver à 5×10^{20} sans accélération, il faudrait mettre en œuvre une puissance de calcul d'au moins 10^{24} instructions; or la puissance cumulée de tous les dispositifs de calcul sur Terre a un ordre de grandeur évaluée à 10^{23} instructions par seconde. (Pour une mise à jour en continu des résultats du calcul mené par David Bařina, voir: http://pcbarina.fit.vutbr.cz)

Une prédiction formulée par Jeffrey Lagarias, grand spécialiste de la conjecture à l'université du Michigan, est qu'en calculant toutes les orbites jusqu'à un entier n, la valeur record d'un point des orbites calculées sera de l'ordre de n^2. Le calcul de David Bařina confirme cette prédiction: en allant jusqu'à 452×2^{60}, le record pour une valeur calculée provient de l'orbite de $n=27413305463235210626 7$, qui passe par la valeur maximale 113298124744388 651798242538014293435290632, soit $n^{2{,}00872}$.

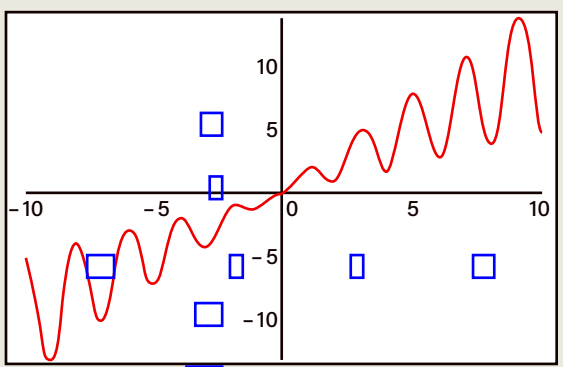
Signalons au passage que le calcul des orbites a eu des retombées indirectes: il a permis

SYRACUSE AVEC DES RÉELS NON ENTIERS

Il est naturel de se demander si l'on peut étendre le calcul des orbites de Collatz à tout nombre réel. En considérant la version compressée des orbites (après un nombre impair n, on le remplace directement par $(3n+1)/2$ puisqu'on sait que $3n+1$ sera pair), Marc Chamberland a proposé la fonction représentée ci-contre, qui pour chaque entier calcule ce qu'il faut ($n/2$ ou $(3n+1)/2$) mais qui a un sens pour tout nombre réel x :

$f(x) = x + 1/4 - [(2x+1)/4]\cos(\pi x)$.

Chamberland a noté qu'il y a une infinité de points fixes x (tels que $f(x) = x$) qui sont des cycles à un seul élément. S'ajoute aussi, au cycle 4,2,1 que bien sûr on retrouve, le cycle suivant :
1,1925319070466...
2,1386563355167...
Il montre aussi que certains réels donnent des orbites qui vont vers l'infini. Tout cela signifie que la conjecture devient fausse quand on passe des entiers aux nombres réels.



© J.-P. Delahaye/pour la Science

de concevoir une nouvelle méthode de multiplication, une technique de marquage d'images pour les signer et les protéger de la copie, une méthode de chiffrage des fichiers sonores et un générateur de suites pseudoaléatoires.

PAS D'AUTRES CYCLES COURTS

On pourrait penser que mener une vérification très loin n'a guère d'intérêt, car il restera toujours une infinité d'entiers dont on ignorera si les orbites aboutissent à 1. Ce n'est pas vrai: Shalom Eliahou, de l'université du Littoral-Côte-d'Opale à Calais, a démontré qu'un calcul de vérification de la conjecture produit des informations sur les cycles possibles. Plus la vérification est poussée loin, plus la taille d'un éventuel cycle autre que (4, 2, 1) doit être grande.

Jusqu'en 2020, les résultats de Shalom Eliahou permettaient d'affirmer que s'il existe un autre cycle que (4, 2, 1), alors il contient au moins 17 milliards d'éléments, 17026679261 pour être précis. Mieux encore, grâce au calcul récent de David Bařina, on sait aujourd'hui que s'il existe un cycle autre que (4, 2, 1), il contient au moins 186 milliards d'éléments, 186265759595 pour être précis. Cela ne démontre pas qu'il n'existe pas d'autres cycles, mais on a quand même le sentiment d'avancer... et ce n'est pas la peine d'espérer trouver un cycle en lançant un calcul avec votre ordinateur!

DU CÔTÉ DE LA THÉORIE

Il ne faut pas croire que le problème n'intéresse que les informaticiens et les amateurs séduits par l'énoncé particulièrement simple de la conjecture. En réalité, plusieurs mathématiciens éminents y ont consacré du temps et ont produit quelques résultats.

Le Britannique John Conway a établi qu'il ne fallait pas s'étonner que le problème résiste, car certains problèmes proches sont indécidables. Voyons ce que cela signifie. Conway introduit la notation $f(n) = n/2 \mid 3n+1$ pour désigner la fonction au cœur de la conjecture, et il la généralise en $f(n) = a_1 n + b_1 \mid a_2 n + b_2 \mid \ldots \mid a_k n + b_k$, où les a_i et b_i sont des nombres rationnels (quotients de deux entiers). La fonction définie par cette notation a le sens suivant: si $a_1 n + b_1$ est un entier, alors $f(n) = a_1 n + b_1$; sinon, on examine $a_2 n + b_2$, si c'est un entier, c'est lui qui donne $f(n)$; sinon, on examine $a_3 n + b_3$, etc.

Conway a prouvé que quel que soit le système S non contradictoire d'axiomes qu'on utilise pour démontrer des propositions mathématiques, il existe une fonction de cette famille dont l'une des orbites n'aboutit pas à 1, ce que le système S ne peut pas démontrer. Conway est revenu sur ce problème en 2013 et a indiqué qu'il était convaincu que la conjecture de Collatz était elle-même indémontrable avec les systèmes d'axiomes utilisés aujourd'hui en mathématiques.

RÉSULTATS POSITIFS

Concernant les résultats théoriques positifs, on dispose maintenant de trois résultats de la forme «la conjecture de Collatz est presque vraie».

Le premier a été démontré en 1976 et est dû au mathématicien américano-estonien Riho Terras. Il indique que la proportion $\mathrm{Pr}(m)$ d'entiers n entre 1 et m qui vérifient que n_k passe en dessous de n tend vers 1 quand m tend vers l'infini. Prouver que tous les entiers n ont une orbite passant en dessous de n démontrerait la conjecture (*voir page précédente la première astuce de calcul que nous avons mentionnée*). Le résultat de Terras y parvient presque, mais il montre seulement que la proportion des n qui ne passent pas sous leur point de départ est inférieure à tout nombre positif fixé à l'avance pourvu qu'on aille assez loin. Il y a peut-être des exceptions, mais elles ont un poids qui devient nul.

Le deuxième résultat a été démontré par le mathématicien slovaque Ivan Korec en 1994. Il améliore celui de Terras: la proportion $\mathrm{Pr}'(m)$ d'entiers entre 1 et m qui vérifient que l'orbite de n passe en dessous de $n^{0,7925}$ tend vers 1 quand m tend vers l'infini. C'est une amélioration du résultat de Terras, car $n^{0,7925} < n$. Ainsi, $1000^{0,7925} = 238$. Non seulement pour presque tout n l'orbite de n passe en dessous

4

CHEVELURES D'ORBITES

On associe à chaque orbite de Collatz le dessin d'un fil, dont le principe est le suivant. On part vers la droite en dessinant un court segment et, à chaque nouvelle étape, on ajoute un petit segment dont la taille diminue et qui prolonge les précédents en tournant un peu vers la droite si l'étape est paire, et un peu vers la gauche si l'étape est impaire. Comme les étapes paires sont plus nombreuses que les étapes impaires, l'angle de rotation vers la gauche est pris plus petit que l'angle de rotation vers la droite. En regroupant ces fils, on obtient d'étranges figures, dont voici un exemple dû à Vitaliy Kaurov (voir https://community.wolfram.com/groups/-/m/t/558256).

© Vitaliy Kaurov

de n, mais elle passe en dessous de $n^{0,7925}$, qui est plus petit.

Le troisième résultat indiquant que la conjecture est presque vraie est dû à Terence Tao. Ce prolifique et célèbre mathématicien australien a démontré en 2019 que non seulement en allant assez loin, presque toutes les orbites passent sous leur point de départ, mais qu'elles font beaucoup mieux : pour presque tout entier n, l'orbite de n passe sous $\log(n)$, qui est bien plus petit que $n^{0,7925}$. Et mieux encore, on peut remplacer $\log(n)$ par $\log(\log(n))$, ou par $\log(\log(\log(n)))$, etc. Les fonctions $\log(n)$, $\log(\log(n))$, etc. sont très lentement croissantes et par exemple $\log(\log(10^{100}) = 5{,}439\ldots$ Le résultat est un progrès considérable par rapport à ce que l'on savait.

Voici deux précisions omises dans un premier temps pour faciliter la compréhension du remarquable résultat de Terence Tao. D'une part, le résultat n'est pas vrai uniquement pour les fonctions combinant des logarithmes, mais pour toute fonction $f(n)$ qui tend vers l'infini quand n tend vers l'infini, cela quelle que soit la lenteur avec laquelle elle va vers l'infini.

D'autre part, la notion de « presque » du résultat de Tao est un peu différente de celle des théorèmes de Terras et Korec. Pour mesurer le poids d'un sous-ensemble A de l'ensemble des entiers, on ne considère pas que chaque entier pèse un poids identique (c'est la méthode de Terras et Korec), mais on considère que le poids de l'entier n est $1/n$. Concrètement, dire « pour presque tout entier n, l'orbite de n passe sous $f(n)$ » signifie pour Terence Tao que « la somme des $1/n$ pour les entiers dont l'orbite passe sous $f(n)$ et qui sont inférieurs à un m donné, divisée par la somme des $1/n$ pour les n compris entre 1 et m, tend vers 1 quand m tend vers l'infini. »

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE À LA RESCOUSSE ?

Abordons une piste qui repose sur des méthodes de démonstration automatique. Avec ces méthodes, on peut envisager que même si la preuve est très longue et inaccessible à l'entendement humain, alors elle sera à la portée des ordinateurs que l'on utilisera.

Pour expliquer l'idée, présentons d'abord un résultat de Liesbeth De Mol, chercheuse du CNRS à l'université de Lille, qui ramène le calcul avec des entiers à une manipulation simple de trois symboles. Plutôt que calculer avec des nombres, elle propose de considérer un système de transformation d'un mot en un autre défini par trois règles :

$$a \to bc,\ b \to a,\ c \to aaa.$$

Le principe des calculs est le suivant. On part d'un mot quelconque formé des lettres a, b et c, puis à chaque étape : (1) on ajoute à la fin du mot courant les lettres données par la règle associée à la première lettre du mot courant ; (2) on enlève deux lettres en tête du mot courant. Par exemple, ccabb donne abbaaa.

Les systèmes de ce type sont nommés « 2-tag systèmes ». Les k-tag systèmes ont été introduits par le mathématicien américain Emil Post en 1943 et sont étudiés en théorie du calcul. Ici, nous ne nous intéresserons qu'à ce 2-tag système particulier. Menons le calcul à partir du mot aaa :

aaa → abc → cbc → caaa → aaaaa → aaabc → abcbc → cbcbc → cbcaaa → caaaaaa → aaaaaaaa → aaaaaabc → aaaabcbc → aabcbcbc → bcbcbcbc → bcbcbca → bcbcaa → bcaaa → aaaa → aabc → bcbc → bca → aa → bc → a.

En retenant les mots composés uniquement de « a » (*en bleu*), on transforme 3 fois a en 5 fois a, puis en 8 fois a, 4 fois a, 2 fois a et enfin 1 fois a. Or l'orbite de 3 pour la conjecture de Collatz est par ailleurs $3 \to 10 \to 5 \to 16 \to 8 \to 4 \to 2 \to 1$. Les mots ne contenant que des « a » obtenus avec le 2-tag système de Liesbeth De Mol correspondent à cette orbite à ceci près qu'après un nombre impair, on omet le nombre pair qui suit.

Cette correspondance n'est pas une coïncidence et il a été démontré que partant d'une suite de n fois a, les suites de « a » qu'on obtiendra par le 2-tag système ont pour longueurs les entiers de l'orbite de n par Collatz en omettant le nombre pair qui suit chaque nombre impair. Le système simule Collatz sans faire ni division, ni addition, ni multiplication. Il en résulte que prouver la conjecture de Collatz revient à démontrer que, comme dans l'exemple, tout mot composé de « a » donne par le tag système le mot réduit à un seul « a ».

Or les problèmes de ce type, les « problèmes de terminaison d'un système de réécriture », se traduisent en problèmes de démonstration d'une formule de logique propositionnelle, c'est-à-dire sans quantificateur ni variable parcourant des ensembles infinis. On ramène donc le problème infini de Collatz avec des entiers à des problèmes finis de logique élémentaire, problèmes pour lesquels on dispose de méthodes de démonstration automatique très efficaces : plusieurs conjectures arithmétiques ont pu être résolues par cette méthode de transformation.

Les mathématiciens ont été frappés et peut-être vexés de rester impuissants face à la conjecture d'apparence si simple. L'aide des ordinateurs leur a déjà donné des informations sur la taille d'un contre-exemple possible allant vers l'infini, qui ne peut être que l'orbite d'un entier d'au moins 20 chiffres décimaux, et sur la taille d'un cycle autre que (4, 2, 1), qui doit avoir au moins 180 milliards de points. On tente maintenant de faire engendrer automatiquement à l'ordinateur la démonstration attendue, qui, même si aucun humain ne pourrait seul la vérifier, serait un soulagement ! ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Yolcu *et al.*, **An automated approach to the Collatz conjecture,** prépublication arXiv:2105.14697, 2021.

D. Bařina, **Convergence verification of the Collatz problem,** *J. Supercomput.*, vol. 77, pp. 2681–2688, 2021.

D. Bařina, **Multiplication algorithm based on Collatz function,** *Theory of Computing Systems*, vol. 64, pp. 1331–1337, 2020.

T. Tao, **Almost all orbits of the Collatz map attain almost bounded values,** prépublication arXiv:1909.03562, 2019.

J. Conway, **Unsettleable Arithmetical Problems,** *The Amer. Math. Monthly*, vol. 120(3), pp. 192-198, 2013.

S. Eliahou, **Le problème 3N + 1 (I, II et III),** *Images des mathématiques* (https://images.math.cnrs.fr/), 2011.

J. Lagarias, **The Ultimate Challenge : The 3x + 1 Problem,** American Mathematical Society, 2010.

L. De Mol, **Tag systems and Collatz-like functions**, *Theoretical Computer Science*, vol. 390, pp. 92-101, 2008.

L'AUTEUR

LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

LE CHŒUR DES AUTOCHTONES

Le musée d'ethnographie de Genève fait entendre la voix des peuples autochtones à travers leurs œuvres d'art, véritables cris d'alarme face aux dangers qui les menacent.

Dans *Titunkai (Déforestation)*, Ti'iwan Couchili alerte sur les dangers liés à l'exploitation de l'or en Amazonie.

© MEG, Johnathan Watts

Selon l'article 7.5 de l'accord de Paris sur le climat, signé en 2015, « Les Parties reconnaissent que l'action pour l'adaptation [au changement climatique] devrait [...] tenir compte [...], selon qu'il convient, des connaissances traditionnelles, du savoir des peuples autochtones et des systèmes de connaissances locaux. » Ainsi, l'avenir de la planète reposerait en partie sur les autochtones, c'est-à-dire les descendants de peuples qui habitaient dans une région donnée avant l'arrivée d'ethnies différentes devenues ensuite prédominantes, par la conquête, l'occupation, la colonisation... De fait, par une longue cohabitation avec l'environnement dans lequel ils vivent, et dont dépend leur existence, les peuples autochtones ménagent les écosystèmes et leurs ressources.

Pourtant, ces quelque 500 millions d'individus, vivant dans plus de 70 pays, sont malmenés et menacés, une grande partie d'entre eux étant particulièrement exposés au changement climatique et à la détérioration de l'environnement. Pour faire entendre leur voix et valoir leurs droits à contrôler leurs terres, certains ont choisi l'art. Et c'est à cette expression, souvent teintée de militantisme et d'activisme, que rend hommage l'exposition « Injustice environnementale – Alternatives autochtones », organisée par le musée ethnographique de Genève (MEG), en Suisse, avec le soutien du haut-commissariat des Nations unies aux Droits de l'homme.

Parmi la diversité des œuvres présentées, venues des quatre coins du monde, attardons-nous sur celle de l'artiste guyanaise Ti'iwan Couchili. Elle présente *Titunkai* (déforestation), une peinture sur bois d'amarante (*voir ci-contre*) réalisée avec des pigments minéraux traditionnels (remplacés par des peintures glycérophtaliques dans les années 1960) qu'elle a contribué à réhabiliter depuis les années 1990. Ces techniques étaient employées pour décorer les « ciels de case » (*maluwana*), ces disques de bois de fromager peints qui ornent le plafond des cases collectives (*tukusipan*) au milieu des villages. La peintre est membre des tribus Wayana et Téko. Ces Amérindiens, installés le long de la rivière Tampok, un affluent du Maroni, le fleuve frontalier entre la Guyane française et le Suriname, sont confrontés aux dégâts causés par l'extraction de l'or, légale ou non, et la pollution qui l'accompagne, notamment celle des cours d'eau avec le mercure.

En effet, cette activité bat son plein dans la région. Le projet dit de la Montagne d'or a certes été abandonné en mai 2019 par le gouvernement en vertu d'exigences insuffisantes en termes de protection de

l'environnement. Cependant, le 29 avril 2020, Espérance, le projet de grande envergure d'extraction aurifère dans la commune d'Apatou, sur les rives du Maroni, a reçu un avis favorable de la commission des mines de Guyane et menace les populations et les écosystèmes. Sans compter l'orpaillage clandestin qui, en forte recrudescence depuis quelques décennies, contribue grandement à la déforestation et à la pollution des cours d'eau.

Dans son œuvre, Ti'iwan Couchili dénonce les ravages de cet extractivisme à l'œuvre depuis plus de 160 ans en associant à différents types d'animaux emblématiques de l'Amazonie une concentration en mercure (fictive, mais réaliste) dans leurs chairs, de la même façon que le méthylmercure est mesuré dans les cheveux des Amérindiens. De part et d'autre d'une forêt détruite par le défrichage (*à droite sur le détail ici représenté*), on distingue par exemple des classiques du bestiaire des *maluwana*, comme *ëlukë*, la chenille urticante (voyez les poils dressés) à deux têtes, et *walisimë*, le tamanoir.

Le MEG expose également des peintures aborigènes d'Australie, qui dans les tribunaux, font office de preuve cadastrale. Comment ? Pour ces peuples, tous les éléments du paysage (rochers, plans d'eau…) portent la trace d'êtres ancestraux. Ainsi, en prenant comme sujets des récits mythiques, des œuvres témoignent d'une occupation ancienne de certaines terres, qui peuvent alors être revendiquées.

Le musée accorde aussi une grande place à Máret Ánne Sara, une Sami de Norvège dont la famille a dû quitter ses terres traditionnelles, où elle élevait des rennes. Ses œuvres retracent la lutte devant les tribunaux pour dénoncer la surexploitation par le gouvernement des ressources des territoires autochtones.

Qu'ils soient d'Alaska, des îles Marshall, du Canada, du Kenya ou d'ailleurs, les peuples autochtones se feront d'autant mieux entendre qu'ils parleront ensemble. C'est ce qu'ils font aux Nations unies, et un fort écho résonne sur les rives du lac Léman. ■

« Injustice environnementale Alternatives autochtones », musée ethnographique de Genève, en Suisse, jusqu'au 21 août 2022. www.ville-ge.ch/meg/

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

LES AUTEURS

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

CONGELER À VOLUME CONSTANT, C'EST MIEUX

Conserver des aliments en préservant toutes leurs qualités: un nouveau procédé, la congélation isochore, s'approche de cet objectif.

Maintenir les aliments à −18 °C dans une chambre froide ou un congélateur domestique permet de les conserver plusieurs mois sans qu'ils ne se dénaturent. Cette méthode éprouvée n'est toutefois pas exempte de défauts: dénaturation partielle de certains aliments et forte consommation d'énergie, pour ne citer que deux des plus importants. Afin d'y remédier, Boris Rubinsky et ses collègues, de l'université de Californie à Berkeley, étudient depuis plusieurs années une approche originale, la congélation isochore, c'est-à-dire à volume constant. Le refroidissement des aliments, immergés dans une solution adaptée, s'accompagne alors d'une augmentation de pression d'un facteur mille et prévient un gel complet. Nous allons voir pourquoi.

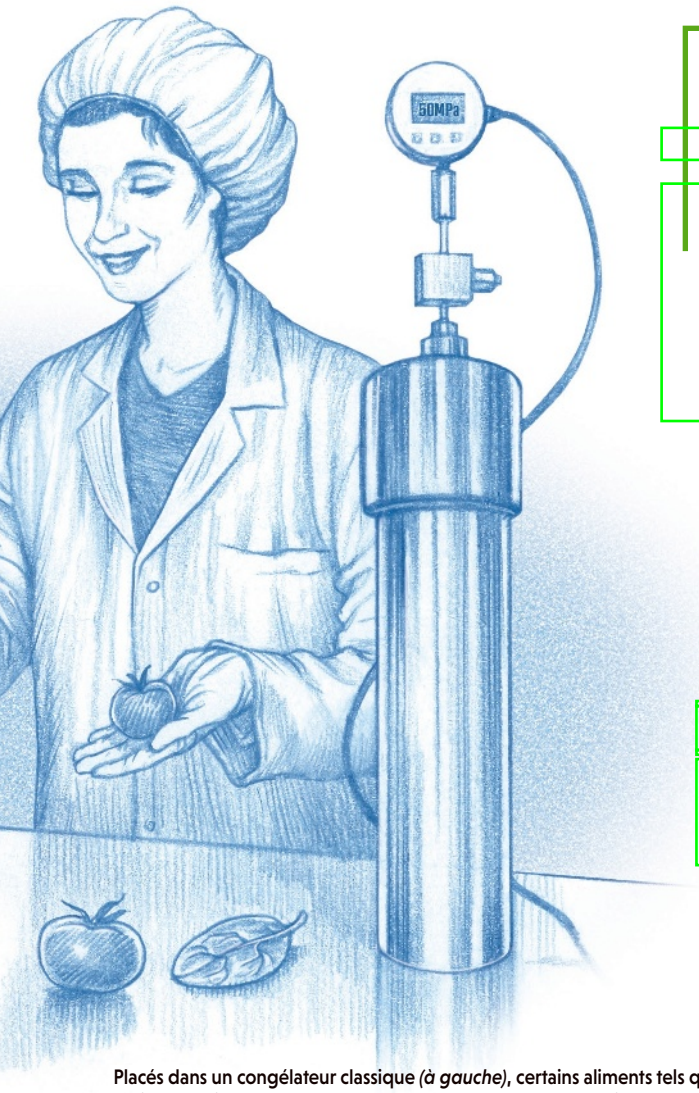
Les réactions chimiques sont d'autant plus lentes que la température est basse. Tous les processus du vivant ralentissent ainsi de l'ordre d'un facteur 2 à chaque fois que l'on diminue la température de 10 °C. En outre, le gel de l'eau réduit considérablement la diffusion des molécules. On a donc tout intérêt à choisir la température la plus basse possible pour faciliter la conservation de tissus biologiques.

LA CONGÉLATION ISOBARE, DESTRUCTRICE ET ÉNERGIVORE

Hélas, les cellules baignent dans du liquide physiologique, c'est-à-dire de l'eau légèrement salée, à 9 grammes par litre. À pression atmosphérique, cette solution gèle à une température légèrement négative (−0,57 °C). Lorsque l'on congèle des aliments chez soi, la lenteur du processus (de l'ordre de 24 heures) conduit à la formation de gros cristaux de glace et au transfert d'eau de l'intérieur des cellules vers l'extérieur. Cette congélation isobare (à pression constante) endommage les tissus, parfois de façon irréversible: à la décongélation, on obtient des produits dénaturés, dont la couleur ou la consistance, par exemple, ont changé. Qui ne s'est pas désolé devant des framboises réduites en bouillie?

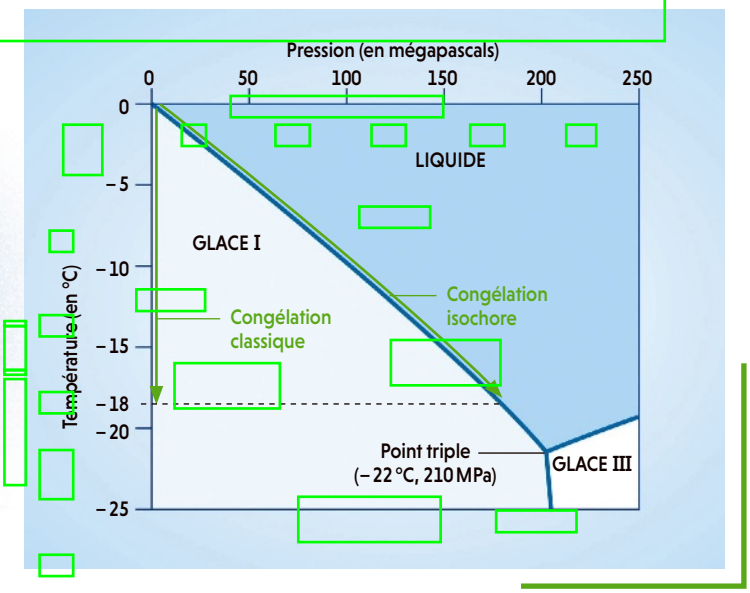
La surgélation, une congélation très rapide, réduit considérablement ces effets, notamment parce que les cristaux de glace formés sont très petits. En adaptant ce processus au cas par cas, il est même possible de conserver vivantes des cellules.

© Illustrations de Bruno Vacaro



SUIVRE L'ÉQUILIBRE LIQUIDE-SOLIDE

Le diagramme de phase d'un corps indique l'état physique de ce corps en fonction de la température et de la pression. Celui de l'eau, montré ici partiellement, indique que la température du point de congélation diminue lorsque la pression augmente. La congélation classique, à la pression atmosphérique, implique à 0 °C le passage intégral de l'eau de son état liquide à un état solide (glace de type I). La congélation isochore, à volume constant (donc à pression croissante quand la température diminue), correspond à une diminution de la température jusqu'à – 18 °C en suivant la ligne de coexistence liquide-solide : une partie de l'eau reste liquide, à l'équilibre avec la glace.



Placés dans un congélateur classique *(à gauche)*, certains aliments tels que tomates ou feuilles d'épinard se dégradent, surtout durant la décongélation. En empêchant le gel de toute l'eau dans laquelle on immerge les aliments, la congélation à volume constant *(à droite)* assure une bien meilleure préservation.

Cependant, tout cela a un coût énergétique non négligeable. Pour fixer les idées, prenons un simple litre d'eau que nous voulons refroidir à −18 °C à partir de la température ambiante (20 °C). On peut distinguer trois étapes dans le processus : refroidissement de l'eau liquide de 20 °C à 0 °C (84 kilojoules, kJ), transformation de l'eau en glace à 0 °C (334 kJ) et refroidissement de la glace de 0 °C à −18 °C (38 kJ). Au total, cela fait 456 kJ, soit environ 0,13 kilowattheure. Cette énergie à prélever semble modeste, mais, compte tenu de l'importance de la chaîne du froid à l'échelle mondiale, elle requiert 4 % de la consommation globale d'électricité. Et l'on remarque aussi que 73 % du coût énergétique provient de l'étape du gel.

Ne pourrait-on pas alors éviter l'apparition de la glace, à la fois responsable de la dénaturation du matériel biologique et du coût énergétique ?

ABAISSER LA TEMPÉRATURE DE SOLIDIFICATION

Il y a deux pistes. La première est l'utilisation d'un « antigel » ou, comme disent les biologistes, d'un « cryoprotecteur » : un composé qui non seulement abaisse le point de congélation de la solution, mais peut aussi pénétrer dans les cellules pour les protéger du gel sans être trop nocif. Ce procédé est courant dans les laboratoires de biologie où l'on utilise du glycérol, de l'éthylène glycol, etc., mais uniquement pour des échantillons en faible quantité ou très fins (sperme, sang, coupes histologiques…), qu'il faut ensuite, après décongélation, « rincer » afin d'éliminer le cryoprotecteur. On ne voit pas comment faire de même en cuisine !

La seconde piste consiste à profiter d'une propriété remarquable de l'eau (*voir l'encadré ci-dessus*) : la température de son point de congélation diminue lorsque la pression augmente. Cela provient du fait qu'en se transformant en glace, l'eau prend du volume, contrairement à la plupart des autres matériaux ; elle enfle d'environ 10 % à pression atmosphérique.

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

Augmenter la pression permet ainsi de retarder la congélation de l'eau de façon notable, mais cela nécessite des pressions considérables. La température de gel se décale à −10 °C à la pression de 111 mégapascals (MPa), soit plus de 1000 fois la pression atmosphérique ; et elle atteint −20 °C à 193 MPa. Ainsi, l'eau peut rester liquide jusqu'à des températures de −18 °C, mais à des pressions difficiles à produire en toute sécurité dans un usage domestique.

L'idée géniale de l'équipe de Berkeley a été de laisser faire la nature. Puisque l'eau se dilate en gelant, empêchons-la d'enfler en la maintenant dans un volume constant. Imaginons donc que nous refroidissions peu à peu un récipient scellé et rempli d'eau. À 0 °C ou un peu en deçà, l'eau commence à geler ; mais, comme le volume est fixé, le tout premier cristal de glace qui naît ne trouve sa place qu'en comprimant l'eau environnante. Le contenu du récipient se retrouve donc à une pression supérieure à la pression atmosphérique, avec la coexistence d'un peu de glace et beaucoup d'eau liquide. Cela abaisse le point de congélation et l'on peut alors continuer à refroidir sans que tout gèle. Et ainsi de suite.

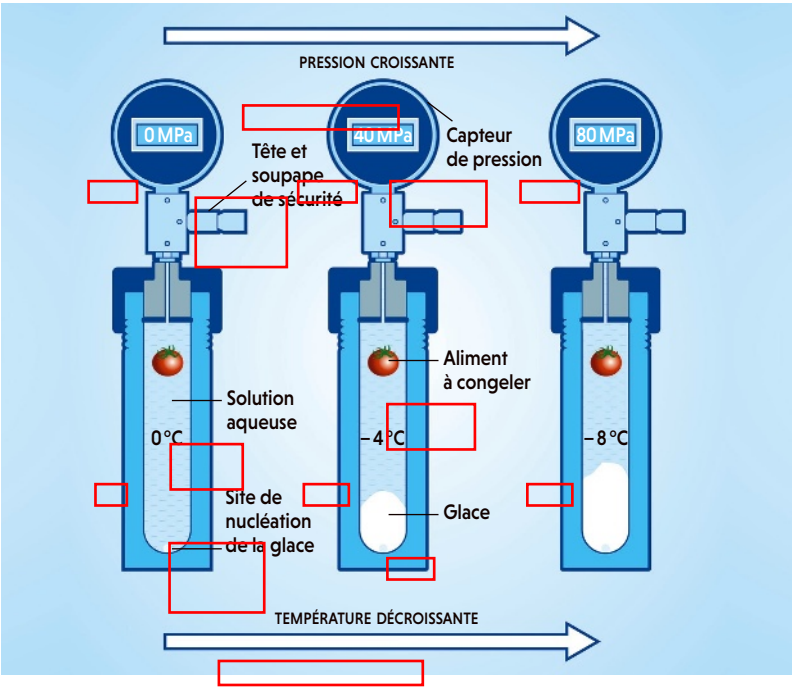
DE L'EAU LIQUIDE QUI COEXISTE AVEC LA GLACE

Dans ce processus, on suit donc la courbe de coexistence liquide-glace du diagramme de phase de l'eau (*voir l'encadré page 89*). La pression à l'intérieur du récipient scellé dépend de la température, de même que la proportion de glace par rapport à l'eau liquide. Par exemple, à −18 °C, la pression vaut 173 MPa et la glace représente 52% de la masse d'eau. Le point important est qu'il reste donc de l'eau sous forme liquide. Si, par un dispositif approprié (*voir l'encadré ci-dessus*), on maintient les aliments à conserver dans la région liquide, on évite la dénaturation des tissus biologiques provoquée par le gel.

Les résultats sur des aliments difficiles à congeler, comme les tomates ou les cerises, semblent prometteurs. Par ailleurs, comme tout l'intérieur du dispositif n'est pas gelé, on a moins d'énergie à prélever. Par conséquent, on dépense moins d'énergie par rapport au procédé habituel. Qui plus est, à mesure que la température baisse, l'énergie à prélever pour la transformation de l'eau liquide en glace diminue : de 334 kJ par kilogramme à 0 °C, elle passe à 250 kJ à −18 °C. Le gain d'énergie est donc accentué et pourrait, selon les chercheurs de Berkeley, atteindre 70% dans certaines conditions.

CONGÉLATEUR ISOCHORE

Dans un dispositif de congélation isochore, l'aliment à congeler est placé dans de l'eau (plus précisément une solution aqueuse) à l'intérieur d'un récipient scellé. À mesure que la température diminue, la pression augmente et donc la température de solidification de l'eau diminue. Bien que de la glace se forme et que sa proportion augmente, une partie de l'eau, où est immergé l'aliment, reste liquide même au plus froid (– 18 °C). Les tissus cellulaires dont est composé l'aliment sont ainsi mieux préservés.



Et il semble qu'il y ait bien d'autres avantages. Par exemple, considérons la répercussion des fluctuations de température du milieu environnant sur l'intérieur du récipient. Dans le cas de la congélation isochore, l'interface liquide-glace sert d'amortisseur. L'apport d'énergie dû à une hausse de la température extérieure est en effet essentiellement absorbé *via* la diminution de la proportion de glace dans le récipient, tandis qu'une diminution de la température externe engendre au contraire un accroissement de cette proportion. En conséquence, la température dans le récipient est bien mieux stabilisée que dans le cas d'une congélation isobare. Autrement dit, maintenir les aliments à la température désirée coûtera moins d'énergie.

Un autre atout est que, en raison des pressions élevées atteintes, la congélation isochore tue les bactéries. Enfin, il semble possible de mettre en œuvre cette nouvelle méthode en conservant pour l'essentiel les systèmes de refroidissement existants. Une révolution dans la conservation des aliments s'annonce-t-elle ? L'équipe de Berkeley le pense. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. Zhao *et al.*, **Analysis of global energy savings in the frozen food industry made possible by transitioning from conventional isobaric freezing to isochoric freezing**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151, article 111621, 2021.

M. J. Powell-Palm et B. Rubinsky, **A shift from the isobaric to the isochoric thermodynamic state can reduce energy consumption and augment temperature stability in frozen food storage**, *Journal of Food Engineering*, vol. 251, pp. 1-10, 2019.

B. Rubinsky *et al.*, **The thermodynamic principles of isochoric cryopreservation**, *Cryobiology*, vol. 50, pp. 121-138, 2005

Pour la Science HORS-SÉRIE

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 112 (août 21)
réf. DO112

N° 111 (mai 21)
réf. DO111

N° 110 (fév. 21)
réf. DO110

N° 109 (nov. 20)
réf. DO109

N° 108 (sept. 20)
réf. DO108

N° 107 (mai 20)
réf. DO107

N° 106 (févr. 20)
réf. DO106

N° 105 (nov. 19)
réf. DO105

N° 104 (juil. 19)
réf. DO104

N° 103 (avr. 19)
réf. DO103

N° 102 (fév. 19)
réf. DO102

N° 101 (nov. 18)
réf. DO101

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

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

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

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

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

TOTAL À RÉGLER ..... €

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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

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

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

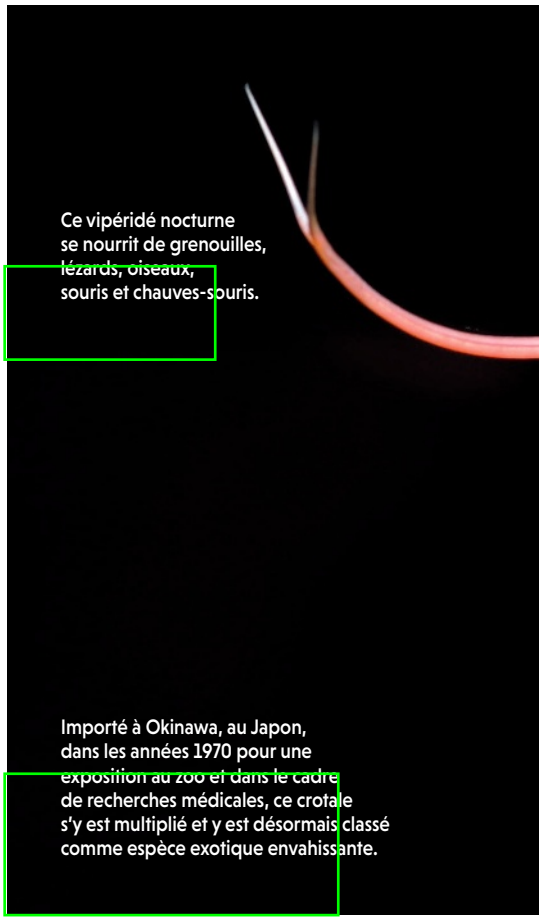
Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

L'AUTEUR

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

POURQUOI DES VENINS SI TOXIQUES ?

En une seule morsure, nombre de serpents venimeux injectent suffisamment de toxines pour tuer mille fois leur proie. Et s'il y avait un intérêt évolutif derrière ce gâchis apparent?



Ce vipéridé nocturne se nourrit de grenouilles, lézards, oiseaux, souris et chauves-souris.

Importé à Okinawa, au Japon, dans les années 1970 pour une exposition au zoo et dans le cadre de recherches médicales, ce crotale s'y est multiplié et y est désormais classé comme espèce exotique envahissante.

Les toxines de serpents soulèvent un profond intérêt, que ce soit pour des questions médicales ou, plus récemment, évolutives. Si soigner les envenimations s'impose dans de nombreux pays tropicaux, en comprendre l'origine et l'histoire relève d'une fascinante enquête. En effet, posséder un venin apparaît comme une percée adaptative, c'est-à-dire une innovation évolutive qui, en permettant à des organismes d'avoir accès à de nouvelles ressources et d'explorer de nouveaux environnements, semble la cause du haut taux de diversification du taxon concerné. Citons, comme autres exemples, l'aile des oiseaux ou des chauves-souris, ou encore l'incisive à croissance continue des rongeurs. Aussi les systématiciens considèrent-ils ces caractères comme des marqueurs clés pour comprendre l'histoire évolutive de ces branches du vivant.

De fait, vu l'avantage conféré aux organismes pourvus de telles innovations, il est certain que la sélection naturelle a grandement présidé aux diversifications subséquentes. Concernant les venins, il paraît donc évident à tout biologiste de l'évolution que les gènes codant les toxines protéiques qui les composent ont subi une forte sélection. Pourtant, restait toujours un mystère *a priori* impénétrable, celui de la surpuissance des venins. Le terme anglais *overkilling* nomme bien cette caractéristique: de nombreux serpents venimeux injectent en

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

© Sam Yue / Alamy Stock Photo

EN CHIFFRES

110 mg

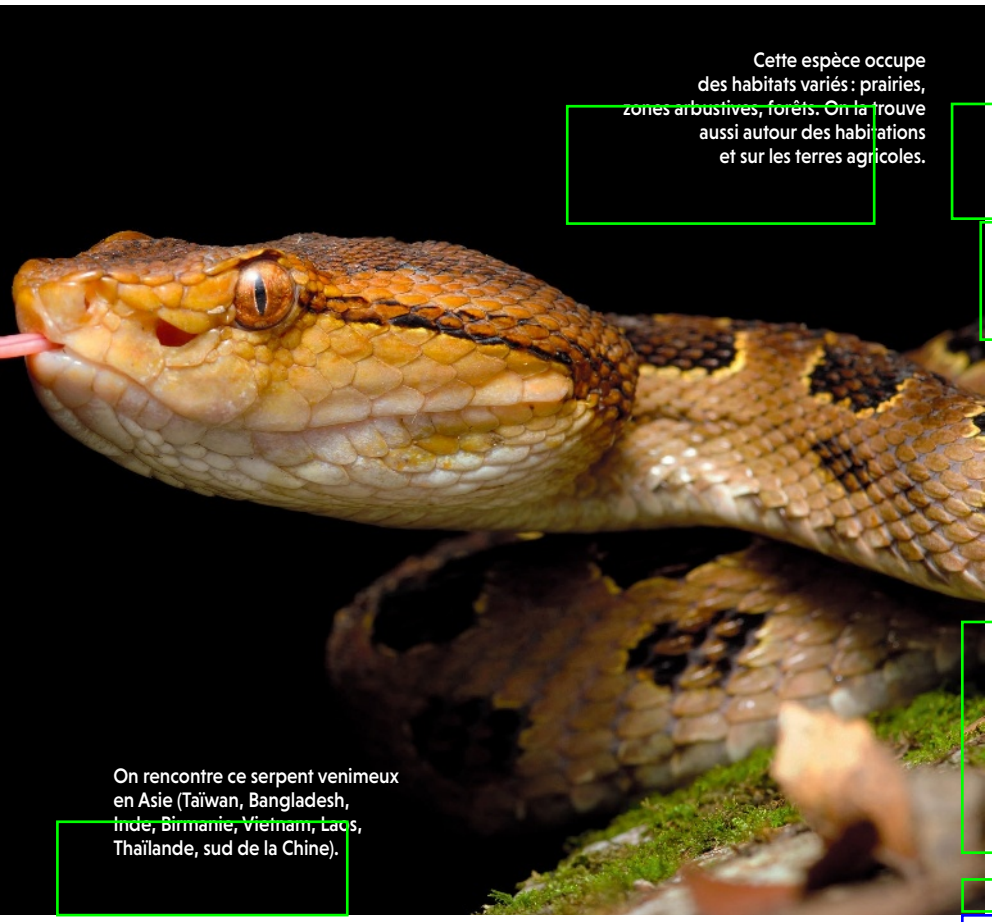
Le taïpan du désert *(Oxyuranus microlepidotus)* délivre en une morsure 110 milligrammes de venin, de quoi tuer 100 personnes ou 250 000 souris.

27

Le venin des serpents compte en général 27 toxines majeures. Dans leur étude sur 52 serpents venimeux, Agneesh Barua et Alexander Mikheyev se sont concentrés sur les 10 toxines les plus diversifiées chez les serpents.

25 MILLIONS D'ANNÉES

Rukwanyoka holmani, le plus ancien fossile d'élapidé trouvé en Tanzanie, date de l'Oligocène terminal, il y a 25 millions d'années. Cette branche est l'une des plus récentes des serpents venimeux.



Cette espèce occupe des habitats variés : prairies, zones arbustives, forêts. On la trouve aussi autour des habitations et sur les terres agricoles.

On rencontre ce serpent venimeux en Asie (Taïwan, Bangladesh, Inde, Birmanie, Vietnam, Laos, Thaïlande, sud de la Chine).

Habu de Taïwan *(Protobothrops mucrosquamatus)*

Longueur :
env. 1,1 m (mâle)
env. 1,2 m (femelle)

une seule morsure de quoi tuer cent fois, mille fois, la proie visée. Par exemple, le taïpan côtier (*Oxyuranus scutellatus*), un élapidé vivant dans le nord et l'est de l'Australie ainsi que dans le sud de la Nouvelle-Guinée et qui se nourrit de rats, souris ou bandicoots, injecte en une seule morsure de quoi tuer 12 000 cochons d'Inde !

À quoi correspond un tel gaspillage ? On en donne souvent une explication *ad hoc*, à savoir que la proie d'un serpent doit être très vite immobilisée, de manière qu'elle n'aille pas mourir loin de son prédateur. Pourtant, sur un caractère donné, le jeu de la sélection naturelle est tel que, la plupart du temps, un optimum est atteint. Or, ici, au premier abord, un tel optimum est largement dépassé. C'est à ce problème que se confrontent depuis plusieurs années Agneesh Barua, du Collège doctoral de science et technologie d'Okinawa, au Japon, et Alexander Mikheyev, aujourd'hui à l'université nationale australienne, à Canberra. Et auquel ils apportent à présent plusieurs réponses.

UN PARADOXE ÉVOLUTIF

Avec des collègues, les deux biologistes ont commencé, en 2017, par séquencer le génome du habu de Taïwan (*Protobothrops mucrosquamatus*), un vipéridé abondant dans les alentours d'Okinawa. Ils y ont capturé vingt exemplaires afin de réaliser une comparaison entre génomes. Cela leur a permis de quantifier la diversité moléculaire des gènes de toxines et de préciser l'impact de la sélection. Ils ont constaté que chaque protéine du venin doit être vue non comme un tout, mais par domaines. Certains domaines de la protéine, et donc les parties correspondantes du gène codant, ont subi une forte sélection, mais d'autres présentent une diversité qui semble répondre à la dérive génétique, c'est-à-dire à un comportement aléatoire.

De telles mutations sont dites « neutres » – transparentes à la sélection.

Or, ici, les mutations des toxines qui suivent la dérive génétique apparaissent non pas neutres, mais délétères pour l'animal: elles rendent les toxines moins efficaces. On s'attendrait donc à ce qu'elles disparaissent, par sélection négative. Pourquoi, alors, ces variations se comportent-elles comme des mutations neutres? Agneesh Barua, Alexander Mikheyev et leurs collègues ont montré que la réponse se trouve dans le niveau d'expression des gènes. En effet, l'*overkilling* est le résultat d'une importante surexpression des gènes de toxines, qui fournit une quantité considérable de protéines. Réfléchissons alors en dynamique, en imaginant une toxine qui subit une mutation légèrement délétère. Elle sera un peu moins efficace, mais comme elle est surexprimée, elle continuera à agir comme auparavant. Que l'*overkilling* passe de 12000 à 10000 cochons d'Inde par morsure ne change rien à la puissance de prédation de l'animal.

Ainsi, parce que les gènes des toxines sont surexprimés, les mutations délétères, mais sans effet apparent sur les serpents et donc transparentes à la sélection naturelle, se comportent comme des mutations neutres. La dynamique de la sélection est donc modulée par le niveau d'expression des gènes: les contraintes sélectives étant levées sur des protéines très abondantes, les mutations délétères s'accumulent.

Ainsi a été démasquée l'utilité évolutive de l'*overkilling*. D'un côté, la sélection naturelle optimise l'efficacité du venin à court terme; de l'autre, le relâchement des contraintes sélectives sur les mutations délétères conduit à un renouvellement rapide des protéines, et donc à une exploration d'un vaste espace de phénotypes de venins. Cela explique l'abondance des duplications de gènes de toxines et l'apparition fréquente de pseudogènes – des gènes devenus inactifs par accumulation d'altérations génétiques. Avec, malgré tout, souvent les mêmes combinaisons de gènes, comme s'il y avait peu de formules optimales.

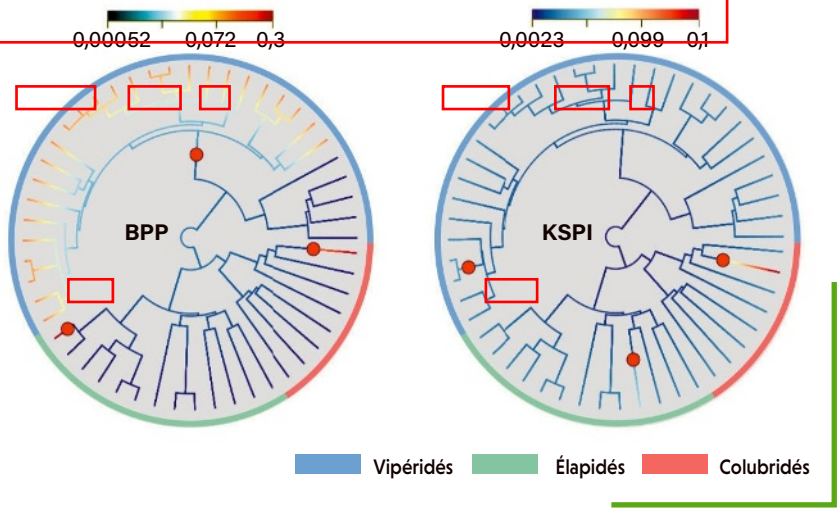
DES PROTÉINES DÉTOURNÉES

Pour aller plus loin, en 2020, Agneesh Barua et Alexander Mikheyev ont testé la dynamique évolutive d'une dizaine de gènes de toxines chez 52 serpents venimeux – des colubridés (serpents des arbres, serpents liane…), des élapidés (serpents corail, mambas, cobras) et des vipéridés (vipères, crotales…). Ils démontrent que l'évolution est rapide, avec des changements brusques des vitesses d'évolution, ce qui confirme leurs conclusions précédentes… et anéantit en revanche tout espoir d'utiliser les gènes des toxines pour construire des phylogénies moléculaires (*voir l'encadré ci-dessus*).

Restait une question: pourquoi les gènes des toxines sont-ils surexprimés? Pour le savoir, les deux biologistes se sont focalisés non pas sur les venins, mais sur le réseau de régulation génique qui contrôle l'expression des gènes de toxines. Ils ont alors trouvé un réseau très conservé, identique à celui agissant dans les glandes salivaires des autres amniotes, comme les mammifères et les oiseaux. Chez les ancêtres des serpents, tout s'est donc passé comme si ce réseau avait tout d'abord surexprimé des protéines toxiques communes dans la salive, telles que des kallicréines. Ingérées avec les aliments, ces protéases activent la vasodilatation, ce qui favorise l'assimilation des aliments par un afflux de sang autour du tube digestif. Injectées à des proies, elles influent aussi sur l'inflammation et la coagulation sanguine. Ces protéines bénéfiques ont ainsi été recrutées comme toxines – de même que bien d'autres plus tard. ■

UNE ÉVOLUTION À CHANGEMENTS DE VITESSE

En examinant la dynamique évolutive d'une dizaine de gènes de toxines de venin (ici les toxines BPP et KSPI), Agneesh Barua et Alexander Mikheyev ont montré que la vitesse d'évolution de chacun de ces gènes a subi de multiples changements brusques *(points rouges)*, de même que des variations *(plus la couleur est chaude, plus la vitesse est élevée)*, chez de nombreux serpents venimeux. Pour la plupart des toxines, ces changements ont augmenté dans les lignées modernes de serpents *(à la périphérie de l'arbre)*. L'évolution des gènes des toxines est si rapide qu'il est impossible de les utiliser pour construire des phylogénies moléculaires des serpents.



BIBLIOGRAPHIE

A. Barua et A. Mikheyev, **Toxin expression in snake venom evolves rapidly with constant shifts in evolutionary rates,** *Proc. R. Soc. B*, vol. 287, article 20200613, 2020.

A. Barua et A. Mikheyev, **An ancient, conserved gene regulatory network led to the rise of oral venom systems,** *PNAS*, vol. 118, article 14e2021311118, 2020.

A. Barua et A. Mikheyev, **Many options, few solutions : over 60 My snakes converged on a few optimal venom formulations,** *Mol. Biol. Evol.*, vol. 36(9), pp. 1964-1974, 2019.

S. D. Aird *et al.*, **Population genomic analysis of a pitviper reveals microevolutionary forces underlying venom chemistry,** *Genome Biol. Evo.*, vol. 9(10), pp. 2640-2649, 2017.

© B. Agneesh et al., Proc. R. Soc. B., vol. 287, article 20200613, 2020 (CC BY 4.0)

ABONNEZ-VOUS À

Pour la Science

OFFRE NOËL 1 AN

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre *Dans la tête d'un mathématicien* ou le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien*	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €**	**79 €**	**99 €**

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

PAG21NOE

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

1 Je choisis ma formule (merci de cocher)

FORMULE PAPIER — 59€

☐ + Le livre *Dans la tête d'un mathématicien* — 1-F-PAP-P-12N-59€-TUM

ou

☐ + Le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien* — 1-F-PAP-P-12N-59€-MVB

FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE — 79€

☐ + Le livre *Dans la tête d'un mathématicien* — 1-F-HSPAP-P-12N-79€-TUM

ou

☐ + Le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien* — 1-F-HSPAP-P-12N-79€-MVB

FORMULE INTÉGRALE — 99€

☐ + Le livre *Dans la tête d'un mathématicien* — 1-F-INT-P-12N-99€-TUM

ou

☐ + Le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien* — 1-F-INT-P-12N-99€-MVB

2 J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Téléphone .....

Courriel : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @.....

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

3 Je choisis mon mode de règlement

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

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

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 €, le livre *Dans la tête d'un mathématicien* pour 22,00 € et le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien* pour 17,00 €.

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

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

L'AUTEUR

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

DES PÂTES REPOSÉES POUR RESTER EN FORME

C'est surtout après avoir étalé une pâte à tarte qu'il faut la laisser reposer quelques minutes, pour éviter qu'elle ne se déforme.

La rétraction d'une pâte, à la cuisson ou avant, est une nuisance pour le cuisinier.

La cuisine préconise de faire reposer les pâtes avant de les utiliser : on éviterait ainsi la rétraction de la pâte, c'est-à-dire sa déformation. Mais on a assez vu de préconisations culinaires inefficaces pour s'en méfier. Nous avons donc exploré diverses conditions opératoires.

Nous avons étudié les pâtes à foncer, pâtes que l'on étale pour faire notamment des fonds de tarte, par opposition aux pâtes à dresser, plus fermes et utilisées pour les parois de pâtés. Restons-en donc aux pâtes à foncer, dont on « fonce » un moule, en « abaissant » la pâte, c'est-à-dire en l'étalant. En évite-t-on la rétraction en laissant reposer la pâte après l'avoir confectionnée ?

La réponse est partiellement négative. Voyons pourquoi. La farine contient notamment des grains d'amidon et des protéines qui, lors d'un malaxage en présence d'eau, forment un réseau nommé « gluten ». Ce gluten est viscoélastique : quand on l'étire et qu'on le relâche, on observe un fluage, mais aussi une élasticité, qui contribue à la rétraction des pâtes.

Les phénomènes sont aussi compliqués par la présence du beurre, du sucre, du sel, de l'œuf… De même, intervient la température qui augmente la proportion de matière grasse liquide.

Nous avons utilisé une recette unique de pâte sablée (100 g de farine, 75 g de beurre, 22 g d'eau). Pour la fabriquer, on frotte la farine avec le beurre pour faire une sorte de sable, puis on ajoute l'eau. Les pâtons ainsi obtenus ont été divisés en deux parties égales, traitées l'une sans repos, l'autre avec.

Pour la pâte qui avait été abaissée, détaillée à l'aide d'un emporte-pièce carré et cuite aussitôt sur la plaque chaude d'un four préchauffé à 200 °C, la rétraction était comprise entre 2 et 4 millimètres, pour une largeur totale de 10 centimètres. En revanche, pour la même pâte qui avait reposé au réfrigérateur (4 °C) pendant 2 heures avant d'être cuite de la même façon, la rétraction était de 7 à 9 millimètres, soit plus que dans le cas sans repos. Conclusion : la rétraction peut être très faible pour les pâtes à foncer même quand elles n'ont pas reposé !

L'expérience a été répétée pour des pâtons qui ont été divisés en deux parties : l'une n'était pas reposée, et l'autre reposait au froid avant d'être remise à la température ambiante, puis abaissée et cuite. Cette fois, pour le pâton non reposé, on observait à nouveau une rétraction notable, de 10 millimètres dans la direction d'abaissement de la pâte et de 2 millimètres dans l'autre direction.

REPOS APRÈS ÉTIREMENT

Pour le pâton reposé et remis à température ambiante, on observe un phénomène qui nous éclaire : dans cette nouvelle expérience, le four n'avait pas été allumé par avance, et il a fallu attendre plusieurs minutes après avoir abaissé et découpé la pâte à l'emporte-pièce. Or, pour ce second pâton, 6 minutes après avoir étalé et découpé la pâte, elle s'était rétractée de 11 millimètres dans la direction de l'étalement (et de 1 à 2 millimètres dans l'autre direction).

Ainsi, la rétraction survient quand on étire la pâte, et dans les minutes qui suivent. Mieux, la rétraction se fait dans le sens de l'étirement ; on le voit plus nettement quand on prépare des pâtes feuilletées, où le pâton est allongé trois fois avant d'être replié en trois, six fois de suite. Nous savons maintenant qu'il faut laisser la pâte reposer quand on l'étire et nous vous invitons à faire l'expérience ! ■

EXPÉRIENCE DE PÂTES

❶ Suivons le *Dictionnaire universel de cuisine* de Joseph Favre (1883). Réunir sur une planche à pâtisserie 500 g de farine en fontaine, au centre de laquelle on dépose 350 g de beurre, 25 g de sel et de l'eau froide.
❷ Pour que le résultat reste croustillant, dit-il, « on opère la détrempe sans fraiser la pâte », en ajoutant l'eau nécessaire pour obtenir une pâte suffisamment ferme.
❸ L'abaisser et la diviser en deux moitiés.
❹ Utiliser la première moitié pour une tarte. Pour l'autre moitié : donner deux tours (on la replie en trois, on étend à nouveau et on replie en trois, puis on l'abaisse). Citons Favre : « On obtient leurs qualités essentielles en obtenant une pâte fraîche, non collante en lui donnant deux tours et les abaissant avec le rouleau. » À voir après cuisson !

© Shutterstock.com/Adrian_am13

ABONNEZ-VOUS À

Pour la Science

OFFRE NOËL

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
Votre cadeau : le livre *Dans la tête d'un mathématicien* ou le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien*	✓	✓	✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnements Pour la Science – 56, rue du Rocher – 75008 Paris – Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

PAG21NOE

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

FORMULE PAPIER – 4,90€ PAR MOIS

☐ + Le livre *Dans la tête d'un mathématicien* ou ☐ + Le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien*

I-F-PAP-F-PVT-4,9€-TUM I-F-PAP-F-PVT-4,9€-MVB

FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE – 6,50€ PAR MOIS

☐ + Le livre *Dans la tête d'un mathématicien* ou ☐ + Le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien*

I-F-HSPAP-F-3PVT-6,5€-TUM I-F-HSPAP-F-3PVT-6,5€-MVB

FORMULE INTÉGRALE – 8,20€ PAR MOIS

☐ + Le livre *Dans la tête d'un mathématicien* ou ☐ + Le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien*

I-F-INT-F-3PVT-8,2€-TUM I-F-INT-F-3PVT-8,2€-MVB

2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Tel. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Courriel : ..... @.....

(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

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

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2022 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 €, le livre *Dans la tête d'un mathématicien* pour 22,00 €, et le livre *Ces microbes qui nous veulent du bien* pour 17,00 €.

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

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

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

p.56 MACROPLASTIQUES

En survolant le fond du canyon Lacaze-Duthiers, en Méditerranée, des chercheurs en biologie marine ont trouvé près de 1 morceau de plastique tous les 100 mètres linéaires. Une équipe de Barcelone en a même observé davantage dans les canyons catalans du cap de Creus, de La Fonera et de Blanes. Les déchets plastiques les plus gros, les « macroplastiques » (de taille supérieure à 5 millimètres), s'accumulent dans les récifs, piégés par le corail.

p.38 31 %

En France, les forêts occupent 16,9 millions d'hectares, soit 31 % du territoire, auxquels s'ajoutent environ 80 000 hectares par an du fait de la déprise pastorale et agricole. Mais dans le monde, on déboise plus de 10 millions d'hectares par an.

p.7

« Toute personne peut être porteuse du virus Ebola en dormance sans le savoir. Il faut communiquer auprès de la population pour éviter la stigmatisation des anciens malades »

ALPHA KEITA, virologue au Cerfig, en Guinée

p.48 SODIUM

À environ 90 kilomètres d'altitude, l'atmosphère présente une couche de quelques kilomètres riche en sodium. Excités avec un laser puissant, ces atomes émettent une lumière orangée. Ce signal aide à corriger les perturbations de l'atmosphère dans les observations du ciel.

p.88 ISOCHORE

En thermodynamique, une transformation isochore signifie que le processus se déroule à volume constant. On peut congeler un aliment de façon isochore en l'immergeant dans une solution adaptée. Dans ces conditions, à mesure que la température diminue, la pression augmente et l'aliment reste dans une solution liquide. Ses cellules sont ainsi mieux préservées. La fin des purées de framboises décongelées ?

p.92 12 000

De nombreux serpents venimeux injectent en une seule morsure de quoi tuer cent fois, mille fois, la proie visée. Par exemple, le taïpan côtier, un élapidé vivant dans le nord et l'est de l'Australie ainsi que dans le sud de la Nouvelle-Guinée et qui se nourrit de rats, souris ou bandicoots, injecte en une seule morsure de quoi tuer 12 000 cochons d'Inde !

p.80 5×10^{20}

D'après la conjecture de Syracuse, en partant de tout entier $n \geq 1$ et en appliquant le calcul « si n est pair, le diviser par 2 ; si n est impair, le remplacer par $3n + 1$; puis recommencer », on finit toujours par arriver à 1. Cette conjecture n'a toujours pas de preuve, mais, grâce à un programme, David Bařina, de l'université de Brno, l'a vérifiée jusqu'à plus de 5×10^{20} !

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal : 5636 – novembre 2021 – N° d'édition : M0770529-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 257 720 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

Des livres pour explorer le vivant

Nouveauté

La boite à curiosités

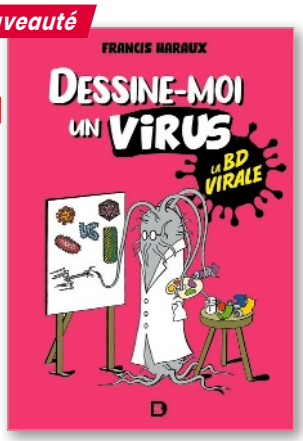
Marie Treibert

2021 | 176 pages | 978280733**0948** | **19,90 €**

Une aventure drôle et insolite au cœur du vivant !

Marie et sa Boite à curiosités est un duo attachant qui parcourt les sciences et en particulier la biodiversité au travers de questions et d'explications humoristiques. Il remonte le temps pour rencontrer les grandes figures scientifiques historiques, il se rapetisse pour rencontrer les bactéries, et prouver au lecteur que la curiosité n'est pas un vilain défaut.

Nouveauté



Dessine-moi un virus !

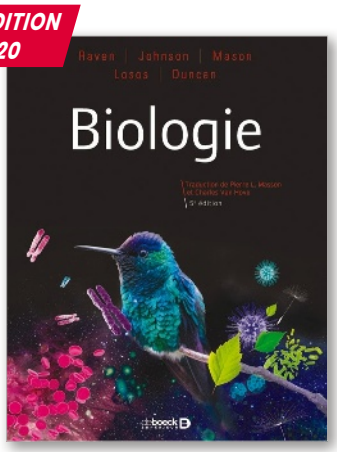
Francis Haraux

2021 | 48 pages | 978280739**3978** | **14,90 €**

La BD virale

Vous entendez parler toute la journée des virus et vous ne savez toujours pas ce que c'est ? Dans un dialogue sans complaisance avec une bactérie ayant un sale caractère, les virus vous racontent leur existence mouvementée, sous forme de BD.

ÉDITION 2020

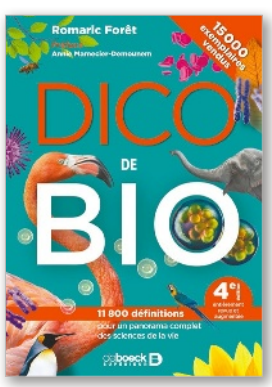


Biologie

Peter H Raven, Jonathan B Losos, Kenneth A Mason, Georges B Johnson, Tod Duncan

2020 | 1480 pages | 978280732**7023** | **75 €**

Une référence majeure pour les étudiants et enseignants en biologie. Très didactique, il propose une approche progressive et complète de cette discipline en constante évolution.



Dico de bio

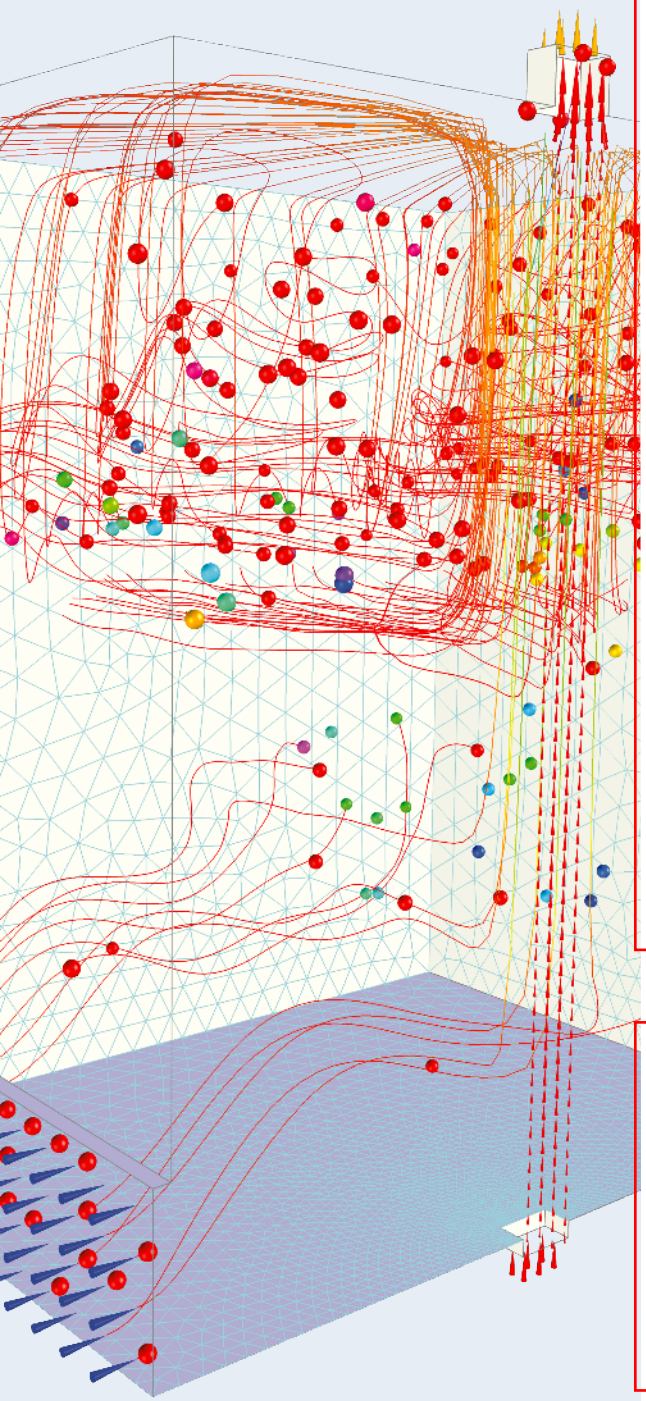
Romaric Forêt

4e édition | 2020 | 1152 pages | 978280730**2891** | **39,90 €**

Le dictionnaire de poche qui offre le panorama le plus complet et à jour des sciences de la vie, dans un format poche : étymologie du mot, traduction anglaise, synonyme, définition scientifique et historique, des exemples pour illustrer.

ÉTUDE DE CAS

Prévenir les flambées épidémiques grâce à la modélisation mathématique et à la simulation



L'utilisation des mathématiques pour analyser la propagation des épidémies n'est pas une idée nouvelle. L'un des premiers modèles mathématiques d'épidémiologie remonte à 1760 et a été présenté par Daniel Bernoulli pour l'étude du taux de mortalité de la variole. Aujourd'hui, les chercheurs en médecine et les responsables de la santé publique continuent à utiliser la modélisation mathématique et la simulation pour prévenir et contrôler les épidémies dans le monde moderne.

EN SAVOIR PLUS *comsol.blog/epidemiology-simulation*

COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.