POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

L 13256 - 522 - F: 6,90 € - RD

AVRIL 2021
N° 522

MATHÉMATIQUES
DE L'HYPERCUBE À LA CONJECTURE DE LA SENSITIVITÉ

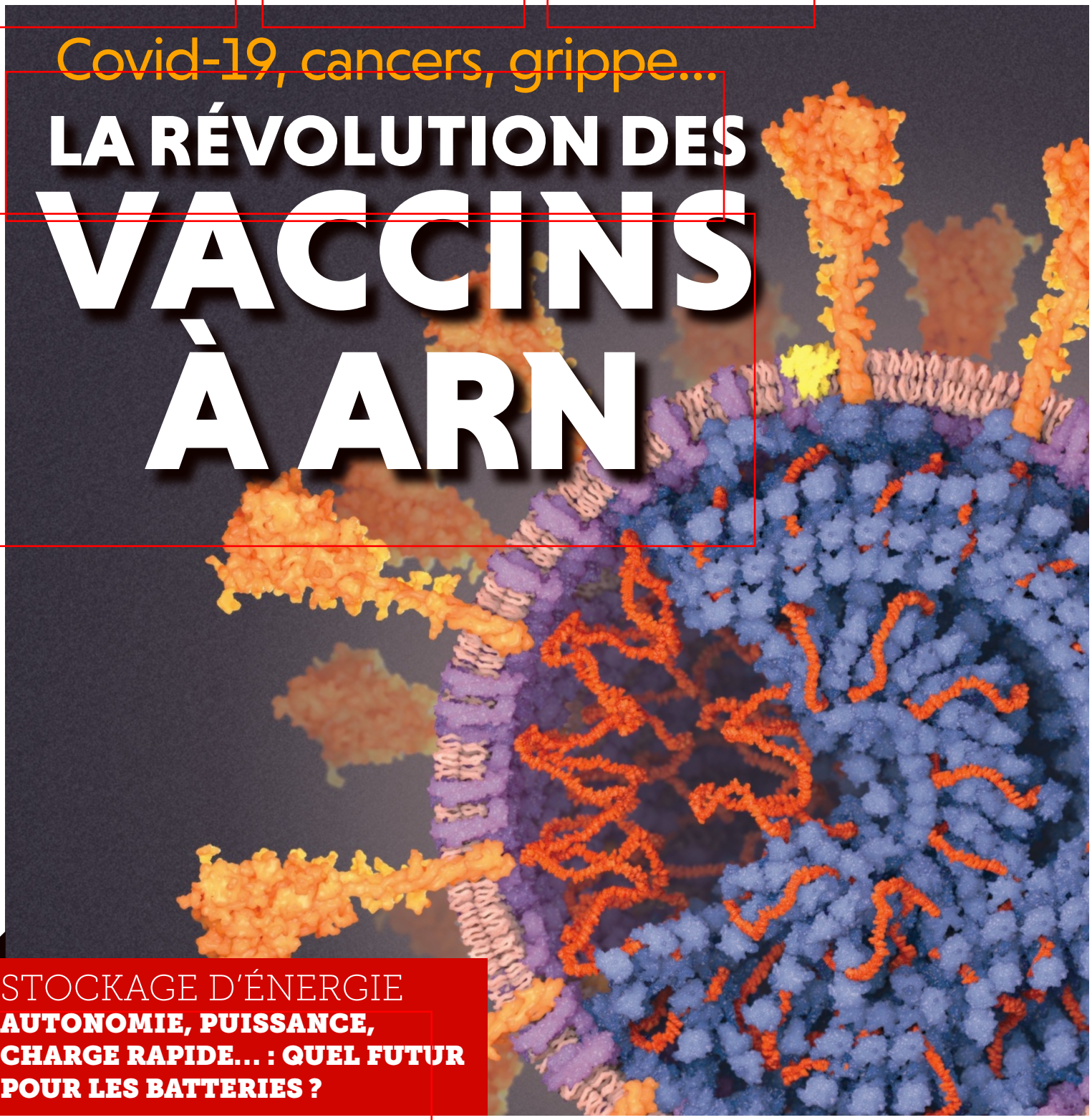
PALÉONTOLOGIE
LE DILOPHOSAURE DE JURASSIC PARK FACE À LA RÉALITÉ

ASTROPHYSIQUE
LA FUREUR DE VIVRE DES GRANDS AMAS DE GALAXIES

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

Covid-19, cancers, grippe…

LA RÉVOLUTION DES VACCINS À ARN



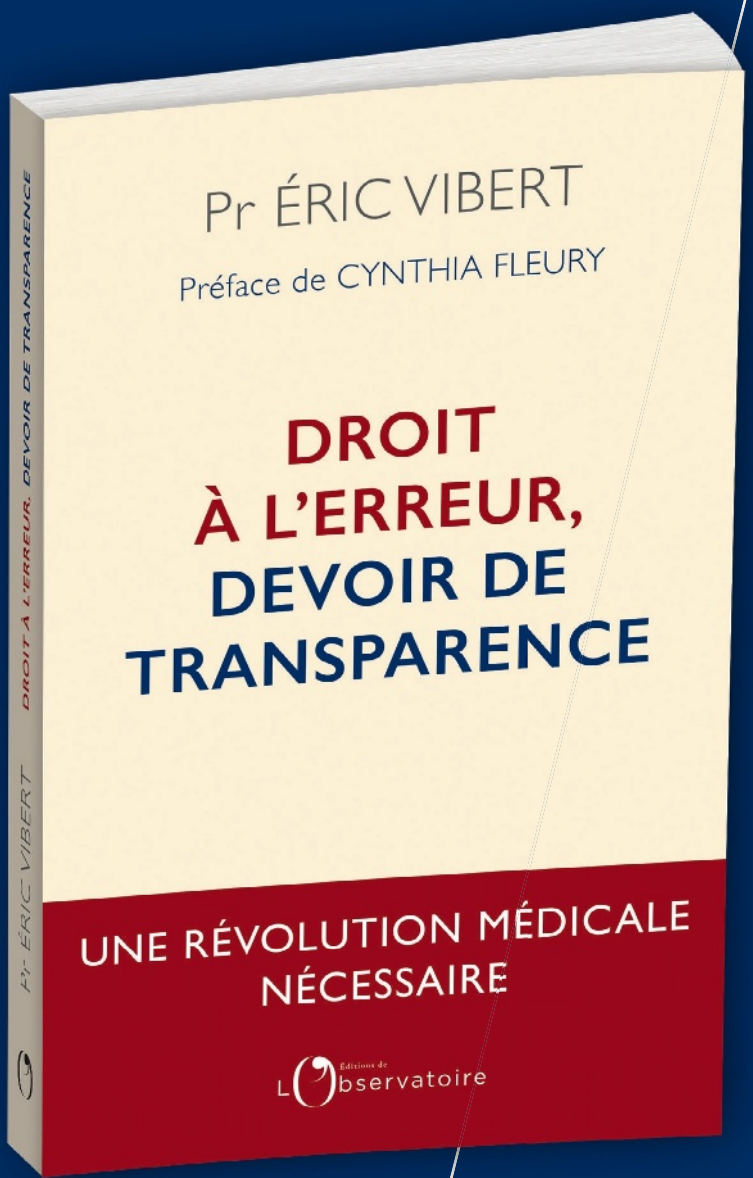
STOCKAGE D'ÉNERGIE
AUTONOMIE, PUISSANCE, CHARGE RAPIDE… : QUEL FUTUR POUR LES BATTERIES ?

En demandons-nous trop à la médecine ? Le professeur Vibert lève le tabou de l'erreur médicale.

« Un essai passionnant : le professeur de chirurgie digestive plaide pour une libération de la parole autour des erreurs médicales. »
Élodie Lepage, *L'Obs*

« Eric Vibert, professeur d'université et chirurgien digestif à Villejuif, pose la question du droit à l'erreur dans un essai original. »
Oihana Gabriel, *20 Minutes*

« Un livre original et sincère. »
Jérôme Vincent, *Le Point*



Éditions de l'Observatoire

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

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

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

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

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro: Nicolas Bellouin, Eric Buffetaut, Antoine Deblais, Delphine Del Marmol, Gilles Ramstein, Caroline Vanhoove

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
www.boutique.groupepourlascience.fr
Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr
Tél.: 01 86 70 01 76
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
Acting 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

DES VACCINS D'AVENIR, POUR PRÉVENIR OU GUÉRIR

Depuis que la pandémie de Covid-19 s'est déclarée, début 2020, beaucoup d'instituts de recherche, de grosses entreprises pharmaceutiques ou de petites sociétés de biotechnologie à travers le monde se sont lancées dans la course au vaccin. L'urgence a fait que ce qui prenait d'habitude plusieurs années, et sans garantie de résultat, s'est réalisé en quelques mois et avec succès: à la fin de 2020, plusieurs vaccins contre le Covid-19 étaient disponibles sur le marché planétaire.

Parmi eux, les vaccins à ARN semblent les plus efficaces. Une efficacité bien sûr bienvenue. Mais sur le plan scientifique, l'essentiel est ailleurs: les vaccins à ARN constituent une nouveauté pour la médecine humaine et laissent présager de multiples développements allant bien au-delà de la lutte contre le Covid-19.

L'idée de ces vaccins n'est pas très récente, puisqu'elle remonte à la fin des années 1980. Mais comme on peut s'en rendre compte en lisant l'enquête d'Elie Dolgin (*pages 22 à 28*) et l'entretien avec le chercheur et entrepreneur Bruno Pitard (*pages 30 à 35*), il a fallu trois décennies de recherches dans des directions diverses et une pandémie accélératrice pour qu'elle débouche sur un vaccin utilisable chez l'humain.

La longue histoire de ces vaccins innovants et dotés de plusieurs atouts montre à quel point s'y sont mêlés recherches scientifiques, prises ou non-prises de risques par de grandes ou petites entreprises, financements ou absence de financements de la part des pouvoirs publics... Peut-être son analyse détaillée livrera-t-elle des enseignements sur les meilleures façons de favoriser l'innovation, et qui pourraient s'appliquer à d'autres domaines comme la robotique, l'informatique quantique, les batteries...?

Cependant, l'histoire des vaccins à ARN n'est pas que du passé, elle est surtout de l'avenir. En particulier, le principe de ces vaccins devrait se décliner contre d'autres maladies infectieuses, et il est aussi envisageable de mettre au point des vaccins thérapeutiques (non préventifs) pour traiter des cancers ou d'autres pathologies. L'invention des vaccins à ARN ouvre clairement d'alléchantes perspectives, et il n'est pas exagéré, une fois n'est pas coutume, de la qualifier de révolutionnaire. ■

SOMMAIRE

N° 522 /
Avril 2021

ACTUALITÉS

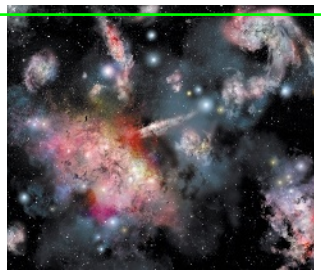
P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Rats-taupes nus: un dialecte pour chaque colonie
- On a séquencé de l'ADN très ancien de mammouths
- Les icebergs, coup de pouce aux périodes glaciaires
- Parler avec des rêveurs
- Pourquoi quatre cornes au lieu de deux?
- Un virus très bien intégré
- Le clairon préhistorique de Marsoulas
- Des organoïdes qui imitent le cerveau de Néandertal

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Quel avenir pour nos ratures?
Gilles Dowek

P. 20
QUESTIONS DE CONFIANCE
Le vaccin, la mort et le politique
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



P. 36
ASTRONOMIE
LA FUREUR DE VIVRE DES GRANDS AMAS DE GALAXIES
Arianna Long

Certains anciens amas de galaxies semblent avoir grandi trop vite. Ils constituent un laboratoire pour explorer l'astrophysique dans des conditions extrêmes.

P. 54
PALÉONTOLOGIE
LE DILOPHOSAURE POST-HOLLYWOOD
Matthew Brown et Adam Marsh

De nouvelles découvertes montrent que l'un des dinosaures les plus spectaculaires du film *Jurassic Park* était en réalité très différent de l'animal représenté à l'écran.

P. 44
TECHNOLOGIE
QUEL FUTUR POUR LES BATTERIES?
Jean-Marie Tarascon

Depuis plusieurs années, les batteries au lithium équipent véhicules électriques, téléphones portables et une multitude d'autres dispositifs électroniques. Mais leurs performances restent en deçà des besoins. Comment les améliorer? Tour d'horizon.

P. 64
GÉOSCIENCES
L'ALTÉRATION DES ROCHES, THERMOSTAT DE LA TERRE
Friedhelm von Blanckenburg

Au cours des 15 derniers millions d'années, le climat global s'est peu à peu refroidi de plusieurs degrés. Pourquoi? En captant du dioxyde de carbone de l'atmosphère, l'altération chimique des roches a joué dans cette évolution un rôle crucial, aujourd'hui mieux cerné.

POUR LA SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION

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

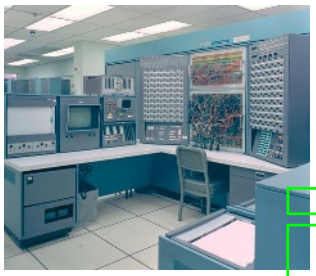
- **Notre sélection d'articles**
- **Des offres préférentielles**
- **Nos autres magazines en kiosque**

Inscrivez-vous www.pourlascience.fr

En couverture:
© Veronica Falconieri Hays; source: Lorenzo Casalino, Zied Gaieb et Rommie Amaro, U. C. San Diego (modélisation de la protéine S)

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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



P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES

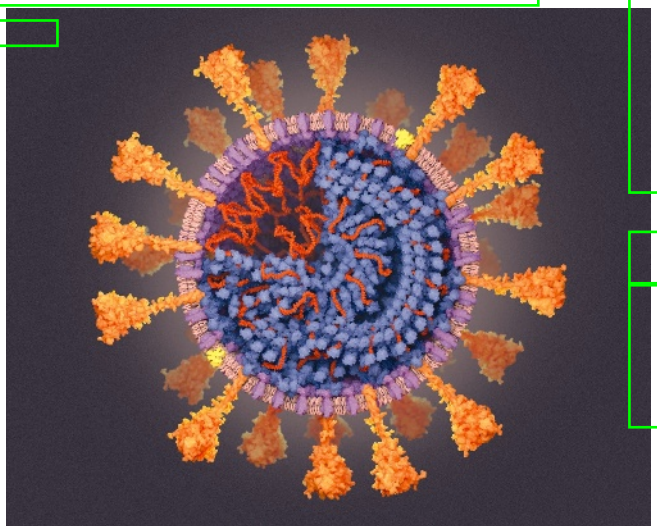
QUAND L'INFORMATIQUE ÉTAIT ANALOGIQUE
Cyrille Foasso

Ou comment l'EAI 8800, une machine de 3 tonnes vieille de plus de cinquante ans accueillie il y a quelques années au musée des Arts et Métiers, à Paris, témoigne que les prédécesseurs des ordinateurs n'ont pas dit leur dernier mot.

À LA UNE

MÉDECINE
P. 22

LA RÉVOLUTION DES VACCINS À ARN
Elie Dolgin



Pour la première fois autorisés chez l'humain dans la lutte contre le Covid-19, les vaccins à ARN offrent des perspectives beaucoup plus larges contre des maladies telles que la grippe, mais aussi le sida, le paludisme ou les cancers.

P. 30

« LES VACCINS À ARN OUVRENT UNE VOIE THÉRAPEUTIQUE PUISSANTE »
Entretien avec Bruno Pitard

Avec l'épidémie de Covid-19, les vaccins à ARN sont entrés dans une nouvelle phase de leur histoire. Bruno Pitard, qui a participé à l'aventure, revient sur ce champ de recherche en pleine ébullition.

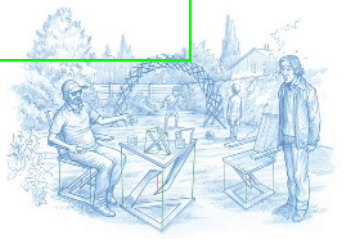
RENDEZ-VOUS

P. 82
LOGIQUE & CALCUL

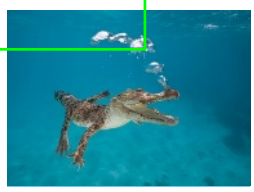
DE L'HYPERCUBE À LA SENSITIVITÉ
Jean-Paul Delahaye

La « conjecture de la sensitivité », qui portait sur la complexité des fonctions booléennes, importantes en informatique, résistait depuis plusieurs décennies. Un jeune mathématicien d'origine chinoise, Hao Huang, l'a prouvée en deux pages, en exploitant un détour par les hypercubes.

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
La tenségrité et la table impossible
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Des crocos au sang chaud
Hervé Le Guyader



P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Sel, sucre et pâtes levées
Hervé This

P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

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

ÉTHOLOGIE

RATS-TAUPES NUS : UN DIALECTE POUR CHAQUE COLONIE

Le rat-taupe nu est un petit rongeur remarquable par son organisation sociale, sa longévité (jusqu'à une trentaine d'années), son insensibilité à certains types de douleurs et la rareté de ses cancers.

Grâce à des signaux sonores spécifiques, les rongeurs indiquent leur appartenance à la colonie. La reine jouerait un rôle central dans le maintien de ce « dialecte ».

De grandes dents, de petits yeux quasi aveugles, une peau glabre… Malgré ce physique pas très engageant, le rat-taupe nu (*Heterocephalus glaber*) est un mammifère fascinant. Ce petit rongeur vit dans l'est de l'Afrique au sein de colonies souterraines qui comptent jusqu'à 300 membres. La structure sociale est matriarcale : une reine, unique, se reproduit avec un nombre limité de mâles. Les autres membres du groupe œuvrent pour la communauté, creusent de nouveaux tunnels et ramènent de la nourriture. De telles structures dites « eusociales » se retrouvent chez certains insectes (fourmis, abeilles, etc.), mais sont extrêmement rares chez les mammifères. Comment s'opère la cohésion d'une telle colonie ? On ne le sait pas bien, mais la communication sonore semble jouer un rôle majeur. En étudiant les sons émis par le rat-taupe nu, Alison Barker, du centre de médecine moléculaire Max-Delbrück, à Berlin, et ses collègues ont constaté que chaque colonie de ces rongeurs présente un « dialecte » spécifique, qui permet aux animaux de s'identifier en tant que membres du groupe.

Le rat-taupe nu présente un répertoire vocal qui contient au moins 17 signaux distincts et essentiels pour communiquer au sein de la colonie. Le plus fréquent est celui qu'émettent deux rongeurs quand ils se rencontrent. Pour en savoir plus sur ce signal, Alison Barker et ses collègues ont enregistré sur une période de deux ans près de 36 000 exemples de cris, nommés *soft chirps* en anglais, émis par 166 animaux issus de sept colonies différentes hébergées dans deux laboratoires à Pretoria, en Afrique du Sud, et à Berlin. Ils ont développé un logiciel qui a isolé les caractéristiques du signal (hauteur, durée, fréquence la plus élevée, etc.). Un programme d'apprentissage automatique était alors capable d'identifier l'individu sur la base du cri qu'il émettait.

© Felix Peterman/MDC

Lors d'expériences, les chercheurs ont constaté qu'un rat-taupe nu répondait beaucoup plus souvent à un *soft chirp* émis par un individu de sa colonie plutôt que venant d'un autre groupe. Le rongeur reconnaît-il la voix de l'individu ou des sonorités caractéristiques de sa colonie? Pour le savoir, les chercheurs ont identifié parmi les signaux enregistrés des éléments spécifiques de chaque colonie. Ils ont ensuite créé un cri artificiel reproduisant ces éléments sans imiter le *chirp* d'un individu en particulier. Résultat: les rats-taupes nus de la colonie correspondante y répondaient davantage. Cette reconnaissance du groupe serait un outil essentiel pour ces animaux qui ne tolèrent pas la présence d'étrangers dans leur colonie.

L'équipe de recherche a aussi voulu savoir si le dialecte chez le rat-taupe nu était acquis et ainsi transmis de génération en génération. Ils ont placé des bébés orphelins dans d'autres colonies que celle où ils sont nés. Au bout de six mois, ces petits ont adopté le patois local.

Alison Barker et ses collègues ont aussi fait une découverte étonnante sur le rôle de la reine dans le maintien du dialecte de son groupe. En laboratoire, dans une colonie particulière, deux reines sont mortes successivement de façon rapprochée. Les chercheurs ont alors constaté que, pendant la période d'«anarchie» faisant suite au décès royal, les individus ne respectaient plus aussi bien l'idiome local: la variabilité individuelle de certaines de ses caractéristiques a augmenté. D'ailleurs, le logiciel de reconnaissance des cris n'était plus aussi efficace dans ces périodes d'instabilité, où l'on assiste à des départs de la colonie et à des combats entre individus pour accéder au statut de reproducteur.

La cohésion de la colonie est restaurée avec l'établissement d'une nouvelle reine, et le dialecte se stabilise aussi. Par quel mécanisme? Les émissions sonores de la reine servent-elles à recalibrer en permanence le patois de sa colonie? Et lorsqu'une nouvelle colonie se crée, comment un «nouveau parler» se met-il en place? Les travaux d'Alison Barker et de son équipe ont ouvert un vaste champ de questions à explorer. ■

SEAN BAILLY

A. J. Barker *et al.*, *Science*, vol. 371, pp. 503-506, 2021

PALÉONTOLOGIE

De l'ADN très ancien de mammouth séquencé

En datant et en séquençant de l'ADN de mammouth vieux de plus de 1 million d'années, l'équipe de Love Dalén, du Centre de paléogénétique de l'université de Stockholm et du Muséum de cette ville, a révélé une ancienne lignée de ces animaux. Le paléogénéticien Régis Debruyne explique ce que ces travaux nous apprennent.

Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

RÉGIS DEBRUYNE
paléontologue au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

Le séquençage d'ADN passe la barre du million d'années : comment est-ce possible ?

Parce que les trois génomes partiellement lus se trouvaient dans des dents provenant du sol gelé sibérien. La dégradation de l'ADN y est assez lente ; il n'est donc pas très étonnant qu'un séquençage reste possible, même après plus de 1 million d'années. La vraie limite est ailleurs : comme il n'existe sur Terre aucun pergélisol âgé de plus de 2,5 millions d'années, nous pourrons difficilement séquencer de l'ADN plus ancien. En fait, ce qui est vraiment novateur dans le travail de l'équipe de Love Dalén, ce sont les datations des trois dents de mammouths.

Comment ont-elles été réalisées ?

Le dégel perturbe la structure du pergélisol, ce qui empêche la datation stratigraphique. Par chance, ces dents étaient associées à des faunes datables. Cela a permis d'estimer que le spécimen nommé Chukochya est vieux de 0,5 à 0,8 million d'années, tandis que l'âge des spécimens Adycha et Krestovka est compris entre 1 et 1,2 million d'années.

En quoi ces dates sont-elles intéressantes ?

Au Pléistocène supérieur, donc il y a moins de 126 000 ans, il n'existait plus que deux espèces de mammouths : les mammouths laineux et, en Amérique seulement, les mammouths de Colomb. Or – et c'est la première trouvaille de l'équipe de Love Dalén –, si Chukochya et Adycha sont des prédécesseurs des mammouths laineux, Krestovka est d'une autre lignée. Cela illustre qu'une plus grande diversité existait chez les mammouths il y a 800 000 ans que ce n'était le cas il y a quelques milliers d'années, lorsque les derniers mammouths laineux ont disparu dans le nord de la Sibérie.

Comment les chercheurs ont-ils décelé cette nouvelle lignée ?

Dans les échantillons tirés des dents, l'équipe de Love Dalén a obtenu seulement de l'ordre de 1 % du génome de Krestovka, le plus ancien, et un peu plus de celui d'Adycha et de Chukochya. Après analyse bio-informatique, le peu d'identité génétique représentée par les millions de paires de nucléotides correspondants a suffi pour conclure que le génome de Krestovka est très distinct de la trentaine de génomes nucléaires partiels de mammouth connus.

Quelle est la seconde trouvaille de l'équipe de Love Dalén ?

C'est le fait que la moitié des variants génétiques de Krestovka ressemblent à ceux du mammouth laineux et l'autre moitié à ceux du mammouth de Colomb, ce qui indique un métissage. L'équipe de Love Dalén en conclut que nous aurions un cas de spéciation hybride, c'est-à-dire d'obtention d'une nouvelle espèce par mélange de deux... Cette conclusion me paraît prématurée, car bien des trajectoires évolutives peuvent conduire à un même mélange.

Menez-vous au Muséum des recherches comparables ?

Nous avons aussi des fossiles de mammouth contenant de l'ADN. Toutefois, plutôt que de travailler à obtenir des génomes entiers comme l'équipe de Love Dalén – qui va sûrement continuer à séquencer de l'ADN de Krestovka –, nous avons déterminé des séquences du génome traduisant les adaptations qui, à partir d'éléphants, ont produit les mammouths et nous les avons rassemblées pour une centaine de spécimens. Leur comparaison, dont nous préparons la publication, fournira un aperçu d'ensemble de l'évolution des mammouths. ■

C. M. Duarte *et al.*, *Science*, vol. 371, article eaba4658, 2021

GÉOSCIENCES

LES ICEBERGS, COUP DE POUCE AUX PÉRIODES GLACIAIRES

En fondant à des latitudes plus septentrionales, les icebergs de l'Antarctique auraient perturbé la circulation océanique et précipité l'avènement des périodes glaciaires.

Depuis un peu plus de 2 millions d'années, la Terre connaît une intensification des glaciations dans l'hémisphère Nord ainsi qu'une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires, caractérisées respectivement par une augmentation et une diminution du volume de glace dans l'hémisphère Nord. Ce régime cyclique est lié aux variations régulières des paramètres orbitaux de la Terre (excentricité de l'orbite, inclinaison de l'axe de rotation…). Ces changements astronomiques entraînent des différences dans la quantité incidente de rayonnement solaire et sa répartition. Cependant, les spécialistes ne comprenaient pas comment ces modifications pouvaient déclencher une réponse aussi radicale qu'une période glaciaire. D'après les travaux d'Aidan Starr, de l'université de Cardiff, au Royaume-Uni, et ses collègues, les icebergs de l'Antarctique auraient joué un rôle crucial.

Ces chercheurs ont étudié la dérive des icebergs qui se détachent de la calotte antarctique. Quand les conditions orbitales de la Terre ont induit un régime globalement plus froid au début de chaque période glaciaire, les icebergs auraient dérivé de quelques degrés plus au nord qu'ils ne le faisaient, par exemple, lors de la période préindustrielle. Ils ont donc apporté de grands volumes d'eau douce dans les océans Atlantique et Indien à des latitudes sud comprises entre 40° et 50°. À l'inverse, plus au sud, l'océan est devenu plus salé que durant les périodes interglaciaires. Ce scénario a été confirmé grâce à une campagne de prélèvements de sédiments marins menée par l'*Expédition 361* du Programme international de découverte océanique (IODP).

Ces changements de salinité ont probablement eu un impact sur la circulation thermohaline, c'est-à-dire les courants à l'échelle des océans engendrés par des différences de densité (à cause de la salinité ou de la température), en particulier la circulation thermohaline de l'Atlantique (Amoc). Les perturbations liées aux icebergs durant les périodes préglaciaires ont ainsi peut-être ralenti l'Amoc. « L'hypothèse proposée dans cette étude serait un mécanisme clé dans le basculement vers les conditions glaciaires », indique Thibaut Caley, chercheur du CNRS au laboratoire Epoc, à l'université de Bordeaux. « Il faudra néanmoins confirmer ce scénario et l'ensemble des rétroactions associées dans des expériences de modélisation plus poussées. Ici, Aidan Starr et ses collègues ont fait des hypothèses simplificatrices, comme supposer que le taux de vêlage des icebergs (le détachement des icebergs de la calotte antarctique) ne change pas au cours du temps. »

Au début des périodes glaciaires, les icebergs de l'Antarctique auraient fondu plus au nord qu'aujourd'hui. Ils auraient ainsi perturbé les courants marins et précipité l'établissement des périodes glaciaires.

Aidan Starr et ses collègues suggèrent aussi que les modifications de la circulation océanique auraient favorisé la séquestration du dioxyde de carbone, précipitant l'avènement des périodes glaciaires. De nombreuses hypothèses ont été avancées pour expliquer le piégeage de ce gaz à effet de serre en correspondance avec les périodes glaciaires ; certaines suggèrent qu'une circulation thermohaline plus lente permettrait de stocker dans l'océan profond une plus grande quantité de carbone. Les icebergs pourraient donc bien être le chaînon manquant dans l'établissement des périodes glaciaires. ■

S. B.

A. Starr *et al.*, *Nature*, vol. 589, pp. 236-240, 2021

© Yandong Yang/Shutterstock.com

EN BREF

LES MIGRATIONS DU PÈLERIN

Le faucon pèlerin vivant en Europe du Nord et en Sibérie est un oiseau migrateur qui descend dans le sud pour hiverner. Zhongru Gu, de l'Académie chinoise des sciences à Pékin, et ses collègues ont suivi par satellite 56 spécimens pour mieux comprendre leur comportement et ont séquencé le génome de 35 individus. Un gène impliqué dans la mémoire à long terme, *ADCY8*, jouerait un rôle crucial : les oiseaux ayant l'allèle dominant migrent sur de plus grandes distances.

Nature, 3 mars 2021

GÉNÉRATEUR D'ALÉA RECORD

Générer des nombres vraiment aléatoires est à la fois difficile et crucial pour de nombreux systèmes de cryptographie. Hui Cao, de l'université Yale, et son équipe ont conçu un dispositif compact qui exploite les fluctuations lumineuses d'un laser. Il produit 250 térabits de chiffres aléatoires par seconde. Et il est assez petit pour être intégré dans une puce électronique, de quoi implémenter le système de cryptage directement dans un téléphone portable.

Science, 26 février 2021

LA NEUVIÈME PLANÈTE CONTESTÉE

En 2016, Mike Brown et Konstantin Batygin, de Caltech, avaient noté que six objets évoluant sur des orbites au-delà de Neptune avaient des trajectoires alignées. D'après eux, ces corps seraient soumis à l'influence d'une planète géante située aux confins du Système solaire. Grâce à l'analyse de trois relevés, Kevin Napier, de l'université du Michigan, et ses collègues contestent cette conclusion qui serait le fruit d'un biais de sélection. D'autres observations seront nécessaires pour y voir clair.

https://arxiv.org/abs/2102.05601

En haut : © C. Mazurek ; en bas : © Shutterstock/Nicholas E Jones

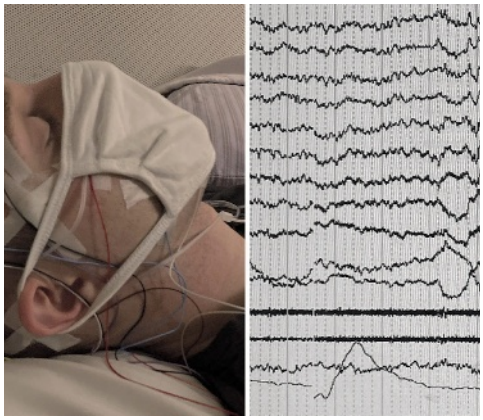
NEUROSCIENCES

PARLER AVEC DES RÊVEURS

Quatre équipes, dont celle de Delphine Oudiette et Isabelle Arnulf, de l'Institut du cerveau, à Paris, ont mené de façon indépendante un projet un peu étrange : parler à des rêveurs endormis… et obtenir une réponse cohérente !

Ces singuliers dialogues se sont déroulés pendant ce qu'on appelle des « rêves lucides », où le dormeur est conscient qu'il rêve. Les protocoles de communication mis en place étaient variés : les chercheurs énonçaient par exemple à voix haute une addition ou une soustraction, et le participant assoupi répondait en effectuant un nombre adéquat d'allers-retours horizontaux avec les yeux (si par exemple l'opération était « 3 + 1 », il devait faire 4 allers-retours oculaires). Autre code utilisé : à une question comme « Aimes-tu le chocolat ? », le dormeur souriait pour répondre par l'affirmative et fronçait les sourcils pour dire « non ». Le tout sans se réveiller !

S'il reste à confirmer que ces échanges sont également réalisables en dehors des rêves lucides, c'est donc la preuve qu'une communication à double sens est possible pendant le sommeil. Les applications seraient multiples. D'abord, pour la compréhension des songes : demander « en direct » à des dormeurs d'accomplir certaines tâches et les interroger sur leur vécu à leur réveil permettrait d'étudier la fiabilité des souvenirs de rêve, question dont toute la recherche sur les rêves est dépendante. Il serait aussi envisageable d'interagir avec le sujet assoupi pour l'aider à digérer un événement douloureux ou à trouver de nouvelles idées – deux des fonctions supposées des rêves. ■



Les dormeurs de l'expérience ont réussi à communiquer avec les chercheurs en bougeant les yeux et en contractant les muscles de leur visage, le tout sans se réveiller.

GUILLAUME JACQUEMONT

K. R. Konkoly *et al.*, *Current Biology*, en ligne le 18 février 2021

ARCHÉOLOGIE

STONEHENGE : DES MÉGALITHES VAGABONDS

L'équipe de Michael Parker Pearson, de l'université de Londres, vient de montrer que certains des mégalithes de Stonehenge ont été probablement repris d'un ancien cercle de pierre. En 2014, les mêmes chercheurs avaient découvert dans les collines de Preseli, au pays de Galles, la carrière d'origine de ces mégalithes. Toutefois, les datations par le radiocarbone de charbons de bois qui y ont été trouvés montraient un décalage de plusieurs siècles entre les débitages et l'arrivée des mégalithes à Stonehenge. Or les mégalithes de Waun Mawn, un ancien cercle de pierre des collines de Preseli, manquent. En datant les sédiments se trouvant à l'intérieur des trous laissés par les mégalithes absents, les chercheurs ont établi que les pierres de Waun Mawn avaient été dressées il y a plus de 5200 ans, puis emportées 300 à 400 ans plus tard, c'est-à-dire au moment de l'édification des premiers cercles de pierre à Stonehenge – par une population dont le strontium dentaire indique qu'elle est originaire des collines de Preseli. ■

Ces pierres du sanctuaire néolithique de Stonehenge semblent provenir du cercle de pierres levées de Waun Mawn, au pays de Galles, à environ 280 kilomètres à l'est.

F. S.

M. P. Pearson *et al.*, *Antiquity*, vol. 95, n° 379, pp. 85-103, 2021

GÉNÉTIQUE

POURQUOI QUATRE CORNES AU LIEU DE DEUX ?

La présence de deux cornes au niveau des os frontaux du crâne est un attribut spécifique de la famille des bovidés (bovins, chèvres, moutons, antilopes, etc.). Chez toutes ces espèces de mammifères, les cornes partagent une origine cellulaire et une structure identiques. Cependant, le mécanisme de développement et d'évolution des cornes reste mal connu, en particulier parce que les cellules souches se différencient très tôt durant l'embryogenèse et parce que des centaines de gènes sont impliqués. Avec ses collègues, Aurélien Capitan, généticien à l'Inrae et à l'union de coopératives d'élevage Allice, a suivi une piste originale pour en savoir plus. Ces chercheurs se sont intéressés à une anomalie que l'on retrouve principalement chez certaines races de moutons et de chèvres, qui présentent alors deux paires de cornes – ces animaux sont dits « polycères ».

En analysant les génomes de plus de mille ovins du monde entier, dont certains étaient polycères, Aurélien Capitan et ses collègues ont montré que tous les moutons présentant cette anomalie portent une mutation affectant le gène *HOXD1*. Cette mutation conduit à une expression réduite de ce gène et de la protéine HOXD1 associée. Le gène *HOXD1* est un gène « architecte », ou homéogène, qui contribue au plan d'organisation de l'organisme lors du développement embryonnaire. Il joue un rôle dans la délimitation de la zone où naissent les cornes de part et d'autre du crâne. Mais quand le gène est défectueux, la zone s'en trouve plus étendue. En raison de cette extension, le bourgeon de corne s'étire et finit par se séparer en deux; il produit donc deux cornes de chaque côté du crâne de l'animal. ■

S. B.

A. Allais-Bonnet *et al.*, *Molecular Biology and Evolution*, msab021, en ligne le 2 février 2021

© Caif Eire/Shutterstock.com

GÉNÉTIQUE

UN VIRUS TRÈS BIEN INTÉGRÉ

L'infection d'un organisme par un virus, plus qu'une simple condamnation à la maladie ou à la mort, peut aussi être un facteur d'évolution. En intégrant dans son ADN le matériel génétique d'un virus, un hôte infecté peut développer de nouvelles fonctions, ce qui peut redéfinir ou améliorer sa physiologie ou son écologie. Exemple évocateur, les guêpes parasitoïdes *Cotesia congregata* – qui pondent leurs œufs dans le corps de chenilles – injectent dans leurs victimes des particules virales. Ces dernières empêchent le système immunitaire des chenilles d'attaquer les larves pendant leur développement. Ainsi, sans le virus qu'elles hébergent, le mode de croissance parasitaire de ces guêpes serait impossible. Pour mieux comprendre cette relation, Jean-Michel Drezen et Jérémy Gauthier, de l'Institut de recherche sur la biologie de l'insecte (CNRS), à Tours, et leur équipe ont reconstitué et étudié le génome de ces guêpes.

Ces travaux montrent que le virus de ces guêpes parasitoïdes, le bracovirus, a pour la première fois été intégré par l'ancêtre de l'insecte au Crétacé, il y a environ 103 millions d'années, quand il n'était qu'un petit nudivirus d'une centaine de milliers de paires de bases. Lorsqu'il n'apporte pas d'avantages à l'hôte, l'ADN viral qui s'insère dans le génome de ce dernier finit généralement par se dégrader et disparaître complètement avec le temps. Or l'ADN du bracovirus n'a pas subi le même sort : il s'est complexifié en s'associant à la guêpe et compte désormais un million de paires de bases. Ses gènes sont aujourd'hui répartis dans les dix chromosomes de la guêpe : le virus et la guêpe sont indissociables. ■

Cette chenille de sphinx du tabac *(Manduca sexta)* est couverte d'œufs de guêpe parasitoïde.

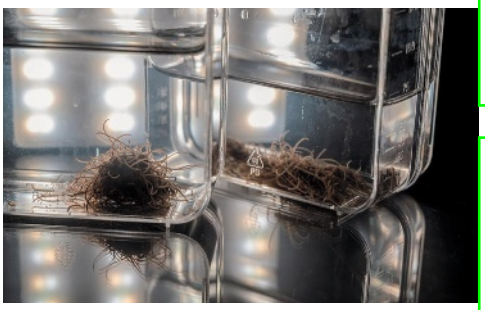
WILLIAM ROWE-PIRRA

J. Gauthier *et al.*, *Communications Biology*, vol. 4, article 104, 2021

BIOLOGIE ANIMALE

PELOTES DE LOMBRICS

Les vers noirs californiens (*Lumbriculus variegatus*) forment avec leurs congénères des pelotes pour mieux retenir l'humidité. Ces boules de vers sont capables de se déplacer, probablement pour trouver de meilleures conditions de température ou d'humidité. Comment, malgré l'absence de coordination à l'échelle individuelle et une structure globalement symétrique, la pelote migre-t-elle dans une direction particulière ? Yasemin Ozkan-Aydin et ses collègues, de l'institut de technologie de Géorgie, aux États-Unis, ont suggéré que la symétrie de la pelote est brisée quand les vers d'un côté se comportent différemment de ceux du côté opposé, par exemple en raison d'une différence de température. Ils ont en effet observé qu'en plaçant une boule de vers dans un aquarium rempli d'eau dans laquelle on instaure un gradient horizontal de température, elle se déplace sur le fond du réservoir vers le côté le plus froid. Les vers de ce côté tirent la pelote en s'allongeant et en se contractant, tandis que du côté le plus chaud, les vers gesticulent et ne peuvent la tirer efficacement. ■



Les vers *Lumbriculus variegatus* s'agglutinent parfois en des sortes de pelotes capables de se déplacer.

THÉO TORCQ

Y. Ozkan-Aydin *et al.*, *PNAS*, vol. 118(6), article e2010542118, 2021

EN BREF

DÉJÀ 25 000 SOURCES POUR LOFAR

Le radiotélescope *Lofar* promet de fournir une carte de l'ensemble du ciel de l'hémisphère Nord avec une précision encore inégalée. Avec une couverture de seulement 4 % de la voûte céleste, Francesco de Gasperin, de l'université de Hambourg, et son équipe ont déjà détecté plus de 25 000 sources radio, des trous noirs supermassifs cachés au centre de galaxies (la matière accélérée autour du trou noir émet notamment un signal radio intense).

Astron. & Astrophys., 17 fév. 2021

UN PARASITE AYANT LE SENS DU PARTAGE

Comme toutes les plantes, le gui est capable de produire ses propres nutriments par photosynthèse, bien qu'il tende à se les procurer en parasitant d'autres végétaux. Paul Nabity, de l'université de Californie à Riverside, et ses collègues ont montré que, lorsque deux plants de gui parasitent le même arbre, ils produisent davantage de nutriments par eux-mêmes. En épargnant ainsi l'arbre parasité, les plants de gui en partagent les ressources sans le mettre en danger.

Current Biology, 23 février 2021

SEICHE ET TEST DU MARSHMALLOW

Le « test du marshmallow » consiste à offrir un bonbon à un enfant en lui disant que, s'il arrive à patienter avant de le manger, il en recevra un second. Alexandra Schnell, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont mené une expérience comparable sur des seiches : elles sont capables d'attendre jusqu'à deux minutes. Selon les chercheurs, cette aptitude vient du fait que les seiches doivent quitter leur camouflage pour chasser, et ont donc l'habitude de choisir le moment propice pour obtenir la meilleure récompense.

Proc. R. Soc. B, 2 mars 2021

En haut : © Shelly Bychowski Shots/shutterstock.com ; en bas : © Christopher Moore, Georgia Tech

BIOLOGIE MARINE

DES ALGUES POUR CORAUX PROFONDS

Certains coraux sont présents à 172 mètres sous la surface, un record. Or la quantité d'énergie lumineuse y est inférieure à 1% de celle mesurée à la surface, et le spectre lumineux est dominé par le bleu. Comment les algues en symbiose avec ces coraux réalisent-elles la photosynthèse ? Héloïse Rouzé, du centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement de Moorea, en Polynésie française, et ses collègues ont montré que certains pigments présents sont fluorescents, et c'est la lumière issue de cette fluorescence qu'utilisent les algues. Par ailleurs, les chercheurs ont trouvé une algue, du genre *Ostreobium*, qui contient des pigments absorbant de la lumière de courtes longueurs d'onde, ce qui lui permet d'effectuer la photosynthèse dans des conditions de quasi-obscurité sous-marine. ■

NICOLAS BUTOR

H. Rouzé *et al.*, *The ISME Journal*, en ligne le 15 janvier 2021

MÉDECINE

ENTÉROPATHIE ET CROISSANCE

En Afrique et en Asie du Sud, des millions d'enfants souffrent de malnutrition, ce qui se traduit notamment par un retard de croissance. Et, pour certains, une alimentation adaptée ne permet pas de rétablir un développement normal. En suivant quelques centaines de tels enfants, Beatrice Amadi et ses collègues, de l'université de Zambie, ont montré qu'ils souffraient d'entéropathie environnementale, une inflammation chronique de l'intestin liée à une exposition à de l'eau et de la nourriture contaminées. Il s'agit d'une réaction de l'organisme à la présence d'agents pathogènes qui endommagent les villosités intestinales, responsables de l'absorption des nutriments. Cette réaction réduit l'exposition aux agents pathogènes, mais au prix d'une capacité limitée d'absorption de nutriments. Il est donc nécessaire de rétablir l'intégrité de l'intestin avant de supplémenter ces enfants en nutriments. ■

T. T.

B. Amadi *et al.*, *Nature Microbiology*, en ligne le 15 février 2021

PRÉHISTOIRE

LE CLAIRON PRÉHISTORIQUE DE MARSOULAS

La conque musicale de la grotte de Marsoulas. On aperçoit des traces d'ocre à l'intérieur du pavillon.

Cérémonie du 11 novembre 2020 : Emmanuel Macron et deux militaires se mettent au garde-à-vous devant la statue de Georges Clemenceau tandis que résonne le clairon. Il y a 18000 ans, une scène analogue s'est peut-être déroulée devant le bison ponctué ornant la grotte de Marsoulas, en Haute-Garonne, à ceci près que le clairon était une conque marine.

Avec des collègues, Carole Fritz, du CNRS, vient de réétudier un gros coquillage (*Charonia lampas*) oublié dans les collections du Muséum de Toulouse. Cette conque avait été découverte en 1931 à l'entrée de la grotte de Marsoulas, une cavité ornée connue pour son magnifique bison d'époque magdalénienne (il y a 16000 à 10000 ans) réalisé en apposant avec le pouce 320 ponctuations d'ocre rouge.

La conque, qui porte aussi des ponctuations d'ocre, a été transformée en un instrument à vent en faisant sauter sa pointe, puis en perçant les deux premières spires afin de pouvoir glisser un tube fixé au niveau des lèvres avec du brai de bouleau (il en reste des traces). Pour tester l'hypothèse que ces modifications ont bien produit un instrument de musique, les chercheurs ont demandé à un musicologue, spécialisé dans les instruments à vent et par ailleurs joueur de cor, de produire des sons. Il a pu en tirer trois notes fondamentales graves (à 256, 265 et 285 hertz) accompagnées d'harmoniques, avec une intensité de 100 décibels. Assourdissant !

Comme les ponctuations d'ocre décorant le pavillon de la conque rappellent celles du bison, un lien entre ce clairon préhistorique et l'œuvre pariétale est vraisemblable. Peut-être servait-il à cadencer une célébration devant le bison ? Ainsi, quand, le clairon ayant résonné, monsieur le Président fait silence, il reproduit peut-être un rituel magdalénien... ■

F. S.

C. Fritz *et al.*, *Science Advances*, vol. 7(7), article eabe9510, 2021

© Didier Descouens

NEUROSCIENCES

DES ORGANOÏDES QUI IMITENT LE CERVEAU DE NÉANDERTAL

Grâce à des cellules souches humaines et un gène néandertalien, une équipe de biologistes a cultivé des organoïdes cérébraux imitant en partie l'organisation du cerveau de notre cousin disparu.

À quoi ressemblait le cerveau de l'homme de Néandertal, le plus proche cousin disparu d'*Homo sapiens*? Difficile à dire, puisque cet organe ne se fossilise pas. Impossible d'en savoir plus sur son organisation interne et ses connexions à partir des fossiles seuls. Pour surmonter cette impasse, Alysson Muotri, de l'université de Californie à San Diego, et ses collègues ont choisi une approche audacieuse. En se servant de cellules souches d'humain moderne et d'un gène néandertalien, ils ont cultivé en laboratoire des organoïdes cérébraux, sortes de «mini-cerveaux partiellement néandertalisés», qui donnent un aperçu de la configuration de la machine à penser de notre cousin éteint.

En 2009, le génome d'*Homo neanderthalensis* était pour la première fois entièrement séquencé par les généticiens. Une fois ce code biologique fondamental reconstitué, il devenait possible de le comparer au nôtre. Dans son étude, l'équipe d'Alysson Muotri s'est particulièrement intéressée à un gène, *NOVA1*, qui joue un rôle important dans les premiers stades du développement cérébral en influant sur de nombreux autres gènes et dont l'implication a été identifiée dans l'apparition de l'autisme et de la schizophrénie. Étonnamment, ce gène ne diffère, entre les versions néandertalienne et moderne, que d'une seule paire de bases.

Les chercheurs se sont servis de CRISPR, technique d'édition génétique récente, afin d'introduire la version néandertalienne de *NOVA1* dans des cellules souches humaines, puis ils ont cultivé ces dernières afin de produire des organoïdes cérébraux. Ces structures cellulaires en trois dimensions reproduisent à échelle réduite et de façon simplifiée l'anatomie de l'organe qu'ils imitent.

Forts d'environ une centaine de milliers de neurones, ils sont donc bien loin de la centaine de milliards qui composent réellement le cerveau humain. Ils n'ont ni la complexité ni la véritable structure d'un encéphale, avec ses connexions finales, mais ils permettent d'observer les premières phases de développement

de cet organe, ainsi que les maladies qui peuvent le perturber. Du reste, selon Alexandra Gros, chercheuse au CNRS et à l'université de Bordeaux, «si le gène inséré dans les cellules provient de Néandertal, l'environnement génétique dans les organoïdes reste celui d'*Homo sapiens*. Les interactions des gènes ne sont donc pas du tout les mêmes que si nous avions des organoïdes pleinement néandertaliens.»

Malgré cette importante nuance, dès le premier coup d'œil, les scientifiques ont remarqué que les organoïdes cérébraux influencés par le gène néandertalien ne ressemblaient pas à ceux d'*Homo sapiens*. Leurs cellules prolifératient différemment et les connexions entre leurs neurones – les synapses – ne se formaient pas de la même façon. Ces changements dans la forme et l'organisation du réseau neuronal laissent entendre que la mutation qui sépare les versions «archaïque» et moderne de *NOVA1* a eu des conséquences fonctionnelles pour notre espèce; en particulier, pensent les chercheurs, dans le développement de certaines capacités comportementales et sociales propres à *Homo sapiens*. ■

W. R.-P.

C. A. Trujillo *et al.*, *Science*, vol. 371, article eaax2537, 2021

EN BREF

CIBLER L'ARN

La maladie de Charcot-Marie-Tooth de type 1A est une maladie neurologique héréditaire parmi les plus fréquentes. Lorsque la protéine PMP22 est fabriquée en quantités deux fois plus importantes que la normale, il s'ensuit une paralysie progressive des mains et des jambes. Liliane Massade, de l'Inserm, et ses collègues ont montré chez la souris qu'en ciblant l'ARN codant cette protéine et en provoquant sa dégradation, il était possible de rétablir les fonctions locomotrices de l'animal.

Communications Biology, 9 mars 2021

PAS DE MODULATION POUR ANAIS

Dans la recherche de matière noire, l'expérience *Dama/Libra*, avec vingt ans de données, fait figure d'énigme : les chercheurs observent une modulation annuelle de leur signal. S'agit-il de l'effet du vent de matière noire que la Terre traverserait dans un sens pendant six mois et dans l'autre le reste de l'année, ou d'un effet autre ? Pour le savoir, l'expérience *Anais*, avec le même type de détecteur, a collecté des données durant trois ans. Résultat : pas de modulation… Le mystère reste entier !

https://arxiv.org/abs/2103.01175v1

LA RÉCOMPENSE DES ODEURS

Pourquoi sommes-nous autant attirés par certaines odeurs ? En associant différentes approches, l'équipe de Nathalie Mandairon, de l'Inserm, a montré chez la souris qu'il existe une connexion particulière entre la zone du bulbe olfactif, qui traite le caractère plaisant des odeurs, et le tubercule olfactif, une région clé du circuit de la récompense. Lorsque ce dernier est activé, il libère de la dopamine et produit un état de satisfaction. Cette connexion existerait aussi chez l'humain.

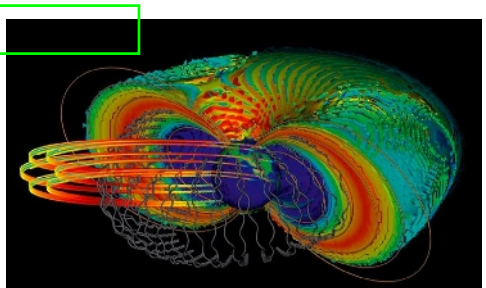
Current Biology, 17 février 2021

PHYSIQUE

L'ACCÉLÉRATEUR DE VAN ALLEN

Transportée par le vent solaire, une pluie de particules chargées bombarde en permanence la Terre. Heureusement, la planète est dotée d'un champ magnétique – engendré par la dynamique du noyau terrestre – qui agit comme un bouclier en déviant la trajectoire du vent solaire. Une zone annulaire de cette magnétosphère, nommée ceinture de Van Allen et située à quelques milliers de kilomètres d'altitude, présente la particularité de piéger de grandes quantités de particules chargées, notamment des électrons. Parmi ces derniers, certains atteignent des énergies de plusieurs mégaélectronvolts, mais on ignorait quel mécanisme était capable de les accélérer aussi fortement.

En s'appuyant sur les observations des deux sondes jumelles *Van Allen Probes*, Haylay Allison et ses collègues, du Centre de recherche allemand en géosciences (GFZ), à Potsdam, ont découvert que ces accélérations étaient liées à des densités anormalement faibles du plasma dans la région externe de la ceinture de Van Allen. À de telles densités, un autre phénomène déjà connu pour accélérer les électrons se trouve amplifié : des fluctuations des champs magnétiques et électriques du plasma piégé dans la magnétosphère, avec lesquelles les électrons entrent en résonance. Très énergétiques, ces électrons sont dangereux pour les satellites qui doivent traverser la ceinture de Van Allen, comme c'est le cas pour les satellites géostationnaires ou en orbite moyenne et haute. Aucun blindage ne permet d'en protéger leurs équipements électroniques : pouvoir prédire ces événements serait donc crucial. ■



L'orbite circulaire de satellites *(en jaune-orange)* croise parfois les trajectoires d'électrons très énergétiques *(en gris)*, accélérés par les champs de la ceinture de Van Allen.

T. T.

H. J. Allison *et al.*, *Science Advances*, vol. 7, article eabc0380, 2021

CLIMATOLOGIE

AÉROSOLS ET CLIMAT

Dans la question du réchauffement climatique, le rôle des aérosols est une source majeure d'incertitudes. Le mécanisme généralement admis est que les aérosols qui pénètrent dans les nuages contribuent à condenser l'humidité en fines gouttelettes. Les nuages deviennent alors plus réfléchissants et renvoient davantage de rayonnement solaire vers l'espace. Les aérosols auraient donc un effet de refroidissement qui s'oppose à celui des gaz à effet de serre.

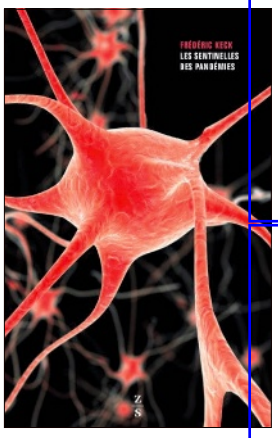
Franziska Glassmeier, de l'université de technologie de Delft, et ses collègues ont cependant avancé que les méthodes utilisées pour estimer l'impact des aérosols donnaient une vision incomplète des processus en jeu. Ces chercheurs ont modélisé les interactions des aérosols avec un type particulier de nuages, les stratocumulus, qui prédominent dans les régions subtropicales. Les aérosols forment d'abord des gouttelettes dans les nuages, dont la brillance se renforce. Mais ces gouttelettes s'évaporent rapidement et les nuages, devenus moins épais, laissent alors passer plus de rayonnement. L'effet de refroidissement serait ainsi surestimé. ■

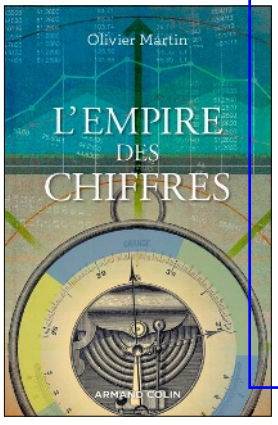
L'effet de refroidissement climatique de l'interaction des aérosols avec les stratocumulus serait surestimé.

S. B.

F. Glassmeier *et al.*, *Science*, vol. 371, pp. 485-489, 2021

En haut : © Ingo Michaelis et Yuri Shprits, GFZ ; en bas : © kajeab_pongsiri/Shutterstock





HISTOIRE DE LA NUTRITION

LE SINGE CUISINIER
Alexandre Stern

Odile Jacob, 2020,
240 pages, 22,90 euros

Qu'est-ce qui distingue les humains des autres animaux? La cuisine! Elle est, pour l'auteur, à l'origine même de notre humanité. Tout à la fois médecine, pratique de sociabilisation, technique d'adaptation, de conservation et de transformation des ressources alimentaires, elle est, en soi, une praxis susceptible de transformer les rapports sociaux et de modifier le milieu naturel dans une perspective globalisante de bonne intelligence de l'homme avec son environnement.

En se fondant sur des données anthropologiques et archéologiques récentes, Alexandre Stern, membre du Collège culinaire de France, retrace l'évolution des pratiques alimentaires depuis les premiers humanoïdes jusqu'à nos jours. Il montre l'influence du climat (alternance de périodes de glaciations et de réchauffement) sur le régime des chasseurs-cueilleurs du Paléolithique, les conséquences de la maîtrise du feu avec l'apparition de la cuisson, le virage de la révolution néolithique rendue possible par la sédentarisation associée à la sélection des semences et à la domestication animale. L'analyse de chaque époque montre ainsi, quelle que soit la localisation géographique, les nombreuses interactions de notre alimentation sur les plans médical, social, culturel, religieux, économique, commercial et politique. La cuisine, devenue un art à part entière, est magnifiée jusqu'à nos jours par des lignées de chefs prestigieux.

Mais l'avenir s'assombrit: standardisation des productions agricoles, industrialisation à outrance des activités agroalimentaires, aliments ultratransformés, disparition progressive du repas commensal, maltraitance animale... Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, l'alimentation semble entrer dans une phase de régression.

BERNARD SCHMITT
CERNH, LORIENT

ANTHROPOLOGIE

LES SENTINELLES DES PANDÉMIES
Frédéric Keck

Zones sensibles, 2020
240 pages, 20 euros

Quand la Chine s'enrhume, le monde éternue. L'auteur, anthropologue, avait écrit en 2010 *Un monde grippé*, livre qui apparaît prémonitoire aujourd'hui. Par cet ouvrage, il s'inscrivait dans la tradition d'Émile Durkheim sur la tuberculose et de Claude Lévi-Strauss sur le sida, quand ces grands chercheurs s'interrogeaient sur ce que les épidémies disent des rapports entre les animaux et les hommes. Comme eux, il interprète les réponses aux épidémies de ses contemporains avec les outils inspirés par l'étude des sociétés exotiques qui anticipent par des rituels les risques encourus. Cela amène cet ancien directeur scientifique du musée du Quai Branly à faire un rapprochement original entre les laboratoires de virologie de pointe et les musées: l'inventaire des virus, comme celui du patrimoine culturel, donne accès aux formes, microbiennes et artistiques, susceptibles d'émerger dans l'avenir, afin de s'y préparer. Frédéric Keck observe l'existence de deux types de stratégies: celle des chasseurs et observateurs d'oiseaux qui s'identifient à leurs cibles pour anticiper leurs mouvements, et celle des pasteurs qui gèrent leur troupeau en stockant remèdes et vaccins.

Frédéric Keck a réalisé l'essentiel de ses observations sur les marges de la Chine: Taïwan, Singapour et Hong Kong, qui jouent le rôle de sentinelles épidémiques, d'où le titre de l'ouvrage. Celui-ci, bien qu'il ait été composé avant la pandémie de Covid-19 (objet d'une postface), tire son actualité de l'entrée en scène du «virus chinois» et donne des clés pour comprendre comment l'empire du Milieu se retrouve aujourd'hui au centre du monde. Un livre touffu et passionnant qui intrigue, interpelle et finalement séduit le lecteur, pour peu qu'il accepte de jongler avec les subtilités de cette mise en relation des microbes, des animaux et des hommes.

ANNE-MARIE MOULIN
LABORATOIRE SPHERE, CNRS/UNIVERSITÉ DE PARIS

PRÉHISTOIRE

LE NÉOLITHIQUE
Anne Lehoërff

Que sais-je?, 2020
128 pages, 9 euros

Les « dix millénaires oubliés qui ont fait l'histoire », selon la belle formule de Jean-Paul Demoule, ont enfin leur écrin. Et c'est Anne Lehoërff, spécialiste de l'âge du Bronze, qui nous régale de son style simple et direct. La « révolution » néolithique nous est présentée dans son acception moderne. En effet, le Néolithique ou « âge de la Pierre nouvelle », terme créé en 1865, n'est plus la seconde période de la Préhistoire, mais « le début d'une nouvelle réalité », la première période de la Protohistoire, une « seconde naissance de l'homme » pour paraphraser Jean Guilaine.

En effet, nous vivons toujours sur le modèle « inédit » d'une économie de production inventée de toutes pièces au Néolithique, avec l'introduction d'un droit de vie et de mort sur un cheptel, dont on contrôle la reproduction. Il faut bien sûr relativiser l'emploi du terme de « révolution » pour qualifier la néolithisation, processus long dont l'origine est toujours inexpliquée. Si ce phénomène mondial aboutit partout à la même conclusion, un mode de vie agricole et sédentaire, les processus qui y ont mené sont extrêmement variés suivant les continents et les époques.

L'ouvrage se termine par une discussion sur la responsabilité des populations néolithiques quant à l'état de notre monde actuel. Le Néolithique n'a-t-il pas vu les premiers déboisements, l'apparition de la guerre, des épidémies, de l'obésité et des caries dentaires? Il serait peut-être temps, propose Anne Lehoërff, de construire « un monde postnéolithique de demain et pour – au moins – les dix mille ans à venir ». Affaire à suivre...

ROMAIN PIGEAUD
CHERCHEUR ASSOCIÉ AU CREAAH, À RENNES, ET AU CRAL, À PARIS

SOCIOLOGIE

L'EMPIRE DES CHIFFRES
Olivier Martin

Armand Colin, 2020
304 pages, 25 euros

À force d'être entourés de données numériques à partir desquelles nous nous déterminons, nous en venons à y voir des absolus décrivant les choses de façon neutre et naturelle. Ces données sont en fait une construction sociale. Ce livre propose une histoire du processus qui nous a menés à tout quantifier.

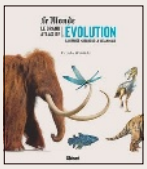
Selon l'auteur, sociologue et statisticien, la science a suivi le mouvement plus qu'elle ne l'a impulsé. La géométrisation qu'elle a longtemps pratiquée n'était pas une quantification. Quantifier n'est apparu comme un acte de connaissance qu'au XVII^e siècle. D'où le besoin d'unités unifiées est-il né? Entre autres, de la fiscalité! Les mesures anciennes se référaient au corps humain et variaient selon les localités. Une longueur pouvait se mesurer en coudées, en brassées, en pieds; la surface d'un terrain, en temps nécessaire à un homme pour l'exploiter; les mesures pour les volumes de stockage pouvaient différer de celles pour le transport, etc. Cela compliquant la collecte des impôts, les pouvoirs ont œuvré pour l'unification des unités de mesure. Ce fut fait au prix d'une abstraction croissante de celles-ci.

Le mouvement vers l'abstraction est général (il s'observe pour la mesure des temps, des températures...) et a permis d'étendre la notion de mesure à un point tel que rien n'échappe plus à la quantification. Nous mesurons l'intelligence, la dépression, donnons des notes aux restaurants, aux universités, aux films, aux hôpitaux... Et aux individus. Évalué au travail, chacun doit faire toujours plus et mieux, ce qui exacerbe la compétition e chacun contre tous.

Ce livre, à la rédaction malheureusement relâchée, regorge d'informations. Quoique pondéré, dépourvu de visée partisane, il donne une image sévère de certaines options adoptées par notre société. Comme quoi, des propos savants peuvent être contestataires!

DIDIER NORDON
ESSAYISTE ET MATHÉMATICIEN ÉMÉRITE

ET AUSSI



LE GRAND SAUT
David Quammen

Flammarion, 2020
544 pages, 25 euros

L'humanité, avec ses sept milliards et quelques membres, représente un milieu privilégié pour les agents pathogènes capables de franchir la barrière séparant les espèces. L'auteur, écrivain scientifique américain, retrace dans un style romancé les cas de « zoonoses » bien connues – infections à virus Hendra, sida, grippe H5N1, Sras... Il décrit les progrès des chercheurs qui les étudient et qu'il connaît souvent. Par exemple, sa restitution de la façon dont le sida est passé, vers 1908, probablement par un unique individu, au Congo belge (l'actuelle République démocratique du Congo) est passionnante.

SOMMES-NOUS TOUS VOUÉS À DISPARAÎTRE ?
Eric Buffetaut

Le Cavalier Bleu, 2020
(2^e édition augmentée)
160 pages, 20 euros

Avec sa grande culture et sa belle plume, le paléontologue Eric Buffetaut nous régale ici d'un essai sur les idées reçues relatives à l'extinction des espèces. Dans une série de textes, il débarrasse, infirme, confirme et, toujours, nuance des formules du genre : « Toute espèce est vouée à disparaître », « Le changement climatique est un facteur majeur d'extinction des espèces », « Les hommes préhistoriques ont provoqué la disparition du mammouth », etc. Facile à lire, efficace et plaisant.

LE GRAND ATLAS DE L'ÉVOLUTION
John Whitfield

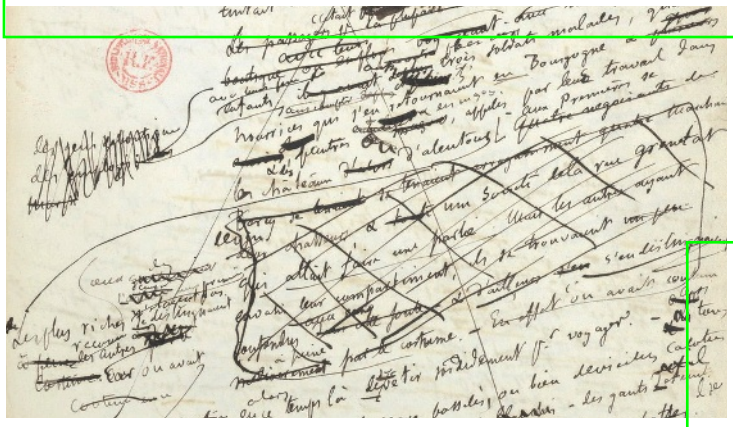
Glénat, 2021
224 pages, 39,95 euros

Après un début sur les faunes primitives marines, l'auteur, zoologiste et journaliste scientifique, commente de jolies vues d'artiste, photographies de fossiles, etc. évoquant l'évolution des vertébrés terrestres. Il parcourt ainsi les étapes bien connues de la sortie des eaux de faunes amphibiennes, de la conquête des continents par des reptiles, de leur large remplacement par des dinosaures, puis par des oiseaux et des mammifères, dont seront issus les humains. Chaque image se distingue par sa richesse ou son intérêt scientifique particulier. Un bel ouvrage sur l'évolution animale, pour tous âges.

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

QUEL AVENIR POUR NOS RATURES ?

Les logiciels de gestion de versions et de traitement de texte collaboratifs gardent trace des modifications des écrits. Les ratures n'ont pas disparu !



Si Flaubert avait utilisé un logiciel de traitement de texte classique, nous n'aurions jamais connu ses hésitations sur la première page de *L'Éducation sentimentale*.

Les écrivains qui n'utilisaient pas de logiciel de traitement de texte nous ont souvent laissé des brouillons volumineux, accessibles aux spécialistes et parfois aussi aux curieux. Les brouillons de *L'Éducation sentimentale*, par exemple, comportent plus de 2500 feuillets recto verso. Ils nous apprennent beaucoup sur la genèse de l'œuvre, même si, sur le plan éthique, nous pouvons nous interroger sur l'opportunité de les exploiter : après tout, si Flaubert a raturé une phrase, c'est peut-être parce qu'il souhaitait que nous ne la lisions pas.

Le développement de l'informatique a transformé notre rapport à la mémoire et l'un des aspects de cette transformation est que les écrivains qui utilisent des logiciels de traitement de texte ne laissent plus de brouillons. Ainsi, nous perdons l'une des sources qui nous permettaient de comprendre comment ils ont écrit certains de leurs livres.

Mais l'utilisation de logiciels de traitement de texte n'est qu'un aspect de cette transformation. Un autre est l'utilisation de logiciels de gestion de versions, tels SVN ou Git, qui permettent à des personnes qui écrivent un texte ensemble de le modifier tour à tour, de garder trace de ces modifications et, éventuellement, de revenir à une version antérieure du texte. Ces logiciels conservent le texte en un endroit unique, le disque de l'ordinateur de l'un des auteurs ou un espace de stockage dans les nuages, en préservant la chronologie des modifications effectuées.

> **Ces photos, mises bout à bout, forment un véritable film de la création**

Quand ces logiciels de gestion de versions ont été conçus, les textes en question étaient, le plus souvent, des programmes. C'est ce qui explique qu'ils permettent à un auteur d'expérimenter une modification de son côté, avant de la partager quand il en est satisfait. Mais ces logiciels ont vite été utilisés par les chercheurs pour écrire aussi des articles. Comme les programmes, les articles scientifiques sont souvent des œuvres collectives et leur écriture demande fréquemment de revenir à une version antérieure, après une modification infructueuse. Ces logiciels de gestion de versions sont aussi un moyen, parmi d'autres, de stocker des informations dans les nuages, évitant ainsi de les perdre quand le disque d'un ordinateur est détruit ou perdu. Cette plus grande sûreté et la possibilité de revenir à des versions antérieures expliquent que certains les utilisent même quand ils écrivent seuls.

Ces logiciels ont par la suite donné naissance à d'autres, similaires, tels des logiciels de traitement de texte coopératifs, qui permettent, ou non, d'archiver les versions successives du texte.

La transformation opérée par ces logiciels est inverse de celle opérée par les logiciels de traitement de texte. Ce ne sont plus quelques feuillets, rescapés de la poubelle et difficiles à déchiffrer, qui sont laissés à la postérité, mais une photo quotidienne de l'état du texte. Ces photos, mises bout à bout, forment un véritable film de la création.

Si nous parvenons à conserver ces archives, il est possible qu'elles constituent, à l'avenir, un matériau précieux pour l'histoire des sciences : nous aurions certainement beaucoup appris sur la manière dont les idées d'Archimède ou de Turing ont cristallisé, si nous avions eu accès à toutes les versions successives de *L'Arénaire* ou de *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*. Et si les écrivains se mettent eux aussi à utiliser des logiciels conservant l'historique d'un texte, il est probable que les archives ainsi produites deviendront un matériau précieux pour les études littéraires. ■

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

© Domaine public ; source : Bibliothèque nationale de France, Département des Manuscrits. NAF 17599

AVEZ-VOUS DES RESSOURCES QUE L'ON ÉCONOMISE QUAND ON RECYCLE ?

EN 2018, 1,3 MILLION DE TONNES
DE PAPIERS ONT ÉTÉ RECYCLÉES.
CE SONT 25 MILLIARDS DE LITRES D'EAU
ÉCONOMISÉS, L'ÉQUIVALENT
DE 8000 PISCINES OLYMPIQUES. ET ÇA,
C'EST GRÂCE À VOTRE GESTE DE TRI.

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LE VACCIN, LA MORT ET LE POLITIQUE

Les réfractaires à la vaccination sont aussi ceux qui font le moins confiance aux pouvoirs publics.

Quels risques sommes-nous prêts à courir pour ne pas mourir ? Le baromètre annuel de la confiance politique, publié par le Cevipof, consacre depuis la crise sanitaire un pan de son enquête à l'effet de l'épidémie de Covid-19 sur les attitudes des citoyens. Que ce sondage dédié à la vie politique puisse alimenter un enjeu philosophique et intime peut surprendre ; mais intervenir sur notre destin biologique dans l'espoir de contrer l'imprévisible est aussi une affaire de confiance politique.

À ce titre, les attitudes vis-à-vis de la vaccination sont emblématiques de la façon dont les citoyens gèrent l'aléa biologique. Si la preuve scientifique des bénéfices de la vaccination est sans appel, l'imaginaire collectif ne s'aligne pas sur cette évidence. En effet, le baromètre révèle que seulement un Français sur deux envisage de se faire vacciner contre le Covid-19. L'hésitation concerne un sondé sur cinq, mais ils sont 30 % à ne pas souhaiter se faire piquer. Ainsi, toute intervention « intrusive » sur le corps biologique est mise en balance avec le risque statistique de mourir d'une maladie infectieuse. Comment expliquer ce front massif de réfractaires ?

Le niveau de confiance de cette population vis-à-vis des pouvoirs publics diffère de celui des partisans de la vaccination. En effet, les trois quarts des plus réfractaires considèrent que le gouvernement gère mal la crise sanitaire et ne fait pas confiance aux Français. Les adhérents à la vaccination sont bien moins sévères. Ils ne sont que 13 % à déclarer ne pas faire confiance aux pouvoirs publics pour surveiller l'apparition d'effets secondaires liés au vaccin, contre 80 % des opposants.

> **Le refus vaccinal est lié à la façon dont le citoyen voit sa place dans la société**

La défiance porte sur les responsables et les institutions politiques chargés de mettre en œuvre la politique sanitaire. En d'autres termes, les citoyens acceptent moins de déléguer leur corps et leur santé aux autorités qui les administrent. Celles-ci ne seraient pas en mesure de prendre en charge leur destin biologique. Le refus vaccinal est en effet corrélé à une défiance interpersonnelle et institutionnelle élevée. Cette tendance ne découle donc pas d'une difficulté de compréhension des acquis scientifiques : elle est liée à la façon dont le citoyen envisage sa place dans la société et son rapport aux gouvernants.

La défiance structurelle des citoyens en matière vaccinale traduit l'échec du politique à administrer la dimension émotionnelle liée aux aléas de la vie en société. Cette crainte collective peut se rapporter à une incertitude « non structurée », c'est-à-dire une incertitude qui rassemble un grand nombre d'inconnues. Elle peut être au contraire « structurée », de sorte que le doute ne porte que sur une partie du tableau général de l'action politique.

En France, le manque de recul sur la maladie et le vaccin constitue le premier motif invoqué par les réfractaires (70 %), suivi de la crainte d'effets secondaires de l'immunisation (53 %). La tendance est inverse en Allemagne, au Royaume-Uni et en Italie : la peur d'effets indésirables ou de l'inefficacité du vaccin est accrue, tandis que la faible visibilité de l'évolution pandémique n'intervient qu'au second plan.

Ainsi, les incertitudes non structurées prédominent dans le pays de Descartes. Ce doute est-il salutaire ? Malheureusement, il traduit moins la recherche de la vérité, si chère à la pensée cartésienne, que le sentiment collectif de ne pas appartenir à une communauté politique. La peur de la vaccination, c'est la peur de la mort politique dont le principal effet indésirable est de pousser les hommes à la mort. ■

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

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**4,90 €** PAR MOIS	**6,50 €** PAR MOIS	**8,20 €** PAR MOIS
	29 % de réduction *	**31 %** de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

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

PAG21STD

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

☐ FORMULE **PAPIER**
- 12 n° du magazine papier

4,90€ PAR MOIS -29 %

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE**
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

6,50€ PAR MOIS -31 %

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

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

8,20€ PAR MOIS -43 %

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2 / Mes coordonnées

Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Tél. : .....

Courriel : ..... @ .....

(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) .....

IBAN .....

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom : .....

Adresse : .....

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

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

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

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

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

L'ESSENTIEL

> L'idée de la vaccination à ARN remonte aux années 1990, quand des chercheurs français ont tenté de vacciner des souris contre la grippe à l'aide d'un ARN codant un fragment du virus.

> Alors trop toxique pour une utilisation chez l'humain, la technologie n'a pas pris dans les grandes entreprises pharmaceutiques, mais s'est peu à peu améliorée grâce à des start-up.

> La pandémie de Covid-19 a suscité un nouvel engouement pour les vaccins à ARN. Rapides à concevoir, modulables au gré des besoins, ils offrent une flexibilité qui ouvre des perspectives contre d'autres maladies comme la grippe, le sida ou le cancer.

> Diverses pistes sont aussi explorées pour faciliter leur stockage, augmenter leur efficacité et limiter leurs effets secondaires.

L'AUTEUR

ELIE DOLGIN
journaliste scientifique canadien travaillant à Somerville, dans le Massachusetts, aux États-Unis

Cet article est la traduction de E. Dolgin, How Covid unlocked the power of RNA vaccines, *Nature*, vol. 589, pp. 189-191, 14 janvier 2021.

La révolution des vaccins à ARN

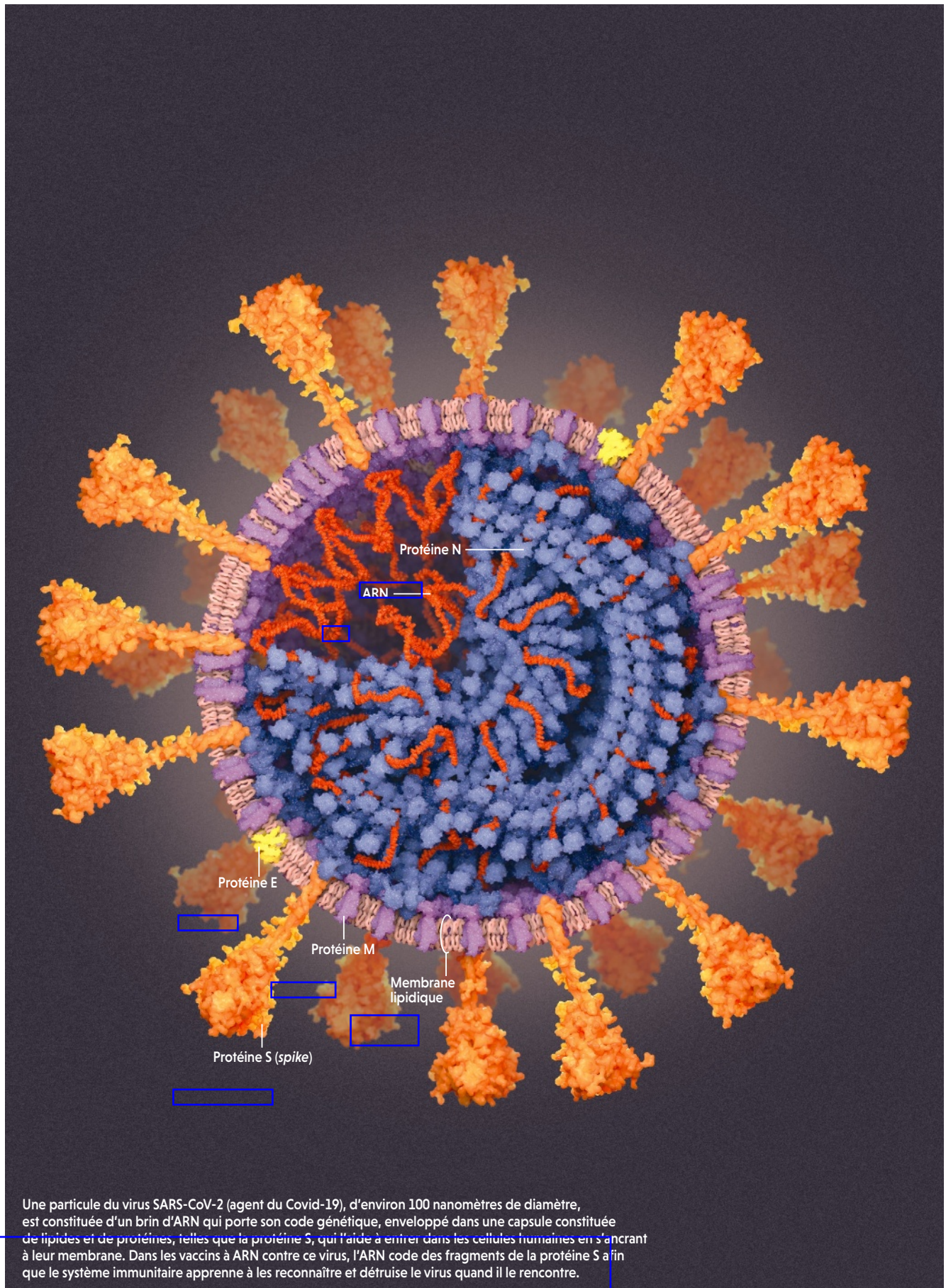
Pour la première fois autorisés chez l'humain dans la lutte contre le Covid-19, les vaccins à ARN offrent des perspectives beaucoup plus larges contre des maladies telles que la grippe, mais aussi le sida, le paludisme ou les cancers.

C'est un vendredi après-midi, en mars 2013, qu'Andy Geall a reçu l'appel. Une nouvelle souche de grippe aviaire venait d'infecter trois personnes en Chine. Le responsable mondial de la recherche sur les vaccins alors chez Novartis, Rino Rappuoli, voulait savoir si ses collègues et lui étaient prêts à tester leur nouvelle technique de vaccination.

Un an auparavant, Andy Geall, alors au centre de recherche américain de Novartis, à Cambridge, dans le Massachusetts, et son équipe avaient enfermé des molécules d'ARN dans des gouttelettes de graisse nommées « nanoparticules lipidiques » et les avaient utilisées pour vacciner – avec succès – des rats contre un virus respiratoire. Pouvaient-ils faire de même pour la nouvelle souche de grippe, et si possible assez vite ?

Andy Geall, chef du groupe ARN, se rappelle sa réponse : « Oui, bien sûr. Envoyez-nous juste la séquence. » Le lundi suivant, l'équipe commençait à synthétiser l'ARN. Le mercredi, elle assemblait le vaccin. Le week-end, elle le testait dans des cellules – et, une semaine plus tard, sur des souris.

Le développement s'est fait à une vitesse fulgurante. L'équipe de Novartis a réalisé en un mois ce qui, en général, prenait un an ou plus. Mais à l'époque, la capacité à fabriquer de l'ARN de qualité clinique était limitée. Et Andy Geall et ses collègues ignoreront toujours si ce vaccin, et plusieurs autres qu'ils avaient mis au point, auraient fonctionné chez l'humain : en 2015, Novartis a vendu ses activités de recherche sur les vaccins. >



Une particule du virus SARS-CoV-2 (agent du Covid-19), d'environ 100 nanomètres de diamètre, est constituée d'un brin d'ARN qui porte son code génétique, enveloppé dans une capsule constituée de lipides et de protéines, telles que la protéine S, qui l'aide à entrer dans les cellules humaines en s'ancrant à leur membrane. Dans les vaccins à ARN contre ce virus, l'ARN code des fragments de la protéine S afin que le système immunitaire apprenne à les reconnaître et détruise le virus quand il le rencontre.

© Veronica Falconieri Hays ; source : Lorenzo Casalino, Zied Gieb et Rommie Amaro, U.C. San Diego (modélisation de la protéine S)

> Aujourd'hui, cinq ans et une pandémie mondiale plus tard, les vaccins à ARN sont en train de faire leurs preuves. En décembre, deux vaccins à ARN – l'un du géant pharmaceutique américain Pfizer et de BioNTech, à Mayence, en Allemagne, l'autre de Moderna, à Cambridge, dans le Massachusetts – ont obtenu l'approbation d'urgence des autorités réglementaires de plusieurs pays pour lutter contre le Covid-19.

L'ère des vaccins à ARN est arrivée – et des dizaines d'entreprises entrent en jeu. « Toutes les grandes sociétés pharmaceutiques sont, d'une manière ou d'une autre, en train de tester la technique », explique Jeffrey Ulmer, ancien directeur de la recherche et du développement précliniques de la division vaccins de GlaxoSmithKline à Rockville, Maryland, et auparavant membre de l'équipe d'Andy Geall chez Novartis.

L'idée d'utiliser l'ARN dans les vaccins est dans l'air depuis près de trois décennies. Plus rationnelle que les approches classiques, la technologie génétique permet aux chercheurs d'accélérer de nombreuses étapes de la recherche et du développement des vaccins. L'intérêt intense suscité aujourd'hui pourrait déboucher sur des solutions contre des maladies particulièrement récalcitrantes comme la tuberculose, le sida et le paludisme. Et la rapidité de leur mise au point offre une piste pour améliorer les vaccins contre la grippe saisonnière.

Mais les applications futures de cette technologie se heurteront à certains défis. Les matières premières sont chères. Les effets secondaires peuvent être perturbants. Et la distribution nécessite actuellement une chaîne du froid coûteuse – le vaccin contre le Covid-19 de Pfizer-BioNTech, par exemple, doit être stocké à – 70 °C. L'urgence du Covid-19 devrait accélérer la résolution de certains de ces problèmes, mais de nombreuses entreprises pourraient abandonner cette stratégie lorsque la crise actuelle sera passée. La question reste entière : jusqu'où irons-nous ?

« La technologie des vaccins à ARN a fait ses preuves, mais tout n'est pas encore terminé », déclare Philip Dormitzer, responsable de la recherche sur les vaccins à base de virus chez Pfizer et ancien collègue d'Andy Geall chez Novartis. « Et maintenant que nous l'avons vue fonctionner pour le Covid-19, il est tentant de vouloir en faire plus. »

PETITES PARTICULES, GRANDE AVANCÉE

Les vaccins apprennent à l'organisme à reconnaître les agents pathogènes et à les détruire. Généralement, pour entraîner le système immunitaire à reconnaître un intrus, on injecte des agents pathogènes affaiblis ou des fragments de protéines ou de sucres présents à leur surface, nommés « antigènes » (*voir l'encadré page ci-contre*). Mais les vaccins à ARN ne portent que les instructions pour produire les protéines de ces envahisseurs. L'objectif est que ces instructions se glissent dans les cellules d'une personne et conduisent ces dernières à produire les antigènes, transformant ainsi le corps en sa propre usine d'inoculation.

L'idée de la vaccination à ARN remonte aux années 1990, lorsque des chercheurs français (de l'entreprise pharmaceutique aujourd'hui connue sous le nom de Sanofi Pasteur) ont utilisé pour la première fois chez la souris un ARN codant un antigène de la grippe. Cela a produit une réponse, mais le système lipidique de libération de l'ARN s'est révélé trop toxique pour une utilisation chez l'humain. Il a fallu encore une décennie avant que les entreprises qui s'intéressaient aux thérapies par interférence à ARN – lesquelles reposent sur la capacité de l'ARN à bloquer sélectivement la production de protéines spécifiques – ne découvrent les technologies des nanoparticules lipidiques, qui ont rendu possibles les vaccins actuels contre le Covid-19 (*voir l'encadré page 26*).

Rien qu'au cours des dix derniers mois, au moins six vaccins à ARN contre le Covid-19 ont été testés chez l'humain

« Enfin, la percée a eu lieu », déclare Nick Jackson, responsable des programmes et technologies innovantes de la Coalition pour les innovations en matière de préparation aux épidémies, à Oslo – un partenariat mondial visant à accélérer le développement de vaccins. « Ce fut vraiment le tournant qui a permis l'application de l'ARN messager à toute une série de maladies différentes. »

En 2012, à peu près au moment où Andy Geall et ses collègues ont décrit le premier vaccin à ARN encapsulé dans une nanoparticule lipidique, l'Agence américaine pour les projets de recherche avancée (la Darpa) a commencé à financer des groupes chez Novartis, Pfizer, AstraZeneca, Sanofi Pasteur et ailleurs pour travailler sur des vaccins et des

produits thérapeutiques à ARN. Mais aucune des grandes entreprises n'a poursuivi dans cette voie. «Elles étaient réticentes à prendre des risques vis-à-vis d'une réglementation sur les vaccins nouvellement en vigueur, même si les données semblaient bonnes», explique Dan Wattendorf, ancien directeur de programme à la Darpa.

En revanche, deux petites entreprises liées au programme de la Darpa ont continué à travailler sur cette approche. L'une d'elles est CureVac, à Tübingen, en Allemagne, qui a commencé à tester un vaccin antirabique sur des humains en 2013. CureVac dispose également d'un vaccin contre le Covid-19 en phase finale de test.

L'autre était Moderna, qui s'est appuyée sur les travaux financés par la Darpa pour, fin 2015, mener jusqu'aux essais cliniques un vaccin à ARN contre une nouvelle souche de grippe aviaire. Ce vaccin a produit des réponses immunitaires suffisamment fortes pour que l'entreprise embraye sur des essais cliniques de vaccins à ARN contre le cytomégalovirus (cause fréquente d'anomalies congénitales), deux virus transmis par des moustiques (Zika et le virus du chikungunya) et trois virus responsables de maladies respiratoires chez les enfants.

Et en 2019, GlaxoSmithKline, qui avait acquis la plupart des actifs de Novartis dans le domaine des vaccins, a également commencé à évaluer un vaccin antirabique à ARN. Telle était l'étendue du développement clinique des vaccins à ARN début 2020: une dizaine de candidats avaient été testés chez l'humain, quatre avaient été rapidement abandonnés après les premiers essais et un seul – contre le cytomégalovirus – avait progressé vers une étude de suivi plus importante.

Puis est arrivé le coronavirus – et avec lui, «il y a eu cet énorme coup de projecteur», explique Kristie Bloom, chercheuse en thérapie génique à l'université du Witwatersrand, à Johannesburg, en Afrique du Sud. Rien qu'au cours des dix derniers mois, au moins six vaccins à ARN contre le Covid-19 ont été testés chez l'humain. Plusieurs autres sont en cours d'évaluation.

UNE FABRICATION EXPRESS

Les vaccins à ARN semblent faits pour la vitesse. À partir de la séquence génétique d'un agent pathogène, les chercheurs peuvent rapidement extraire un fragment codant un antigène potentiel, insérer cette séquence dans une matrice d'ADN et ensuite synthétiser l'ARN correspondant avant de finaliser le vaccin.

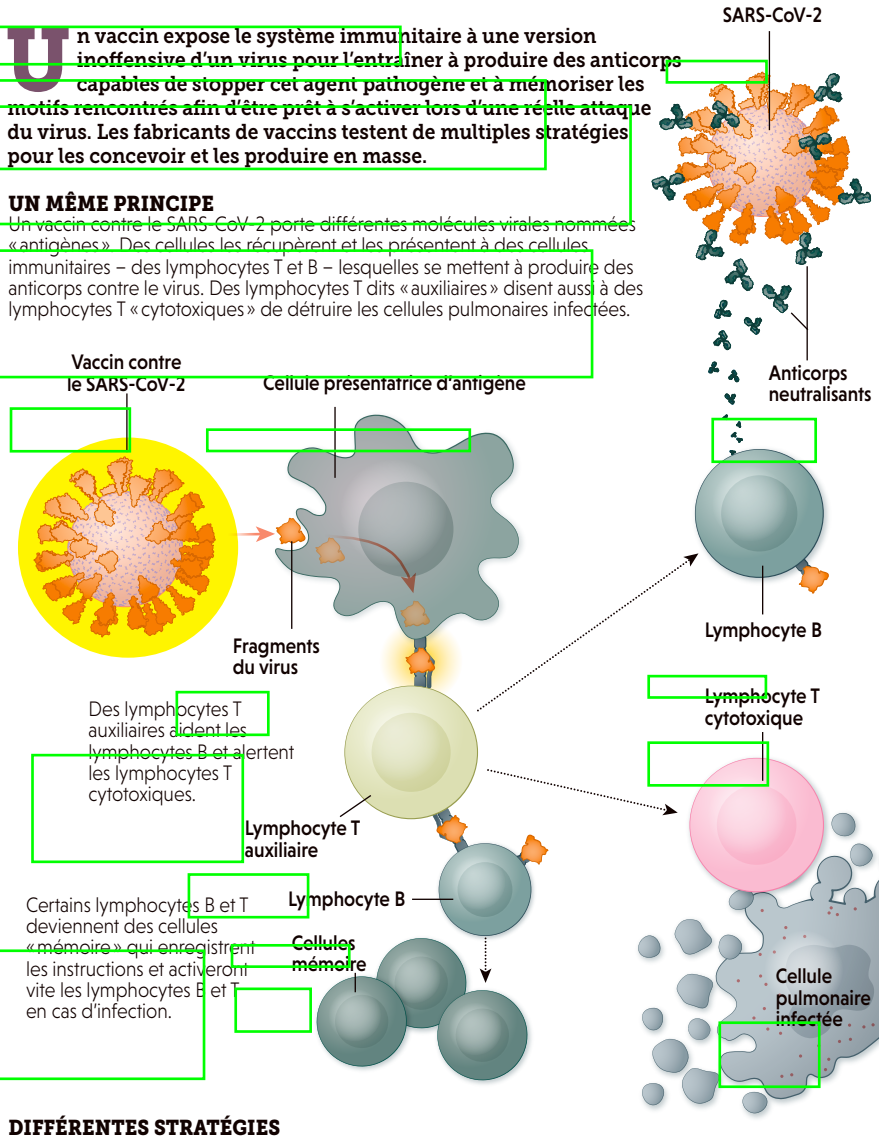
Moderna, par exemple, a accompli ce protocole dans les quatre jours qui ont suivi la réception de la séquence du génome du SARS-CoV-2, le virus responsable du Covid-19. L'entreprise s'est concentrée sur la protéine S (ou *spike*), une >

LES PISTES DE VACCIN

Un vaccin expose le système immunitaire à une version inoffensive d'un virus pour l'entraîner à produire des anticorps capables de stopper cet agent pathogène et à mémoriser les motifs rencontrés afin d'être prêt à s'activer lors d'une réelle attaque du virus. Les fabricants de vaccins testent de multiples stratégies pour les concevoir et les produire en masse.

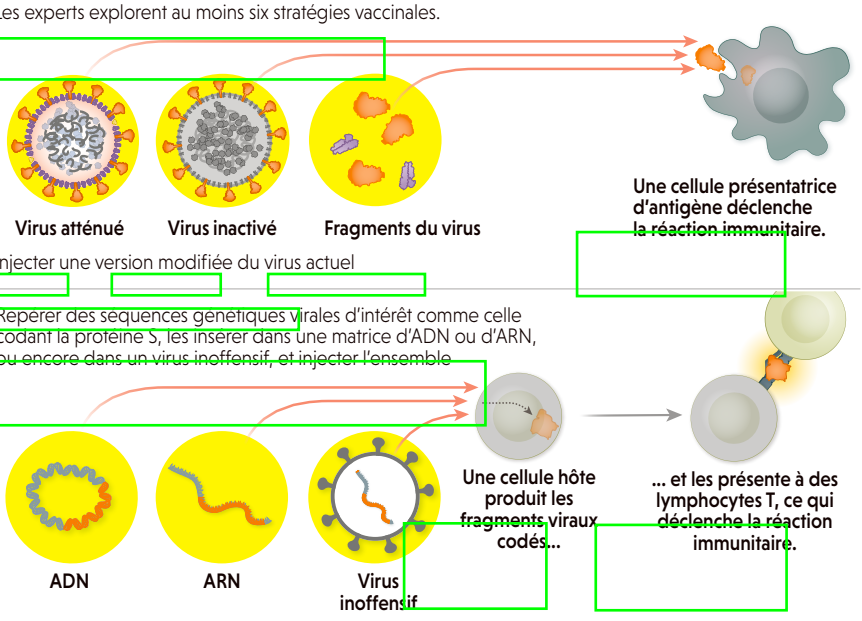
UN MÊME PRINCIPE

Un vaccin contre le SARS-CoV-2 porte différentes molécules virales nommées «antigènes». Des cellules les récupèrent et les présentent à des cellules immunitaires – des lymphocytes T et B – lesquelles se mettent à produire des anticorps contre le virus. Des lymphocytes T dits «auxiliaires» disent aussi à des lymphocytes T «cytotoxiques» de détruire les cellules pulmonaires infectées.



DIFFÉRENTES STRATÉGIES

Les experts explorent au moins six stratégies vaccinales.



© Veronica Falconieri Hays

> protéine située à la surface des particules virales et que ces dernières utilisent pour entrer dans les cellules. Puis, en seulement deux mois, elle a mené, en collaboration avec les Instituts américains de la santé, des expériences de preuve de concept sur des souris, avant de lancer les premiers tests chez l'humain.

N'importe quel vaccin, en théorie, pourrait être créé de la même manière. « Dans ce sens, il s'agit vraiment d'une plateforme », déclare John Shiver, responsable de la recherche et du développement des vaccins chez Sanofi Pasteur. Avec l'ARN, « vous n'avez pas besoin de recréer tout le processus ».

Les approches classiques pour concevoir des vaccins, en revanche, exigent pour chaque candidat des étapes sur mesure, coûteuses et chronophages. Ces lacunes expliquent pourquoi les autorités sanitaires doivent s'y prendre des mois avant la saison de la grippe pour choisir les souches à inclure dans le vaccin annuel contre cette maladie. Ces choix manquent souvent leur cible, et le temps est trop court pour revenir en arrière et tester un autre cocktail. Par conséquent, les vaccins antigrippaux sont rarement efficaces à plus de 60 %.

Avec l'ARN, cependant, les fabricants de vaccins pourraient plus rapidement se réorienter sur un choix efficace d'antigènes. « Théoriquement, on pourrait agir très vite pour ajuster la séquence et régler ce problème – presque à la volée », explique Ron Renaud, directeur général de Translate Bio, une entreprise de Lexington (Massachusetts) spécialisée dans l'ARN, qui travaille avec Sanofi Pasteur sur des vaccins à ARN contre la grippe, le Covid-19 et plusieurs autres infections virales et bactériennes.

Grâce à leur fonctionnalité prête à l'emploi, les vaccins à ARN pourraient aussi aider la recherche fondamentale. Justin Richner, vaccinologue à la faculté de médecine de l'université de l'Illinois à Chicago, met actuellement au point, dans son laboratoire, un vaccin à ARN contre la dengue. De façon systématique, Justin Richner et ses collègues coupent et modifient le gène codant la protéine que le virus de la dengue utilise pour lancer son attaque sur les cellules humaines – la principale protéine de son enveloppe. En itérant leur conception, les chercheurs ont ainsi testé une quinzaine de vaccins candidats chez la souris. « Il est vraiment facile de manipuler la séquence codante du vaccin pour essayer de nouvelles hypothèses et stratégies susceptibles de l'améliorer », explique Justin Richner.

UN VACCIN UNIVERSEL CONTRE LA GRIPPE ?

Les progrès de la technologie aident à présent les chercheurs à se rapprocher de certains graals du développement vaccinal – par

exemple un vaccin antigrippal universel qui fonctionnerait contre n'importe quelle souche du virus sans nécessiter une nouvelle conception chaque année. D'autres chercheurs s'attaquent au sida et à d'autres maladies mortelles dans les pays à faible revenu. Jusqu'à présent, les scientifiques ne sont pas parvenus à produire de vaccins contre ces maladies, souvent parce que les agents responsables de ces pathologies modifient systématiquement leurs protéines de surface et échappent ainsi au système immunitaire. Certains agents infectieux, comme celui du paludisme, ont également des cycles de vie complexes qui compliquent encore le choix des antigènes.

Les vaccins à ARN pourraient inclure des instructions pour produire plusieurs antigènes, soit rassemblées sur un seul brin d'ARN soit sous la forme de plusieurs brins d'ARN enchâssés dans une même nanoparticule. Norbert Pardi, scientifique spécialisé dans les vaccins à la faculté de médecine Perelman de l'université de Pennsylvanie à Philadelphie, a adopté cette dernière approche pour concevoir son vaccin expérimental contre la grippe. Constitué de quatre brins d'ARN, chacun codant une protéine différente du virus de la grippe, ce vaccin multiplex a réussi à protéger des souris contre l'infection par un sous-type particulier de virus de la grippe.

Aujourd'hui, avec ses collègues de la faculté de médecine Icahn du Mont-Sinaï, à New York, Norbert Pardi espère répéter l'exercice pour les deux autres principaux sous-types du virus avant de tout rassembler en un vaccin antigrippal à douze brins qui pourrait remplacer la vaccination annuelle. « Si vous touchez le virus en plusieurs points, explique Norbert Pardi, vous induisez des réponses immunitaires largement protectrices. »

Malgré ses nombreux avantages potentiels, la technologie actuelle des vaccins à ARN demeure perfectible. « Cette technologie est encore très précoce, commente Robin Shattock, immunologiste à l'Imperial College de Londres, et je pense que nous allons assister à de nombreuses créations et améliorations au cours des prochaines années. »

DES PISTES POUR DES VACCINS PLUS PERFORMANTS

Tout d'abord, il y a la question du stockage. Les vaccins de Pfizer-BioNTech et de Moderna nécessitent tous deux des températures très basses pour maintenir l'intégrité de leur ARN. Mais au moins deux entreprises prétendent avoir des vaccins à ARN contre le Covid-19 stables pendant des mois à des températures plus élevées.

CureVac, qui utilise les mêmes nanoparticules lipidiques que Pfizer-BioNTech, plie son ARN en structures 3D compactes, ce qui permet un stockage à des températures d'un réfrigérateur pendant plusieurs mois, explique Mariola Fotin-Mleczek, directrice technique de CureVac. Et Suzhou Abogen Biosciences, une entreprise chinoise dont le vaccin à ARN contre le Covid-19 est actuellement testé chez l'humain, s'est concentrée sur la qualité et la pureté des nanoparticules lipidiques pour créer un produit qui, selon les informations disponibles, conserverait son efficacité jusqu'à une semaine à température ambiante.

Un autre défi est à relever : jusqu'à présent, les vaccins à ARN testés chez l'humain contre une maladie, qu'il s'agisse du Covid-19 ou d'une autre, ont généralement nécessité une double dose pour être efficaces. Or, à en juger par le peu d'assiduité pour les rappels vaccinaux, de nombreuses personnes ayant reçu la première dose ne recevront probablement pas la seconde.

De nouveaux systèmes d'inoculation pourraient y remédier. Chez Vaxess Technologies, à Cambridge, dans le Massachusetts, par exemple, des chercheurs ont mis au point un patch cutané portable, parsemé de minuscules microaiguilles à pointe de soie qui, en se dissolvant, laissent lentement s'écouler le vaccin dans l'organisme.

Administrer le vaccin au goutte-à-goutte plutôt que d'un seul coup pourrait aider à résoudre un troisième inconvénient : les effets secondaires. Bien que transitoires, les réactions fortes semblent plus fréquentes avec les vaccins contre le Covid-19 qu'avec d'autres – plus de 80 % des personnes ayant reçu le vaccin Moderna lors des essais cliniques ont eu une réaction systémique au vaccin, avec des accès de fatigue, des douleurs musculaires et d'autres problèmes qui se sont souvent révélés temporairement invalidants.

Pour le vaccinologue Stanley Plotkin, consultant pour de nombreux fabricants de vaccins, ce désagrément est acceptable dans le cadre d'une pandémie mondiale mortelle. En revanche, les gens pourraient se plaindre s'il >

Avec l'ARN, on n'a pas besoin de recréer tout le processus pour adapter un vaccin à une nouvelle souche

> survenait régulièrement, par exemple lors de leur vaccination annuelle contre la grippe. Et pour tout vaccin destiné aux nourrissons, « on voudrait certainement avoir quelque chose de moins réactogène ».

On considère que les contaminants introduits lors la synthèse des vaccins et les nanoparticules lipidiques sont deux des principales sources de réactogénicité. Les systèmes de purification ne sont pas parfaits et les nanoparticules lipidiques ne sont optimisables que partiellement. Pour ces raisons, les fabricants de vaccins administrent souvent des doses plus faibles afin de limiter l'exposition à ces deux éléments. Avec un vaccin à ARN classique, des doses plus faibles signifient une efficacité moindre. Mais des entreprises telles qu'Arcturus Therapeutics à San Diego, en Californie, et VaxEquity, à Londres, ont trouvé des solutions en construisant, pour leurs vaccins contre le Covid-19, des ARN qui s'autoamplifient (*voir la figure ci-contre*).

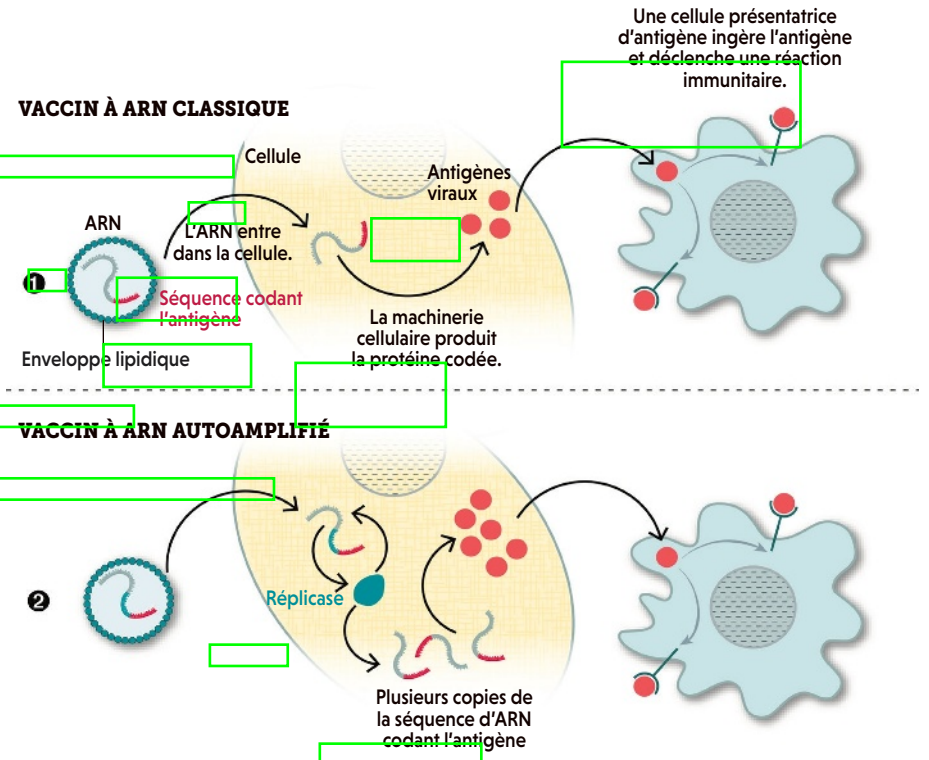
RÉDUIRE LA DOSE

Les vaccins à ARN contre le Covid-19 en tête de course ne contiennent guère plus que la séquence codante de la protéine S du coronavirus flanquée de régions régulatrices. Ces vaccins candidats dont l'ARN s'autoamplifie comportent, en plus, des instructions qui permettent à l'ARN de se copier lui-même.

La construction du vaccin est alors un peu plus ingrate, car elle nécessite une plus grande optimisation de la séquence et un plus grand savoir-faire. Mais elle permet aux entreprises de réduire la dose. Et l'ARN qui se réplique ressemble davantage à une infection virale naturelle, et déclenche une réaction immunitaire plus forte et plus large, susceptible d'autoriser une inoculation à dose unique.

Récemment, BioNTech a amélioré la technologie d'amplification de l'ARN. Avant le Covid-19, l'entreprise se concentrait principalement sur les vaccins contre le cancer. Mais avec sa réputation désormais bien établie, sa capacité de production accrue et le flux substantiel de trésorerie attendu des ventes du vaccin contre le Covid-19, « nous allons pouvoir développer beaucoup plus rapidement notre plateforme contre les maladies infectieuses », déclare Uğur Şahin, cofondateur et directeur général de BioNTech.

À Oostkamp, en Belgique, l'entreprise Ziphius Vaccines a également tenté de tirer parti de la dynamique du coronavirus. Fondée en mai 2019 – initialement pour développer des traitements à base d'ARN contre des maladies rares telles que la myopathie de Duchenne et la mucoviscidose –, Ziphius a revu ses plans de développement l'année dernière après avoir commencé à travailler sur un vaccin à ARN autoamplifié contre le Covid-19. Son directeur général, Chris Cardon, a déclaré que la start-up tente à présent de réunir 30 millions d'euros pour faire avancer quatorze programmes précliniques contre diverses maladies infectieuses.



Une stratégie afin de diminuer le nombre de doses nécessaires de vaccin à ARN pour protéger une personne est d'augmenter l'efficacité du vaccin en incorporant, dans le brin d'ARN, la séquence codant une réplicase, une enzyme qui produit de nombreuses copies de l'ARN ciblé (celui du vaccin en l'occurrence). Le nombre d'antigènes produits est ainsi amplifié.

Pourtant, les vaccins à ARN pourraient se heurter à des obstacles financiers. De nombreux acteurs de l'industrie pensent que l'intérêt actuel pour les vaccins à ARN ne durera pas une fois la pandémie calmée.

« Il est assez difficile de convaincre les gens de parier sur ce type de technologie vaccinale contre les maladies infectieuses », explique Nathaniel Wang, directeur général de Replicate Bioscience, à San Diego, en Californie, une entreprise qu'il a cofondée l'année dernière avec Andy Geall pour développer des traitements à base d'ARN contre le cancer. Et, selon lui, même si Replicate a monté quelques partenariats universitaires et commerciaux autour des vaccins à ARN contre le Covid-19 et le virus Zika, ce n'est pas ce que la plupart des sociétés de capital-risque veulent financer.

Pour autant, alors que les vaccins à ARN font la une des journaux, Andy Geall et nombre de ses anciens collègues se remémorent leurs années chez Novartis. Si l'entreprise avait conservé sa branche vaccinale, auraient-ils pu contribuer à mettre fin aux épidémies d'Ebola ou de Zika au cours de la dernière décennie ?

« C'est toujours un peu triste de regarder en arrière », constate Christian Mandl, ancien responsable de la recherche et des premiers développements cliniques de la branche vaccinale chez Novartis. Mais le succès des vaccins contre le Covid-19 le réconforte aujourd'hui : « Je suis très fier de la contribution précieuse que nous avons apportée. » ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Beissert *et al.*, **A trans-amplifying RNA vaccine strategy for induction of potent protective immunity**, *Mol. Ther.*, vol. 28, pp. 119-128, 2020.

N.-N. Zhang *et al.*, **A thermostable mRNA vaccine against Covid-19**, *Cell*, vol. 182, pp. 1271-1283, 2020.

A. J. Geall *et al.*, **Nonviral delivery of self-amplifying RNA vaccines**, *PNAS*, vol. 109, pp. 14604-14609, 2012.

F. Martinon *et al.*, **Induction of virus-specific cytotoxic T lymphocytes in vivo by liposome-entrapped mRNA**, *Eur. J. Immunol.*, vol. 23, pp. 1719-1722, 1993.

© Pour la Science

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an			✓
Le hors-série papier 4 numéros par an		✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an			✓
Accès à pourlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de ~~82,80 €~~	**79 €** Au lieu de ~~114,40 €~~	**99 €** Au lieu de ~~174,40 €~~
	29 % de réduction *	**31 %** de réduction *	**43 %** de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

PAG21STD

☑ **OUI, je m'abonne pour 1 an à POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

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

☐ FORMULE **PAPIER + HORS-SÉRIE** — **79€** Au lieu de ~~114,40€~~
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~174,40€~~
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

FF-PAP-N-12N-59€ · FF-PAP+HSP-N-12N-79€ · FF-INT-N-12N-99€

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**

☐ **Carte bancaire**

N° ....

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

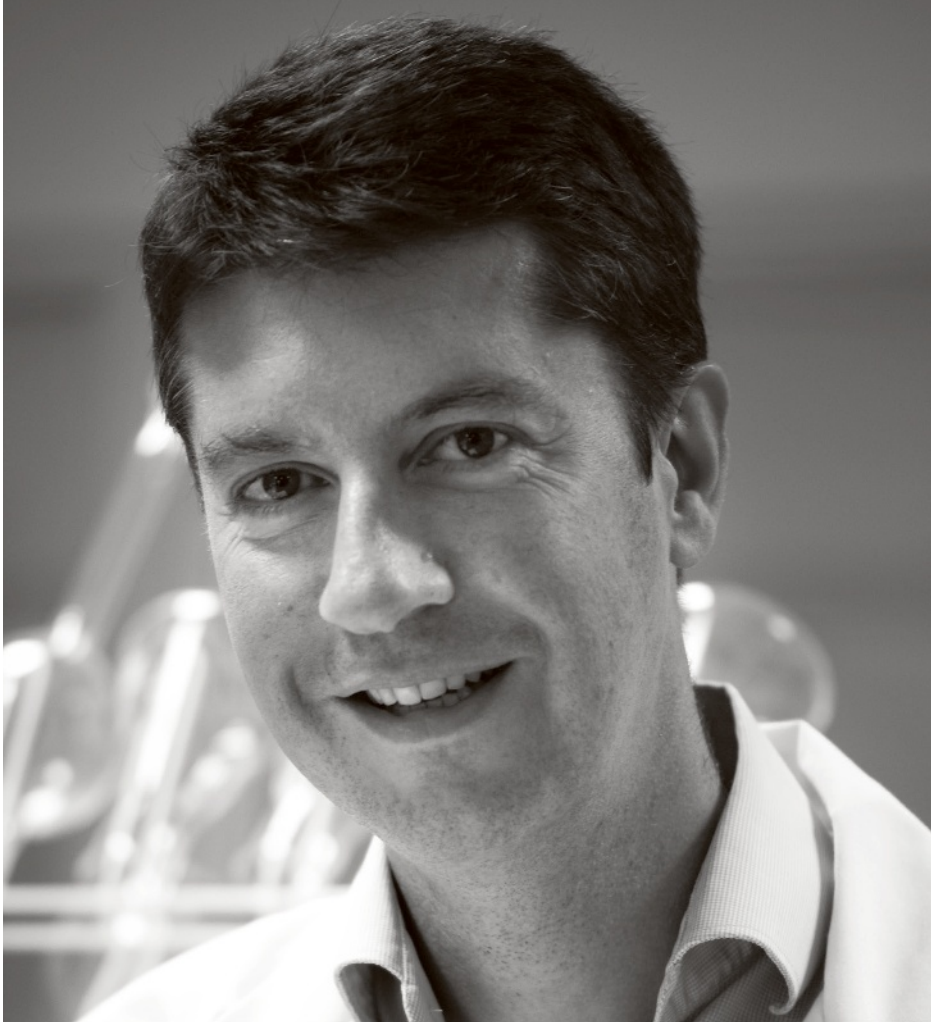
Signature obligatoire :

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

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

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

BRUNO PITARD
est directeur de recherche au CNRS, au sein du centre de recherche en cancérologie et immunologie Nantes-Angers, et fondateur de la société de biotechnologie In-Cell-Art, spécialisée dans le développement de nanotransporteurs d'acides nucléiques.



Les vaccins à ARN ouvrent une voie thérapeutique puissante

Avec l'épidémie de Covid-19, les vaccins à ARN sont entrés dans une nouvelle phase de leur histoire. Bruno Pitard, qui a participé à l'aventure, revient sur ce champ de recherche en pleine ébullition.

Vous avez participé aux travaux sur les vaccins à ARN. Dans quelles circonstances avez-vous rejoint ce domaine de recherche ?

Je travaille sur la vectorisation des acides nucléiques (ADN et ARN), c'est-à-dire la recherche de moyens pour transporter ces molécules dans des cellules, depuis vingt-six ans. J'ai commencé cette activité en 1995. Après des études d'ingénieur et une thèse au CEA et à l'institut Curie, à Paris, j'avais été recruté par la direction scientifique du groupe Rhône-Poulenc – aujourd'hui Sanofi –, qu'animaient à l'époque, entre autres, Pierre-Gilles de Gennes, Prix Nobel de physique, Jean-Marie Lehn, Prix Nobel de chimie, et le biophysicien Claude Hélène. On m'a alors chargé de mettre au point des systèmes synthétiques pour transporter des acides nucléiques dans les cellules.

Déjà à l'époque, l'idée était de trouver un moyen de faire entrer dans les cellules des molécules d'ADN ou d'ARN afin qu'elles synthétisent des protéines d'intérêt thérapeutique ou vaccinal. C'étaient les tout débuts. Ces molécules n'entrant pas toutes seules dans les cellules, il fallait concevoir des vecteurs – des sortes de capsules leur permettant de traverser la membrane cellulaire. Les particules virales le font très bien – c'est d'ailleurs leur seule activité : mettre les cellules à leur service en y transportant leurs acides nucléiques. Mon projet consistait à obtenir le même résultat, mais de façon entièrement synthétique, avec l'aide de chimistes.

Quelle piste avez-vous suivie ?

Les premiers transporteurs que nous avons synthétisés étaient des lipides : une couche constituée de chaînes d'acides gras pour mimer la membrane cellulaire, auxquelles on avait accroché des molécules chargées positivement, car les acides nucléiques sont chargés négativement. On s'inspirait de la nature : dans le noyau cellulaire, par exemple, les acides nucléiques sont en interaction avec des molécules chargées positivement. Et dans les spermatozoïdes, des molécules chargées positivement condensent le matériel génétique, ce qui suggérait que nous pourrions aussi condenser nos acides nucléiques par cette méthode.

Nous avions ainsi obtenu nos premiers vecteurs, mais il restait encore tout à faire : établir leur carte d'identité. À quoi ils ressemblent, comment ils entrent dans les cellules, quel chemin l'acide nucléique suit dans la cellule… Une caractérisation qui a nécessité plusieurs années d'études physicochimiques, de microscopie électronique et même d'analyse structurelle par diffusion de rayons X à l'ESRF, le synchrotron européen de Grenoble. Nous avons ainsi montré en 1997, puis en 1999, que nos transporteurs étaient des structures constituées de multiples lamelles organisées en pelures d'oignons et qu'ils étaient capables d'entrer dans des cellules en culture, puis nous avons continué à les améliorer, notamment en les stabilisant à l'aide de mélanges de lipides naturels et de lipides portant des chaînes de polyéthylène glycol (PEG), technologie que nous avions brevetée en 1998.

Quand vous avez commencé ces travaux, d'autres laboratoires ailleurs dans le monde s'intéressaient-ils aussi à ce domaine ?

Oui, dans les années 1990, plusieurs équipes aux États-Unis et en Angleterre s'étaient lancées sur cette voie et d'autres liposomes cationiques avaient été synthétisés, notamment par les Américains Philip Felgner et Lee Huang. En France, Jean-Paul Behr, à la faculté de médecine de l'université de Strasbourg, avait aussi produit ses premiers vecteurs lipidiques dès la fin des années 1980. On commençait par ailleurs à envisager cette technologie pour des vaccins à ADN.

C'est d'ailleurs la voie que vous avez suivie…

En effet, c'est à ce moment-là que j'ai travaillé sur le programme de vaccination à ADN de Sanofi Pasteur. Quelques années plus tard, en 2005, avec Jean-Marie Lehn, nous avons fondé notre propre entreprise, In-Cell-Art, pour exploiter nos nouveaux concepts de transport intracellulaire. C'est ainsi qu'en 2011, il y a dix ans, Sanofi, CureVac et In-Cell-Art ont reçu 33 millions de dollars de l'armée américaine pour un projet commun de développement de vaccins à ARN. Nous avons alors mis au point un système de vectorisation d'ARN messager reposant sur un lipide dérivé d'un sucre naturel (l'ARN messager étant l'intermédiaire de production des protéines à partir de l'ADN) que nous avons pu tester en 2019 chez des primates non humains.

Nous avons ainsi montré qu'après injection intramusculaire, l'ARN était pris en charge par les ganglions lymphatiques – les lieux de production des cellules immunitaires – et que les cellules présentatrices d'antigènes (des cellules qui, en présence de molécules étrangères, activent le système immunitaire en les leur présentant) étaient bien les premières cellules qui se mettaient à produire la protéine codée par l'ARN.

C'est aussi au début des années 2010 que Novartis a publié ses propres travaux sur les vaccins à ARN…

L'armée américaine avait en effet financé deux projets à cette époque : le nôtre et celui de Novartis. La technique de Novartis était un peu différente. Alors que nous étions partis d'ARN messagers simples, les chercheurs de Novartis ont exploré la piste d'ARN qui >

> s'autoamplifient : ils ont ajouté à l'ARN messager la séquence codant une « réplicase », une enzyme que produisent des virus à ARN et dont le rôle est de fabriquer de multiples copies d'un ARN cible. Les deux systèmes fonctionnaient très bien. La piste de la réplicase est d'ailleurs toujours d'actualité pour augmenter l'efficacité des vaccins à ARN.

Pourquoi, alors, Novartis a-t-il interrompu ses travaux sur les vaccins à ARN en 2015 ?

La branche vaccination de Novartis a été rachetée par GlaxoSmithKline, qui a préféré ne pas continuer dans ce secteur, comme d'ailleurs tous les grands groupes pharmaceutiques. Les entreprises qui ont poursuivi – Moderna, CureVac et BioNTech – étaient de petites sociétés de biotechnologie.

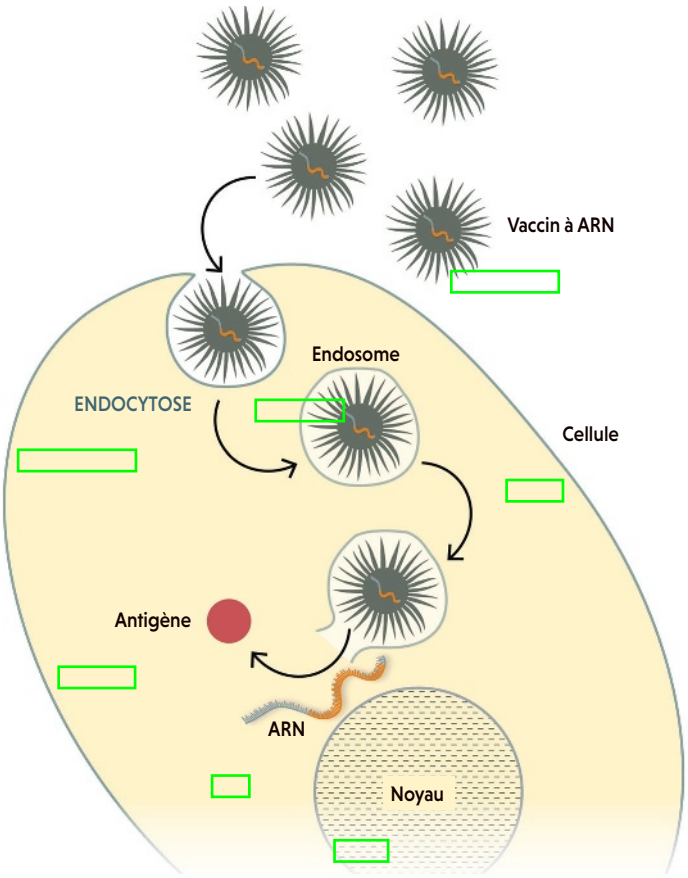
Les grands groupes ont une gestion du risque un peu différente. Ils évitent d'utiliser des systèmes trop innovants, susceptibles de ternir leur image s'ils ne fonctionnent finalement pas. Par exemple, Sanofi Pasteur a mis vingt ans à développer un vaccin contre la dengue à partir du virus de la fièvre jaune et dépensé 1,5 milliard d'euros entre sa fabrication à grande échelle et ses essais cliniques, pour devoir finalement rabaisser considérablement ses ambitions après la mort de quatorze enfants aux Philippines durant la campagne de vaccination lancée en 2015. De fait, en 2017, Sanofi Pasteur a publié un communiqué de presse indiquant que les personnes n'ayant jamais été en contact avec le virus de la dengue étaient plus susceptibles de réagir fortement au vaccin. En termes d'image, de tels résultats sont catastrophiques et n'encouragent pas les grands groupes à investir dans des innovations trop importantes.

Finalement, les vaccins à ARN contre le Covid-19 de Moderna et Pfizer-BioNTech sont-ils proches de ceux que vous aviez élaborés ?

Ils sont conçus sur le même modèle : les ARN messagers sont toujours transportés par un mélange de lipides stabilisés au moyen de chaînes de polyéthylène glycol, comme dans notre brevet de 1998. Il ne s'agit pas exactement de notre formulation, mais ces vecteurs sont le fruit de l'émergence d'un domaine – le transport lipidique synthétique d'acides nucléiques – à laquelle nous avons largement contribué. D'ailleurs, en 2020, avec notre plateforme de synthèse, nous avons conçu un vaccin à ADN contre le SARS-CoV-2 qui a protégé avec succès des souris contre la souche virale initiale qui circule encore en France.

Pourquoi un vaccin à ADN et non à ARN ?

L'ADN est plus stable que l'ARN. De plus, nous avions déjà fait tout un développement préclinique réglementaire sur un vaccin à ADN contre le cancer du foie. Nous avons donc décliné la plateforme de synthèse de ce vaccin pour l'adapter au SARS-CoV-2. Nous avons ainsi obtenu un vaccin stable à 25 °C pendant plus de six mois sous une forme lyophilisée.



VACCIN À ARN

Pour optimiser la réponse immunitaire, on conçoit les vaccins à ARN de telle façon que la cellule les ingère par endocytose, c'est-à-dire par invagination de sa membrane, qui enveloppe le vaccin jusqu'à former une vésicule, un endosome, laquelle l'achemine dans le cytoplasme. En effet, quand un ARN exogène se retrouve dans un endosome, des protéines de ce dernier le détectent et alertent le système immunitaire. Les vecteurs qui permettent cette ingestion sont constitués de lipides stabilisés à l'aide de chaînes de polyéthylène glycol. Une fois libéré dans le cytoplasme, l'ARN est traduit en un antigène qui sera ciblé par le système immunitaire.

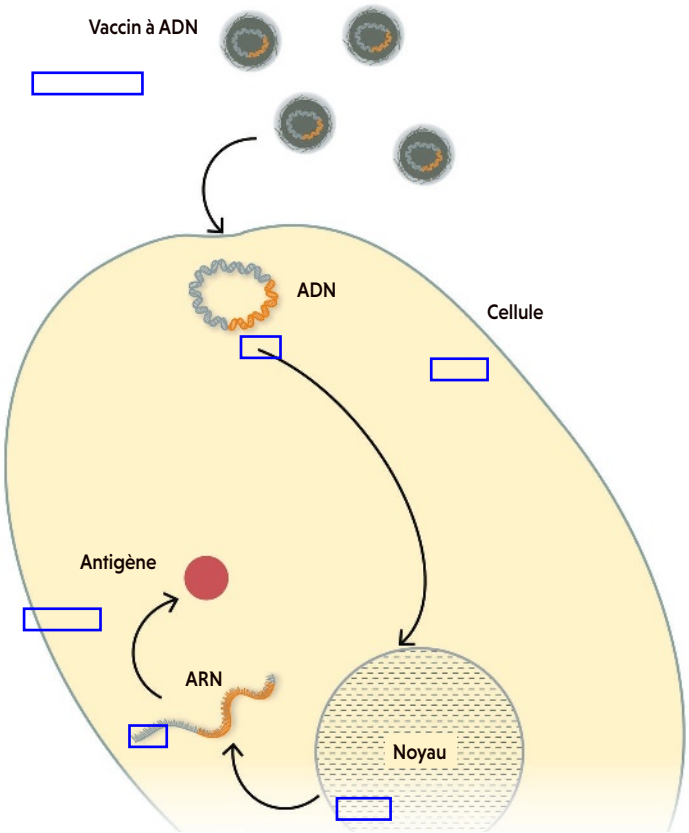
Allez-vous lancer des essais cliniques ?

Notre vaccin est prêt pour des essais cliniques, mais à l'heure actuelle nous n'avons pas encore les financements nécessaires pour les mettre en œuvre. Néanmoins, compte tenu des très bons résultats que notre vaccin a obtenus contre la souche initiale, nous allons pouvoir le faire évoluer pour qu'il protège contre les variants circulant actuellement en France. Même si les vaccins à ARN de Moderna et Pfizer-BioNTech sont désormais largement utilisés, il y a toujours un intérêt fort à développer un vaccin stable à température ambiante.

Pourquoi s'intéresser plus à des vaccins à ARN qu'à des vaccins à ADN si ces derniers sont plus stables ?

Parce que les molécules d'ARN s'arrêtent dans le cytoplasme. Il y a eu, au départ, énormément de levées de boucliers contre les vaccins à ARN. On s'inquiétait que l'ARN entre dans le noyau et modifie le patrimoine génétique des personnes vaccinées. Or si, dans les cellules, les ARN messagers sortent bien du

© Pour la Science



VACCIN À ADN

Le système de détection des ADN étrangers étant dans le cytoplasme, on conçoit les vaccins à ADN de façon qu'ils entrent directement dans le cytoplasme, afin qu'ils y activent le système immunitaire. Le vecteur est cette fois constitué de polymères amphiphiles (avec une partie hydrophobe et une partie hydrophile). Une fois entré dans la cellule, l'ADN pénètre dans le noyau, puis est transcrit en un ARN qui sera traduit en un antigène.

noyau – ils transportent ainsi le code génétique dans le cytoplasme, où se trouve la machinerie qui le lit et le traduit en protéines –, il est très rare qu'ils y entrent. C'est d'ailleurs assez curieux que les médias et les personnes antivaccins n'aient pas plus réagi lorsqu'on a commencé à utiliser le vaccin d'AstraZeneca, un vaccin construit à l'aide d'un virus à ADN qui transporte une molécule d'ADN, laquelle va dans le noyau pour que la cellule exprime la protéine S du SARS-CoV-2 (la protéine à sa surface par laquelle le virus s'amarre aux cellules).

Concrètement, le vaccin à ADN est-il plus dangereux ? Y a-t-il plus de risque que l'ADN du vaccin perturbe celui de la personne ?

Dans un cas comme dans l'autre, les cellules qui exprimeront l'antigène, soit *via* un ARN, soit *via* un ADN, seront détruites par le système immunitaire, car elles vont produire des fragments d'une protéine virale, la protéine S, qui sera détectée par l'organisme comme non physiologique et ciblée par le système immunitaire. De plus, les molécules d'ADN ou d'ARN utilisées dans les vaccins ne comportent pas d'instruction pour s'intégrer au génome. Ce ne sont pas des rétrovirus. Ces virus à ARN comme celui du sida ou du SARS-CoV-2 portent une séquence qui code une enzyme nommée « intégrase », laquelle, une fois l'ARN viral rétrotranscrit en ADN dans la cellule infectée, intègre cet ADN dans le génome de la cellule. Quand les gens sont infectés par le coronavirus, des millions de particules virales infectent des cellules qui se mettent à produire des centaines de milliers de particules de coronavirus. Celui-ci se distribue dans l'organisme, de nombreuses cellules sont détruites, et l'on ne se pose pas la question de ce qui se passe dans les cellules de toutes ces personnes…

Vous parliez de lyophilisation des vaccins à ADN. Est-ce envisageable de procéder de même pour conserver les vaccins à ARN ?

La conservation à – 70 °C du vaccin de Pfizer-BioNTech est en effet un cauchemar logistique. Nous avons commencé à explorer la piste de la lyophilisation : il existe des possibilités de lyophiliser les formulations issues de notre lipide dérivé d'un sucre naturel combiné à de l'ARN. Il est fort probable que Moderna et Pfizer-BioNTech y réfléchissent aussi. La formulation liquide est la plus facile à obtenir – c'est ce qui leur a permis d'aller très vite pour développer leur stratégie de vaccination –, mais la suite logique est d'améliorer la stabilité du vaccin.

Vous développez par ailleurs d'autres méthodes de vectorisation des acides nucléiques. De quoi s'agit-il ?

Les nanoparticules lipidiques utilisées dans les vaccins à ARN ont été développées pour favoriser une inflammation, afin de créer les conditions d'une réaction immunitaire contre l'antigène codé dans le vaccin. En revanche, si l'on cherche à utiliser des ARN pour faire exprimer par les cellules une protéine d'intérêt thérapeutique – une hormone de croissance, un facteur de coagulation, un anticorps, etc. –, déclencher une inflammation est contre-productif. On se tourne alors vers d'autres systèmes de vectorisation à base de polymères amphiphiles (constitués d'une tête hydrophile >

Nous allons modifier notre vaccin afin qu'il protège contre les nouveaux variants

> et d'une queue hydrophobe), qui ne sont pas du tout inflammatoires.

Pourquoi ces systèmes de vectorisation à base de polymères amphiphiles ne sont pas inflammatoires, et pourquoi les nanoparticules lipidiques utilisées dans les vaccins le sont ?

Dans les cellules, l'ADN est dans le noyau, l'ARN dans le cytoplasme. Et le système de détection des ARN exogènes se trouve non pas dans le cytoplasme (il y détecterait alors tous les ARN cellulaires), mais dans les endosomes, les vésicules *via* lesquelles les cellules se nourrissent (la membrane cellulaire se creuse jusqu'à se refermer sur elle-même, puis la vésicule ainsi formée – un endosome –, se détache et poursuit sa route dans le cytoplasme).

La cellule détecte les ARN exogènes ainsi ingérés à l'aide de protéines nommées TLR nichées dans la membrane interne des endosomes. Lorsqu'elles rencontrent un ARN étranger, les protéines TLR produisent des signaux de danger qui déclenchent l'expression de cytokines, de petites molécules que la cellule libère et qui produisent une inflammation en activant une réaction immunitaire innée, c'est-à-dire non spécifique de l'ARN exogène rencontré.

Aussi, pour la vaccination, l'idée est d'utiliser des systèmes lipidiques qui font entrer les ARN dans les endosomes, afin que ces derniers stimulent les TLR et déclenchent la production de cytokines pro-inflammatoires, de manière à attirer le système immunitaire sur le site d'injection. De même, le système de détection des ADN étrangers est non pas dans le noyau, mais dans le cytoplasme. Nos vaccins à ADN sont donc conçus pour que l'ADN soit libéré directement dans le cytoplasme afin d'y déclencher une réaction immunitaire.

En revanche, pour les ARN thérapeutiques, on utilise un système de vectorisation à base de polymères qui introduit l'ARN directement dans le cytoplasme. On contourne ainsi tous les commutateurs de l'immunité innée situés dans les endosomes. Par cette méthode, que nous avons brevetée en 2015, nous avons réussi à produire des protéines de façon non inflammatoire chez l'animal. Nous sommes d'ailleurs les seuls à savoir ainsi produire des anticorps monoclonaux d'intérêt thérapeutique directement chez l'individu.

Contre quelles maladies cette méthode serait-elle envisageable ?

Elle est potentiellement applicable dans différentes pathologies, pour exprimer des anticorps soit contre des virus ou des bactéries lors de maladies infectieuses, soit contre des cibles intracellulaires dans le cadre d'un traitement contre le cancer, par exemple.

Concernant les maladies infectieuses comme le Covid-19, un problème de la vaccination est que son efficacité dépend de l'état du système immunitaire de l'individu vacciné. S'il est peu efficace, il y a un risque qu'il ne soit pas capable de produire des anticorps, par exemple contre la protéine S du coronavirus dans le cas de la vaccination contre le Covid-19. En revanche, si l'on connaît déjà un anticorps neutralisant – un anticorps qui empêche l'agent pathogène de s'introduire dans les cellules –, comme c'est le cas avec le SARS-CoV-2, notre système de vectorisation non inflammatoire peut aider l'organisme à produire cet anticorps (l'ARN introduit est alors l'ARN messager qui code l'anticorps) et même des cocktails d'anticorps pour neutraliser le virus initial et ses variants.

Le principe est le même que celui utilisé pour traiter Donald Trump quand, ayant contracté le Covid-19, il a reçu l'injection d'un cocktail expérimental d'anticorps ciblant la protéine S. Mais au lieu que les anticorps soient produits par une lignée cellulaire de hamster cultivée dans des fermenteurs de 1 000 litres

Contre le sida, la piste d'anticorps produits par ARN thérapeutique paraît plus prometteuse que le vaccin

en inox, notre idée est que ce soient directement les cellules musculaires de la personne qui les expriment, ce qui peut être très rapide. En trois heures, les cellules du muscle où a eu lieu l'injection expriment les anticorps.

Comment un tel système pourrait agir contre un cancer ?

L'idée est d'exprimer des anticorps qui ont des cibles connues dans la tumeur, au lieu d'injecter directement les anticorps déjà synthétisés, comme c'est le cas dans les immunothérapies actuelles. En particulier, il n'est pas rare que les cellules tumorales contrôlent le système immunitaire : elles produisent à leur

surface une protéine que des cellules immunitaires venues combattre la tumeur détectent comme un signal les poussant au suicide. Une piste est donc de faire produire par les cellules de l'organisme des anticorps qui bloquent le récepteur de cette protéine sur les cellules immunitaires, afin qu'elles ne se suicident plus.

Une difficulté est que l'efficacité de ces anticorps est faible (qu'ils soient introduits déjà synthétisés ou sous forme d'acide nucléique) : environ 80 % des patients n'y répondent pas suffisamment. L'idée est donc de combiner l'action de ces anticorps à des vaccins antitumoraux : on injecte aux patients des antigènes sous la forme de peptides, de virus modifiés, ou encore d'ARN ou d'ADN, afin de stimuler le système immunitaire.

Dans ce cas, l'antigène est un marqueur de la tumeur. Par exemple, chez 70 % des personnes atteintes d'hépatocarcinome, le cancer primaire du foie le plus fréquent chez l'adulte, les cellules tumorales se mettent à exprimer de nouveau une protéine, l'alpha-fœtoprotéine, qui, en temps normal, n'est produite que durant le développement embryonnaire. En 2010, nous avons donc conçu un vaccin à ADN codant cette protéine et l'avons injecté à des souris qui avaient développé un modèle de la maladie. Cela a considérablement réduit la taille de la tumeur.

La temporalité de ces vaccins est-elle compatible avec celle des tumeurs et de leur évolution ?

Une médecine personnalisée paraît envisageable. On prend une cellule cancéreuse de la tumeur d'un patient, on séquence son génome et on le compare avec celui d'une cellule saine. Si cette étude révèle de nouveaux antigènes, on produit à petite échelle, à l'hôpital, un vaccin à ARN ou à ADN qui les cible, personnalisé pour le patient.

Et contre le sida, quelle est la forme la plus prometteuse : le vaccin ou l'ARN thérapeutique ?

Pour faire un vaccin à ADN ou à ARN, il faut un bon trio : un antigène pertinent, un ADN ou un ARN adéquat qui portera la séquence de l'antigène et un transporteur efficace. Dans la lutte contre le coronavirus, on a de la chance, la protéine S est une formidable molécule immunogène. Mais dans le cas du virus du sida, on ne connaît toujours pas l'antigène qui stimulera le système immunitaire. En revanche, la piste des anticorps neutralisants paraît plus encourageante, car on connaît de tels anticorps. L'idée serait de les faire produire directement par l'individu au moyen d'un ARN messager vectorisé avec notre polymère.

Peut-on dire que l'ère des vaccins à ARN est lancée ou y a-t-il encore des freins à lever ?

Contre le coronavirus, je ne pense pas que l'on pouvait faire mieux que les vaccins à ARN de BioNTech et de Moderna, efficaces à 95 %, alors que les autres le sont moins ou ne marchent pas. Le vaccin d'AstraZeneca protège entre 70 % et 90 % des personnes qui l'ont reçu, les virus inactivés chinois atteignent 60 % d'efficacité, le virus de la rougeole de l'institut Pasteur n'a pas fonctionné et les essais de protéine recombinante chez Sanofi n'ont pas encore été concluants. S'il y avait un vaccin à produire pour la planète entière, ce serait celui de BioNTech ou celui de Moderna. Donc, en ce sens, les vaccins à acides nucléiques se sont imposés.

Mais ce ne sera peut-être pas le cas pour toutes les maladies. Certains vaccins pourront être produits, par exemple contre le virus Zika, le cytomégalovirus et le chikungunya. Mais difficile de miser sur un vaccin à ARN contre le sida tant que l'on ne connaît pas d'antigène à cibler. L'utilisation de ces vaccins se fera plutôt au cas par cas, car elle est toujours tributaire du trio ARN-système de transport-antigène. La molécule d'ARN est optimisée et fonctionne bien. La plateforme vaccinale est opérationnelle et même polyvalente : le système lipidique est toujours le même quelle que soit la séquence codée dans l'ARN. Le facteur limitant est l'antigène : il faut trouver le bon pour chaque vaccin. Mais un domaine s'ouvre, c'est certain.

Comment voyez-vous le domaine des vaccins à acides nucléiques dans les prochaines années ?

Depuis vingt-cinq ans, on disait qu'ils étaient les vaccins du futur. Cette fois, on y est, au moins pour le coronavirus, mais sans doute bientôt pour d'autres maladies. Grâce à leurs vaccins contre ce virus, les sociétés Moderna et BioNTech ont désormais une trésorerie que beaucoup d'entreprises envient et qui leur permettra d'exploiter tous azimuts leur technologie. Elles ont déjà commencé. Moderna mène des essais cliniques sur des vaccins contre des virus comme Zika, le cytomégalovirus ou H7N9 (un virus de grippe aviaire qui a infecté des humains en 2017 en Chine), mais aussi sur des vaccins personnalisés contre le cancer, ainsi que sur diverses pistes thérapeutiques, notamment contre des tumeurs solides. Et BioNTech a plusieurs essais cliniques en cours sur des vaccins contre différents cancers (prostate, sein, ovaires, mélanome…). Reste à savoir comment la population les accueillera. ■

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

BIBLIOGRAPHIE

K. E. Lindsay *et al.*, **Visualization of early events in mRNA vaccine delivery in non-human primates via PET-CT and near-infrared imaging**, *Nat. Biomed. Eng.*, vol. 3, pp. 371-380, 2019.

A. J. Geall *et al.*, **Nonviral delivery of self-amplifying RNA vaccines**, *PNAS*, vol. 109(36), pp. 14604-14609, 2012.

J. Cany *et al.*, **AFP-specific immunotherapy impairs growth of autochthonous hepatocellular carcinoma in mice**, *J. Hepatol.*, vol. 54(1), pp. 115-121, 2011.

B. Pitard *et al.*, **Sterically stabilized BGTC-based lipoplexes : Structural features and gene transfection into the mouse airways *in vivo***, *J. Gene Med.*, vol. 3(5), pp. 478-487, 2001.

B. Pitard *et al.*, **Structural characteristics of supramolecular assemblies formed by guanidinium-cholesterol reagents for gene transfection**, *PNAS*, vol. 96(6), pp. 2621-2626, 1999.

Vue d'artiste d'un protoamas où la production d'étoiles dans les galaxies qui le composent est intense. Ces dernières ont des formes irrégulières du fait des nombreuses collisions et interactions.

© Ron Miller

La fureur de vivre des grands amas de galaxies

Certains anciens amas de galaxies semblent avoir grandi trop vite. Ils constituent un laboratoire pour explorer l'astrophysique dans des conditions extrêmes.

L'ESSENTIEL

> Aujourd'hui, certains amas sont remplis de galaxies passives qui ne produisent quasiment plus d'étoiles.

> Ces amas semblent avoir eu une évolution extrêmement rapide. Pour le vérifier, les astronomes traquent ces monstres dans l'Univers jeune.

> Grâce aux avancées les plus récentes en astronomie infrarouge, ils commencent à détecter ces objets et à en mesurer les caractéristiques.

> Cela ouvre un vaste champ de recherches sur les processus à l'œuvre dans ces amas, leurs galaxies et leurs étoiles.

L'AUTRICE

ARIANNA LONG
doctorante en astrophysique à l'université de Californie à Irvine, aux États-Unis

De la même façon que les arbres ou les humains naissent, grandissent et meurent, les galaxies, ces structures composées de gaz et d'étoiles qui peuplent l'Univers, ont un début et une fin. Elles se forment soit lorsqu'un nuage de gaz a accumulé une masse suffisante et s'effondre sur lui-même, soit quand deux plus petites galaxies, ou plus, entrent en collision. Une fois constituée, une galaxie donne naissance à des étoiles durant toute son existence. Sa réserve de gaz crée ces creusets stellaires où les réactions de fusion nucléaire convertissent des éléments légers, tels l'hydrogène ou l'hélium, en d'autres, plus lourds, et libèrent de la lumière et de l'énergie.

Une galaxie est dite «active» quand elle brille intensément dans l'ultraviolet: c'est le signe de la présence d'étoiles jeunes, lumineuses et chaudes. Quand ces astres vieillissent, leur lumière change. Elles évoluent de chaudes et bleues à froides et jaunes ou rouges. Dès lors qu'une galaxie contient principalement des étoiles jaunes et rouges, elle n'émet plus ou peu de rayonnement ultraviolet. On la considère en fin de vie, ou «passive». Si elle est suffisamment massive, elle prend une forme sphéroïdale, une galaxie elliptique, où les naissances d'étoiles deviennent assez rares.

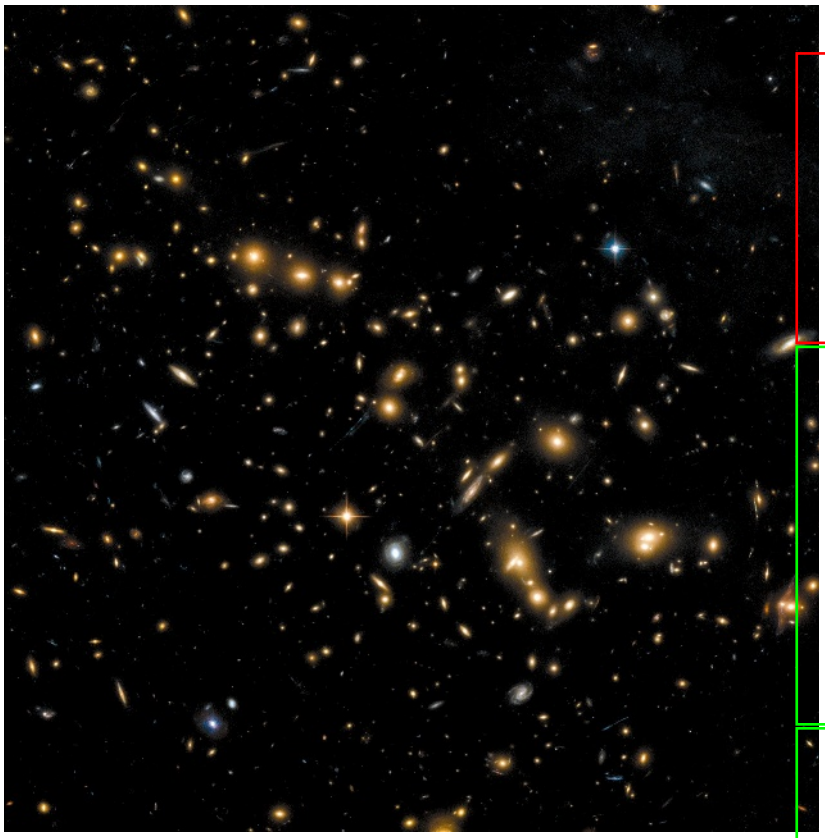
Quand les astronomes observent l'espace autour de nous, jusqu'à des distances de l'ordre de 300 à 600 millions d'années-lumière typiquement, ils constatent qu'un nombre important de ces galaxies elliptiques sont regroupées dans de grands ensembles, des amas de galaxies. Certains de ces amas hébergent les restes des galaxies les plus massives jamais formées dans l'Univers. On y trouve des centaines, voire des milliers de galaxies qui gravitent lentement les unes autour des autres, sans perspective de changement.

Ces amas de galaxies sont des objets très étonnants qui posent d'épineux problèmes pour les astronomes. La plupart d'entre eux semblent avoir atteint leur stade final d'évolution quand l'Univers n'avait que la moitié de son âge actuel (13,8 milliards d'années). Pour que leurs galaxies soient déjà devenues elliptiques, cela signifie qu'elles ont produit leurs étoiles et consommé leur gaz très tôt dans l'histoire du cosmos. Mais, dans ce cas, ces galaxies auraient atteint la taille de la Voie lactée, voire plus, il y a au moins 10 milliards d'années, beaucoup plus tôt que ce que l'on sait de l'évolution des galaxies. Ces observations suggèrent que les jeunes amas de galaxies – les «protoamas» – où ces galaxies se sont formées devaient être des endroits incroyablement actifs, où le rythme de formation des étoiles était frénétique. Quelles conditions ont favorisé une évolution aussi rapide?

Pour le comprendre, les astronomes ont entrepris de traquer ces protoamas. Mais c'est seulement récemment que les chercheurs ont eu accès à des télescopes assez puissants pour découvrir ces objets dont la lumière a mis au moins 10 milliards d'années pour nous parvenir. Ils nous ont longtemps échappé car ils étaient cachés dans leur propre nuage de poussière. Ces dernières années, les astronomes ont détecté deux protoamas qui nous livrent de précieux indices sur la croissance des amas. Ces observations confirment que ces groupes de galaxies sont très actifs, mais aussi qu'ils sont gigantesques – si énormes qu'il reste à comprendre de nombreux aspects de leur formation. Si nous parvenons à identifier les conditions qui ont donné naissance à ces mastodontes, nous pourrons redessiner l'histoire de l'évolution de l'Univers.

DES FLAMBÉES D'ÉTOILES

En général, les galaxies actives produisent très peu d'étoiles par an – en moyenne, l'équivalent d'une à dix masses solaires de gaz se transforme en étoiles (une masse solaire par an ne signifie pas une étoile par an, car des étoiles plus légères que le Soleil peuvent se former; on peut donc avoir plusieurs étoiles par an). On



L'amas de galaxies noté RXC J0032.1 +1808 est l'un des plus massifs connus. Il a été observé dans le cadre du programme *Relics* par le télescope spatial *Hubble*. Les astrophysiciens veulent étudier les protoamas qui ont donné naissance à des objets si gros.

les qualifie de galaxies à formation d'étoiles normale. La Voie lactée appartient à cette catégorie. Ces galaxies sont un peu les tortues de la fable : elles produisent des étoiles avec lenteur mais à un rythme constant pendant environ 10 milliards d'années. Pendant cette période, les galaxies restent bleues et leur structure a l'aspect d'un disque.

Cependant, certaines galaxies produisent l'équivalent de cent masses solaires d'étoiles par an. On les qualifie de galaxies à sursauts de formation d'étoiles ou galaxies à flambées d'étoiles (*starburst galaxies* en anglais). Elles incarnent les lièvres de l'évolution galactique. En quelque 300 millions d'années, ces galaxies naissent, forment le plus d'étoiles possible et en un clin d'œil cosmique épuisent leur carburant. Ces flambeuses profitent de la vie à toute vitesse et meurent jeunes. Les astronomes pensent qu'elles sont peut-être à l'origine de ces galaxies elliptiques massives et passives que l'on trouve aujourd'hui dans les amas.

En toute logique, si l'on regarde assez loin dans l'Univers (c'est-à-dire l'Univers tel qu'il était dans sa prime jeunesse), on devrait y voir des protoamas remplis de galaxies à flambées d'étoiles (qui deviendront ces amas d'aujourd'hui peuplés de galaxies déjà épuisées). Mais trouver de telles galaxies dans les protoamas a été plus difficile qu'on ne l'espérait.

Jusqu'à récemment, les méthodes que nous utilisions pour détecter des amas consistaient à traquer justement les galaxies elliptiques passives ou le gaz chaud contenu dans l'espace entre ces galaxies. Cependant, ces composantes des amas ne se forment que tardivement dans l'histoire de l'Univers et ne sont donc pas adaptées pour traquer des protoamas. Nous avons dû imaginer de nouvelles stratégies pour mettre en évidence les ancêtres des amas, aux galaxies plus bleues et formant encore des étoiles.

Pour compliquer notre tâche, les protoamas sont souvent très étendus dans le ciel, car les galaxies ne se sont pas encore agglomérées au sein des structures que nous observons dans l'Univers d'aujourd'hui. Quand les télescopes les plus puissants ont des caméras dont le champ de vue se limite au diamètre d'un crayon (comme c'est le cas du télescope spatial *Hubble*), il n'est pas surprenant que nous ayons des difficultés à rassembler les pièces du puzzle que constitue un protoamas, ces pièces étant dispersées sur des distances cent fois plus grandes que le champ de vue des télescopes.

Par ailleurs, les stratégies de recherche qui reposent sur l'observation systématique de vastes régions du ciel ratent souvent les galaxies à flambées d'étoiles, car ces dernières sont cachées dans de vastes et opaques nuages de poussière. En effet, le rythme de formation d'étoiles dans ces flambées s'accompagne aussi de nombreuses explosions d'étoiles massives qui arrivent rapidement en fin de vie. Ces cataclysmes émettent une surabondance d'éléments lourds – fer, carbone, or, etc. Ces derniers se dispersent dans l'espace, s'associent et forment des molécules complexes, de la poussière, qui absorbe le rayonnement visible et ultraviolet. On observe le même genre de phénomène lors de vastes incendies de forêt : la suie capte surtout la lumière bleue et laisse passer la lumière rouge. Les galaxies à flambées d'étoiles sont donc quasi invisibles pour des télescopes opérant dans le visible ou l'ultraviolet, mais… brillent intensément dans l'infrarouge.

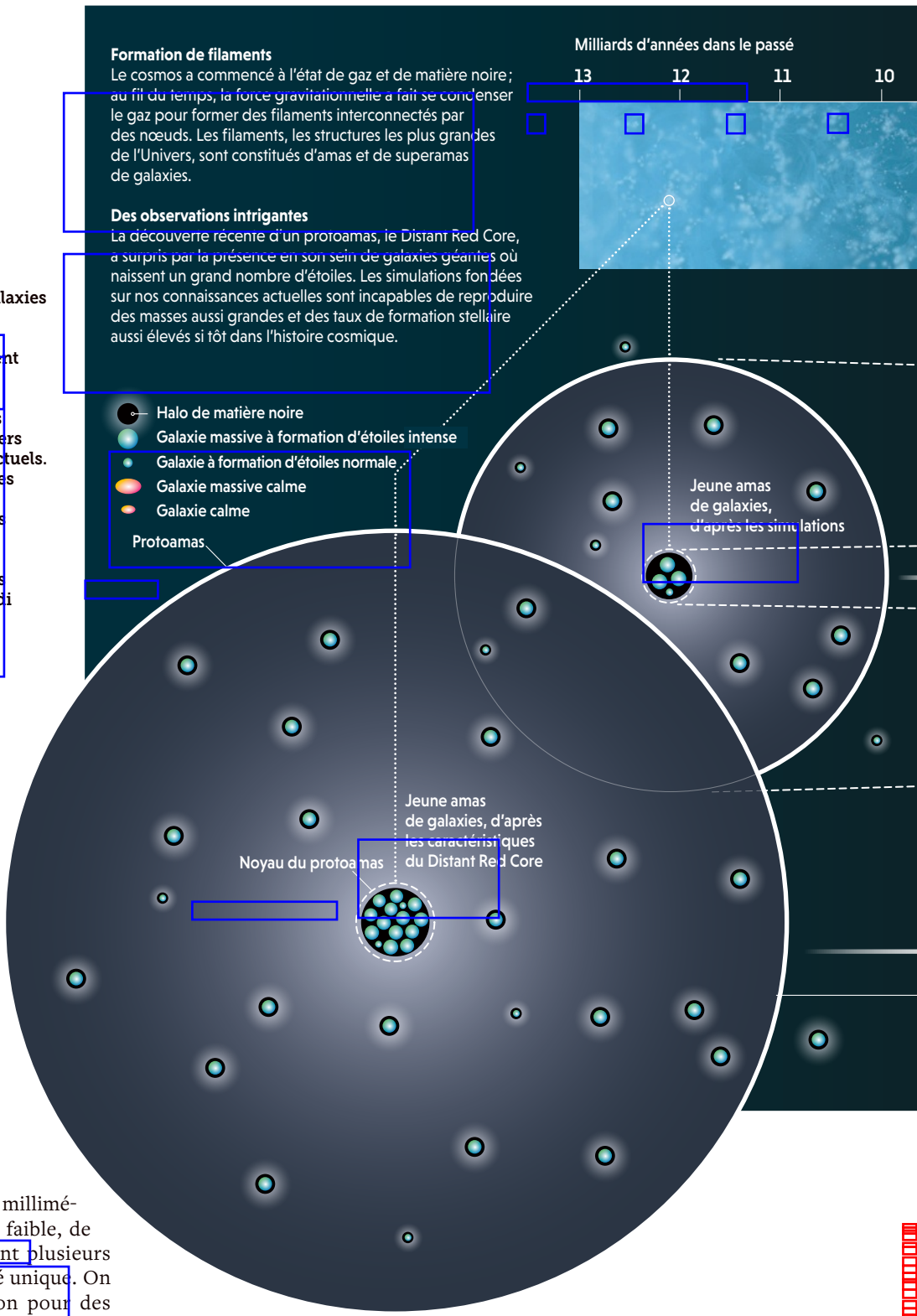
VISION INFRAROUGE

À partir de la fin des années 1990, en observant dans l'infrarouge, le bolomètre Scuba du télescope *James-Clerk-Maxwell*, à Hawaii, l'observatoire spatial *Herschel*, le *Télescope du Pôle Sud* (*SPT*) et le télescope spatial *Spitzer* ont commencé à dévoiler la partie de l'Univers cachée par la poussière et ont détecté des millions de galaxies qui étaient jusque-là invisibles. Il y a quinze ans, les astronomes ont amorcé l'étude des propriétés des galaxies à flambées d'étoiles et ils ont montré que ces usines à étoiles vivent de préférence à proximité d'autres galaxies très actives. Mais ces instruments d'observation étaient encore limités : la résolution en >

© ESA, Hubble, Nasa et Relics

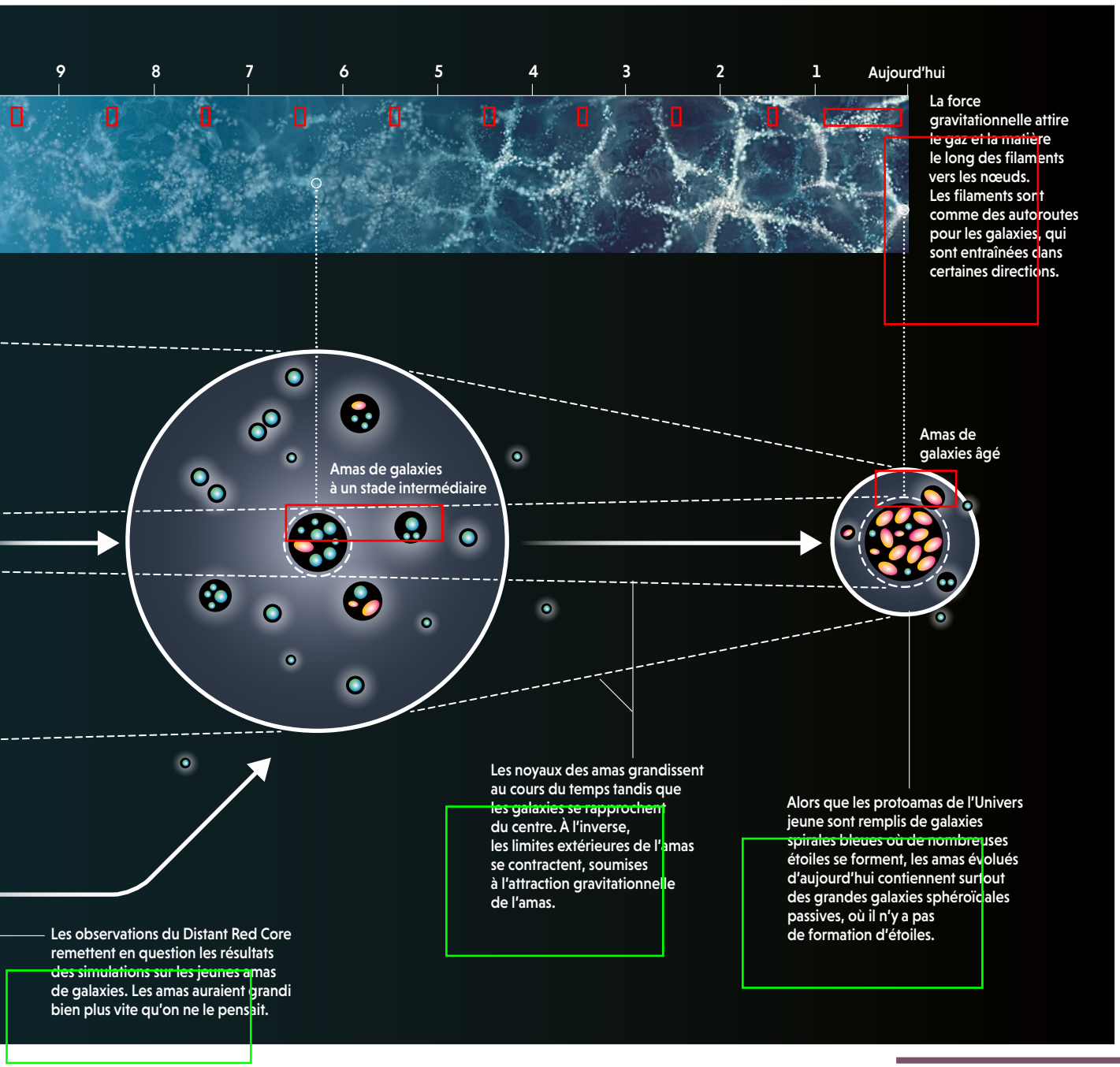
COMMENT LES AMAS DE GALAXIES GRANDISSENT

Aujourd'hui, les amas de galaxies sont surtout constitués de galaxies passives, dans le sens où elles ne produisent plus de nouvelles étoiles. Les astronomes ont découvert récemment plusieurs protoamas lointains représentant les premiers stades de l'évolution des amas actuels. Ils sont remplis de galaxies jeunes où le taux de formation d'étoiles est très élevé. Mais les protoamas sont si gros, et leurs galaxies si massives, que les chercheurs s'interrogent sur les mécanismes qui leur ont permis d'avoir grandi si vite dans l'Univers si jeune.



> infrarouge et en longueur d'onde millimétrique des télescopes était trop faible, de sorte que l'on identifiait souvent plusieurs galaxies comme étant une entité unique. On retrouvait aussi cette confusion pour des galaxies éloignées les unes des autres, mais situées sur la même ligne de visée.

La situation a profondément changé en 2013 avec l'entrée en fonction du radiotélescope *Alma* (*Atacama large millimeter/submillimeter array*), au Chili. Cet ensemble de 70 paraboles opérant de concert pour constituer un seul télescope géant atteint une résolution jusqu'à 600 fois supérieure à celle de l'observatoire *Herschel*. Le radiotélescope *Alma* a révolutionné de nombreux domaines de l'astronomie, dont l'étude de l'évolution des galaxies. Il est, par exemple, très performant pour détecter les pouponnières d'étoiles qui se cachent dans des régions poussiéreuses des galaxies. Il a ainsi rendu possibles diverses découvertes à la fois inattendues et passionnantes.

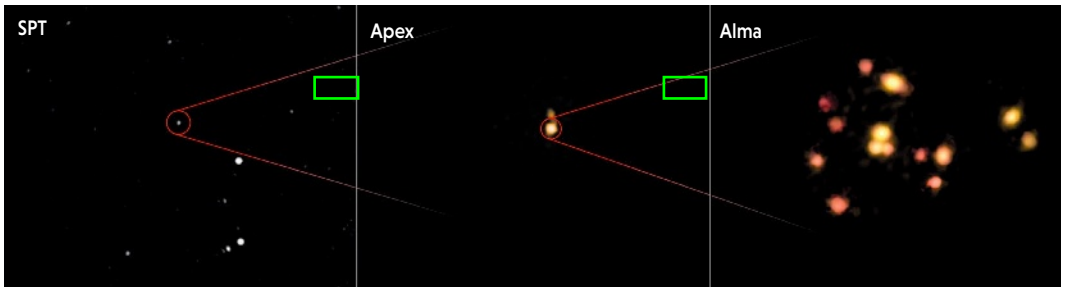


© Ron Miller et Jen Christiansen, d'après Yi-Kuan Chiang et al., Astrophysical Journal Letters, vol. 844, L23, août 2017 (simulations)

En 2018, deux équipes indépendantes ont utilisé *Alma* pour étudier les objets les plus lumineux en infrarouge qu'ils pouvaient trouver dans l'Univers lointain. Elles ont chacune découvert un ensemble de galaxies poussiéreuses à flambées d'étoiles qui étaient considérées comme des entités uniques dans les données de la première génération de télescopes infrarouges. Ainsi, SPT2349-56 est un groupe de 14 galaxies, et le Distant Red Core (DRC) rassemble 10 galaxies. Ces deux protoamas se trouvent dans l'Univers alors vieux d'à peine 10% de son âge actuel. On y observe une formation intense d'étoiles – chaque groupe convertit 10000 fois plus de gaz en étoiles par an que ne le fait la Voie lactée – dans un volume correspondant à la moitié de la taille du groupe Local (qui comprend la Voie lactée, la galaxie d'Andromède et plusieurs autres petites galaxies).

Nos estimations de la quantité de gaz contenu dans ces protoamas indiquent qu'avec un tel rythme de formation d'étoiles, leurs galaxies ont épuisé leurs ressources en quelques centaines de millions d'années, devenant ainsi des galaxies elliptiques massives et passives que l'on retrouve dans les amas de l'Univers actuel. Comme nous le pensions, ces >

LES PROTOAMAS, LABORATOIRES DE L'EXTRÊME



Les progrès techniques en termes de résolution ont permis, avec *Alma*, de séparer les différentes galaxies d'un amas. Elles étaient vues comme un objet unique par les télescopes *SPT* et *Apex*.

Comme le souligne Arianna Long, la traque des protoamas a nécessité des instruments performants et des stratégies adaptées. Aujourd'hui, nous commençons à avoir des données, mais il nous reste encore à comprendre ces structures, qui sont de véritables laboratoires de la formation des galaxies dans les conditions les plus extrêmes.

La modélisation des protoamas est particulièrement ardue. En effet, ces objets correspondent à des surdensités très rares de l'Univers : il y en a en moyenne moins d'un seul dans le volume qu'englobent les grandes simulations numériques d'évolutions des galaxies ! De plus, à cause des nombreuses fusions et interactions galactiques dans ces amas, il est nécessaire d'avoir une très bonne résolution pour décrire correctement la physique interne des galaxies. La solution viendra probablement de simulations hybrides qui démarrent en modélisant uniquement la matière noire à basse résolution, mais sur de grands volumes, et permettent ensuite de zoomer sur une région pour y déterminer la dynamique du gaz cosmique primordial.

La tâche est loin d'être évidente. En effet, les protoamas sont alimentés en gaz à un rythme parmi les plus intenses de l'Univers observable. Nous devons alors comprendre comment ce gaz nourrit les galaxies au cœur de ces amas. Par comparaison, les amas de galaxies dans l'Univers actuel contiennent du gaz chauffé à plusieurs millions de degrés que l'on étudie en rayons X. Les galaxies baignant dans ce gaz chaud sont en général passives. Quand ces conditions se sont-elles mises en place ? Très tôt, ou au contraire étaient-elles totalement absentes dans les protoamas ?

Nous devons aussi comprendre pourquoi la formation d'étoiles est si intense dans ces galaxies. Le gaz pourrait être converti anormalement vite en étoiles à cause des interactions des galaxies. Celles-ci favoriseraient la compression du gaz et son effondrement pour donner naissance à des astres. Une autre explication plus simple pourrait être que ces galaxies contiennent juste de gigantesques réservoirs de gaz qui s'effondrent sous leur propre poids. Ce processus n'est pas très efficace pour produire des étoiles, mais cela peut être compensé par les volumes de gaz impliqués.

Qui dit formation intense d'étoiles dit aussi mort de nombreux astres massifs qui vivent très peu de temps et explosent en supernovæ. Ces événements cataclysmiques produisent et éjectent de grandes quantités d'éléments lourds, qui changent la composition et la chimie du gaz à l'intérieur et autour des galaxies. Une évolution qui influe sur la formation de nouvelles générations d'étoiles. Enfin, les trous noirs supermassifs hébergés par les galaxies émettent parfois des jets qui vident leurs hôtes de leur gaz, mais qui chauffent aussi le gaz de l'amas dans lequel baignent les galaxies.

S'il reste à élucider ces processus astrophysiques extrêmes, les protoamas que nous connaissons ne remettent pas en cause, pour l'instant, le modèle cosmologique standard. En effet, ils sont à la limite des prévisions en termes de surdensités extrêmes dans l'Univers observable. Toutefois, si l'on trouvait encore beaucoup d'autres protoamas très massifs, le modèle cosmologique pourrait être mis en difficulté. Il faudrait alors être sûr que la détermination de la masse totale des protoamas est correcte, car c'est un exercice difficile et incertain, fondé sur des hypothèses encore peu testées. Il reste donc encore beaucoup à comprendre sur ces métropoles bouillonnantes de l'Univers dans sa prime jeunesse.

MATTHIEU BETHERMIN
Laboratoire d'astrophysique de Marseille

> données suggèrent donc que ces amas sont rapidement arrivés au terme de leur évolution, bien avant l'époque actuelle.

L'étude de ces objets cosmiques est loin d'être terminée. La découverte de ces deux protoamas cachés dans la poussière offre une nouvelle perspective sur l'évolution des amas, mais cette histoire reste incomplète. Une question cruciale est celle de la masse de ces structures. La meilleure façon de « peser » une galaxie consiste à mesurer la quantité de lumière qu'elle émet pour évaluer l'importance de sa population d'étoiles. Cette approche nécessite des données sur l'ensemble du spectre électromagnétique.

Jusqu'à récemment, les observations de protoamas dans l'Univers âgé de moins de 2 milliards d'années s'effectuaient dans des gammes restreintes du visible et de l'infrarouge. En septembre 2018, mes collègues et moi avons pu observer le DRC dans l'ultraviolet et le visible. Grâce au télescope spatial *Hubble*, l'observatoire *Gemini* et le télescope spatial *Spitzer*, nous avons récolté des informations multispectrales pour calculer la masse de cette structure.

Attendre les données du télescope *Hubble* est rude pour les nerfs. Vous êtes informés du jour où le télescope doit observer le coin du ciel qui vous intéresse, mais vous ignorez quand les données vous seront transmises. Il faut guetter une notification par courriel qui vous prévient que ces précieuses données sont accessibles dans les archives. Le jour où le protoamas DRC était au programme, j'ai probablement consulté ma messagerie toutes les deux minutes...

Le lendemain matin, j'ai sauté du lit pour me précipiter sur mon ordinateur. La livraison des données s'était déroulée quelques heures

© ESO/Alma (ESO/NAOJ/NRAO)/Miller

après minuit. Alors que les fichiers se téléchargeaient sur mon disque dur, je ne tenais plus en place. Puis j'ai ouvert l'image. Lorsqu'on est la première personne à poser les yeux sur une partie de l'Univers que personne n'a encore jamais vue, on ressent une émotion indescriptible. J'ai d'abord pris un moment pour apprécier la présence de chaque étoile et galaxie sur l'image. Puis je me suis mise au travail.

Le coin de l'image qui m'intéressait est une région riche en activité. Au moins la moitié des galaxies ont une forme irrégulière car elles ont subi, ou subissent encore, des collisions avec des galaxies voisines. Mes collègues et moi avons estimé la population d'étoiles de ces galaxies – avec des résultats spectaculaires, voire problématiques.

En effet, dès cette époque, certaines des galaxies du DRC avaient formé en un temps record trois fois plus d'étoiles que la Voie lactée n'en compte aujourd'hui. Les simulations numériques fondées sur notre compréhension des processus physiques en jeu n'arrivent pas à produire de telles galaxies si tôt dans l'histoire de l'Univers. Modéliser le rythme effréné de la formation d'étoiles dans ces galaxies est difficile, car la physique prévoit que les galaxies devraient se disloquer ou chauffer à tel point qu'elles expulseraient tout le gaz qu'elles contiennent, ce qui ne leur permettrait pas de croître jusqu'aux tailles constatées aujourd'hui.

Le protoamas dans son ensemble est la source d'un second problème : il est lui-même particulièrement massif. Quand j'ai estimé sa masse la première fois, j'ai trouvé le résultat très suspect. J'ai consulté mes collègues pour vérifier mes calculs. Deux semaines plus tard, j'ai présenté mes données à mes collaborateurs. L'un pensait qu'il y avait une erreur dans le code ; un autre m'a demandé si je n'avais pas compté deux fois une composante. (Il y avait bien un petit bug dans mon programme, mais pas assez grave pour expliquer la masse gigantesque de l'amas.) Après maintes vérifications, le résultat semblait solide : le Distant Red Core frôle les limites autorisées dans notre Univers.

La masse d'un amas ne se résume pas à celle des galaxies et du gaz qu'il contient. Il faut ajouter la matière noire, la forme de matière la plus abondante dans l'Univers. Chaque galaxie, et chaque amas, est entourée d'un « nuage » (ou halo) de cette composante de nature inconnue. Et bien que la matière noire soit invisible et mal comprise, elle laisse un signal gravitationnel assez clair pour estimer son abondance (en utilisant diverses techniques astrophysiques).

Nous avons donc estimé la masse de la matière noire du Distant Red Core, et, selon nos simulations, ce protoamas contiendrait presque la quantité maximale possible pour une telle structure présente aussi précocement dans l'histoire cosmique. Si nous simulons son évolution jusqu'à aujourd'hui, soit pendant 12 milliards d'années, il serait plus large que le plus grand amas de galaxies actuel, El Gordo (« le gros » en espagnol). Même si l'estimation de la quantité de matière noire dans l'amas souffre d'incertitudes importantes, la situation pourrait devenir problématique : nous ne sommes pas certains d'avoir repéré toutes les galaxies qui appartiennent à cet amas. Nous pourrions encore en trouver en dehors du champ de vue de nos observations du DRC. La masse totale pourrait alors être encore plus grande et nous aurions alors des difficultés pour expliquer l'existence d'un tel objet.

REPENSER L'HISTOIRE DES GALAXIES

Notre étude du DRC et la découverte d'autres protoamas du même genre nous obligent à repenser notre compréhension de la formation des amas de galaxies. Nous devons comprendre comment des objets très massifs se sont formés très tôt dans l'Univers. Il nous faut mieux cerner les processus physiques et la chimie de la naissance des étoiles dans les galaxies (*voir l'encadré page ci-contre*). Mais il faut aussi identifier les conditions de formation des halos de matière noire qui ont servi à amorcer la constitution de galaxies. Ces dernières sont-elles apparues plus tôt qu'on ne le pensait ? Quelles seraient les conséquences sur la formation des éléments ? Ces galaxies auraient-elles produit les ingrédients indispensables à l'émergence de planètes habitables, voire hébergé des formes de vie ?

Certaines de ces questions sont encore largement hors de notre portée, mais les astrophysiciens travaillent dur pour répondre aux autres. Nous poursuivons nos observations sur ces protoamas à travers tout le spectre électromagnétique. Nous développons des méthodes innovantes pour découvrir d'autres protoamas. Avec plus d'exemples, nous pourrons voir si des amas ayant des caractéristiques semblables à celles du DRC sont exceptionnels ou fréquents. Les astronomes et les théoriciens constituent de nouvelles collaborations pour percer le mystère de la naissance des protoamas très denses présentant des taux de formation d'étoiles extraordinaires.

La meilleure façon d'éprouver les modèles est de les faire trembler en portant notre regard sur les situations les plus extrêmes. Serons-nous d'ici à quelques années à même d'expliquer les caractéristiques de ces protoamas ? En mettant au défi notre compréhension de la naissance des étoiles et des galaxies dans l'Univers primordial, nous ne pouvons qu'affiner notre vision du cosmos et de son histoire. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. S. Long *et al.*, **Emergence of an ultrared, ultramassive galaxy cluster core at z = 4**, *The Astrophysicial Journal*, vol. 898(2), article 133, 2020.

D. Coe, **Pleins feux sur les premières galaxies**, *Pour la Science*, n° 496, pp. 60-68, février 2019.

Quel futur pour les batteries ?

Depuis plusieurs années, les batteries au lithium équipent véhicules électriques, téléphones portables et une multitude d'autres dispositifs électroniques. Mais leurs performances restent en deçà des besoins. Comment les améliorer ? Tour d'horizon.

De plus en plus présentes dans notre quotidien, en particulier dans nos appareils électroniques mobiles, les batteries intéressent aussi un large éventail de domaines industriels (automobile, réseaux de distribution d'électricité, aérospatial, etc.) et équipent nombre de dispositifs médicaux et robotiques. Depuis plusieurs années, on les considère comme l'un des moyens les plus performants et les plus flexibles pour stocker de l'énergie. Ces dispositifs électrochimiques accumulateurs d'électricité et rechargeables, dont le premier (la batterie au plomb-acide) a été mis au point en 1859 par le physicien français Gaston Planté, joueront sans doute un rôle clé dans la transition énergétique de nos sociétés vers un modèle de développement à faibles émissions de dioxyde de carbone.

Parmi les technologies de batteries existantes, celle dite «lithium-ion» (Li-ion) s'est imposée et est commercialisée depuis 1991. Sa force principale réside dans sa haute densité d'énergie – l'énergie stockée par unité de volume ou de masse –, deux à six fois supérieure à celles des batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd), qui ont vu le jour en 1899, au nickel-hydrure métallique (Ni-MH), commercialisées pour la première fois en 1989, ou au plomb-acide.

Les batteries Li-ion équipent par exemple les voitures électriques, dont le marché est en forte progression, et leur procurent à ce jour une autonomie de quelque 300 à 400 kilomètres. Pour que les véhicules électriques séduisent la majorité des automobilistes, cependant, une autonomie deux fois plus grande sera nécessaire. Dans ce domaine comme dans bien d'autres, on attend donc des batteries aux performances améliorées. Aura-t-on bientôt, dans chacun des domaines concernés, des batteries satisfaisantes en termes d'autonomie, de vitesse de recharge et de fiabilité, et ce sans sacrifier les ambitions écologiques ?

DES ASSEMBLAGES DE CELLULES ÉLECTROCHIMIQUES

Avant de poursuivre et donner des éléments de réponse, rappelons brièvement le principe de fonctionnement des batteries.

Une batterie est un assemblage de plusieurs accumulateurs ou «cellules» identiques fournissant chacun une tension électrique qui dépend des propriétés électrochimiques des matériaux utilisés. Chaque cellule est constituée d'une électrode positive, la cathode, et d'une électrode négative, l'anode, les deux électrodes étant séparées par un milieu liquide ou solide, l'électrolyte, où des ions peuvent se déplacer. Lorsque les deux électrodes sont connectées à un circuit électrique externe où des électrons sont libres de circuler, les réactions électrochimiques (réversibles) au niveau des électrodes conduisent à un stockage ou à une libération de charges électriques (processus de charge ou décharge), selon le sens de circulation des électrons.

Prenons l'exemple d'une cellule Li-ion (*voir la figure pages 46 et 47*). Ses deux électrodes agissent comme des éponges à lithium. La cathode est généralement constituée d'un oxyde métallique, et l'anode de graphite >

© Nor Gal/shutterstock.com

L'AUTEUR

JEAN-MARIE TARASCON
professeur au Collège de France, où il dirige le laboratoire Chimie du solide et énergie, directeur du Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E) et membre de l'Académie des sciences

L'ESSENTIEL

> Les batteries sont des systèmes qui convertissent de l'énergie chimique en énergie électrique et qui sont rechargeables.

> Les batteries « lithium-ion », apparues dans les années 1990 après de longues recherches, offrent une densité d'énergie élevée. Elles sont utilisées aujourd'hui dans un grand nombre d'applications.

> Les scientifiques explorent plusieurs voies afin d'améliorer les performances de ces batteries ou d'autres et de diminuer leur empreinte écologique.

Depuis les années 1990, les batteries au lithium-ion, ou Li-ion, *(ici des batteries de type « bouton »)* se sont beaucoup répandues, grâce à leur capacité relativement élevée par rapport aux batteries plus anciennes. Elles alimentent notamment les véhicules électriques et des appareils portables tels que téléphones, ordinateurs, casques et écouteurs sans fil, rasoirs, outils de bricolage, etc.

> (feuillets de carbone). En décharge, c'est-à-dire quand la cellule fournit de l'électricité à un appareil, les atomes de lithium liés au carbone de l'anode se dissocient en ions positifs, Li^+, et en électrons (selon la réaction $Li_xC_6 \rightarrow xLi^+ + xe^- + C_6$); les électrons partent dans le circuit externe, tandis que les ions Li^+ se déplacent en sens inverse à travers l'électrolyte jusqu'à la cathode; ces ions s'insèrent dans le matériau de l'électrode et se recombinent avec les électrons provenant du circuit électrique externe (selon la réaction $MO_2 + xLi^+ + xe^- \rightarrow Li_xMO_2$, où MO_2 désigne l'oxyde métallique). En situation de charge, c'est l'inverse.

La différence entre les potentiels électrochimiques des matériaux des deux électrodes détermine la tension électrique fournie par la cellule. L'étendue des réactions (traduite par le facteur *x* dans les réactions indiquées ci-dessus) détermine quant à elle la capacité de stockage de charge, c'est-à-dire la charge électrique maximale accumulée. L'énergie stockée est le produit de la tension par la capacité; elle s'exprime en wattheures par litre (Wh/L) ou en wattheures par kilogramme (Wh/kg), la puissance fournie s'exprimant en watts (W).

Vers le milieu du xx^e siècle, afin de mettre au point de meilleures batteries en termes de puissance (énergie fournie par unité de temps), d'autonomie ou de capacité (charge électrique stockée), de durée de vie, etc., les scientifiques ont commencé à s'intéresser au lithium, métal qui a l'avantage d'être très léger. Dans les années 1970, des chercheurs ont remarqué la faculté de certains matériaux à intégrer, de façon réversible, des ions Li^+ dans leur structure sans que celle-ci se déstabilise. Cette propriété, associée au fort pouvoir réducteur du lithium, c'est-à-dire la propension des atomes de lithium à céder un électron, promettait des densités d'énergie deux à trois fois supérieures à celles des batteries de l'époque.

Ainsi, en 1976, l'Américain Stanley Whittingham (Prix Nobel de chimie en 2019), travaillant chez Exxon, fit la démonstration d'une batterie lithium-métal, avec une anode métallique en lithium et une cathode constituée d'un matériau dit «d'insertion» ou «d'intercalation» à structure lamellaire, le disulfure de titane (TiS_2), où les ions Li^+ s'insèrent aisément; l'eau étant incompatible avec le lithium, on a remplacé l'électrolyte aqueux des anciennes techniques par un électrolyte organique (du sel de lithium, $LiPF_6$, dissous dans du carbonate de propylène).

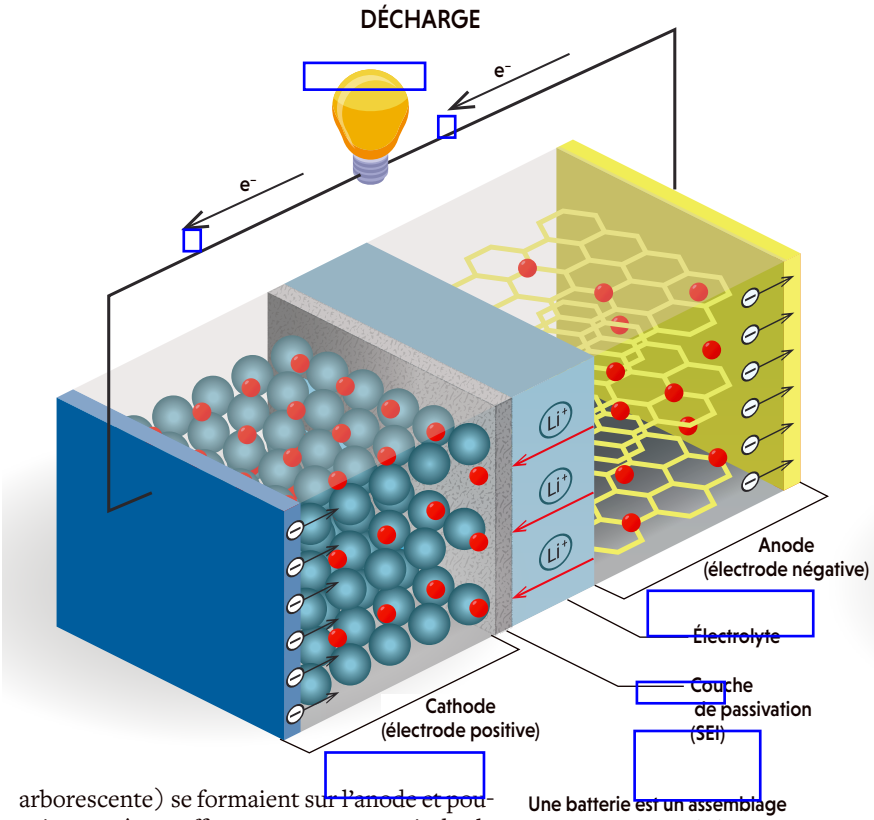
Malheureusement, cette configuration de batterie présentait des problèmes de sécurité persistants. En effet, lors de la charge et décharge des accumulateurs, des dendrites de lithium (amas de cristaux de forme arborescente) se formaient sur l'anode et pouvaient croître suffisamment pour atteindre la cathode et ainsi provoquer un court-circuit. Les batteries pouvaient alors prendre feu, voire exploser, lors de leur utilisation.

Face à ce défi, les scientifiques ont adopté deux stratégies. L'une est d'interposer entre l'anode de lithium métallique et la cathode une barrière matérielle; c'est le principe des batteries lithium-métal-polymère de Blue Solutions, filiale du groupe Bolloré. L'autre stratégie consiste à diminuer l'activité du lithium métallique de l'anode en le remplaçant par un matériau d'intercalation pour les ions Li^+, généralement du graphite, forme lamellaire du carbone. C'est ce qui a donné naissance au concept des batteries Li-ion dans les années 1980 et qui a rendu possible la commercialisation par Sony, en 1991, des premières batteries de ce type.

Depuis, les performances des batteries Li-ion ont beaucoup progressé. Leur densité d'énergie produite a ainsi plus que doublé: elle est passée de 100 Wh/kg à 240 Wh/kg aujourd'hui (à comparer par exemple avec les 40-50 Wh/kg des batteries au plomb-acide). Un rythme de progression inédit, la densité d'énergie des batteries n'ayant jusque-là que doublé en un siècle.

LE FRUIT D'UN TRAVAIL DE LONGUE HALEINE

Le succès des batteries Li-ion est le fruit d'un travail de longue haleine mené par de nombreux scientifiques et ingénieurs, qui ont dû lever plusieurs verrous techniques et scientifiques tant au niveau des matériaux d'électrodes, des électrolytes et de leurs interfaces que des configurations de cellules.

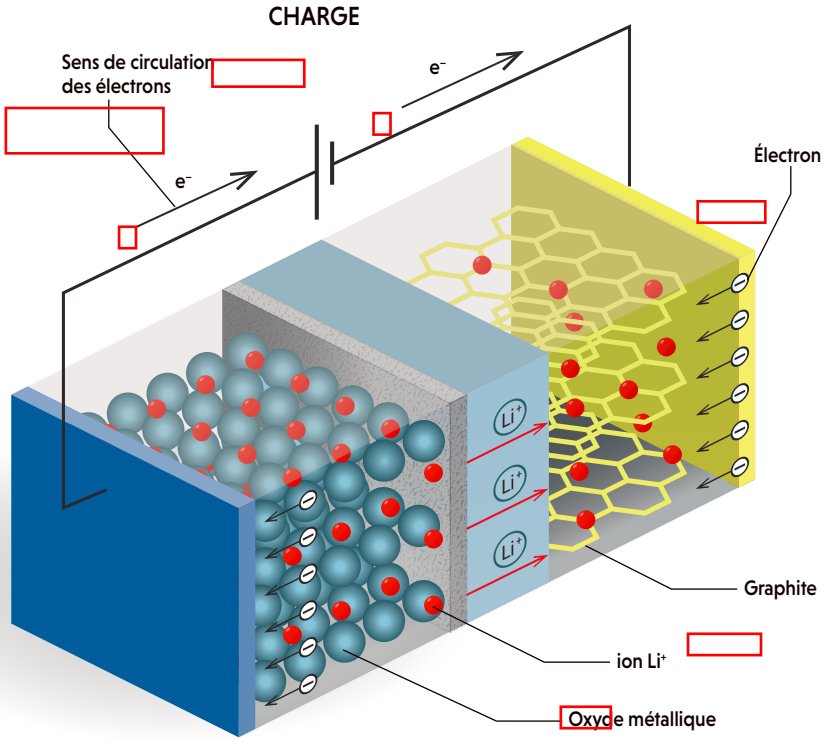


Une batterie est un assemblage de cellules électrochimiques, chacune comportant une cathode, un électrolyte et une anode. Quand la batterie alimente un appareil électrique (décharge), l'anode fournit des électrons (e^-) au circuit externe, tandis que la cathode en reçoit; simultanément, l'anode fournit des ions positifs au circuit interne, ions qui vont de l'anode à la cathode *via* l'électrolyte. Ainsi, lors de la décharge d'une batterie Li-ion, l'oxyde lamellaire de la cathode est le siège de réactions de «réduction» avec insertion d'un certain nombre *x* d'ions de lithium Li^+ et d'autant d'électrons, tandis que l'anode est le siège de réactions d'«oxydation» libérant *x* ions Li^+ et *x* électrons. En situation de charge, les réactions sont inversées.

PRIX BALZAN 2020

Jean-Marie Tarascon a été récompensé en 2020 par le prix Balzan (www.balzan.org) pour ses travaux « sur la science des matériaux pour les énergies renouvelables ».

Pour © Pour la Science



Commençons par le passage de la technologie Li-métal (anode en lithium, cathode en TiS_2) à la technologie Li-ion. Les chercheurs devaient trouver une alternative au matériau de cathode qui puisse à la fois servir de réservoir de lithium et avoir de bonnes propriétés électrochimiques, afin de compenser l'effet du remplacement du lithium de l'anode par le carbone.

Avec ses collègues à l'université d'Oxford, John Goodenough (Prix Nobel de chimie en 2019) fit d'une pierre deux coups en proposant vers 1980 l'oxyde lamellaire $LiCoO_2$, où des atomes de lithium s'insèrent entre les feuillets de dioxyde de cobalt, CoO_2. D'autres candidats ont émergé par la suite, tel le $LiNiO_2$, rapidement abandonné pour des raisons de sécurité, et le $LiMn_2O_4$ qui, malgré ses avantages en termes de puissance et d'impact environnemental, n'a pu concurrencer le $LiCoO_2$ en raison d'une capacité plus faible et, surtout, d'une plus courte durée de vie.

Une décennie plus tard, l'arrivée des composés polyanioniques, en particulier le $LiFePO_4$, une fois de plus identifié par John Goodenough, apporta une alternative crédible au $LiCoO_2$. Leur écocompatibilité et leur sécurité d'utilisation expliquent leur succès initial.

Cependant, la compétitivité des batteries à base de ces composés s'est effritée du fait de leur faible densité d'énergie (150 Wh/kg) par rapport à celles utilisant des oxydes lamellaires (240 Wh/kg). Ces derniers ont en effet été améliorés *via* des substitutions du cobalt par du manganèse et du nickel, ce qui a donné des matériaux de formules $Li(Ni_xMn_yCo_z)O_2$, notés NMC. La phase dite «622» (notation abrégée pour x=60% de nickel, y=20% de manganèse et z=20% de cobalt) est aujourd'hui une référence industrielle dans le monde des batteries.

On cherche désormais à augmenter le taux de nickel tout en abaissant celui du cobalt, dont l'extraction en Afrique se fait dans des conditions contestables sur le plan éthique. La commercialisation de batteries dont les cathodes sont constituées d'un composé NMC riche en nickel et pauvre en cobalt, à savoir NMC 811, est ainsi prévue pour cette année 2021. Les scientifiques travaillent également sur des composés NMC 90-05-05 (90% de nickel, 5% de manganèse et 5% de cobalt) qui, en plus d'être parcimonieux en cobalt, offriront une capacité de charge 10% supérieure au désormais classique NMC 622.

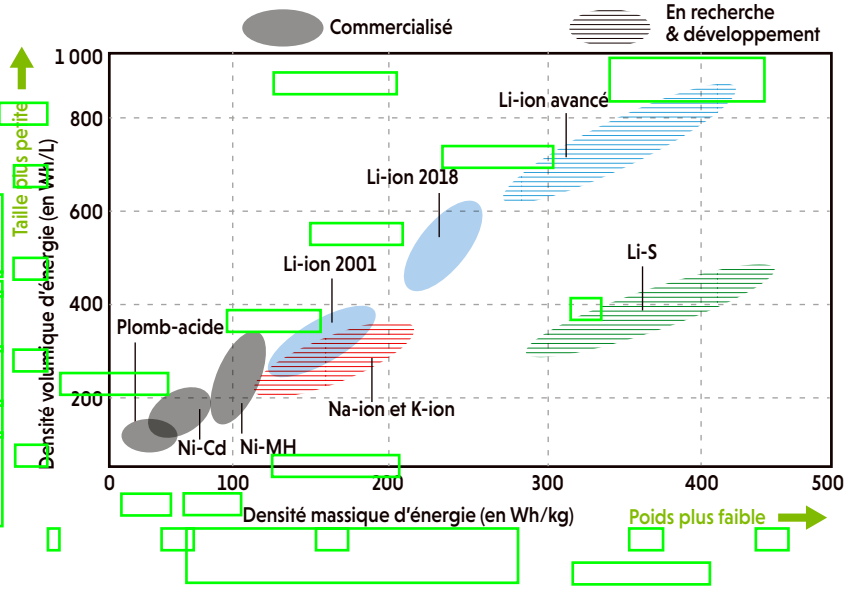
Une autre piste est celle des composés $Li(Ni_xCo_yAl_{1-x-y})O_2$. Ils résultent de la substitution partielle du cobalt et du nickel par de l'aluminium et sont utilisés dans les cellules Li-ion qui alimentent les véhicules électriques du constructeur Tesla.

REMPLACER LE GRAPHITE DE L'ANODE ?

Pour ce qui est de l'anode, l'électrode négative, elle reste encore essentiellement à base de carbone. Elle a connu de nombreuses améliorations avec le passage du carbone désordonné initial, d'une capacité de 270 milliampèreheures par gramme (mAh/g), au carbone dur ou au graphite, d'une capacité de 372 mAh/g.

Une autre possibilité pour obtenir des cellules à forte densité d'énergie est de remplacer le graphite par des oxydes de silicium ou par du silicium, dont la capacité théorique est dix fois supérieure. Pour le moment, la principale limite au développement d'une anode au silicium est l'instabilité de la «couche de passivation» ou SEI (pour *solid electrolyte interface*), une couche constituée de composés organiques et inorganiques qui se forme à l'interface anode-électrolyte. >

Ce graphique compare les différentes technologies de batteries en termes de densité d'énergie en volume et en masse. Ne sont prises en compte ici que les technologies pour lesquelles des prototypes fonctionnels ont été démontrés (d'où l'absence, par exemple, de la technologie Li-air).



© Pour la Science, d'après Gaurav Assat, thèse de doctorat, Sorbonne Université-Collège de France, 14 décembre 2018

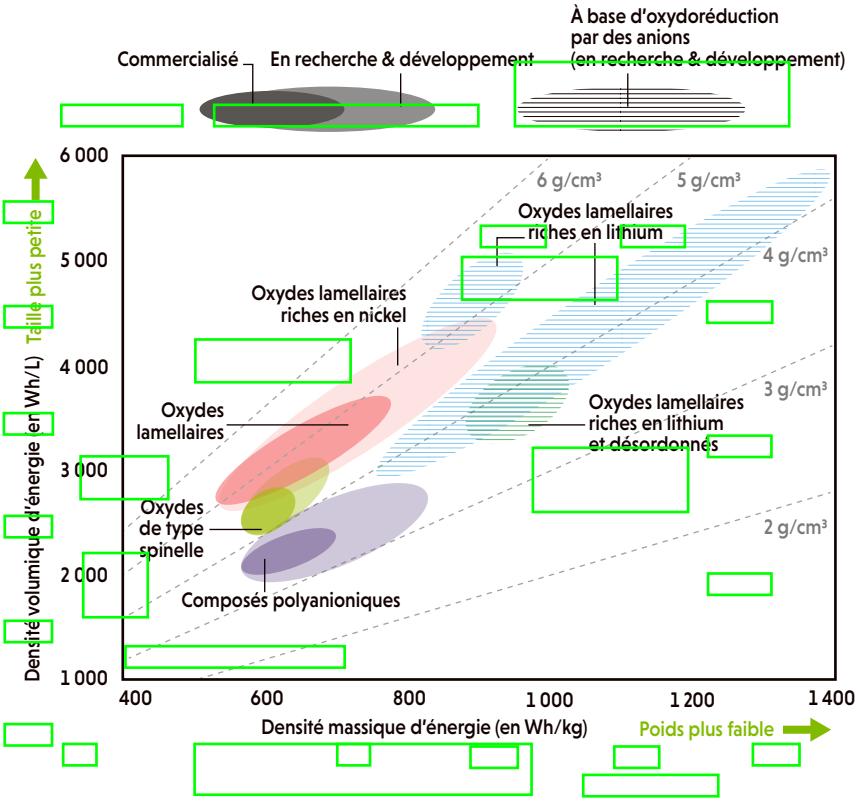
> Issue des réactions du matériau de l'anode avec les divers composants de l'électrolyte, la couche de passivation a une grande influence sur les performances de la batterie et sur sa durée de vie. Elle protège en effet l'électrolyte d'une dégradation excessive en réduisant les réactions entre ses composés et l'anode. Or, en raison des importants changements de volume des particules de silicium constituant l'anode (variations dues à l'absorption ou la désorption de lithium), cette couche protectrice se brise et se reforme sans cesse lors des cycles de charge-décharge ; et comme du lithium est impliqué dans sa formation, il s'ensuit une consommation irréversible de lithium et donc une durée de vie fortement écourtée.

L'une des solutions proposées à ce problème est de réduire la plage de « lithiation » (absorption de lithium) du silicium et de limiter ainsi sa variation de volume. Sur le plan industriel, l'approche la plus avancée aujourd'hui consiste à utiliser des anodes en composites carbone-silicium, par exemple C/Si (90%-10%), voire C/SiO_x. Cependant, les variations volumiques du silicium provoquent un broyage mécanique du graphite, ce qui pose des problèmes de sécurité et réduit la durée de vie des cellules. Reste que des batteries aux cathodes en NMC et anodes en C/Si (90%/10%) sont déjà commercialisées pour des applications d'électronique grand public exigeantes en densité d'énergie.

L'ÉLECTROLYTE, UN AUTRE COMPOSANT CLÉ

Ces recherches ont évolué de pair avec celles sur l'électrolyte. Son choix (mélange de solvants et sels de lithium) est complexe car, dans le cas de la technologie Li-ion, l'électrolyte fonctionne en dehors de sa fenêtre de stabilité thermodynamique. Par chance, la formation de la couche de passivation empêche qu'il se dégrade. La formation et la nature de cette couche dépendent fortement de l'électrode et de l'électrolyte. Difficile à contrôler, la SEI est au cœur des recherches des électrochimistes.

Quoi qu'il en soit, depuis les années 1990, on utilise des électrolytes constitués d'un mélange de carbonates cycliques et linéaires (le plus répandu est un mélange de carbonate d'éthylène et de carbonate d'éthyle et de méthyle) où sont dissous des sels de $LiPF_6$. Ces électrolytes présentent de bonnes propriétés de dissolution des sels de lithium et de solvatation des ions Li^+, caractéristiques essentielles pour une conduction ionique optimale. De plus, pour des performances optimales en termes de durée de vie de la batterie, ils contiennent une multitude d'additifs dont la composition chimique exacte et les concentrations (généralement inférieures à 3%) relèvent du secret industriel.



Les performances des batteries Li-ion dépendent entre autres du matériau dont est constituée l'électrode positive, la cathode. Les divers matériaux utilisés ou envisagés pour la cathode sont ici comparés en termes de densité d'énergie. Ne sont ici pris en compte que les matériaux d'intercalation, c'est-à-dire des structures où des atomes ou ions de lithium peuvent aisément s'incorporer.

Tous ces travaux sur les électrodes et l'électrolyte ont ainsi conduit à des batteries Li-ion ayant des densités d'énergie d'environ 240 Wh/kg ou 600 Wh/L (*voir la figure page 47*). Du fait de ces bonnes performances, les batteries à ions lithium sont vues comme le nerf de la guerre pour le développement rapide de véhicules électriques et, à plus long terme, pour le stockage – et donc l'utilisation massive – des énergies renouvelables.

En termes d'impact sur nos sociétés, l'invention des batteries Li-ion est sans doute comparable à celles du transistor, de la fibre optique ou du GPS, et l'on comprend que la fondation Nobel ait récompensé (en 2019) John Goodenough, Stanley Whittingham et Akira Yoshino (ingénieur de l'entreprise japonaise Asahi Kasei, qui a notamment mis au point le premier prototype de batterie Li-ion vers 1985) pour leurs travaux pionniers.

Mais tous les mérites ne vont pas qu'aux chercheurs. Des entrepreneurs ont su s'engouffrer dans la brèche et ont fortement dynamisé le domaine. Parmi eux, Elon Musk, fondateur de Tesla et de SpaceX, notamment, a joué un rôle essentiel.

Ce personnage bouillonnant d'idées et visionnaire, au parcours atypique, s'est lancé dès 2010 dans l'aventure du stockage de l'énergie. Son ambition était de mettre à la disposition de tous les habitants de la planète de l'énergie propre en grande quantité et à bas coût grâce aux batteries.

Pour atteindre son objectif, il a créé dans le Nevada, aux États-Unis, la première *gigafactory*, usine géante de fabrication de batteries

© Pour la Science, d'après Gaurav Assat, thèse de doctorat, Sorbonne Université-Collège de France, 14 décembre 2018

qui peut produire jusqu'à 5 milliards de cellules par an.

Grâce aux économies d'échelle réalisées, le prix du kilowattheure (kWh) stocké a été divisé par dix durant la dernière décennie. L'objectif est de passer sous la barre des 100 euros le kWh stocké d'ici à 2025 et, à plus long terme, au-dessous de 60 euros. Pour ce faire, Tesla mise notamment sur une augmentation de la capacité de ses cellules *via* une augmentation du taux de nickel à la cathode et l'intégration de composites C/Si à l'anode, ou encore sur le développement d'un nouveau procédé industriel de fabrication des électrodes.

Le dynamisme d'Elon Musk a bousculé l'industrie automobile et a permis l'essor actuel des véhicules électriques – à ce jour, plus de 450 modèles et une flotte de plus de 8 millions de véhicules qui dépassera les 150 millions, voire beaucoup plus, en 2040. Des entreprises concurrentes comme CATL, Panasonic ou Volkswagen prévoient la construction de *giga-factories* pour satisfaire la demande mondiale sans cesse croissante.

Pour le « stockage stationnaire » d'énergie (par exemple le stockage massif de l'électricité produite par des fermes d'éoliennes ou de panneaux photovoltaïques), la capacité installée dans le monde devrait passer de 3-4 gigawattheures (GWh) à 1 300 GWh dans les années à venir, ce qui laisse présager une expansion spectaculaire de la production annuelle de batteries.

VERS DES BATTERIES PLUS ÉNERGÉTIQUES ET PLUS PUISSANTES

Il reste cependant à améliorer la technologie Li-ion tant sur le plan de la densité d'énergie que sur ceux de la durée de vie, de la sécurité et de l'empreinte environnementale. Quelles sont les pistes explorées?

Afin d'augmenter la densité d'énergie d'une batterie, donc son autonomie, on peut soit augmenter la tension de la cellule, c'est-à-dire la différence de potentiel de travail entre les matériaux actifs de la cathode et de l'anode, soit augmenter la capacité spécifique des deux électrodes.

En dehors des phases lamellaires riches en nickel présentées plus haut, la découverte en 2002 par l'équipe de Jeff Dahn, de l'université Dalhousie, au Canada, et en 2007 par celle de Michael Thackeray, du laboratoire américain d'Argonne, de composés riches en lithium, dont l'archétype est la phase $Li_{1,2}Ni_{0,13}Co_{0,13}Mn_{0,54}O_2$, suscite de grands espoirs: ils ont une capacité exacerbée, due au cumul d'activités liées à la fois aux cations (ions positifs) et aux anions (ions négatifs). Mon groupe au Collège de France a prédit ce phénomène en 1999 et l'a démontré expérimentalement pour la première fois en 2013. Ces matériaux remettent ainsi en cause une idée vieille de trente ans qui postulait que l'activité d'un matériau d'électrode était seulement liée aux cations. On peut ainsi obtenir des densités d'énergie très intéressantes, d'environ 350 Wh/kg ou 750 Wh/L.

Malheureusement, l'activité liée aux anions s'accompagne de divers phénomènes qui limitent l'efficacité énergétique et font décroître le potentiel moyen des cellules avec le nombre de cycles de charge. De plus, bien qu'impressionnantes, les densités d'énergie atteintes ne satisfont pas encore les constructeurs automobiles, qui souhaiteraient des densités supérieures à 800 Wh/L pour équiper des véhicules à forte autonomie.

L'ambition d'atteindre cette performance est-elle réaliste? Il y a de cela une dizaine d'années, on a parié sur la technologie Li-air (où le lithium réagit avec de l'oxygène provenant de l'air), certains spécialistes ayant estimé qu'elle pourrait fournir 5 à 10 fois la densité d'énergie du Li-ion. Même Toyota prévoyait de concurrencer dès 2022 les voitures Tesla avec des batteries de ce type à charge rapide. Mais l'espoir a été de courte durée et on n'en parle plus aujourd'hui.

Actuellement, c'est au tour des batteries au lithium « tout solide », batteries dont l'électrolyte est solide et non liquide, de susciter l'engouement des spécialistes. Cette technologie a été développée initialement en 1986 par James Akridge, de la société américaine Eveready, dans une version à couches minces; mais le passage à des électrodes massives n'avait jamais pu être réalisé. La mise au point d'un prototype fonctionnel pourrait cependant aboutir grâce à la découverte en 2011, par Ryoji Kanno, de l'institut de technologie de Tokyo, et ses collègues, d'un thiophosphate ($Li_{10}GeP_2S_{12}$) qui présente une conductivité ionique exceptionnellement élevée, comparable voire supérieure à celle d'un électrolyte liquide.

PILE OU BATTERIE ?

Les piles et les batteries sont des assemblages en série ou en parallèle de plusieurs éléments : des accumulateurs, ou cellules, électrochimiques. Mais les piles ne sont pas rechargeables, contrairement aux batteries. Il est à noter que l'anglais ne fait pas la distinction, le mot *battery* pouvant désigner soit une batterie, soit une pile, soit même un simple accumulateur électrochimique.

C'est aujourd'hui au tour des batteries au lithium dont l'électrolyte est solide, et non liquide, de susciter l'engouement des spécialistes

> Cette avancée a poussé les différents acteurs à mobiliser des moyens colossaux pour faire des batteries tout solide une réalité. Leur électrolyte n'étant pas liquide, ces batteries seraient potentiellement plus sûres que celles commercialisées aujourd'hui, mais aussi plus attractives en termes de densité volumique d'énergie (supérieure de 60 % à celle du Li-ion classique), notamment parce qu'elles autorisent l'utilisation d'anodes en lithium métallique, au lieu du graphite.

Cependant, de nombreux obstacles demeurent (instabilité des interfaces électrolyte-électrode, croissance de dendrites de lithium à l'anode, etc.). Des progrès considérables ont été réalisés pour lever ces difficultés. Le résultat le plus spectaculaire est à mettre au crédit de Samsung, qui a présenté en 2020 un prototype de cellule tout solide (avec une densité d'énergie d'environ 900 Wh/L) dépourvue de lithium à l'anode au moment de l'assemblage et qui est capable de dépasser 1 000 cycles de recharge sans perte notable de capacité.

Bien que le défi des interfaces au sein des batteries tout solide soit loin d'être maîtrisé, des jeunes entreprises telles que QuantumScape et Solid Power n'hésitent plus à annoncer la production dès 2024 de batteries tout solide. Elles rejoignent ainsi Toyota qui, dès 2017, avait affirmé que des batteries tout solide alimenteraient en 2022 ses véhicules électriques. Si cela se réalise, le développement si rapide d'une technologie nouvelle serait une première dans l'histoire des batteries.

COMMENT OBTENIR UNE RECHARGE RAPIDE ?

Outre la capacité, donc l'autonomie, des batteries Li-ion, une demande pressante des utilisateurs est une vitesse élevée de charge. Sur ce plan, la technologie tout solide offre en théorie un avantage (car l'électrolyte solide permet de transporter un plus grand nombre d'ions Li^+), mais qui reste à démontrer en pratique.

La vitesse de charge dépend entre autres de la distance que les ions ont à parcourir au sein des électrodes. Cette distance est d'autant plus courte que les particules dont est constitué le matériau d'électrode sont petites et les électrodes minces, mais cette configuration a l'inconvénient d'augmenter le nombre de réactions parasites et de réduire la densité d'énergie.

À cela s'ajoutent bien d'autres difficultés. L'une d'elles est le risque de formation de dendrites de lithium lors de la charge, comme on l'a évoqué plus haut, et donc d'un emballement thermique. Un réglage fin de la température lors de la charge se révèle essentiel, car une température basse augmente le risque d'emballement, tandis qu'une température élevée favorise des réactions parasites qui nuisent à la durée de vie de la batterie.

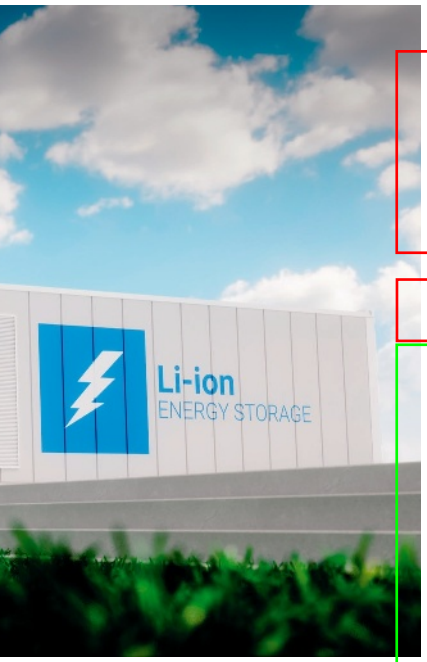
Les batteries Li-ion servent aussi à stocker de l'électricité produite à partir de sources intermittentes comme l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. Des batteries au sodium (Na-ion) pourraient bientôt les concurrencer dans ces applications.

À ces considérations qui montrent la complexité de la charge rapide s'ajoute la problématique du dimensionnement des bornes de recharge en termes de connectique : des fils de cuivre de diamètre supérieur à 2 centimètres sont nécessaires pour transférer une énergie de quelques centaines de kWh en moins de 10 minutes. En bref, une batterie conférant à un véhicule électrique une autonomie de 800 kilomètres et rechargeable en 10 minutes paraît fortement inconcevable.

Cependant, de nombreux travaux sont en cours pour améliorer la charge rapide. Au niveau de la chimie, les chercheurs tentent d'identifier de nouveaux matériaux d'électrodes à conductivités ioniques et électriques plus élevées et d'en optimiser la morphologie ou la structure, en s'aidant des techniques de tomographie à rayons X ou à neutrons. En attendant que ces recherches aboutissent, une solution alternative est de recourir à des recharges partielles (jusqu'à 80 %) de la batterie selon des protocoles bien précis, ce qui permet d'atteindre des temps de recharge approchant 25 minutes. C'est ce que font les superchargeurs actuels de Tesla.

Évoquons un autre aspect de la charge des batteries, celle concernant les appareils portables (téléphones, ordinateurs, tablettes, rasoirs électriques, etc.) de nouvelles générations : pour des raisons de commodité, il y a un engouement pour la charge sans fil, par induction électromagnétique. Ce procédé repose sur le transfert sans contact de l'énergie entre deux bobines, l'une émettrice et l'autre réceptrice, dont les fréquences de résonance

© petrmalinak/shutterstock.com



électromagnétique doivent être bien ajustées pour que les pertes soient minimales. Peut-on appliquer le couplage inductif aux voitures électriques pour des recharges rapides ? La question est à l'étude, mais cela implique de résoudre des problèmes de dimensionnement ainsi que d'échauffement des batteries.

VERS PLUS DE COMPATIBILITÉ ÉCOLOGIQUE

Outre l'autonomie et la vitesse de charge des batteries, leur compatibilité avec les préoccupations écologiques actuelles est une question capitale. Leur empreinte environnementale dépend de l'abondance des éléments chimiques dont elles sont constituées, du coût énergétique de leur fabrication, mais aussi des possibilités de les recycler. Les analyses de cycle de vie les plus récentes montrent que pour fabriquer ou pour recycler une batterie Li-ion stockant 1 kWh par cycle, une énergie de 400 kWh, associée à l'émission de 75 kilogrammes de CO_2, est nécessaire.

Ce constat incite à innover au niveau des matériaux et de leurs procédés d'élaboration. Il a aussi incité à revisiter certaines technologies telles que le Li-air, le Li-S (lithium-soufre), le Na-ion (sodium-ion)… De toutes ces options, la dernière, qui s'inspire fortement du Li-ion, est la plus avancée. Des batteries Na-ion seront bientôt commercialisées par plusieurs compagnies comme Faradion (Royaume-Uni), Tiamat (France) ou Hina (Chine), qui a démarré une production de masse (60 000 cellules par mois).

En termes de densité d'énergie, la technologie Na-ion (140 Wh/kg) ne pourra pas concurrencer le Li-ion (240 Wh/kg). Elle présente en revanche des puissances intéressantes, pouvant dépasser 40 kilowatts par kilogramme, contre 1,5 kW/kg pour les batteries Li-ion. Elle bénéficie aussi de possibilités de charge rapide. Qui plus est, on peut transporter et stocker les batteries Na-ion même lorsqu'elles sont complètement déchargées (contrairement aux batteries Li-ion, pour des raisons liées aux réactions avec le métal utilisé à l'interface anode-circuit électrique externe), ce qui facilite les manipulations. Et l'élément clé de ces accumulateurs, à savoir le sodium, est mille fois plus abondant que le lithium, donc moins cher, tout en étant uniformément réparti sur le globe terrestre, alors que le lithium est très localisé. Les batteries Na-ion pourraient donc bien remplacer avantageusement, dans un avenir proche, les batteries Li-ion pour nombre d'applications ne nécessitant pas une très grande autonomie, comme les vélos à assistance électrique, les trottinettes, les scooters, les véhicules hybrides ou les appareils de bricolage, sans oublier bien sûr les applications liées aux réseaux de distribution d'électricité pour lesquelles une faible densité volumique d'énergie n'est pas un handicap.

Pour en revenir à l'empreinte écologique des batteries Li-ion, une voie possible pour la diminuer est d'augmenter la durée de vie de ces dispositifs. Les batteries Li-ion actuelles sont déjà fortement optimisées : elles fonctionnent pendant des mois, voire des années, et certaines devraient fonctionner pendant des décennies.

Ainsi, Jeff Dahn et son équipe ont récemment conduit des tests accélérés sur une période de trois ans sur des cellules Li-ion dont la cathode est en NMC 532 et l'anode en graphite. Ces tests ont montré qu'une batterie Li-ion pourrait alimenter un véhicule électrique sur 3 millions de kilomètres parcourus à 20 °C, soit une durée de vie d'environ 25 ans en supposant une décharge de 100% par jour. Cependant, la durée de vie de ces accumulateurs se réduit à 10 ans quand la température d'opération est de 40 °C.

METTRE AU POINT DES BATTERIES « INTELLIGENTES »

Peut-on étendre la durée de vie des batteries tout en recueillant des informations fiables sur leur état de fonctionnement et d'usure ? Tel est le défi que l'on tente de relever avec les batteries dites « intelligentes ». L'idée est de mettre au point des outils de diagnostic dont serait équipée la batterie et qui détecteraient ce qui se passe en son sein, afin de gérer de façon optimale son fonctionnement et les cycles de charge quelles que soient les applications visées.

Au cours du cycle de charge-décharge, les électrodes, en se rétractant ou en se dilatant, peuvent être le siège de craquelures et émettre ainsi des ultrasons. Depuis plusieurs années, on considère la détection de ces émissions acoustiques comme la méthode idéale pour suivre *in situ* les évolutions de la batterie. Cependant, cette méthode reste pour l'instant une curiosité de laboratoire en raison de la lourdeur de son utilisation. >

En termes de densité d'énergie, la technologie sodium-ion ne pourra pas concurrencer celle du lithium-ion

> Les approches actuelles s'inspirent du secteur médical, où l'on utilise des fibres optiques pour transmettre et recevoir des informations lors d'une intervention chirurgicale. Par analogie, on envisage d'intégrer au sein des batteries des fibres et des capteurs optiques afin de cartographier les variations de leur température interne, mais aussi de suivre lors des cycles de charge la formation et l'évolution de la SEI, la couche de passivation à l'interface électrode-électrolyte. Enfin, on peut suivre les flux de chaleur générés par la cellule selon les vitesses de charge, ce qui est un atout pour des batteries plus sûres. Un autre objectif est l'identification des espèces chimiques. Les chercheurs tentent d'obtenir ces informations en concevant des fibres optiques adaptées.

Les techniques optiques ou acoustiques de diagnostic permettent d'identifier les phénomènes à l'origine de la dégradation prématurée des batteries actuelles : fractures mécaniques des électrodes, phénomènes de dissolution des dépôts ou changements de morphologie, etc. Mais pour des batteries intelligentes, cette approche du diagnostic est indissociable d'une étape de réparation.

INTÉGRER DES MATÉRIAUX AUTORÉPARANTS

Doter les batteries de systèmes autoréparants constitue ainsi un champ d'expérimentation de plus en plus actif. Inspirées de processus biologiques comme la cicatrisation ou la reconnaissance spécifique anticorps-antigène, de telles fonctions suggèrent le recours à la chimie supramoléculaire.

Dans cet esprit, on peut souligner les travaux pionniers d'Akira Harada, de l'université d'Osaka, au Japon, et ses collègues. Depuis les années 1990, ces chercheurs ont mis à profit l'interaction d'une cyclodextrine, une molécule circulaire, avec une chaîne polymère. L'enfilement de cyclodextrines autour de la chaîne polymère produit des architectures supramoléculaires à maillons glissants, dont les propriétés élastiques sont remarquables et qui, incorporées à un matériau, peuvent « lier » celui-ci et dissiper les contraintes mécaniques qui s'y exercent.

En 2017, avec de tels liants, Sunghun Choi et ses collègues, de l'Institut coréen avancé de science et technologie (Kaist), ont ainsi amélioré considérablement les performances des anodes en silicium, qui subissent des fluctuations de volume de plus de 300 % lors de l'insertion et la désinsertion du lithium. Les batteries dotées de telles anodes supportent ainsi plus de 400 cycles de charge.

L'approche couplant diagnostic et autoréparation, que l'Europe a intégrée au cœur de son programme de recherche *Battery 2030+* démarré en 2019, pourrait ainsi aboutir à des batteries dotées d'une sortie permettant de communiquer avec un système de gestion qui, en fonction du diagnostic reçu, commanderait le traitement adéquat au sein de la batterie. Cette double fonctionnalité diagnostic-autoréparation sera cruciale pour augmenter la durabilité et la fiabilité des batteries, et par ricochet diminuer leur empreinte écologique.

Cette empreinte écologique des batteries dépend par ailleurs étroitement de leur recyclage, une problématique qui devient de plus en plus importante du fait des millions de batteries Li-ion produites annuellement.

AMÉLIORER LE RECYCLAGE

Le recyclage reposait jusqu'à maintenant sur des procédés métallurgiques classiques, mais complexes. Ils font intervenir de nombreuses étapes (pyrolyses, fusions, extractions de composés solubles…) coûteuses en solvants et en énergie. Surtout, ils sont responsables de nombreuses émissions de CO_2, parfois plus importantes que celles liées à la fabrication de la batterie. Les recherches actuelles visent ainsi à mettre au point des procédés innovants, simples et peu coûteux pour permettre le réemploi ou la récupération directe des électrodes ou des matières actives sans aller jusqu'à leur décomposition chimique, voire à repenser la configuration des batteries afin que chaque électrode puisse être recyclée séparément.

Au cours des trente années qui ont suivi sa mise sur le marché, la technologie Li-ion a peu à peu atteint des performances proches de la

Le marché des voitures électriques est en plein essor, mais les performances des batteries existantes restent insuffisantes pour séduire une majorité d'automobilistes. Le développement de batteries se chargeant en quelques minutes semble aujourd'hui illusoire. En revanche, l'augmentation de l'autonomie, c'est-à-dire de l'énergie stockée en une recharge, est un objectif réaliste.

© BigPixel Photo/shutterstock.com

À long terme, les défis les plus importants sont l'augmentation de la durée de vie des batteries, de leur fiabilité et de leur compatibilité écologique

limite théorique que sa chimie pouvait laisser attendre. Devenue sûre, elle est aussi économiquement compétitive. Elle est désormais un élément clé pour réussir la transition énergétique vers un monde plus durable.

UN ÉLÉMENT CLÉ POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

D'après le Forum économique mondial, les batteries ont déjà entraîné une baisse colossale de 0,4 gigatonne des émissions mondiales de CO_2 dues aux transports ; et elles pourraient réduire les émissions de CO_2 de 2,2 gigatonnes supplémentaires d'ici à 2030, soit 30 % de la diminution mondiale requise pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur le climat conclu en 2015.

Que réserve l'avenir ? La suprématie de la technologie Li-ion devrait encore perdurer pendant plusieurs décennies et ce d'autant plus qu'elle continue de s'améliorer. Il reste néanmoins des défis à relever, qui sont de deux ordres.

À court terme, la charge rapide des batteries Li-ion est l'objectif le plus pressant. Mais une recharge complète en moins de 10 minutes est intrinsèquement impossible. Il y a en revanche beaucoup d'espoir du côté de l'augmentation de l'autonomie, soit *via* l'amélioration des matériaux, soit *via* les batteries tout solide si les verrous technologiques associés sont levés.

À long terme, les défis les plus importants sont l'augmentation de la durée de vie, de la fiabilité et de l'écocompatibilité des batteries. Cela impliquera vraisemblablement un déplacement de l'attention que nous portons aujourd'hui aux matériaux vers l'électrochimie des interfaces électrode-électrolyte, dont dépendent les performances en puissance, en sécurité, en fiabilité et en longévité. L'aspect dynamique de ces interfaces exigera des techniques d'analyse et de caractérisation *in situ* innovantes.

Ce défi est aussi l'occasion de développer des batteries intelligentes, intégrant à la fois des techniques de diagnostic interne et des matériaux autoréparants. Les diagnostics ainsi réalisés fourniront d'importantes masses de données, que les outils de l'intelligence artificielle pourront utiliser afin de développer de meilleurs systèmes de gestion de la batterie.

La question de l'apport de l'intelligence artificielle au domaine des batteries reste d'ailleurs ouverte. L'IA sera peut-être utile pour accélérer le développement de nouveaux matériaux, mieux maîtriser les interfaces, prédire la durée de vie de la batterie, voire faciliter l'émergence de nouvelles chimies.

Tous ces aspects quelque peu futuristes sont les piliers du programme européen *Battery 2030+*. Mais pour que l'ambition de cette entreprise devienne une réalité, il faudra une vaste collaboration entre chercheurs de spécialités différentes. Dans ce cas, l'Europe pourrait bien rattraper son retard sur les géants asiatiques qui règnent aujourd'hui sur le monde des batteries et reprendre la main sur un marché financièrement lucratif. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-M. Tarascon, **Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?**, *Comptes Rendus Géoscience*, vol. 352(4-5), pp. 401-414, 2020.

J.-M. Tarascon, **Na-ion versus Li-ion batteries : Complementarity rather than competitiveness**, *Joule*, vol. 4, pp. 1616-1620, 2020.

J. Huang *et al.*, **Operando decoding of chemical and thermal events in commercial Na(Li)-ion cells via optical sensors**, *Nature Energy*, vol. 5, pp. 674-683, 2020.

P. Allemand, **Batteries à charge rapide : les limites de la physique**, *Contrepoints*, 14 août 2020.

S. Randau *et al.*, **Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries**, *Nature Energy*, vol. 5, pp. 259-270, 2020.

Un dilophosaure est attiré par la proie abattue par un autre, qui compte défendre sa prise. La paire de crêtes que ces dinosaures avaient sur la tête leur permettait peut-être de s'identifier entre eux.

© Chase Stone

De nouvelles découvertes montrent que l'un des dinosaures les plus spectaculaires du film « Jurassic Park » était en réalité très différent de l'animal représenté à l'écran.

Le dilophosaure post-Hollywood

L'ESSENTIEL

> Le dilophosaure, dinosaure du Jurassique inférieur, était l'un des premiers grands théropodes prédateurs.

> Il a aussi été l'une des vedettes du film *Jurassic Park*.

> De nouveaux fossiles et les progrès de la paléontologie permettent aujourd'hui d'en dresser un portrait bien différent de celui de l'animal porté à l'écran.

LES AUTEURS

MATTHEW BROWN
directeur des Collections paléontologiques des vertébrés du Texas à l'université du Texas à Austin, aux États-Unis

ADAM MARSH
paléontologue en chef du parc américain Petrified Forest, chercheur aux Collections paléontologiques des vertébrés du Texas et au Muséum de l'Arizona du Nord

Le soleil se couchait sur les Badlands, sur le plateau du Colorado en Arizona du nord. En ce mois de juin 2014, nous terminions notre journée de terrain dans le « pays des dinosaures », une région se trouvant en plein milieu des terres navajos. Le soleil tapait toujours et nous étions épuisés par le travail à la pelle ou à la main pour déplacer du sable. Nous étions là pour essayer de dater deux squelettes de *Dilophosaurus wetherilli* récemment mis au jour, ce qui nous amenait à collecter des échantillons rocheux et à mesurer l'épaisseur de couches géologiques. De retour à notre véhicule, voilà qu'il nous a fallu creuser de nouveau, cette fois pour le dégager : il était ensablé jusqu'aux essieux !

La vie d'un paléontologue de terrain se passe à demander des autorisations officielles, à prendre des notes, à préparer des repas et à faire la vaisselle dans un camp, avant d'examiner la moisson de la journée à la lumière du feu… Indiana Jones, l'archéologue des films de Georges Lucas, ou Alan Grant, le paléontologue de *Jurassic Park*, n'ont jamais eu, eux, à désensabler leur véhicule.

Toutefois, ces chercheurs de cinéma ont rendu un grand service à la science. La sortie, en été 1993, du film tiré du roman éponyme *Jurassic Park* de Michael Crichton a brusquement rendu célèbre la profession de spécialiste des dinosaures. Plusieurs espèces peu connues de ces animaux disparus, notamment le vélociraptor et le dilophosaure, sont alors devenues des vedettes aujourd'hui aussi célèbres que le tyrannosaure ou le tricératops. Dans le film, ces espèces jouaient des rôles invraisemblables, car elles ne correspondaient pas aux animaux que les paléontologues restituent peu à peu à partir de leurs observations. Michael Crichton, l'auteur de *Jurassic Park*, et Steven Spielberg, son réalisateur à l'écran, ont donné une image quelque peu faussée de ce que pourraient être la paléontologie et la génétique d'aujourd'hui. Ils n'ont pas moins apporté un regard moderne sur la science des dinosaures ; et désormais, l'idée que les dinosaures étaient des animaux actifs et intelligents est ancrée dans l'esprit du grand public.

Bien sûr, Michael Crichton et Steven Spielberg ont pris des libertés artistiques avec la science, afin de rendre plus captivants leurs récits et de mieux mettre en scène chercheurs et dinosaures. Le dilophosaure est justement le dinosaure dont la version cinématographique s'écarte le plus de ce que suggèrent les fossiles. De la taille d'un humain dans le film, il y est doté de deux traits spectaculaires : une effrayante collerette émettant un bruit de crécelle et la faculté de cracher un venin si puissant qu'il tue le programmeur Dennis Nedry, devenu trafiquant de dinosaures.

Mais à quoi ressemblait le réel dilophosaure ? Il est vrai que les chercheurs n'avaient pas encore une image complète de ce dinosaure lorsqu'il est entré dans la culture populaire. Depuis qu'il est devenu un héros hollywoodien, ils ont découvert de nouveaux spécimens plus complets et ont étudié les fossiles de l'espèce par des méthodes de plus en plus élaborées. Aujourd'hui, nous pouvons reconstituer en détail ce dinosaure, son apparence et son comportement, son évolution et le milieu dans lequel il vivait. Il en ressort que le vrai dilophosaure ne ressemble guère à son personnage de cinéma, mais aussi que nous pouvons désormais brosser le portrait plus détaillé à ce jour d'un dinosaure du Jurassique inférieur (il y a environ 200 à 145 millions d'années).

BIEN PLUS GRAND QUE SON HOMOLOGUE DE CINÉMA

Nous savons aujourd'hui que le dilophosaure était un dinosaure carnivore et bipède de plus de six mètres de long, dont la tête était surmontée d'une paire de minces crêtes osseuses parallèles (d'où le nom *Dilophosaurus*, qui signifie en grec « lézard à deux crêtes »). En 1954, quand l'animal est apparu pour la première fois dans la littérature scientifique, il ne portait pas le même nom. Samuel Welles, paléontologue de l'université de Californie à Berkeley, présentait dans une série d'articles ses recherches sur deux squelettes trouvés par Jesse Williams, un Navajo de Tuba City, en Arizona. La paire de crêtes manquait dans les fossiles, et Welles nomma l'animal *Megalosaurus wetherilli*, car il croyait avoir affaire à une nouvelle espèce du genre *Megalosaurus*, déjà connu. Plus tard, en 1964, en découvrant un spécimen comportant la paire de crêtes, il corrigea son erreur et introduisit un nouveau genre, *Dilophosaurus*, et renomma donc l'espèce *Dilophosaurus wetherilli*.

On a brossé le portrait le plus détaillé à ce jour d'un dinosaure du Jurassique inférieur

Le plan d'organisation de l'animal représenté dans *Jurassic Park* provient de la

Une jonction osseuse reliait la partie postérieure et la partie antérieure du maxillaire du dilophosaure. Ce trait curieux a d'abord été considéré comme un point de faiblesse, puis de nouveaux fossiles ont démenti cette idée.

description anatomique de Welles de 1984, des reconstitutions de ses os exposées dans les muséums et, finalement, du travail de restitution du paléontologue Gregory Paul dans son livre de 1988 *Predatory Dinosaurs of the World*. Toutefois, le dilophosaure cinématographique contredit les données disponibles dans les années 1980 sur son espèce sur plusieurs points. Le plus saillant est qu'il est trois fois plus petit que ne l'était le vrai dilophosaure. Cela résulte d'un choix délibéré des cinéastes, qui voulaient éviter qu'on le confonde avec le vélociraptor, un autre acteur principal du film.

Les traits emblématiques du dilophosaure de cinéma, à savoir son crachat venimeux et sa collerette repliable, lui ont été ajoutés pour le rendre plus spectaculaire. Ces « embellissements » sont toutefois inspirés de la biologie de certains animaux actuels, ce qui les rend vraisemblables. En effet, en écrivant son roman, Crichton a imaginé un spectaculaire mécanisme permettant au dilophosaure de cracher un liquide aveuglant, en s'inspirant des cobras actuels qui sont capables de cracher du venin à deux mètres. S'agissant de la collerette, il s'est inspiré de celle du lézard à collerette moderne, *Chlamydosaurus kingii*. Cette espèce endémique du nord de l'Australie et du sud de la Papouasie-Nouvelle Guinée possède en effet un repli de peau jaune soutenu par des tiges cartilagineuses, que le lézard déploie brusquement lorsqu'il se sent en danger.

De son côté, Welles pensait que les os constituant l'extrémité du maxillaire du dilophosaure étaient trop fragiles pour lui permettre de tuer en mordant. Il a donc supposé que ce dinosaure était un charognard ou qu'il tuait ses proies le plus souvent à l'aide de ses griffes.

D'autres aspects de *Jurassic Park* sont en revanche tirés des avancées scientifiques des années 1980. À l'époque, les paléontologues commençaient en effet à s'accorder sur le fait que les oiseaux modernes descendent de dinosaures théropodes et constituent donc la dernière lignée survivante de dinosaures. Les cinéastes renoncèrent à de premières animations montrant des vélociraptors ondoyant comme des serpents, et suivirent plutôt leur conseiller scientifique, le paléontologue Jack Horner, qui recommandait de rendre leurs mouvements plus proches de ceux des oiseaux. Avec ses dinosaures vifs et intelligents, plutôt que léthargiques comme les sortes de lézards imaginés par les paléontologues du XIXe siècle, le film a ouvert les yeux de nombreux spectateurs sur le lien oiseaux-dinosaures.

NOUVELLES DONNÉES SUR LE DILOPHOSAURE

Choix artistiques mis à part, notre vision du dilophosaure était de toute façon vouée à changer après la sortie de *Jurassic Park*. Avant même la publication du livre, la paléontologie était déjà en pleine mutation. Grâce aux progrès informatiques, les chercheurs ont acquis la possibilité de brasser d'énormes ensembles de données, ce qui était inimaginable à l'époque de la découverte des premiers fossiles de dilophosaure. Ils en ont par exemple besoin lorsqu'ils effectuent des analyses cladistiques, c'est-à-dire lorsqu'ils construisent les arbres de parenté les plus probables en répertoriant les caractères communs entre les différentes formes, puis en calculant la probabilité de leur parenté. Aujourd'hui, les chercheurs peuvent prendre en compte et analyser très vite un ensemble de très nombreux traits, ce qui leur permet de proposer des hypothèses bien mieux étayées sur l'évolution des dinosaures. Par ailleurs, le développement de la tomographie par rayons X a fourni une méthode non destructive d'examen de la structure interne d'un os ou des parties cachées d'un fossile enchâssé dans un bloc rocheux.

Outre de nouveaux outils, de nouvelles données sont disponibles. En 1998, des équipes de l'université du Texas à Austin ont découvert d'autres restes de dilophosaure dans la région du nord de l'Arizona où avaient eu lieu les premières découvertes. Comme chaque fois, un fossile supplémentaire confirme ou infirme ce que l'on pensait d'un organisme disparu. Or les trouvailles de l'équipe texane nous ont apporté des parties du dilophosaure manquantes ou déformées dans les précédentes découvertes.

Les fossiles sont en général prélevés au sein de grands blocs rocheux, puis enrobés de plâtre afin de les protéger pendant leur transport du terrain vers le laboratoire. Là, à l'aide d'outils de dentistes, de ciseaux et de minuscules marteaux-piqueurs, on les dégage soigneusement de leur gangue. Après des millions d'années passées sous terre, ils sont le plus souvent déformés et incomplets. Nous les désassemblons parfois, >

© Brian Engh

PORTRAIT D'UN PRÉDATEUR

Les premières études du dilophosaure avaient conclu que l'animal avait des mâchoires trop faibles pour que sa morsure soit mortelle, et on l'imaginait alors comme un charognard ou comme un prédateur tuant ses proies avec ses griffes. Les fossiles s'accumulant, il est apparu qu'au contraire, ses mâchoires étaient assez puissantes pour qu'il s'attaque à d'autres dinosaures ; et qu'il était vif et agile malgré sa taille. C'était donc le superprédateur de son écosystème.

Probablement enveloppées de kératine, les deux crêtes sagittales renfermaient des sacs aériens. Elles facilitaient l'identification entre individus ou jouaient un rôle dans la séduction.

Les vertèbres intégraient des espaces vides où se logeaient des sacs aériens faisant partie du système respiratoire. Ces sacs allégeaient et renforçaient le squelette. Ils permettaient une respiration unidirectionnelle, qui est généralement associée à des niveaux élevés de métabolisme et d'activité.

1984

Aujourd'hui

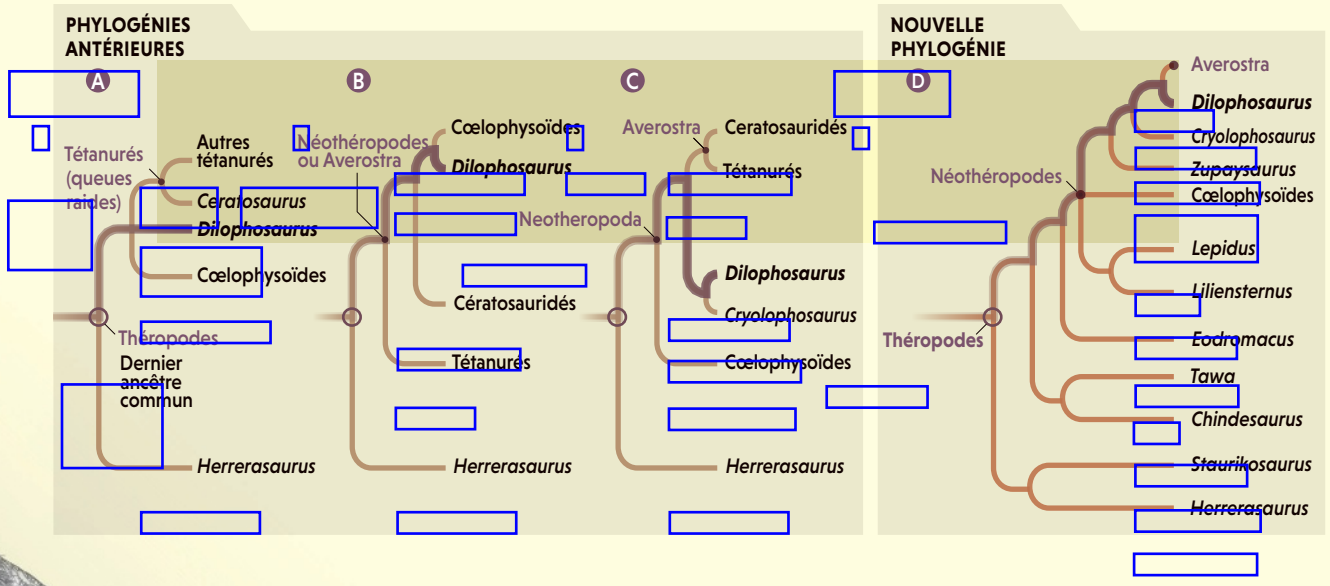
UNE INTERPRÉTATION QUI A ÉVOLUÉ
On sait aujourd'hui que le dilophosaure avait une jonction osseuse au milieu du maxillaire plus forte et une mandibule plus grande qu'on ne le pensait, traits qui le rendaient sans doute capable de mordre puissamment. Le sommet des crêtes sagittales n'étant pas conservé, elles étaient peut-être plus grandes que ce qui est figuré ici.

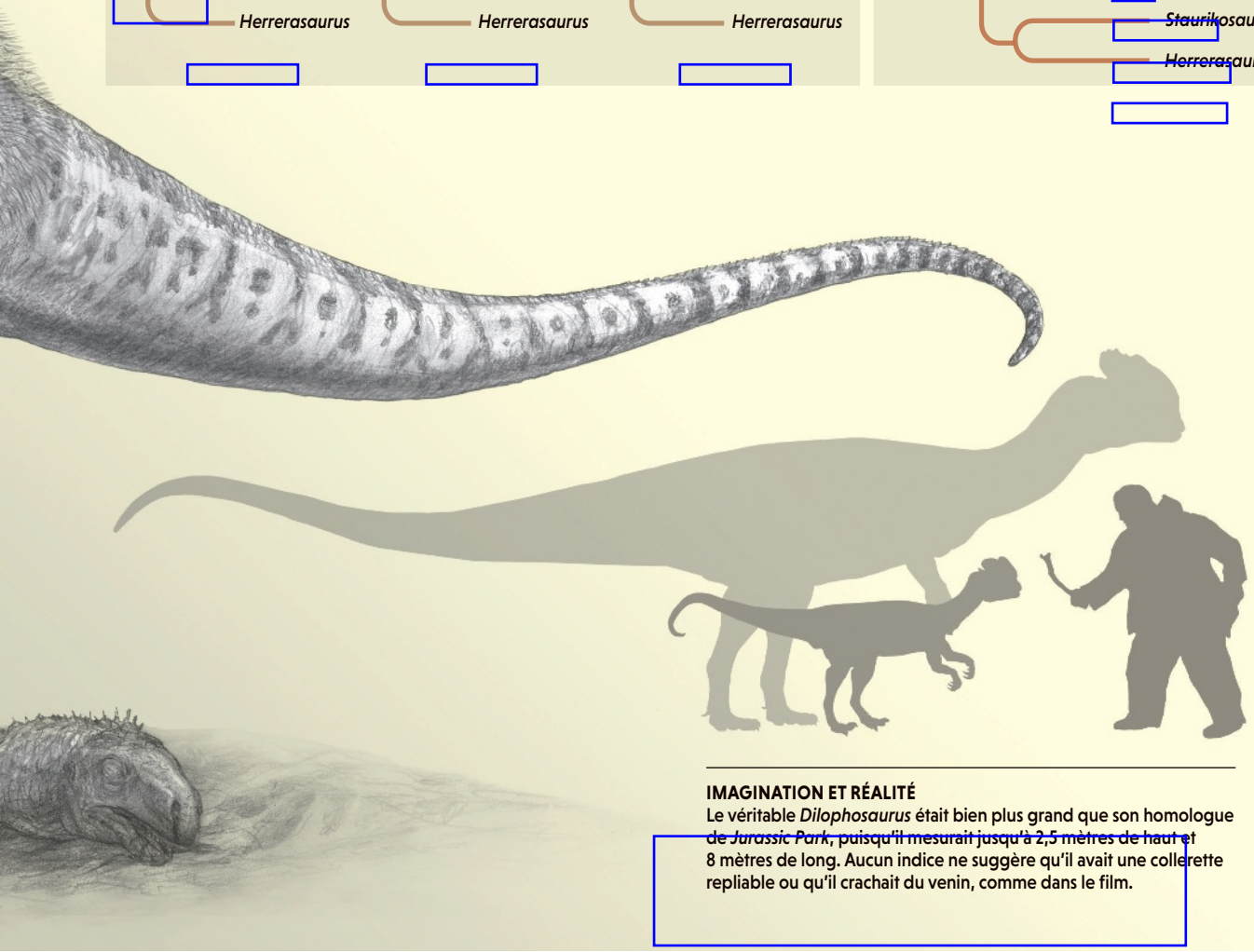
De puissants membres antérieurs munis de griffes acérées et des membres postérieurs longs et musclés aidaient le dilophosaure à capturer et tuer ses proies.

© Brian Engh (reconstitutions) et Daisy Chung (arbres de parenté) ; d'après A. D. Marsh et T. B. Rowe, Journal of Paleontology, vol. 94 (S78), pp.1-103, 2020

UN ARBRE DE PARENTÉ REDESSINÉ

Les liens de parenté du dilophosaure avec les autres dinosaures ont longtemps embarrassé les paléontologues. Les premières études phylogénétiques ont suggéré un lien de parenté étroit avec les cœlophysoïdes A, les cératosaures B ou d'autres théropodes à crête C. Samuel Welles, qui décrivit les premiers fossiles aujourd'hui associés au dilophosaure, suggérait même qu'ils pourraient appartenir à plusieurs genres différents. Une analyse récente et beaucoup plus complète des traits du dilophosaure prouve qu'il s'agit bien d'une seule et même espèce, et qu'elle est proche des grands théropodes jurassiques D. Toutefois, les différences assez marquées entre le genre *Dilophosaurus* et les théropodes jurassiques suggèrent qu'il existe des espèces plus proches du dilophosaure, qui restent à découvrir.





IMAGINATION ET RÉALITÉ

Le véritable *Dilophosaurus* était bien plus grand que son homologue de *Jurassic Park*, puisqu'il mesurait jusqu'à 2,5 mètres de haut et 8 mètres de long. Aucun indice ne suggère qu'il avait une collerette repliable ou qu'il crachait du venin, comme dans le film.

> puis les reconstruisons à partir des fragments brisés pour mieux nous rapprocher de leur état d'origine, ce qui peut nous amener à ajouter et à sculpter de la matière en nous inspirant d'animaux apparentés.

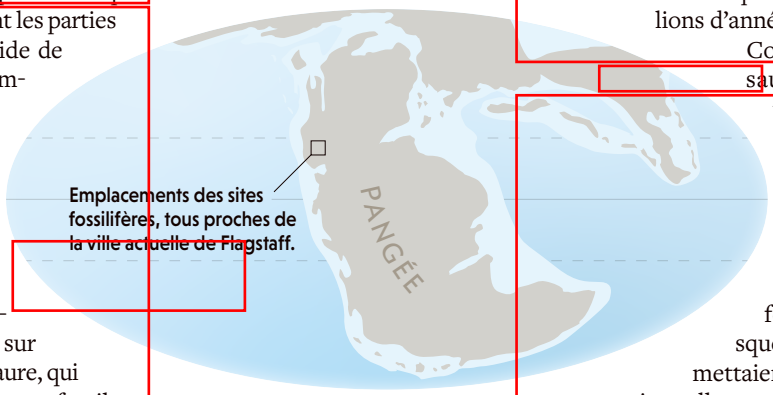
Vers 1950, Wann Langston et des collègues, à Berkeley, ont préparé les premiers squelettes de dilophosaure en comblant les parties manquantes du crâne à l'aide de moulages du crâne plus complet d'un dinosaure carnivore du Jurassique et en sculptant en plâtre les parties manquantes du bassin. Personne ne savait alors à quoi ressemblaient ces parties; ces reconstructions représentaient donc une hypothèse sur la morphologie du dilophosaure, qui restait à vérifier sur de nouveaux fossiles.

Le matériel supplémentaire découvert depuis la description de l'espèce et ses premières reconstitutions montre que le museau et la mâchoire du dilophosaure étaient beaucoup plus puissants qu'on ne l'avait entrevu. Les os du maxillaire ne présentent pas la fragile jonction que suggéraient les premiers fragments découverts. Les nouveaux fossiles indiquent plutôt un crâne robuste, capable de mordre une proie. De même, la mandibule a révélé la présence de crêtes osseuses saillantes. Or chez les reptiles modernes, des crêtes semblables servent à attacher des muscles puissants. Par ailleurs, un squelette de *Sarahsaurus*, un dinosaure herbivore, mis au jour sur le même site, porte des traces de morsures, qui attestent de la présence dans les parages d'un gros carnivore à mâchoires assez fortes pour percer l'os.

L'ensemble de ces indices soutient l'idée que le dilophosaure était probablement un prédateur à la morsure mortelle plutôt qu'un animal charognard ou qui utilisait ses griffes pour tuer, comme l'avait supposé Welles.

Le dilophosaure était un grand dinosaure, surtout pour son époque. À peine 20 millions d'années auparavant, les dinosaures du Trias supérieur (237 à 201 millions d'années) de l'ouest de l'Amérique du Nord avaient tous la taille d'une dinde ou d'un aigle. Avec une longueur atteignant 8 mètres et une hauteur de 2,5 mètres, un dilophosaure adulte était un animal impressionnant. Ses membres antérieurs, c'est-à-dire ses bras, étaient bien plus longs et forts que ceux d'autres dinosaures carnivores plus gros, tels que l'allosaure ou le cératosaure, et il avait aussi des jambes relativement plus longues.

Lors de la découverte des premiers dilophosaures, les paléontologues ont cru avoir affaire à une espèce apparentée aux dinosaures prédateurs qu'étaient *Allosaurus* et *Streptospondylus*.



Emplacements des sites fossilifères, tous proches de la ville actuelle de Flagstaff.

Les fossiles de dilophosaure proviennent tous de deux sites de ce qui est aujourd'hui le nord de l'Arizona. Ils datent du début du Jurassique, peu après que la Pangée a commencé à se disloquer.

Ils ont donc reconstitué les parties manquantes du bassin pour qu'elles ressemblent aux mêmes parties chez ces animaux. Les squelettes de dilophosaure mieux conservés découverts plus tard ont révélé des bassins intermédiaires entre les cœlophysidés du Trias supérieur et les allosauridés du Jurassique supérieur (161 à 145 millions d'années).

Comme de nombreux dinosaures primitifs et comme tous les oiseaux modernes, le dilophosaure avait des sacs aériens dans ses vertèbres, c'est-à-dire des sacs d'air faisant partie de son système respiratoire, ce qui le renforçait tout en allégeant son squelette. Ces sacs aériens permettaient une circulation unidirectionnelle et continue de l'air à travers les poumons. Comme chez les oiseaux et les crocodiliens, ce type de respiration fournit davantage d'oxygène que le système respiratoire bidirectionnel des mammifères, qui suppose une inspiration suivie d'une expiration. Les animaux dotés d'un système respiratoire unidirectionnel tendent à avoir un métabolisme de base relativement élevé et donc des niveaux élevés d'activité, de sorte que le dilophosaure était probablement un chasseur vif et agile.

Ses crêtes étaient peut-être des atours sexuels. Ou un trait distinctif...

La tomographie par rayons X a révélé que ces sacs d'air sont aussi présents dans les os entourant le cerveau du dinosaure, en continuité avec les cavités sinusales situées en avant du crâne. Chez la plupart des dinosaures carnivores, une crête osseuse forme un toit au-dessus de l'une des ouvertures du crâne située en avant des orbites, la fenêtre antorbitaire. Chez le dilophosaure, cette ouverture est dans le prolongement des crêtes osseuses de la tête, ce qui suggère que ces crêtes aussi contenaient des sacs aériens. Elles étaient presque certainement recouvertes de kératine, le matériau des cornes, griffes et poils. Les crêtes que portait le dilophosaure sur le crâne étaient peut-être des atours

© Daisy Chung, d'après Christopher R. Scotese (carte paléogéographique de référence)

sexuels ou des traits servant à l'identification entre congénères. Leur rôle exact, comme celui de leurs sacs d'air, n'est pas clair.

L'un des défis de l'étude de l'évolution de toute espèce est de comprendre les variations au sein d'un même groupe taxonomique (espèce ou groupe d'espèces classées dans une même entité) ou entre groupes taxonomiques différents. Welles pensait que les squelettes que nous attribuons aujourd'hui au dilophosaure appartenaient à plusieurs genres différents. À l'aide des outils de cladistique les plus récents, l'un de nous (Adam Marsh) a mis à l'épreuve cette hypothèse en relevant des centaines de traits anatomiques sur chaque squelette puis en les comparant. Il en ressort que, contrairement à ce que supposait Welles, tous les squelettes connus sont si proches qu'ils appartiennent non seulement à un seul genre, mais aussi à une seule et unique espèce.

Adam Marsh a intégré ces traits anatomiques dans un ensemble de données bien plus vaste afin de comparer le dilophosaure à d'autres dinosaures du monde entier. Il a ainsi pu élucider l'évolution et la distribution biogéographique des différents groupes de dinosaures, ce qui lui a permis de placer plus précisément le dilophosaure dans l'arbre phylogénétique dinosaurien. Cela a mis en évidence que le dilophosaure est notablement séparé de ses plus proches parents connus, ce qui implique que de nombreuses formes plus proches de lui restent à découvrir.

ALLUVIONS QUATERNAIRES

Si notre vision du dilophosaure a progressé, il en est de même de celle que nous nous faisons de son milieu de vie. La descente des falaises d'Adeii Eichii pour se rendre sur le site à dilophosaures signifie un voyage de plus de 180 millions d'années jusqu'au Jurassique inférieur. À l'époque, des dinosaures foulaient les environs en laissant des empreintes dans ce qui est devenu aujourd'hui le grès du plateau du Colorado. Les routes goudronnées s'arrêtant à plusieurs kilomètres du site fossilifère, il nous faut emprunter des pistes à deux voies envahies d'ornières pour traverser des champs de dunes notés QAL sur nos cartes géologiques (pour *quaternary alluvium*, «alluvions quaternaires»). C'est ce sable déplacé par le vent qui avait ensablé notre véhicule tout-terrain en 2014. Sous ces dunes récentes se cache le grès navajo, c'est-à-dire les restes d'un désert de 180 millions d'années. Les Badlands à roches rouges de Ward Terrace, comme on nomme la zone, s'étendent vers l'ouest où, vers Flagstaff en Arizona, ils donnent sur les volcans de San Francisco, beaucoup plus récents. Au nord-ouest se trouve le début de l'une des structures géologiques les plus visitées du monde: le Grand Canyon.

Des sables qui ont piégé notre véhicule au sommet de Ward Terrace jusqu'au schiste de Vishnu – la roche noire du fond du canyon creusé par le fleuve Colorado –, ces paysages représentent une durée de 1,8 milliard d'années. Paléontologues, nous nous efforçons de comprendre les espèces fossiles enregistrées dans ces roches et nous utilisons les faisceaux d'indices géologiques et biologiques préservés pour restituer leurs environnements disparus.

L'un de nos objectifs était de déterminer avec précision l'âge de la formation Kayenta qui a livré des dilophosaures. Cette roche s'est constituée parce que des rivières, des ruisseaux et des lacs se trouvant à l'est d'un arc volcanique amassaient des cendres et des particules fines. Les cendres ont à la fois préservé les fossiles de dilophosaure et aidé aux premières tentatives de datation de la formation Kayenta.

Nous avons collecté de nouveaux échantillons de roche afin de les dater par radiochronologie, c'est-à-dire en exploitant la décroissance, au cours du temps, de l'abondance de certains isotopes radioactifs de l'uranium. En broyant ces échantillons, nous en avons extrait des cristaux de zircon, un minéral stable qui a préservé les isotopes d'uranium lors de la formation de la roche. Ces isotopes se désintégrant en plomb en plusieurs étapes et à un rythme constant, nous avons déterminé l'âge des échantillons rocheux en vaporisant au laser les cristaux de zircon et en les analysant avec un spectromètre de masse, qui a mesuré les proportions de plomb et d'uranium présentes. Résultat: à quelques millions d'années près, les roches qui ont livré des fossiles de dilophosaure datent de 183 millions d'années.

Le dilophosaure a donc vécu au début du Jurassique, environ 5 à 15 millions d'années après l'extinction massive de la fin du Trias, dans laquelle ont disparu les trois quarts environ des formes de vie existantes – dont la plupart des grands reptiles qui étaient en concurrence avec les premiers dinosaures. Cette extinction de masse résulte probablement de la dislocation du supercontinent de la Pangée, lorsque l'océan Atlantique s'est ouvert du sud au nord, libéré par une fermeture Éclair volcanique. Tout au long du Trias supérieur et du Jurassique inférieur, la plaque tectonique Nord-Américaine s'est déplacée vers le nord, passant d'un climat subtropical à un climat aride, si bien que l'habitat du dilophosaure s'est déplacé de la latitude approximative de l'actuel Costa Rica vers le nord du Mexique actuel. Ainsi, l'écosystème à l'origine de la formation Kayenta connaissait une saison sèche et des dunes y traversaient des zones plus humides, où s'épanouissait la vie animale.

Les fossiles d'autres organismes trouvés dans la formation Kayenta révèlent que le dilophosaure était le superprédateur de son milieu, constitué des environs d'un cours d'eau bordé de conifères traversant une mer de sable. Un spécimen de dilophosaure conservé à l'université du Texas fut découvert en compagnie de >

> deux individus *Sarahsaurus*. Ces dinosaures herbivores à long cou côtoyaient *Megapnosaurus*, un petit dinosaure carnivore, et *Scutellosaurus*, un petit dinosaure cuirassé. L'animal le plus fréquent dans la formation Kayenta était la tortue *Kayentachelys*, qui nageait aux côtés de poissons osseux revêtus d'écailles, notamment de cœlacanthes d'eau douce et de dipneustes. Des mammifères archaïques étaient présents, notamment des tritylodontidés, qui évoquent des castors, et des morganucodontidés, qui font penser à des rats. Autant de proies pour les dilophosaures...

DES FOSSILES POUR TOUS

Dans le film *Jurassic Park*, un squelette complet de vélociraptor est mis au jour au... pinceau! Dans le monde réel, les fossiles dinosauriens se présentent plutôt sous la forme de fragments à peine identifiables. Les jours de chance, il arrive que l'on mette au jour un os presque complet. Avec la publication en 2020 de l'étude anatomique complète réalisée par Adam Marsh, le dilophosaure est désormais le dinosaure du Jurassique inférieur le mieux connu au monde, mais il a fallu des décennies pour en arriver là, et des générations de paléontologues pour interpréter ses ossements fossiles.

Dans cette quête, les muséums d'histoire naturelle jouent un rôle essentiel. Le public les perçoit avant tout comme des espaces d'exposition à l'éclairage sophistiqué, mais leur principale fonction est de mener des recherches en sciences naturelles. À cette fin, ces institutions rassemblent de grandes collections de spécimens qui constituent autant d'indices précieux pour les chercheurs. Des équipes de conservateurs, d'archivistes et de gestionnaires de collections spécialement formés documentent et préservent soigneusement les spécimens, afin que les collections soient accessibles aux chercheurs actuels et futurs. Pouvoir répéter une expérience ou une observation est en effet une exigence fondamentale de la recherche scientifique: quand une découverte est faite, les autres chercheurs doivent pouvoir la corroborer. En paléontologie, cela implique que les fossiles eux-mêmes doivent être conservés, afin de garantir que les futures générations pourront les examiner de nouveau, vérifier et améliorer les observations.

La Nation navajo a des partenariats avec plusieurs muséums qui conservent les fossiles trouvés sur ses terres et les données accumulées sur eux. En 2015, lorsque nous sommes allés repérer l'endroit de la première découverte du dilophosaure, nous avons eu la chance de rencontrer John Willie, un parent de Jesse Williams, le Navajo qui découvrit en 1940 les premiers os fossilisés. John Willie nous a montré le site et nous a expliqué que le peuple navajo accorde une grande importance aux richesses naturelles de son territoire. Le territoire navajo étant l'un des plus favorables à l'observation de roches du début du Mésozoïque, son département des Ressources minérales a facilité la recherche scientifique, notamment en délivrant des autorisations de prospection, en prêtant des fossiles et en révisant les manuscrits scientifiques.

Le dilophosaure devait se nourrir de tortues et de mammifères archaïques

La science progresse en mettant à profit des connaissances antérieures et en les réévaluant, ce qui s'accompagne parfois du renversement de vieilles idées. Il est passionnant de voir ces savoirs durement acquis s'intégrer à la culture populaire. La paléontologie est étroitement liée au cinéma depuis l'aube de l'animation cinématographique. Au début de son film d'animation *Gertie le dinosaure* de 1914, Winsor McCay visite avec des amis le Muséum américain d'histoire naturelle à New York et observe le squelette d'un dinosaure sauropode. Il parie avec eux qu'il saura redonner vie à l'animal, et c'est ainsi qu'un dinosaure apparaîtra pour la première fois dans un film. Avant de se lancer dans sa reconstitution d'un sauropode, McCay avait consulté les paléontologues du Muséum.

Plus tard, Barnum Brown, le découvreur du *Tyrannosaurus rex*, conseilla Walt Disney lors de la réalisation de son film d'animation *Fantasia* de 1940. Et le studio à l'origine du *Godzilla* de 1954 s'est inspiré des dinosaures figurant sur la fresque murale peinte en 1947 par Rudolph Zallinger au musée Peabody d'histoire naturelle de l'université Yale. Quant à nous, nous sommes déjà impatients de savoir comment la paléontologie sera traduite dans le sixième épisode de la série *Jurassic Park* prévu pour 2022.

On peut remarquer que la culture populaire a, réciproquement, de l'influence sur la marche de la science. Langston racontait que dans les années 1930 et 1940, plutôt que d'acheter de la colle spéciale, fort onéreuse, les paléontologues de l'université de Californie à Berkeley réparaient leurs fossiles à l'aide de colle produite en dissolvant dans de l'acétone les films en acétate qu'utilisait alors l'industrie du cinéma. Ainsi, si le dilophosaure est dans le cinéma, il y a peut-être aussi du cinéma dans le dilophosaure. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. D. Marsh et T. B. Rowe, **A comprehensive anatomical and phylogenetic evaluation of *Dilophosaurus wetherilli* (Dinosauria, Theropoda) with descriptions of new specimens from the Kayenta Formation of northern Arizona**, *Journal of Paleontology*, vol. 94 (S78), pp. 1-103, 2020.

R. Lehoucq et J.-S. Steyer, **Les dinosaures de la science-fiction**, *Pour la Science*, n° 426, mars 2013.

E. Buffetaut, **La modernité des dinosaures**, *Pour la Science*, n° 300, octobre 2002.

cité
sciences
et industrie

surprenants géants

cycle de conférences

— les jeudis à 19h

© GettyImages

La diversité du vivant ne cesse de nous étonner. À grande échelle, les surprises sont nécessairement de taille !

Quels mécanismes ont permis la naissance d'animaux démesurés ? Pourquoi les découvertes des virus géants bouleversent le monde de la virologie ? Comment explique-t-on le gigantisme humain ?

Accès gratuit sur réservation obligatoire ou en ligne suivant la situation sanitaire

1er avril à 19h

Gigafaune : titans de l'évolution
Pierre-Olivier Antoine, paléontologue

8 avril à 19h

Virus géants : des découvertes de taille
Chantal Abergel, biologiste

15 avril à 19h

Le gigantisme humain : un mystère élucidé
Albert Beckers, endocrinologue

AVEC LE SOUTIEN DE POUR LA SCIENCE

Informations **cite-sciences.fr**

L'ESSENTIEL

> Depuis des milliards d'années, l'altération chimique des roches régule la concentration atmosphérique de CO_2, et ainsi la température moyenne terrestre.

> Le réglage de ce thermostat géologique s'est modifié au cours des 15 derniers millions d'années, période où le climat s'est globalement refroidi de plusieurs degrés.

> De récentes mesures de rapports isotopiques suggèrent qu'une augmentation de la réactivité chimique des surfaces terrestres est à l'origine de cette évolution.

L'AUTEUR

FRIEDHELM VON BLANCKENBURG
géochimiste au Centre allemand de recherche en géosciences (GFZ) de Potsdam et enseignant à l'université libre de Berlin

Les pics himalayens s'élèvent aujourd'hui à plus de 8 000 mètres au-dessus du niveau de la mer, mais au cours des prochains millions d'années, leurs roches seront altérées, transformées en sols qui seront érodés, processus qui fixera lentement du CO_2 atmosphérique.

L'altération des roches, thermostat de la Terre

Au cours des 15 derniers millions d'années, le climat global s'est peu à peu refroidi de plusieurs degrés. Pourquoi ? En captant du dioxyde de carbone de l'atmosphère, l'altération chimique des roches a joué dans cette évolution un rôle crucial, aujourd'hui mieux cerné.

© Shutterstock.com/ Daniel Prudek

Quelle planète singulière que la Terre ! Sa surface est couverte à 70 % par de l'eau qui, pendant la presque totalité des 4,5 milliards d'années d'histoire géologique, est restée liquide. Heureusement : si la glace avait régné sur Terre, comme c'est actuellement le cas sur Mars, aucune vie n'aurait été possible ; et si toute l'eau s'était trouvée dans l'atmosphère sous forme de vapeur, comme c'est actuellement le cas sur Vénus, les rayons ultraviolets auraient dissocié les molécules d'eau en hydrogène et oxygène, qui se seraient ensuite échappés dans l'espace, et la vie n'aurait pas non plus été possible. De fait, il règne sur Vénus une température d'environ 470 °C, en raison de l'effet de serre dû à une atmosphère composée surtout de dioxyde de carbone. Par contraste, la température moyenne de la Terre se maintient depuis très longtemps dans une fourchette comprise entre 0 et 100 °C, ce qui a été favorable à la vie. Mais pourquoi en est-il ainsi ?

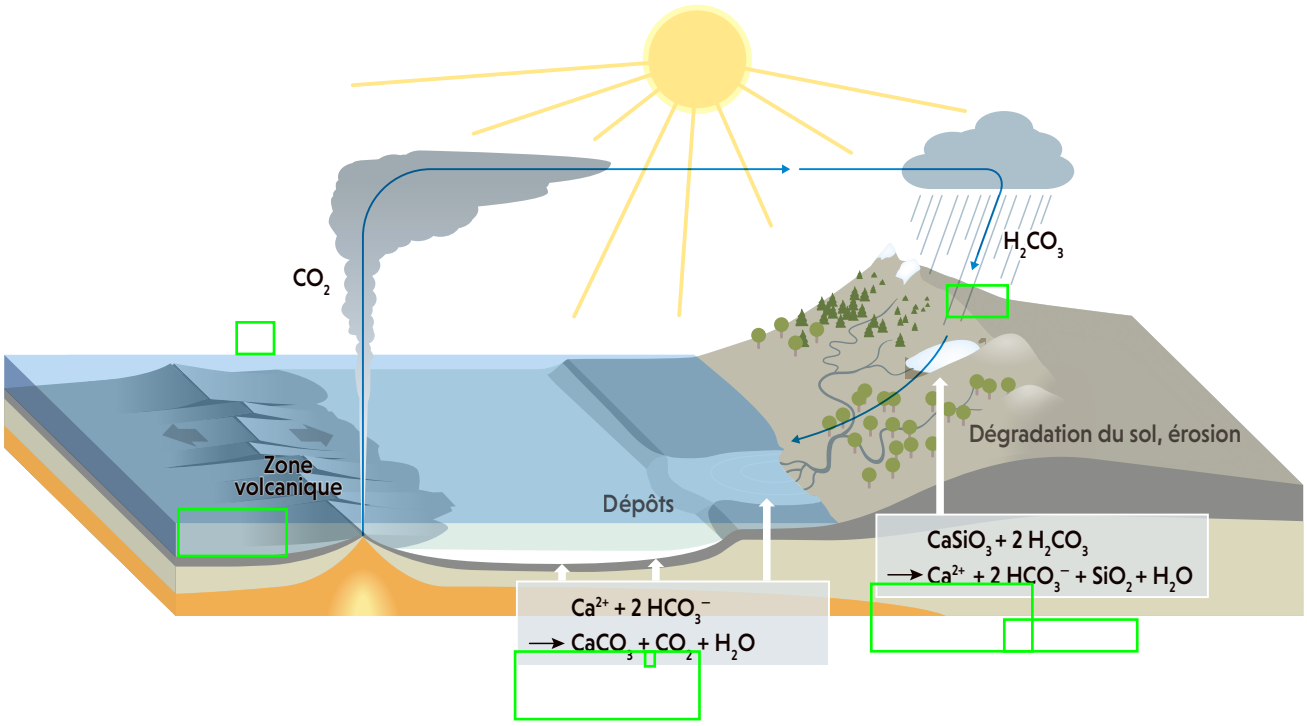
Un simple bilan thermique de la Terre montre que cela n'a rien d'évident. À la surface de notre planète, le rayonnement solaire est la principale source de chaleur. Si l'on suppose que la Terre absorbe parfaitement l'énergie lumineuse, c'est-à-dire si l'on suppose qu'elle est un « corps noir », le calcul aboutit à une température moyenne (à la surface du globe) de 5 °C.

Toutefois, notre planète est loin d'être un corps noir : les nuages, les glaciers et les sols réfléchissants des déserts, entre autres, renvoient vers l'espace une partie du rayonnement solaire incident. L'ensemble de ces zones brillantes contribue à élever l'albédo terrestre, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie lumineuse réfléchie vers l'espace et l'énergie incidente. Si l'on tient compte de l'albédo terrestre, le calcul conduit à une température moyenne terrestre d'environ – 18 °C, ce qui impliquerait l'absence d'eau liquide.

Or la température moyenne est d'environ 15 °C. Nous la devons à un autre phénomène physique : l'effet de serre. En effet, toute la lumière renvoyée vers l'espace n'y parvient pas : une partie du rayonnement rencontre sur

L'ABSORPTION DE CO_2 PAR LA MÉTÉORISATION

Les émissions volcaniques de dioxyde de carbone sont contrebalancées par l'érosion chimique qui se produit dans la zone critique d'altération des roches du sol. Le silicate de calcium ($CaSiO_3$) des roches réagit avec l'acide carbonique (H_2CO_3) des précipitations. Cela libère des ions hydrogénocarbonate HCO_3^- et des ions calcium Ca^{2+}, lesquels sont transportés par le ruissellement des eaux vers l'océan, où ils précipitent sous la forme de calcite ($CaCO_3$), qui contribue ensuite à la formation de bancs de calcaire. Le schéma de droite montre la zone critique d'altération. L'activité tectonique approvisionne cette zone en roches, en particulier dans les chaînes de montagnes. La roche s'altère chimiquement au contact de l'eau et du dioxyde de carbone, ce qui produit du sol. La surface de ce sol est soumise à l'érosion.



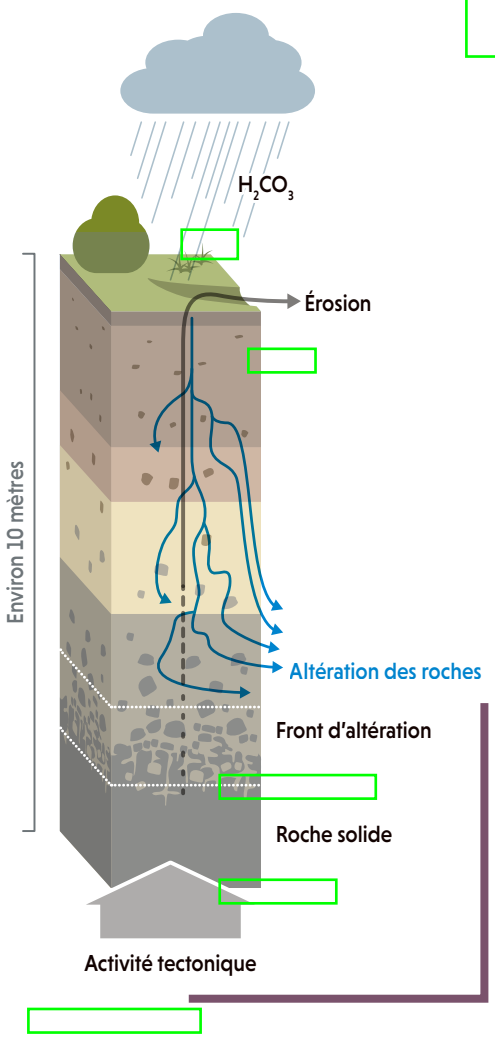
Spektrum der Wissenschaft / Emde-Grafik, d'après F. von Blanckenburg et Manuela Dziggel, GFZ Potsdam

son chemin des molécules (H_2O, CO_2, CH_4, O_3, etc.) qui la renvoient vers la surface terrestre. Par cet effet de serre, l'atmosphère se réchauffe d'autant plus qu'elle contient davantage de gaz ayant le pouvoir de renvoyer le rayonnement. Aujourd'hui, la vapeur d'eau est à l'origine d'environ 60% de l'effet de serre, tandis que la part du dioxyde de carbone (CO_2) en constitue 26%. Les variations de la température de la Terre au cours de son histoire proviennent des variations de l'effet de serre, qui est principalement déterminé par la teneur atmosphérique en CO_2.

Avant l'ère industrielle, le CO_2 atmosphérique provenait surtout des émissions de gaz volcaniques. Aujourd'hui, ces émissions s'élèvent à environ 0,55 milliard de tonnes de CO_2 par an (pour comparaison, en 2019, les émissions anthropiques étaient de 37 milliards de tonnes, près de 70 fois plus !). Sachant que les volcans émettent du CO_2 depuis les débuts de l'histoire de la Terre, pourquoi ce gaz ne s'est-il pas accumulé au point de plonger la planète dans un enfer brûlant, comme sur Vénus ?

La réponse réside dans la « météorisation » (*weathering* en anglais), terme qui désigne l'altération des roches par l'eau, les agents chimiques qu'elle contient, les gaz atmosphériques, les variations de température, les organismes vivants, l'érosion éolienne, etc. La météorisation a pour effet de décomposer les roches silicatées en composés qui se dissolvent dans les eaux et en solides résiduels qui s'accumulent dans les sols. Or la météorisation absorbe du CO_2 présent dans l'atmosphère et contrecarre ainsi l'incessant ajout de CO_2 par les volcans.

La météorisation absorbe du CO_2 et contrecarre ainsi l'ajout de CO_2 par les volcans



Comment la météorisation des roches silicatées consomme-t-elle du CO_2 ? En réagissant avec l'eau, le dioxyde de carbone atmosphérique forme de petites quantités d'acide carbonique (H_2CO_3). S'il pleut, cet acide faible parvient au sol. Au contact des roches silicatées, l'acide carbonique dissout partiellement les minéraux primaires dont ils sont formés, tels le mica (silicates d'aluminium et de potassium en feuillets) et le feldspath (des aluminosilicates de sodium, de potassium et de calcium, qui constituent les minéraux les plus fréquents sur Terre). Ce processus est très lent : typiquement, il n'use la roche que de 5 à 100 millimètres par millénaire. Cependant, la réaction chimique qui l'accompagne libère des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) qui, avec l'ion hydrogénocarbonate (HCO_3^-) provenant de l'acide carbonique, sont convoyés dans l'océan par le ruissellement (*voir l'encadré page ci-contre*).

Là, l'ion calcium se combine avec l'ion carbonate (CO_3^{2-}) pour former de la calcite ($CaCO_3$) ; puis, au fil des centaines de milliers d'années, les cristaux de calcite déposés sur le fond des mers se transforment en calcaire. Ce processus est à l'origine des puits de carbone océaniques : le CO_2 consommé par la météorisation passe des centaines de millions d'années hors de l'atmosphère, piégé sous forme de calcaire. Ainsi, si les volcans ajoutent du CO_2 dans l'atmosphère, l'altération des roches en soustrait et le séquestre dans les puits de carbone océaniques. >

Ces images illustrent le cycle géologique du CO_2. À gauche, un exemple de source : un volcan dont les émissions contiennent du CO_2. En haut à droite, le réacteur qui extrait du CO_2 de l'atmosphère : l'altération chimique des roches. On remarque que le sol est déjà largement altéré, même si des blocs de granit en voie d'érosion chimique subsistent. En bas à droite, l'un des puits de carbone océaniques : des récifs coralliens.

Volcan : © Mike Doukas via USGS ; sol : © F. von Blanckenburg, GFZ Potsdam ; coraux : © Shutterstock.com/Sarah_lewis

> Depuis les débuts de la Terre, les émissions volcaniques de CO_2 ont toujours été contrebalancées par les puits de carbone océaniques. C'est ce qui a garanti que l'atmosphère et avec elle le climat soit restés favorables à la vie. Cet équilibre nécessaire n'a cependant pas besoin d'être strictement respecté chaque année. Il suffit qu'il le soit sur une période de temps supérieure ou à peu près égale au temps moyen de séjour d'une molécule de CO_2 dans l'atmosphère (temps allant de son émission par un volcan jusqu'à sa consommation chimique).

Au cours de l'Holocène, c'est-à-dire les derniers 10000 ans, ce temps de séjour a été d'environ 250000 ans. C'est plutôt court si l'on considère que la teneur atmosphérique en CO_2 et donc le climat sont restés stables pendant des centaines de millions d'années. Alors comment se fait-il que tout le CO_2 atmosphérique n'ait pas été consommé en quelques centaines de milliers d'années, par exemple sous l'effet d'une météorisation deux fois plus importante ? Ou, à l'inverse, pourquoi une augmentation durable du volcanisme n'a-t-elle pas transformé la Terre en four ?

UN THERMOSTAT GÉOLOGIQUE

Le mécanisme qui équilibre le retrait et l'ajout de CO_2 dans l'atmosphère fait partie du genre de boucles de contrôle qui nous sont familières avec certaines machines, un réfrigérateur par exemple. Si l'on en ouvre la porte pour prendre une boisson, l'arrivée d'air extérieur réchauffe l'intérieur ; le thermomètre électronique ordonne alors au compresseur de refroidir le liquide caloporteur, qui va prélever des calories à l'intérieur du réfrigérateur, et ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'intérieur soit de nouveau à la température programmée. Ce type de boucle de contrôle fonctionne grâce à une rétroaction, en d'autres termes à une action en retour d'un signal.

Dans la machine climatique terrestre, la rétroaction provient de la météorisation des roches. Supposons qu'une activité tectonique accrue crée plus de volcans aux frontières des plaques tectoniques. Davantage de CO_2 est alors libéré dans l'atmosphère, ce qui augmente l'effet de serre ; la température moyenne s'élève ; davantage d'eau s'évapore alors des océans, de sorte qu'il pleut et ruisselle plus sur les continents. Ces phénomènes accélèrent l'altération des roches, ce qui en retour élimine plus de CO_2 de l'atmosphère, d'où une diminution de l'effet de serre et donc un refroidissement…

Ce régulateur de température fonctionne aussi dans l'autre sens : si, par exemple, des calottes glaciaires se développent aux pôles, l'albédo de la Terre augmente, ce qui refroidit le climat ; dès lors, moins de vapeur se forme au-dessus des océans, de sorte qu'il pleut et neige moins, ce qui ralentit la météorisation ; moins de CO_2 étant éliminé de l'atmosphère, la Terre commence à se réchauffer…

Ce fascinant mécanisme de régulation naturelle constitue le thermostat géologique de la Terre. Son existence n'implique pas que la quantité de CO_2 atmosphérique et donc la température moyenne à la surface de la Terre aient toujours été les mêmes. Les grandeurs faisant réagir le thermostat ont au contraire constamment varié, en fonction des baisses et des hausses des émissions volcaniques ou parce que la formation de montagnes augmentait l'altération des roches.

Une équation différentielle simple traduit la variation de la quantité Q de CO_2 atmosphérique en fonction des sources et des puits de CO_2 :

$$dQ/dt = V - M = V - k[CO_2]$$

Dans cette équation, dQ/dt est la variation de la quantité de CO_2 atmosphérique par unité de temps, V est la quantité de CO_2 que les volcans ajoutent à l'atmosphère par unité de temps, M est la quantité de CO_2 retirée de l'atmosphère par la météorisation, par unité de temps ; $[CO_2]$ représente la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone ; et k est une constante de réaction qui traduit la propension du CO_2 atmosphérique à être consommé par la météorisation, en d'autres termes la réactivité de la surface terrestre (notons que les grandeurs Q, V, M et $[CO_2]$, voire k, sont des fonctions du temps t).

UN ÉQUILIBRE APPARENT

Quand les émissions et la séquestration de CO_2 s'équilibrent, c'est-à-dire quand V et M sont égales, dQ/dt est nul. Pour que la température terrestre reste convenable, cet état « stationnaire » des échanges de CO_2 doit persister pendant la durée déjà citée de quelque 250 000 ans, à quelques pourcents près. Bien que les volcans introduisent constamment du CO_2 dans l'atmosphère et que l'altération des roches en retire sans cesse, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone reste quasiment constante.

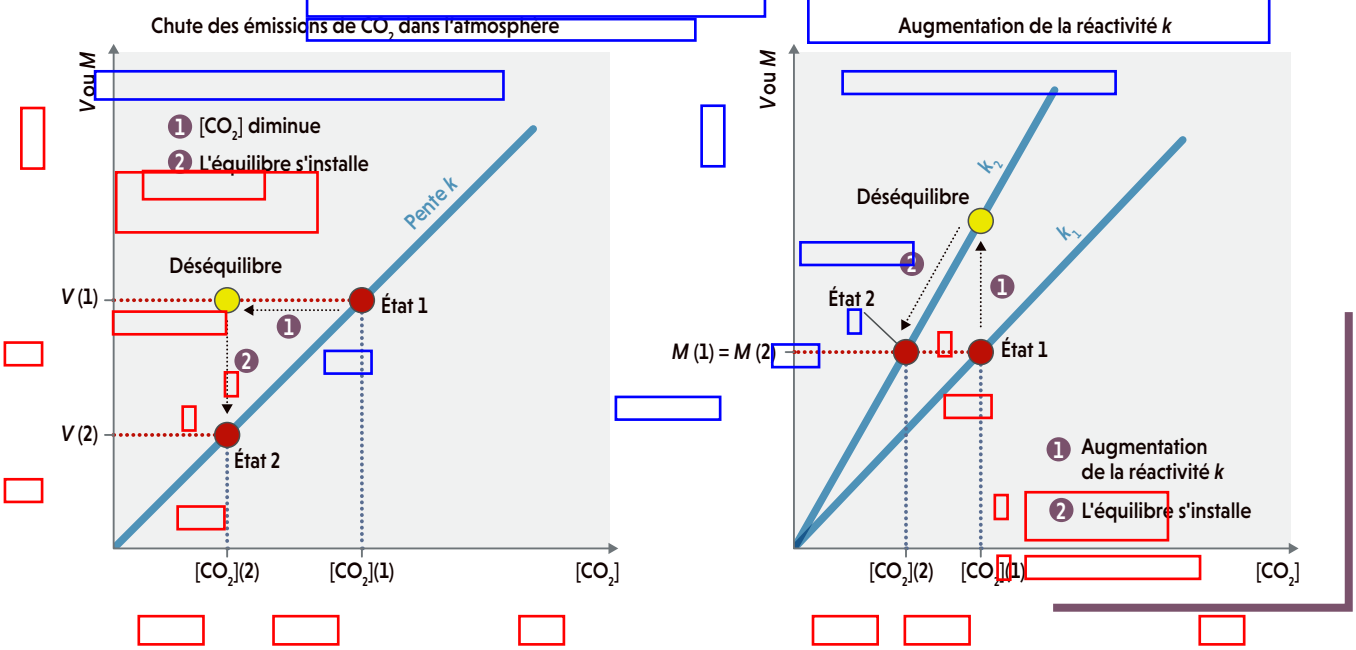
Deux facteurs peuvent perturber cet équilibre : une soudaine augmentation ou diminution des émissions volcaniques, ou une variation dans l'altération chimique des roches >

RÉTROACTION EN GRAPHIQUES

On peut représenter graphiquement la rétroaction due à une modification de l'émission de CO_2 par les volcans ou d'un changement de la réactivité chimique des surfaces terrestres, en considérant l'équation simple $dQ/dt = V - M = V - k[CO_2]$ où dQ/dt représente la variation au cours du temps de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère. Montrons d'abord comment un changement de l'émission V de CO_2 par les volcans modifie $[CO_2]$, la concentration atmosphérique de CO_2, par le biais de la constante de la réaction d'érosion chimique k. À l'équilibre, $dQ/dt = 0$, donc V est égale à M, l'absorption de CO_2 par la météorisation des roches. La grandeur V (ou M) est ici portée sur l'axe vertical des graphiques.

Le graphique de gauche montre le cas d'une baisse de l'émission volcanique V. Le système Terre est alors temporairement déséquilibré, car la concentration atmosphérique $[CO_2]$ diminue *(point jaune)*. L'absorption de CO_2 par la météorisation *(M)* diminue donc, jusqu'à ce que le système soit de nouveau à l'équilibre *(position 2)*, mais à une concentration $[CO_2]$ inférieure, correspondant à la nouvelle valeur de V.

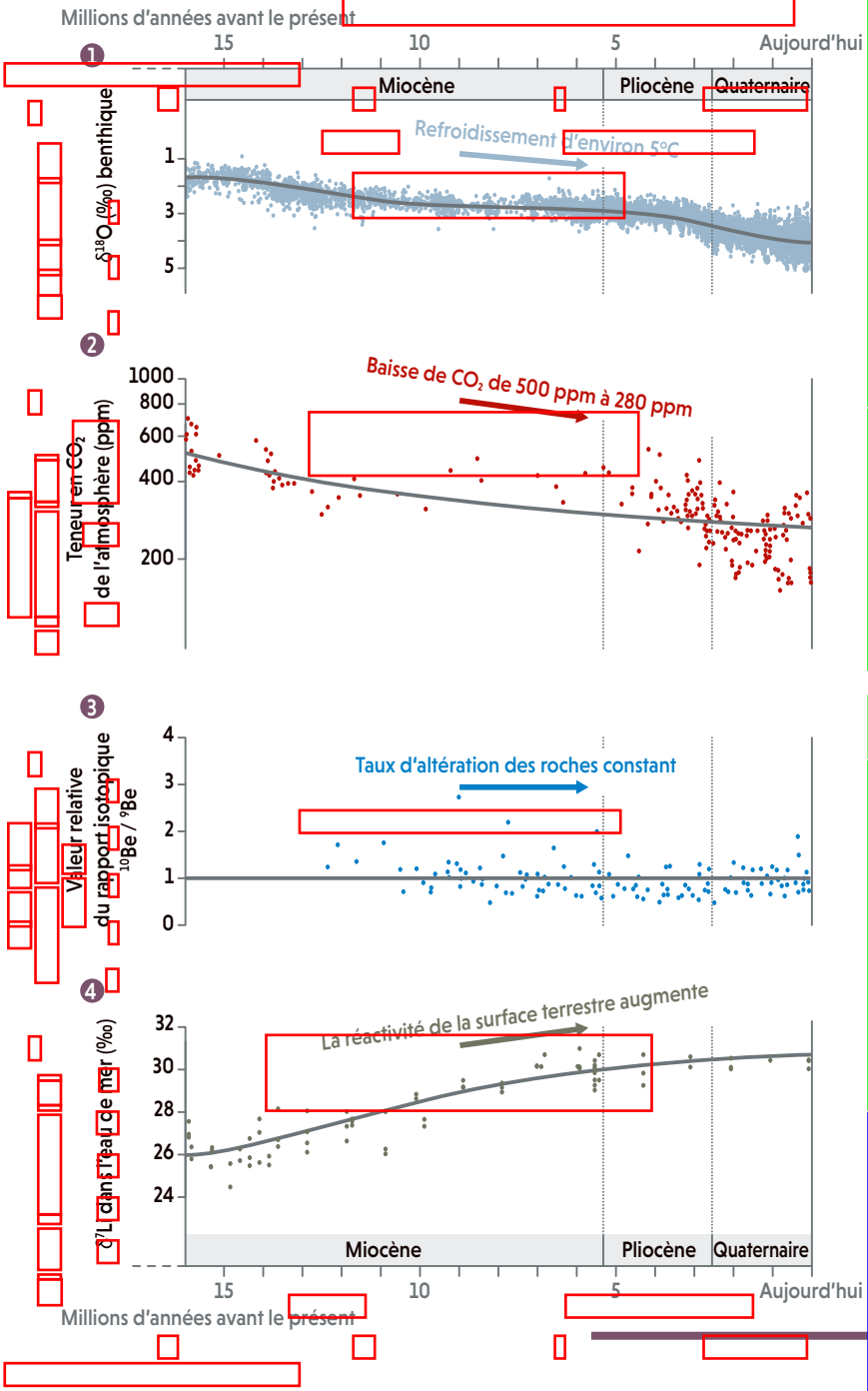
Le graphique de droite montre ce qui se passe lorsque la constante de réaction k augmente, par exemple en raison d'une érosion accrue des roches. La quantité $M = k$ [CO2] devient alors temporairement plus élevée que V *(point jaune)*. Toutefois, l'équilibre sera ici aussi rétabli, parce que la concentration $[CO_2]$ va diminuer de telle façon que, à la fin, règne le même taux d'altération M, mais avec une concentration $[CO_2]$ plus faible.



© Spektrum der Wissenschaft / Emde-Grafik, d'après F. von Blanckenburg, GFZ Potsdam

LES SIGNES DU CHANGEMENT

Au cours des 15 derniers millions d'années, une plus forte rétroaction a fait évoluer la régulation du climat terrestre. 1 Ce dernier s'est refroidi (ce que l'on sait grâce aux isotopes stables de l'oxygène). 2 La concentration atmosphérique de CO_2 a diminué (ce que l'on sait grâce aux isotopes stables du bore). 3 Le taux d'altération des roches silicatées est néanmoins resté constant (ce que nous savons en comparant le rapport passé entre l'isotope ^{10}Be, produit par le rayonnement cosmique, et l'isotope stable ^{9}Be dans les sédiments marins, au rapport actuel $^{10}Be/^{9}Be$ dans l'eau de mer, qui est de l'ordre de 10^{-7}). 4 Pour autant, la réactivité chimique de la surface terrestre a augmenté (ce que nous savons grâce aux isotopes stables du lithium).



> silicatées. Si, par exemple, les émissions volcaniques diminuent, la concentration atmosphérique de CO_2 baisse. Cela fait diminuer l'altération des roches, qui absorbe alors moins de CO_2, jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre s'instaure, avec une concentration atmosphérique de CO_2 inférieure à la concentration initiale (*voir l'encadré page 69*). Comme indiqué plus haut, la durée d'un état d'équilibre est de l'ordre de 250 000 ans.

Au cours de son histoire, la Terre a connu de telles évolutions du CO_2 atmosphérique. Nous savons par exemple qu'au début de l'Éocène, il y a 52 millions d'années, notre planète était environ 10 °C plus chaude qu'à la fin de l'Éocène, il y a 35 millions d'années, et que l'atmosphère contenait alors environ 3 000 parties par million, ou ppm, de CO_2. En revanche, à l'époque préindustrielle, le niveau de CO_2 était faible : 280 ppm. En fait, au cours des 15 derniers millions d'années, la température moyenne mondiale a, globalement, diminué régulièrement ; elle a baissé d'environ 3 °C au cours des 5 derniers millions d'années. En conséquence, il y a 2,5 millions d'années, d'énormes calottes glaciaires ont commencé à se former périodiquement dans l'hémisphère Nord : ce sont les « glaciations quaternaires ».

Un vif débat se poursuit depuis plus de vingt ans sur les raisons de ce long refroidissement. Selon la théorie qui a le plus de partisans, la formation de grandes montagnes telles que l'Himalaya, les Andes ou les Alpes aurait entraîné une augmentation globale de la météorisation des roches silicatées. La quantité de CO_2 atmosphérique aurait alors diminué, et l'atmosphère se serait refroidie.

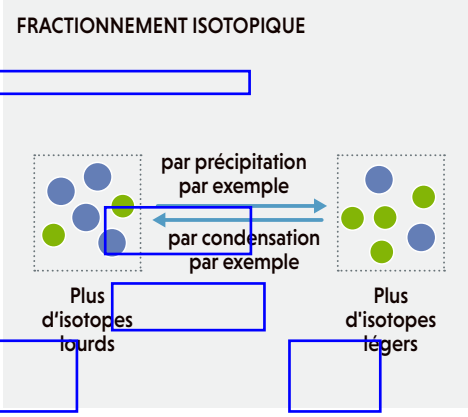
UNE FAILLE DANS LA THÉORIE DOMINANTE

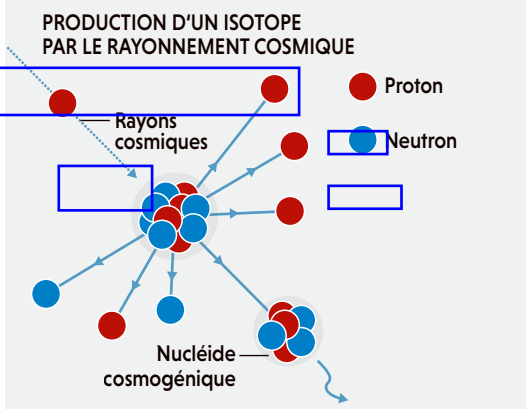
Cependant, en 1997, les géochimistes américains Robert Berner et Ken Caldeira ont attiré l'attention sur une faille majeure dans cette théorie : ils ont montré qu'une évolution aussi considérable de la météorisation des roches aurait très vite déséquilibré le fragile bilan du CO_2, les émissions volcaniques étant restées au même niveau. Dans cette hypothèse, il ne devrait pratiquement plus rester de CO_2 dans l'atmosphère et une Terre « boule de neige » aurait dû se former. Or cela ne s'est pas produit.

Pour comprendre où se niche le problème dans ce raisonnement, il faut savoir ce qui s'est déroulé dans l'atmosphère et à la surface terrestre au cours des 15 derniers millions d'années. Pour se renseigner sur l'histoire climatique, les géologues étudient les archives sédimentaires. Ils recherchent des dépôts d'âges connus, puis en extraient des informations sur des grandeurs physiques caractérisant les climats passés : température de surface, >

© Spektrum der Wissenschaft / Emde-Grafik, modifié d'après J. K. Caves Rugenstein et al., Nature, vol. 571, pp. 99-102, 2019, fig. 1

RAPPORTS ISOTOPIQUES ET PASSÉ GÉOLOGIQUE





Les caractéristiques du système Terre actuel telles que la température, la concentration atmosphérique de CO_2 ou les taux d'érosion et de météorisation de la surface terrestre se mesurent directement. Afin de reconstituer ces informations pour le passé géologique, les chercheurs doivent disposer de mesures sur des grandeurs constituant des indices indirects. Les rapports des abondances de certains isotopes constituent de tels indicateurs (les isotopes d'un même élément chimique ne diffèrent que par la masse de leurs atomes).

LE THERMOMÈTRE $^{18}O/^{16}O$

Le rapport des isotopes stables de l'oxygène ^{18}O et ^{16}O augmente au fur et à mesure que l'eau se refroidit. En effet, les abondances des deux isotopes changent lorsque l'eau s'évapore – c'est le phénomène de fractionnement isotopique *(ci-dessus à gauche)*. L'isotope ^{16}O, plus léger, s'évapore davantage que ^{18}O, même si cela ne s'exprime qu'en dix millièmes dans le rapport isotopique. À mesure que la Terre se refroidit, davantage de précipitations sont piégées dans les masses glaciaires continentales croissantes. La glace est ainsi plus riche en ^{16}O que l'eau des océans. L'oxygène contenu dans les coquilles calcaires de foraminifères benthiques – des microorganismes marins morts qui vivaient au fond des océans – indique les fluctuations du rapport $^{18}O/^{16}O$ dans l'eau de mer. Il indique aussi la température de l'eau directement, car les isotopes de l'oxygène entrent plus ou moins dans leur composition selon la température de l'eau. Les fluctuations indiquent à leur tour les changements de la température de l'eau et aussi des masses de glace, et donc de la température de l'atmosphère, dans le passé. Comme les variations des rapports isotopiques sont très faibles, elles sont données en parties pour mille (‰) par rapport à un matériau de référence, en l'occurrence l'eau de mer pour le rapport isotopique de l'oxygène. Plutôt que le rapport $R = {}^{18}O/{}^{16}O$ lui-même, on utilise ainsi la grandeur notée $\delta^{18}O$ et définie par : $\delta^{18}O = (R_{\text{échantillon}}/R_{\text{référence}} - 1) \times 1\,000$.

LE RAPPORT $^{11}B/^{10}B$, INDICATEUR DU CO_2 ATMOSPHÉRIQUE

Le bore (B) dissous dans l'eau forme divers composés dont les abondances relatives varient en fonction de l'acidité de l'eau de mer. Le rapport isotopique $^{11}B/^{10}B$ varie aussi selon le composé. Les foraminifères incorporent de petites quantités d'un des composés du bore dissous dans l'eau. Ainsi, le rapport $^{11}B/^{10}B$ dans les coquilles de foraminifères dépend de l'acidité de l'eau de mer. Or plus il y a de dioxyde de carbone dans l'air, plus celui-ci se dissout sous forme d'acide carbonique dans l'eau, et plus l'eau est acide. *Via* le rapport $^{11}B/^{10}B$, les coquilles calcaires des sédiments anciens renseignent ainsi sur la teneur en CO_2 de l'atmosphère de l'époque.

LE RAPPORT $^{10}Be/^{9}Be$, INDICATEUR DE L'ALTÉRATION CHIMIQUE

Le béryllium (Be) est un élément dont un seul isotope est naturellement présent sur Terre : le ^{9}Be. L'isotope ^{10}Be, plus lourd, est en revanche « cosmogénique », c'est-à-dire qu'il est constamment produit en très petites quantités par le rayonnement cosmique dans l'atmosphère et à la surface de la Terre *(ci-dessus à droite)*. Comme le ^{10}Be est radioactif, avec une demi-vie de 1,4 million d'années, cet isotope n'existe pas à l'intérieur de la Terre, puisque celle-ci est beaucoup plus ancienne. Cependant, lorsque la pluie tombe sur les océans ou les continents, du ^{10}Be frais s'y accumule. On connaît assez précisément le nombre d'atomes ^{10}Be qui arrivent à la surface de la Terre chaque année. L'isotope stable ^{9}Be, en revanche, est libéré lors de l'altération des roches et se retrouve dans les océans en petites quantités *via* les rivières, où il se mélange avec le ^{10}Be. Plus le taux mondial d'altération des roches silicatées est élevé, plus le rapport $^{10}Be/^{9}Be$ est faible dans l'eau océanique, dont les deux isotopes sont déposés dans les sédiments des profondeurs. En les y mesurant et en tenant compte de la désintégration naturelle du ^{10}Be, on obtient le taux d'altération des continents au moment du dépôt des sédiments. L'auteur et son équipe ont récemment développé cette méthode dans leur laboratoire, afin de déterminer les taux de météorisation passés et présents.

LE RAPPORT $^{7}Li/^{6}Li$, INDICATEUR DE LA RÉACTIVITÉ DE LA SURFACE TERRESTRE

Quand la météorisation désagrège les roches, les isotopes stables du lithium ^{7}Li et ^{6}Li qu'elles contiennent entrent dans l'eau remplissant les pores de la roche altérée. À partir de cette eau interstitielle se forment des minéraux argileux, qui sont une composante importante de tous les sols. Ce faisant, ils absorbent préférentiellement le ^{6}Li par fractionnement isotopique (15 millièmes de plus que le ^{7}Li). L'eau interstitielle est donc appauvrie en ^{6}Li. Plus les minéraux d'origine sont présents (surface terrestre réactive), plus il y a formation de minéraux argileux, et plus le rapport $^{7}Li/^{6}Li$ de l'eau interstitielle est élevé. Au contraire, plus les minéraux d'origine sont rares (surface terrestre peu réactive), moins il y aura formation de minéraux argileux absorbant préférentiellement le ^{6}Li, et plus le rapport $^{7}Li/^{6}Li$ de l'eau interstitielle est faible. *Via* les eaux souterraines, ce lithium atteint les rivières puis les océans, où il se mélange avec le lithium contenu dans les eaux chaudes issues des sources hydrothermales des dorsales océaniques. Cet élément est aussi incorporé dans les coquilles calcaires marines en quantités infimes. En définitive, le rapport $^{7}Li/^{6}Li$ mesuré dans les coquilles calcaires indiquera donc la réactivité de la surface terrestre à l'époque de leur sédimentation.

TECHNIQUES DE MESURE

Les rapports isotopiques sont mesurés par spectrométrie de masse. Pour déterminer le rapport $^{18}O/^{16}O$, les coquilles de calcaire sont dissoutes directement sur le spectromètre de masse en phase gazeuse et le CO_2 libéré est mesuré. Les rapports $^{11}B/^{10}B$ et $^{7}Li/^{6}Li$ sont mesurés sur un instrument spécial, un spectromètre de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS), après dissolution de l'échantillon et séparation chimique sous forme d'ions (B^+ et Li^+). L'isotope ^{10}Be n'étant présent qu'en petites quantités, il est mesuré après dissolution et séparation chimique sur un spectromètre de masse très sensible, dit « à accélérateur », tandis que l'isotope stable ^{9}Be est mesuré séparément avec un spectromètre optique (ICP ou ICP-MS).

© Spektrum der Wissenschaft / Emde-Grafik, d'après F. von Blanckenburg, GFZ Potsdam

> composition de l'atmosphère par exemple (*voir l'encadré page 70*). La mesure des quantités d'isotopes stables de l'oxygène dans les coquilles calcaires des fonds marins permet par exemple de déterminer indirectement les masses des immenses glaciers qui ont couvert la Terre à plusieurs reprises, et d'en déduire la température moyenne terrestre: comme nous l'avons indiqué, elle n'a cessé de baisser au cours des 15 derniers millions d'années (*voir l'encadré page 71*).

La mesure des quantités d'isotopes stables du bore dans les sédiments océaniques nous a appris par ailleurs que la concentration atmosphérique de CO_2 a diminué au cours des 15 derniers millions d'années. Elle est passée d'environ 550 ppm à 280 ppm au début de l'Holocène, il y a 10000 ans, puis est restée relativement constante jusqu'au début de l'industrialisation, au milieu du XVIII^{e} siècle. Cette baisse de la concentration de CO_2 a été suffisante pour rendre compte du refroidissement.

Pour autant, un nouvel indicateur conçu en 2014 avec mon équipe, le rapport isotopique $^{10}Be/^{9}Be$ du béryllium dans les sédiments océaniques, a posé une nouvelle énigme. D'après cet indicateur, le taux d'altération chimique des roches est resté constant durant les 15 derniers millions d'années de refroidissement (*voir l'encadré page 70*). En outre, grâce aux reconstitutions des mouvements tectoniques, nous savons que les émissions volcaniques n'ont pas diminué pendant la même période.

Dès lors, comment la température et la concentration de CO_2 ont-elles pu diminuer si ni les émissions volcaniques (V) ni le taux de météorisation (M) n'ont changé pendant 15 millions d'années? Jeremy Caves Rugenstein, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, Dan Ibarra, de l'université Stanford, et moi-même avons fait appel au principe de la rétroaction pour proposer, en 2019, l'idée que cela s'explique par une augmentation de la réactivité de la surface terrestre, c'est-à-dire du facteur k figurant dans l'équation différentielle donnée plus haut du bilan de CO_2 atmosphérique (*voir l'encadré page 69, graphique de droite*).

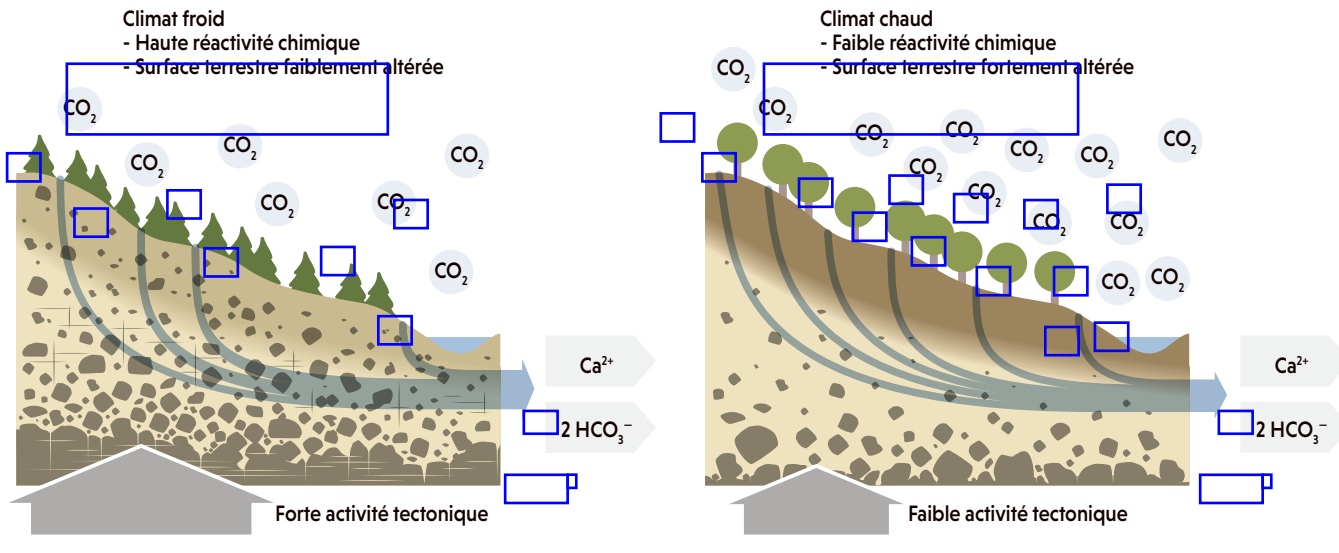
Si, à une concentration de CO_2 donnée, k augmente, l'érosion chimique des roches s'intensifie temporairement, ce qui retire du CO_2 de l'atmosphère; par conséquent, si l'activité volcanique n'augmente pas simultanément, il reste moins de CO_2 atmosphérique disponible pour réagir avec les roches, ce qui ralentit l'altération chimique. On a donc deux tendances simultanées qui s'opposent et, au final, s'instaure un nouvel équilibre au taux d'altération des roches initial (c'est-à-dire à la même valeur $M = k[CO2]$). L'augmentation de la réactivité k a donc fait baisser la concentration de CO_2 atmosphérique.

Ainsi, selon le scénario proposé, l'accroissement initial de la réactivité (le facteur k) a refroidi le climat, même si le taux de météorisation des roches est resté le même. Ce raisonnement explique que pendant 15 millions d'années, la concentration de CO_2 et, donc, la température ont pu baisser, tandis que, comme l'indique le rapport isotopique $^{10}Be/^{9}Be$, le taux d'altération des roches est resté constant.

UNE SURFACE TERRESTRE PLUS OU MOINS RÉACTIVE AU CO_2

Reste une question importante: comment la réactivité k a-t-elle pu changer? Pour y répondre, nous devons nous intéresser à la pellicule la plus externe de la Terre: une couche de terre s'étendant depuis la surface jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur. On la qualifie de «zone critique», car c'est dans cette épaisseur que se déroulent la plupart des

La «réactivité» de la pellicule supérieure terrestre – la zone critique d'altération chimique des roches silicatées – varie. Si le sol contient davantage de minéraux silicatés non altérés, tels que le feldspath ou le mica, il peut réagir chimiquement même avec peu de CO_2 dans l'atmosphère *(à gauche)*, tout comme un sol déjà fortement altéré quand il y a beaucoup de CO_2 dans l'atmosphère *(à droite)*. Dans les deux situations, on peut donc avoir le même taux d'altération chimique des roches silicatées et donc la même quantité de CO_2 retirée de l'atmosphère par intervalle de temps.



© Spektrum der Wissenschaft / Emde-Grafik, nach: F. von Blanckenburg, GFZ Potsdam

LES DEUX CYCLES DU CO_2

Dès 1845, l'ingénieur minier français Jacques-Joseph Ébelmen a compris que le cycle du CO_2 décrit dans cet article est un cycle géologique lent, mais stabilisateur du climat terrestre à long terme grâce aux puits de calcaire océaniques. Ce processus n'élimine de l'atmosphère que 0,1 milliard de tonnes de carbone par an. Le cycle du carbone organique, en revanche, est beaucoup plus important grâce à la photosynthèse : les plantes terrestres retirent de l'atmosphère 60 milliards de tonnes de carbone par an et 90 autres milliards de tonnes par l'échange gaz-eau et par les microorganismes océaniques. Cependant, ce gigantesque cycle du CO_2 est fermé, car le carbone organique est oxydé au même rythme qu'il est fixé par la photosynthèse. C'est pourquoi il n'est pas pris en compte s'agissant du contrôle géologique de la température. Il peut cependant influer sur le bilan de CO_2 atmosphérique si – comme cela a été le cas au Carbonifère (il y a environ 360 à 300 millions d'années) – de grandes quantités de carbone organique sont stockées dans des sédiments et deviennent ensuite du charbon. Représentant aujourd'hui 10 milliards de tonnes de carbone (qui équivalent à 37 milliards de tonnes de CO_2), les émissions massives dues à l'utilisation des combustibles fossiles déséquilibrent aussi le cycle du CO_2 organique.

processus transformant les roches silicatées en sol. Selon les quantités de minéraux présents, la météorisation est plus ou moins active. Les surfaces réactives lient efficacement le CO_2 même en cas de faible teneur atmosphérique, et ont une constante de réaction k élevée; celles qui sont moins réactives ont une plus faible probabilité de réagir avec le CO_2 et une constante k moins élevée.

La réactivité d'une surface est déterminée par la quantité de minéraux « primaires » présents dans la zone critique (*voir la figure ci-contre*) : ces minéraux contenus à l'origine dans la roche sont par exemple le feldspath, la biotite (famille des micas), la hornblende ou le pyroxène. Dans une zone critique réactive, ces minéraux silicatés sont si abondants que même de petites quantités de CO_2 réagissent efficacement, de sorte que la roche s'altère. Il en résulte la formation de minéraux dits « secondaires » et, avec eux, celle du sol. Aujourd'hui, les surfaces terrestres réactives se situent dans les chaînes de montagnes hautes et basses, telles l'Himalaya, les Alpes, les Vosges ou le Massif central, etc., ou dans les zones anciennement gelées d'Europe du Nord ou d'Amérique. Les mouvements tectoniques et un taux d'érosion moyen suffisent à éliminer de la surface suffisamment de minéraux secondaires non réactifs pour qu'il y ait toujours assez de minéraux primaires frais disponibles pour réagir.

Dans une zone d'altération moins réactive, les minéraux primaires « frais » sont en revanche déjà épuisés. À leur place, on trouve principalement des minéraux secondaires qui se sont formés au cours de l'altération des roches, comme les minéraux argileux (kaolinite, illite) ou les oxydes de fer. La météorisation de ces minéraux secondaires exige beaucoup d'eau, de chaleur et de CO_2. On trouve ces surfaces terrestres fortement altérées dans les zones tropicales et tectoniquement inactives d'Afrique, du Brésil ou d'Australie. Il semble que, il y a 15 millions d'années, la plupart des surfaces étaient peu réactives.

Une méthode isotopique relativement nouvelle donne une indication de l'activité passée de la surface terrestre. Comme le lithium (Li) se trouve à l'état de traces dans les roches, il est libéré lors de la météorisation et pénètre dans l'eau interstitielle à partir de laquelle se forment les minéraux argileux. Dans ces derniers, l'isotope ^{6}Li, plus léger, est favorisé. Si plus de minéraux argileux contenant du ^{6}Li sont produits, alors il y a davantage d'atomes de lithium de l'isotope ^{7}Li transportés, *via* les eaux souterraines et les rivières, vers les océans. Il est donc possible d'estimer la réactivité passée de la surface terrestre à partir du rapport isotopique ^{7}Li/^{6}Li des coquilles calcaires des organismes marins ayant sédimenté. De fait, ce rapport isotopique ^{7}Li/^{6}Li a augmenté dans les sédiments océaniques au cours des 15 derniers millions d'années (*voir l'encadré page 70*) ; cela signifie que, en moyenne, la réactivité de la surface terrestre (en d'autres termes la constante k) a régulièrement augmenté dans le monde.

Nous avons estimé qu'à un taux de météorisation constant, un doublement du taux d'érosion pourrait avoir été suffisant pour produire cette réactivité accrue. Au cours des 15 derniers millions d'années, cela a de plus en plus refroidi la Terre et a finalement amorcé l'englaçage de l'hémisphère Nord. Cependant, pour quelle raison le taux d'érosion s'est-il modifié? La question reste ouverte.

UNE RÉGULATION MISE À MAL

Une seule chose est sûre : pendant toute l'histoire de la Terre, le thermostat terrestre a maintenu les conditions climatiques favorables à la vie. Malheureusement, l'une des plus grandes perturbations du délicat cycle géologique du CO_2 est en cours, puisque l'humanité a fait passer la concentration atmosphérique de CO_2 de 280 ppm à plus de 400 ppm depuis 1900. Si nous n'agissons pas immédiatement, nous pourrions avoir une atmosphère à 1000 ppm en 2100 et même 2000 ppm en 2200… Or David Archer, de l'université de Chicago, et Victor Brovkin, de l'institut Max-Planck de météorologie à Hambourg, ont montré en 2008 qu'il faudrait pas moins de 3000 ans pour que la séquestration du dioxyde de carbone dans les océans réduise sa concentration dans l'atmosphère de 1400 ppm à 600 ppm. En d'autres termes, l'humanité doit mettre fin le plus tôt possible à la dangereuse aventure climatique dans laquelle elle s'est lancée. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. K. Caves Rugenstein *et al.*, **Neogene cooling driven by land surface reactivity rather than increased weathering fluxes,** *Nature*, vol. 571, pp. 99-102, 2019.

F. von Blanckenburg et J. Bouchez, **River fluxes to the sea from the ocean's ^{10}Be/^{9}Be ratio,** *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 387, pp. 34-43, 2014.

M. E. Galvez et J. Gaillardet, **Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept,** *Comptes Rendus Géoscience*, vol. 344(11-12), pp. 549-567, 2012.

D. Archer et V. Brovkin, **The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO_2,** *Climatic Change*, vol. 90, pp. 283-297, 2008.

R. A. Berner et K. Caldeira, **The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle,** *Geology*, vol. 26(5), pp. 477-478, 1997.

L'ESSENTIEL

> En 2006, le service de simulation des missiles de MBDA a proposé au musée des Arts et Métiers un énorme calculateur analogique électronique nommé EAI 8800.

> Fabriquée en 1965 aux États-Unis, cette machine a fonctionné pendant près de quarante ans, d'abord dans la conception des centrales nucléaires du CEA et d'EDF, avant de simuler des missiles chez Matra dans les années 1980.

> Son histoire est emblématique de celle des calculateurs analogiques, ces machines qui aidaient les ingénieurs à résoudre des problèmes en les transposant dans des systèmes plus simples à étudier.

> Tombées dans l'oubli avec l'avènement des ordinateurs actuels, elles pourraient connaître un renouveau inspiré du vivant.

L'AUTEUR

CYRILLE FOASSO
ingénieur physicien et docteur en histoire, conservateur des collections d'instruments scientifiques et de mécanique au musée des Arts et Métiers, à Paris

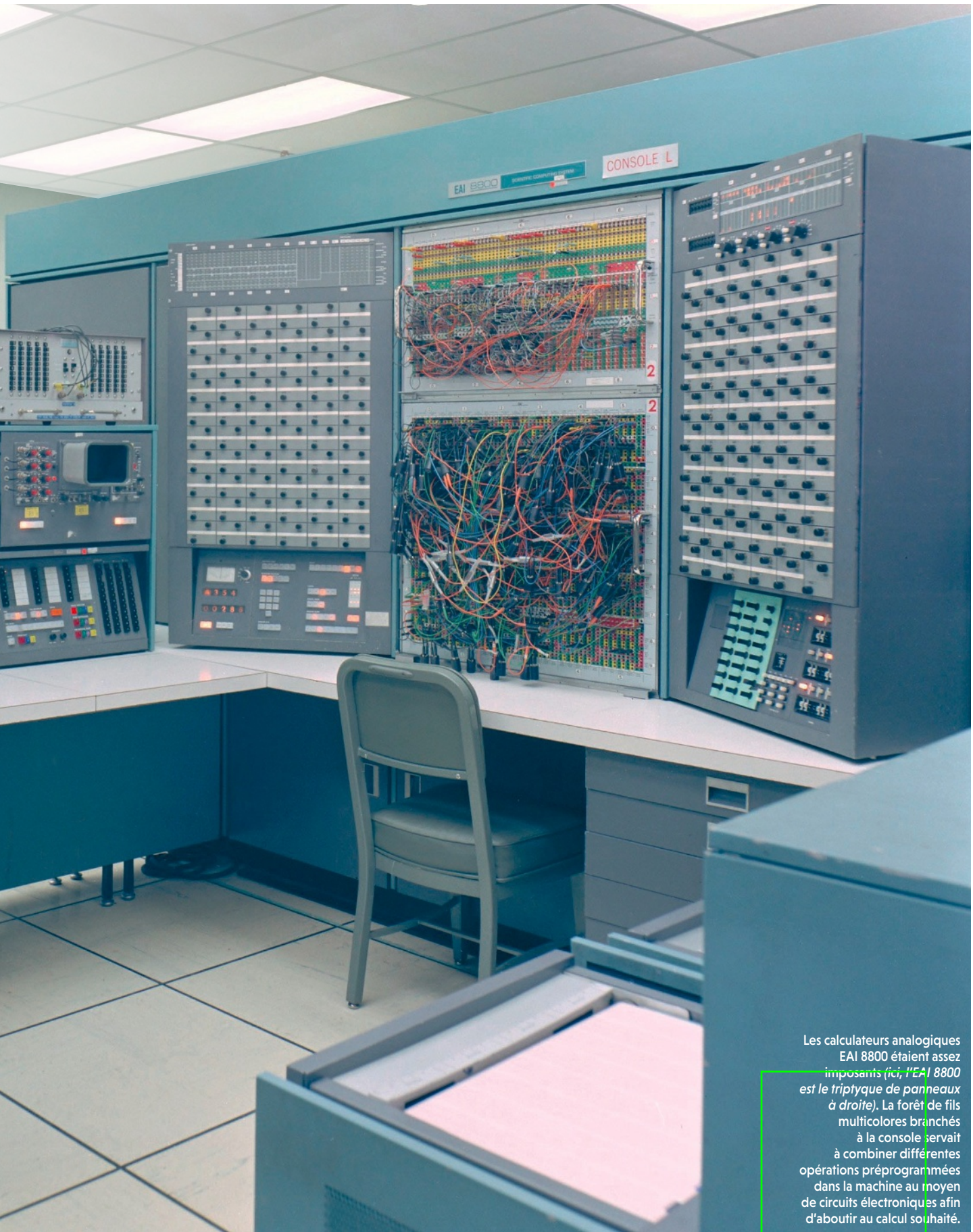
Quand l'informatique était analogique

Ou comment l'EAI 8800, une machine de 3 tonnes vieille de plus de cinquante ans accueillie il y a quelques années au musée des Arts et Métiers, à Paris, témoigne que les prédécesseurs des ordinateurs n'ont pas dit leur dernier mot.

En 2006, à l'occasion d'un déménagement, des ingénieurs du service de simulation des missiles de MBDA (Matra Bae Dynamics Alenia) prirent contact avec le musée des Arts et Métiers (Musée national des techniques) pour savoir s'il serait intéressé par un calculateur analogique des années 1960, une machine imposante de près de 3 tonnes nommée EAI 8800. Le musée reçoit très souvent de telles propositions. Des particuliers, des laboratoires ou des entreprises le joignent sur le mode : « Nous avons ce matériel ancien, est-ce que cela vous intéresse ? Si vous n'en voulez pas, je le jette ! » Ce ne fut pas le cas ici.

Le temps qui nous est accordé pour répondre est parfois très court pour une décision qui engage le futur, d'autant plus que la loi fait qu'un objet, une fois intégré dans le patrimoine d'un >

© Bernd Ulmann, analogmuseum.org



Les calculateurs analogiques EAI 8800 étaient assez imposants (*ici, l'EAI 8800 est le triptyque de panneaux à droite*). La forêt de fils multicolores branchés à la console servait à combiner différentes opérations préprogrammées dans la machine au moyen de circuits électroniques afin d'aboutir au calcul souhaité.

> musée de France, est inaliénable et imprescriptible. Avant le passage devant une commission collégiale qui rend un avis, il a donc fallu évaluer l'intérêt d'une telle machine pour un musée des sciences et des techniques. Un argument majeur était la tradition historique de constitution des collections du musée qui sont déjà très riches en instruments de calcul, de la première machine à calculer mécanique de Blaise Pascal, la Pascaline (1642), jusqu'au superordinateur Cray des années 1980 en passant par les machines analogiques mécaniques du XIXe siècle telles que les intégraphes, les planimètres, le prédicteur de marée de Lord Kelvin (*voir l'encadré ci-dessous*)… L'EAI 8800 pouvait donc s'insérer harmonieusement dans une grande lignée d'inventions liées au calcul.

Mais l'intérêt majeur de cette acquisition était de sortir de l'oubli une technologie qui fut un temps prépondérante dans l'histoire de l'informatique – le calcul analogique électronique – et dont plus personne ou presque ne se souvient, tant la victoire des ordinateurs digitaux semble aujourd'hui incontestable. Il nous a donc semblé important de conserver un exemplaire de ces dinosaures, ces grands calculateurs analogiques vedettes des années 1950 et 1960 que des générations d'ingénieurs ont utilisés et dont l'extinction fut brutale du fait des progrès fulgurants des ordinateurs numériques en matière de rapidité de calcul et de capacité de mémoire. Cette histoire ne devrait pas être seulement celle des vainqueurs, et il est trop rare qu'elle laisse une place aux vaincus. Pourtant, ceux-ci sont tout autant une source d'enseignements.

Au début des années 1950, une photographie des techniques de calcul disponibles révèle d'une part la prééminence des calculateurs analogiques visant à résoudre des problèmes d'hydrodynamique d'écoulement de fluides autour des turbines électriques : des électrodes judicieusement disposées dans une cuve remplie d'eau ou d'huile créaient un champ électrique selon des lois similaires à de nombreux systèmes physiques, qu'il était dès lors plus facile d'étudier à l'aide de ces cuves que sur les systèmes réels ou sur maquette.

Les calculateurs analogiques électroniques, fondés sur l'analogie entre les équations des circuits électroniques et celles des systèmes physiques étudiés, se sont imposés à la fin des années 1940, sonnant le déclin de leurs prédécesseurs mécaniques.

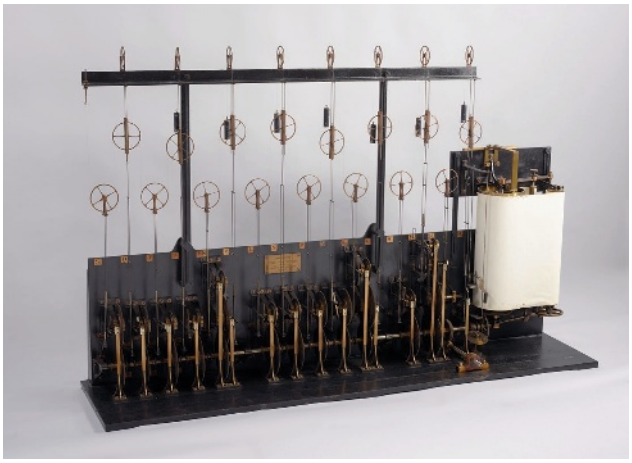
QUELQUES PRÉCURSEURS MÉCANIQUES

Les calculateurs analogiques, machines construites pour résoudre des problèmes en les transposant dans un système plus simple à étudier, ont d'abord été mécaniques. Entre le milieu du XIXe siècle et le milieu du siècle suivant, de nombreux types de planimètres et intégraphes ont été imaginés pour effectuer des opérations spécifiques telles que le calcul de surfaces (l'intégration) sous des courbes obtenues expérimentalement et dont on ne connaît pas les équations (comme le calcul du travail d'un moteur à partir d'un diagramme montrant la pression en fonction du déplacement du piston). Le calcul s'effectuait en faisant suivre le tracé d'une courbe par le curseur de l'un des bras articulés de l'appareil. Selon les modèles, le mouvement du curseur était combiné au déplacement d'une roulette sur un cylindre, d'une sphère sur un disque, ou encore un cône, lequel, grâce à la géométrie de la machine, calculait l'aire de la surface sous la courbe.

Conçu dans les années 1880, le prédicteur de marée de Lord Kelvin *(ci-contre)* est une machine imposante, entièrement mécanique. Il est considéré comme le premier calculateur analogique, qui aurait inspiré tous les suivants. L'appareil repose sur la théorie que le mathématicien Joseph Fourier a formulée au début du XIXe siècle, selon laquelle un signal périodique (l'onde de marée) est une somme de fonctions sinusoïdales (des harmoniques). L'idée était d'obtenir, à partir des caractéristiques de ces fonctions sinusoïdales, les courbes des marées pour les années à venir. Avant de l'utiliser, on déterminait donc, à l'aide d'une autre machine inventée par le physicien britannique William Thomson (mieux connu aujourd'hui sous le nom de Lord Kelvin) – un analyseur de marées –, les amplitudes de chaque fonction sinusoïdale à partir d'enregistrements des courbes annuelles des marées d'un port donné. Puis on les « injectait » dans le prédicteur de marée.

L'appareil est constitué de différentes poulies reliées par un fil et fixées à un engrenage *(en bas)*. Chaque poulie correspond à une fonction sinusoïdale, dont l'amplitude est indiquée par la distance de la poulie à l'engrenage. Une manivelle actionne l'engrenage, lequel est conçu de telle façon qu'au niveau de chaque poulie, il transforme sa rotation en un mouvement sinusoïdal vertical qui simule la fonction correspondante. Le dispositif combine ainsi toutes les fonctions sinusoïdales en les additionnant, et un curseur trace sur un rouleau, lui aussi en rotation, le signal obtenu, qui n'est autre que la courbe de marée recherchée.

Au cours des années 1920, les calculateurs analogiques mécaniques dits « analyseurs différentiels » connurent un grand succès dans le domaine militaire, en particulier dans les défenses antiaériennes pour le tir sur cibles mouvantes, avec la nécessité d'opérer en temps réel. L'entre-deux-guerres a aussi vu apparaître des « cuves rhéographiques », des



Un prédicteur de marée de Lord Kelvin.

© Musée des Arts et Métiers-Cnam/photo Pierre Ballif

techniques analogiques et, d'autre part, les balbutiements des technologies numériques. C'est indiscutable : quand, au milieu des années 1950, un industriel souhaitait concrètement entrer dans le « calcul électronique », il devait s'équiper en « analogique » et non en « numérique ».

Pour se lancer dans le calcul électronique, il fallait s'équiper en analogique

Il faut dire qu'à l'époque, les outils de calcul analogique des industriels étaient encore essentiellement mécaniques : il s'agissait de trouver les solutions d'un problème en construisant un système mécanique analogue, c'est-à-dire décrit par des équations similaires, et pour lequel les mesures étaient plus simples et moins coûteuses. Mais quand, au tournant des années 1950, les amplificateurs opérationnels ont été inventés et ont commencé à être produits en série, les industriels se sont massivement tournés vers le calcul électronique. De fait, constitués à l'époque de tubes électroniques (des électrodes placées dans un tube sous vide), ces dispositifs capables d'amplifier le signal électrique reçu en entrée offraient un moyen simple d'effectuer des opérations mathématiques comme l'addition, la soustraction, l'intégration et la dérivation, ce qui simplifiait considérablement les modélisations. C'est donc le choix que firent EDF et le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) en 1955, aux débuts de l'industrialisation de l'énergie atomique en France.

L'AVÈNEMENT DES CALCULATEURS ÉLECTRONIQUES

EDF passa ainsi commande à la SEA, la Société d'électronique et d'automatisme, d'un analyseur différentiel, un calculateur électronique fondé sur des amplificateurs à courant continu. C'est sur cette machine que, peu après, fut réalisée pour la première fois en France la simulation cinétique d'un réacteur nucléaire. La même année, le CEA créa à Saclay, en banlieue parisienne, un laboratoire de calcul analogique au sein de son service des constructions électriques. Le laboratoire s'équipa d'abord d'une machine comprenant trente amplificateurs – c'est ce nombre qui détermine la puissance de calcul de ces machines –, puis de deux nouvelles, puis, en 1957, de quatre machines de type « Djinn », produites par la société française Derveaux ; il acheta également des machines de la SEA. Du matériel français – on insistait sur ce point à l'époque – dont le coût s'élevait à 25 millions de francs. Ces machines permettaient de tracer plusieurs milliers de courbes, solutions des équations différentielles étudiées.

Dans le domaine nucléaire, les machines analogiques étaient utilisées pour étudier la stabilité, la régulation et la sécurité des réacteurs : les ingénieurs cherchaient à savoir quelles seraient les réponses du réacteur aux perturbations ou aux éventuels accidents. Pour cela, il leur fallait déterminer un modèle mathématique qui représente de façon convenable le fonctionnement du réacteur (équations relatives aux comportements neutroniques et thermiques) et de ses auxiliaires (échangeurs, réfrigérants, groupes tournants, organes de régulation). Chaque sous-partie était ensuite testée par des expérimentations sur machine réelle, ce qui permettait d'obtenir un modèle mathématique global de l'installation. Les ingénieurs pouvaient alors, enfin, mener des essais de sécurité sur la machine analogique, essais très spectaculaires puisqu'il était permis d'effectuer toutes les manœuvres interdites dans la réalité et de simuler tous les incidents susceptibles d'avoir lieu.

À partir de 1958, les études analogiques de Saclay furent menées sur des calculateurs américains EAI 231R, plus précis et plus fiables que les matériels français (*voir la photo pages 78 et 79*). Le laboratoire disposait alors au total de 260 amplificateurs, 450 potentiomètres manuels, 40 multiplieurs… Dès le début des années 1960, le programme du Centre de calcul analogique de Saclay fut très chargé. Un second laboratoire fut donc créé en 1962 sur le site du CEA de Cadarache, près d'Avignon, lui aussi équipé d'EAI 231R.

De fait, dans ces années, l'entreprise Electronic Associates Inc. (EAI), dans le New Jersey, qui construisait l'EAI 231R, est devenue la principale productrice de calculateurs analogiques. Fondée en 1945 par des ingénieurs du Corps des communications de l'armée américaine, EAI avait fourni à la société Westinghouse, dès 1953, un calculateur pour la conception du Nautilus, le premier sous-marin à propulsion nucléaire. Elle avait connu ensuite un succès commercial considérable avec un client très important, la Nasa, pour le développement des lanceurs spatiaux et des satellites. Son succès était tel qu'au début des années 1960, EAI installa à Bruxelles un centre européen de calcul analogique, où de nombreux ingénieurs vinrent se former au calcul analogique électronique.

Mais, concrètement, qu'est-ce qu'un calculateur analogique électronique ? Le nom de ces >

> machines provient du fait qu'elles fonctionnent sur le principe d'une analogie entre les variables du problème à étudier et celles d'un système physique connu, régi par les mêmes lois. Typiquement, la dynamique des systèmes mécaniques, aérodynamiques, hydrauliques, acoustiques est régie par les mêmes équations que des systèmes électriques comportant des résistances, des capacités ou des inductances (*voir le schéma page 80*). Ces systèmes peuvent alors être analysés de façon plus simple en travaillant sur leur analogue électrique.

Sur le plan matériel, un calculateur analogique électronique est un ensemble d'opérateurs élémentaires (sommateurs, intégrateurs, multiplieurs, générateurs de fonctions, etc.), qu'il est possible de connecter entre eux par l'intermédiaire d'un panneau de câblage. Les connexions entre ces opérateurs constituent le système physique qui est l'analogue recherché. Les grandeurs des phénomènes physiques sont représentées par des signaux électriques continus – des tensions comprises entre ±100 volts dans le cas de l'EAI 8800, par exemple. Ce calculateur comporte ainsi des milliers de racks de fonctions précâblées, que l'on relie entre eux sur la console de pilotage (4800 racks effectuant des fonctions analogiques et 2400 racks effectuant des opérations logiques).

UNE GRANDE RAPIDITÉ DE CALCUL

Au cours des années 1950 et 1960, les machines analogiques électroniques sont apparues comme incontournables pour les ingénieurs, car elles offraient la possibilité de simuler de nombreux systèmes physiques expérimentaux et industriels dont ils savaient décrire l'évolution au cours du temps au moyen d'équations différentielles linéaires ou non, mais pour lesquelles les mathématiques n'apportaient pas de solution analytique (c'est-à-dire exprimée sous forme compacte à l'aide de fonctions connues).

Grâce à ces calculateurs, on était capable de prévoir le comportement de ces systèmes, mais aussi de proposer des solutions optimisées: ils étaient une aide tant à la compréhension qu'à la conception. On les utilisait aussi comme simulateurs d'entraînement, en particulier lorsque la dynamique du temps réel imposait que les calculs soient exécutés à très grande vitesse. Comme ces machines effectuaient les calculs en parallèle, elles étaient capables de résoudre des systèmes de plusieurs dizaines d'équations différentielles non linéaires simultanément et d'en donner un résultat visible soit sous la forme de courbes tracées sur un enregistreur, soit sous celle d'un signal lumineux sur un oscilloscope.

Cette rapidité de calcul et cette interface «conviviale» étaient, au début des années 1960, les principaux avantages de ces calculateurs par rapport aux «calculatrices arithmétiques», les ordinateurs numériques ou binaires de l'époque qui, par comparaison, travaillaient en *batch*: il fallait leur livrer une pile de cartes perforées et attendre le résultat, qui ne parvenait que plusieurs heures plus tard, là où les calculateurs analogiques donnaient un résultat en quelques secondes.

Un autre avantage de ces machines était leur câblage – leur programme, en quelque sorte. Certes, il était long à réaliser, mais une fois effectué, il était très facile de faire varier les paramètres, les coefficients, le temps, et l'on pouvait simuler en direct (en temps réel) les solutions des systèmes d'équations, ou encore accélérer un phénomène qui, dans la réalité, aurait duré plusieurs heures ou dizaines d'heures et le visualiser en quelques minutes. À l'inverse, il était aussi possible de ralentir un événement très rapide (une explosion, par exemple) pour en comprendre l'évolution. Le monde analogique était un monde très physique, très visuel, qui «parlait» aux ingénieurs. Les machines analogiques fonctionnaient comme de véritables modèles réduits, où l'on lisait directement la valeur des grandeurs physiques simulées.

En revanche, ils présentaient un inconvénient: le manque de précision. La nature physique du signal analogique conduisait à une perte d'information à chaque passage par un opérateur élémentaire, car, le plus souvent, celui-ci était un composant électrique, dont la précision n'est pas infinie. C'est ce qui explique l'importance de la qualité de réalisation de ces composants, tels les amplificateurs ou les

L'unité de base du calculateur EAI 231R *(la partie devant laquelle un homme est assis)* était rarement utilisée seule. Dans les années 1960, pour augmenter leurs capacités de calcul, les ingénieurs non seulement couplaient plusieurs EAI 231R étendus *(deux ici)*, mais aussi leur associaient des dispositifs annexes tels que des générateurs de fonction, des multiplieurs, une imprimante et un système automatique numérique d'entrée et sortie des données muni d'une machine à écrire *(à droite)*.

© Avec l'aimable autorisation du Computer History Museum

potentiomètres servocommandés, des dispositifs qui servaient à introduire dans la simulation les coefficients des équations. Tous ces éléments présentaient un coût élevé. Les câbles de connexion, par exemple, portaient des embouts en or pour limiter les faux contacts. Typiquement, dans les années 1960, chaque composant avait une précision de l'ordre de 1 pour 10000 (soit 10^{-4}) et la précision finale pouvait être de l'ordre de 1 % (10^{-2}) ou 1 pour 1000 (10^{-3}). Ces chiffres peuvent prêter à sourire quand on compare aux précisions des ordinateurs actuels, mais ils n'étaient pas gênants à l'époque, car les modèles mathématiques représentant les systèmes physiques n'étaient guère plus précis.

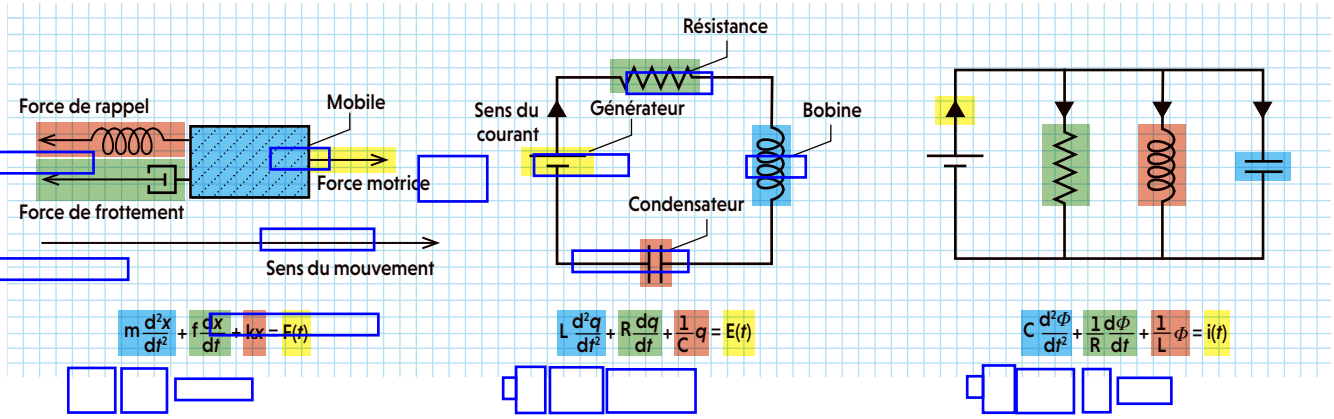
> **Le monde analogique était très physique, visuel, ce qui parlait aux ingénieurs**

À la différence d'autres machines analogiques principalement utilisées pour la régulation ou les automatismes industriels – des systèmes fermés dédiés à une application spécifique comme la régulation de la température d'une machine, de la vitesse de rotation d'un moteur ou du débit d'une pompe –, les calculateurs analogiques de type EAI étaient appelés « calculateurs universels », car ils permettaient de traiter des problèmes variés à l'aide de leurs montages électriques adaptés et changeables.

LES CALCULATEURS HYBRIDES : UN COURT RÉPIT

Malgré cet « universalisme », dès la fin des années 1950, les ingénieurs ont constaté un certain nombre de limitations aux calculateurs analogiques : de nouveaux problèmes à résoudre nécessitaient, par exemple, l'utilisation de mémoires qui permettraient de stocker les résultats de calculs. On cherchait aussi à améliorer ces machines de diverses façons. Ainsi, une piste envisagée à la fin des années 1960 consistait à programmer et automatiser les interconnexions électriques, afin de gagner du temps sur les interconnexions faites de façon manuelle, qui étaient un facteur limitant du calcul analogique.

Certains ingénieurs – utilisateurs ou promoteurs des techniques analogiques – ressentaient également le manque de théoriciens mathématiciens dans le champ du calcul analogique, resté un domaine d'ingénieur. Ils constataient que dans le champ du calcul numérique, on redécouvrait des méthodes de résolution d'équation mises au point par des mathématiciens de la fin du XIX^{e} siècle et du début du XX^{e} (comme les méthodes de Runge-Kutta de résolution d'équations différentielles par itérations successives) qui se révélaient parfaitement adaptées aux premiers ordinateurs et à leurs >



> mémoires de faible capacité. Dans ce domaine numérique, les progrès concernant la taille des mémoires et la vitesse de calcul des machines allaient de pair avec les avancées théoriques mathématiques et algorithmiques.

C'est pourquoi, dès la fin des années 1950, devant les progrès des ordinateurs numériques, les industriels ont commencé à envisager de coupler les techniques analogique et numérique pour bénéficier des avantages de l'une et de l'autre : précision illimitée (ou presque) pour les calculateurs numériques, rapidité, simplicité de programmation et souplesse de calcul pour les calculateurs analogiques. Cette évolution conduisit les constructeurs à proposer des calculateurs dits « hybrides ».

Fabriquée à partir de 1965, la machine EAI 8800, analogique, a ainsi été d'emblée conçue pour être utilisable soit seule, soit couplée à un ordinateur numérique. Entre 1965 et 1970, le CEA, comme d'autres industriels, a peu à peu remplacé ses équipements EAI 231R par des calculateurs hybrides EAI 8900 comportant des unités analogiques 8800 et une unité numérique 8400 (32 000 mots de mémoire avec 32 bits par mot et une interface ayant 32 canaux de conversion). Toutes ces machines étaient interconnectables et offraient la possibilité de traiter des problèmes nécessitant plus de 500 amplificateurs.

Au début des années 1970, tous les grands industriels disposaient de centres de calcul analogique. On en dénombrait 75 en France, dans la chimie, l'aéronautique… Pourtant, c'était déjà le chant du cygne de cette technologie, et les calculateurs hybrides n'ont fait que retarder de quelques années le passage au numérique.

UNE DEUXIÈME VIE CHEZ MATRA DÉFENSE

Mais revenons à notre calculateur EAI 8800. Fabriqué en 1965, il a fait partie de ces machines hybrides qui ont remplacé les équipements E 231R au CEA. Jusqu'au début des années 1970, il a rendu de bons et loyaux services au CEA et à EDF dans la conception des centrales nucléaires. Puis on perd sa trace au milieu des années 1970, mais on le retrouve dans la division défense de Matra, au milieu des années 1980, où il a été utilisé pour la conception de missiles air-air, comme me l'a raconté Philippe Longis, chef en 2006 du département Modélisation et simulation de MBDA.

Au début des années 1980, en effet, la complexité croissante des missiles, avec notamment l'introduction des calculateurs de vol embarqués numériques, a conduit les constructeurs de missiles comme Matra à deux évolutions importantes. D'une part, ils se sont mis à développer les simulations numériques, qui sont devenues alors un outil prépondérant pour les études de développement, les algorithmes embarqués, la préparation des tirs et l'évaluation des performances du système. D'autre part, les fabricants de missiles ont dû se doter de moyens de simulation en temps réel permettant de tester des équipements réels de missiles (autodirecteurs, calculateurs embarqués, détecteurs inertiels…) dans un environnement représentatif d'un tir. C'est là que sont intervenus, grâce à leur rapidité de calcul, les calculateurs analogiques électroniques, dont notre EAI 8800.

Dès le début des années 1980, Matra a créé un « laboratoire de simulation avec éléments réels ». Il faut se représenter le missile sur un banc d'essai, connecté au calculateur, tout comme la cible à atteindre. Le calculateur devait réagir aux mouvements de la cible en temps réel pour adapter le vol du missile. Le laboratoire comportait des simulateurs de cible (soit électromagnétiques, soit infrarouges), des simulateurs de mouvements (des simulateurs hydrauliques recréant les mouvements de lacet, tangage et roulis) et des calculateurs effectuant la simulation du vol de missile (aérodynamique, équations de la dynamique du vol, cinématique…). Ces essais étaient réalisés au sol, en laboratoire, et permettaient de valider les matériels de vol dans un grand nombre de tests en environnement virtuel.

À cette époque, les performances des calculateurs numériques ne permettaient pas encore de faire tourner en temps réel ces

PROBLÈMES ANALOGUES

Imaginez un mobile de masse *m* soumis d'une part à une force motrice et, d'autre part, à une force de frottement proportionnelle à sa vitesse et à une force de rappel proportionnelle à son déplacement *x* *(à gauche)*. L'équation de son mouvement est alors équivalente à celle de la charge électrique *q* en fonction du temps dans un circuit électrique comportant une résistance, une bobine et un condensateur en série *(au centre)*. Quand le circuit est en parallèle *(à droite)*, une telle équivalence existe aussi à condition d'utiliser comme variable non plus la charge, mais l'intégrale Φ de la tension par rapport au temps.

Publicité de l'entreprise Derveaux, spécialisée dans la construction de calculateurs analogiques dans les années 1950, parue dans le magazine *L'Onde électrique* en 1956.

© L'Onde électrique, août-sept. 1956, avec l'aimable autorisation de la Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication; en bas: © Pour la Science

simulations. C'est pour cette raison que Matra a choisi un calculateur analogique, où tous les éléments de calcul travaillent en parallèle, et dont le fonctionnement était celui du monde continu que l'on cherchait à simuler. Un calculateur « temps réel » par nature, en somme.

Le calculateur EAI 8800 a été connecté à différentes générations de calculateurs numériques. Leur rôle était notamment de gérer les interfaces avec les éléments réels, qui comportaient de plus en plus d'éléments numériques. Les calculs les plus rapides (dynamiques notamment), eux, restaient l'apanage des calculateurs analogiques.

L'EAI 8800 a permis le développement du missile Super 530 D, le premier missile hybride, avec calculateur embarqué numérique et analogique, et participé au début de celui du missile Mica. Dans les années 1990, les calculateurs numériques n'étaient toujours pas suffisants pour la simulation du dernier modèle, le Mistral. Par la suite, l'EAI 8800 a été associé à une autre génération de calculateur analogique, le Simstar, à câblage automatique des éléments de calculs.

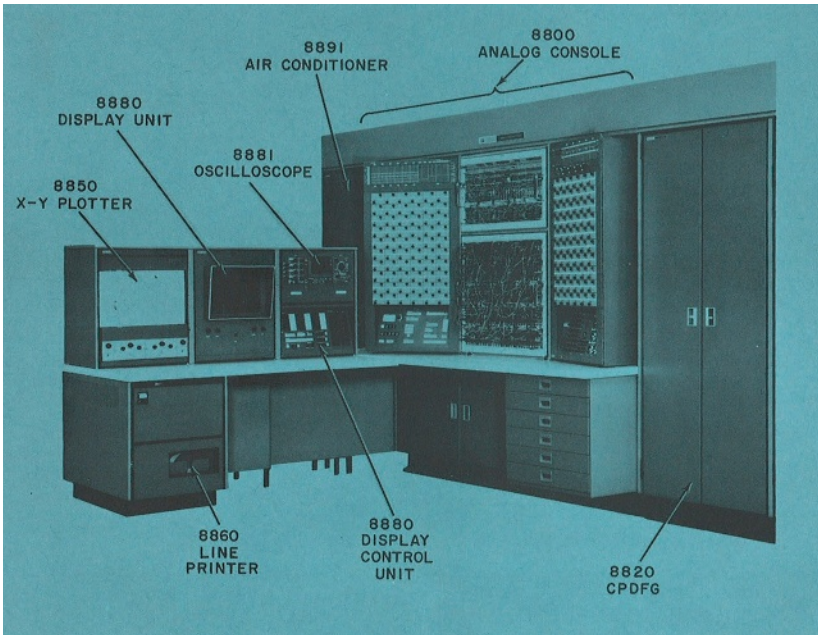
Grâce à cette approche, les missiliers ont réduit drastiquement le nombre de tirs. Si dans les années 1960, 200 tirs étaient nécessaires au développement d'un missile, ils n'en réalisaient plus que 15 en 1990, et seulement quelques-uns dans les années 2000. Cette démarche était à la fois économique, car un tir coûte très cher en prototype et en moyens – et un missile ne vole qu'une fois –, et technique, car les tirs étaient devenus insuffisants à eux seuls pour mettre au point un système aussi complexe qu'un missile.

LA POUBELLE OU LE PANTHÉON ?

Pendant une dizaine d'années, l'EAI 8800 a continué à simuler les vols de missiles pour MBDA, jusqu'à ce qu'en 2006, au gré d'un déménagement du service qui l'hébergeait, il atterrisse au musée des Arts et Métiers et y entame sa troisième vie. Sauvegardé et nettoyé, il a depuis intégré les collections du musée.

Ce modèle est d'ailleurs vraisemblablement le seul rescapé au monde. En effet, l'EAI 8800 était une machine rare et chère. À son introduction sur le marché, en 1965, il était vendu entre 100 000 et 500 000 dollars ; et l'EAI 8900 (la forme hybride), entre 700 000 et 1 300 000 dollars. L'EAI 8800 a été produit à peu d'exemplaires, peut-être quelques dizaines, sans doute en raison de son coût et du type d'utilisations très spécifiques de simulation en temps réel que l'on en faisait.

À la différence de l'ordinateur numérique, qui a trouvé des applications dans la finance, la logistique, les bureaux, la communication, les réseaux..., le calculateur EAI 8800 est resté un instrument dédié au calcul scientifique et n'a jamais été utilisé dans d'autres secteurs que la simulation. C'est aussi l'une des raisons de sa quasi-disparition. À la fin des années 1970, les ordinateurs numériques étaient capables de réaliser presque toutes les fonctions des calculateurs analogiques, mais ils pouvaient en réaliser bien d'autres encore.



À l'instar de l'EAI 231R, l'EAI 8800 était couplé à plusieurs modules complémentaires, comme l'indique ici la notice de l'instrument.

Pour autant, le cadavre n'est peut-être pas encore complètement froid. Ce type de calculateurs pourrait connaître un renouveau en dépassant les limites de l'arithmétique binaire, à base de logique sur des 0 et des 1, sur laquelle reposent les ordinateurs actuels. Des modèles fondés sur une logique continue seraient susceptibles d'offrir des solutions plus efficaces, par exemple dans la simulation de certains systèmes biologiques, ou encore dans des modèles d'intelligence artificielle ou de réseaux de neurones.

C'est la voie qu'explorent des chercheurs comme Olivier Bournez, à l'école Polytechnique, à Palaiseau, ou Rahul Sarpeshkar, à l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Le premier a montré en 2017, avec ses collègues, qu'il est possible d'effectuer les mêmes calculs qu'un ordinateur actuel en utilisant seulement des réactions biochimiques, c'est-à-dire des processus analogiques continus. Les concentrations de protéines codent les quantités continues et sont modulées par des réactions chimiques bien choisies. L'équipe du second crée des ordinateurs bio-inspirés fondés sur le calcul analogique que les cellules effectuent quand, par exemple, elles régulent l'expression d'un gène.

Dans ce contexte, avoir préservé le calculateur EAI 8800 aidera peut-être à redécouvrir des démarches et des modes de raisonnement des ingénieurs de la seconde moitié du XX^{e} siècle, lesquels pourraient se révéler riches d'enseignements pour l'avenir. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Foasso, **Atomes sous surveillance. Une histoire de la sûreté nucléaire en France**, Peter Lang, 2012.

P.-E. Mounier-Kuhn, **L'Informatique en France**, Presses de l'université Paris-Sorbonne, 2010.

J. S. Small, **The Analogue Alternative : The Electronic Analogue Computer in Britain and the USA, 1930-1975**, Routledge, 2001.

J. Ramunni, **La Physique du calcul. Histoire de l'ordinateur**, Hachette, 1988.

G. A. Korn et T. M. Korn, **Electronic analog and hybrid computers**, 2^{e}éd., McGraw-Hill, 1972.

© Musée des arts et métiers

RENDEZ-VOUS

P.82 *Logique & calcul*
P.88 *Idées de physique*
P.92 *Chroniques de l'évolution*
P.96 *Science & gastronomie*
P.98 *À picorer*

DE L'HYPERCUBE À LA SENSITIVITÉ

La «conjecture de la sensitivité», qui portait sur la complexité des fonctions booléennes, importantes en informatique, résistait depuis plusieurs décennies. Un jeune mathématicien d'origine chinoise, Hao Huang, l'a prouvée en deux pages, en exploitant un détour par les hypercubes.

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)

La logique booléenne est celle que vous pratiquez quand vous lisez une carte de restaurant: (Œuf mayonnaise ou Carottes ou Jambon) et ((Canard et Pommes de terre) ou (Saumon et riz)) et (Tarte ou Glace). Même sans les parenthèses, vous comprenez! Son nom évoque George Boole (1815-1864), qui proposa de calculer avec les propositions et les connecteurs logiques (NON, ET, OU, IMPLIQUE, etc.) comme on calcule avec les nombres.

Les travaux de l'ingénieur et mathématicien américain Claude Shannon (1916-2001) ont rendu essentiel ce calcul pour la conception des puces électroniques et aujourd'hui pour la cryptographie. Comme toujours en mathématiques, on y rencontre des énoncés que l'on soupçonne vrais sans réussir à les démontrer. C'était le cas de la «conjecture de la sensitivité» devenu en 2019 «théorème de la sensitivité» puisqu'elle a été démontrée. Le plus étonnant est que, après avoir résisté près de trente ans aux meilleurs spécialistes, un jeune mathématicien aux États-Unis, Hao Huang, en est venu à bout dans un article de six pages, l'argument principal de la démonstration occupant moins de deux pages.

LE GRAPHE DE L'HYPERCUBE

Pour analyser ce résultat, examinons d'abord la structure remarquable de l'hypercube de dimension n, ce qui est déjà un défi pour l'imagination que quelques dessins nous aideront à relever.

L'hypercube de dimension n, noté H_n, est un graphe qui généralise le carré et le cube (*voir l'encadré page ci-contre*). En dimension 2, le carré, H_2, possède 4 sommets et 4 arêtes. Sur le plan, on représentera les sommets du carré par les points de coordonnées A (0, 0), B (0, 1), C (1, 0) et D (1, 1). Chaque sommet de ce graphe est relié par deux arêtes à deux voisins; par exemple, le sommet A est relié à B et à C.

En dimension 3, le cube, H_3, a 8 sommets et 12 arêtes. Les sommets sont par exemple les points ayant pour coordonnées les 8 triplets de nombres pris parmi 0 et 1: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 et 111. Chaque sommet S est relié par trois arêtes à trois voisins. Les voisins de S sont les sommets S' dont les coordonnées ne diffèrent de celles de S que par une coordonnée. Par exemple, les trois voisins de 010 sont 110, 000 et 011. Les 12 arêtes du cube constituent un graphe où, pour se déplacer en n'empruntant que les arêtes, on doit passer d'un sommet à l'autre en ne changeant qu'une coordonnée à la fois. On peut parcourir tous les sommets du cube sans passer deux fois par le même sommet; cela définit un «chemin hamiltonien», dont un exemple est le parcours:

000 – 001 – 011 – 010 – 110 – 111 – 101 - 100.

Vous l'avez deviné, l'hypercube de dimension 4, H_4, est défini par ses 16 sommets qui sont tous les quadruplets possibles de 0 et de 1: 0000, 0001, 0010, ..., 1111. On obtient son graphe en prenant deux copies du graphe du cube de dimension 3 et en ajoutant des 0 devant les coordonnées des sommets du premier et des 1 devant les coordonnées des sommets du second. On ajoute pour finir des arêtes pour joindre les sommets analogues des deux cubes de dimension 3: >

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

© The Metropolitan Museum of Art, Dist. RMN-Grand Palais / image of the MMA; © Salvador Dali, Fundacio G-S Dali/ ADAGP, Paris

D'UN HYPERCUBE À L'AUTRE

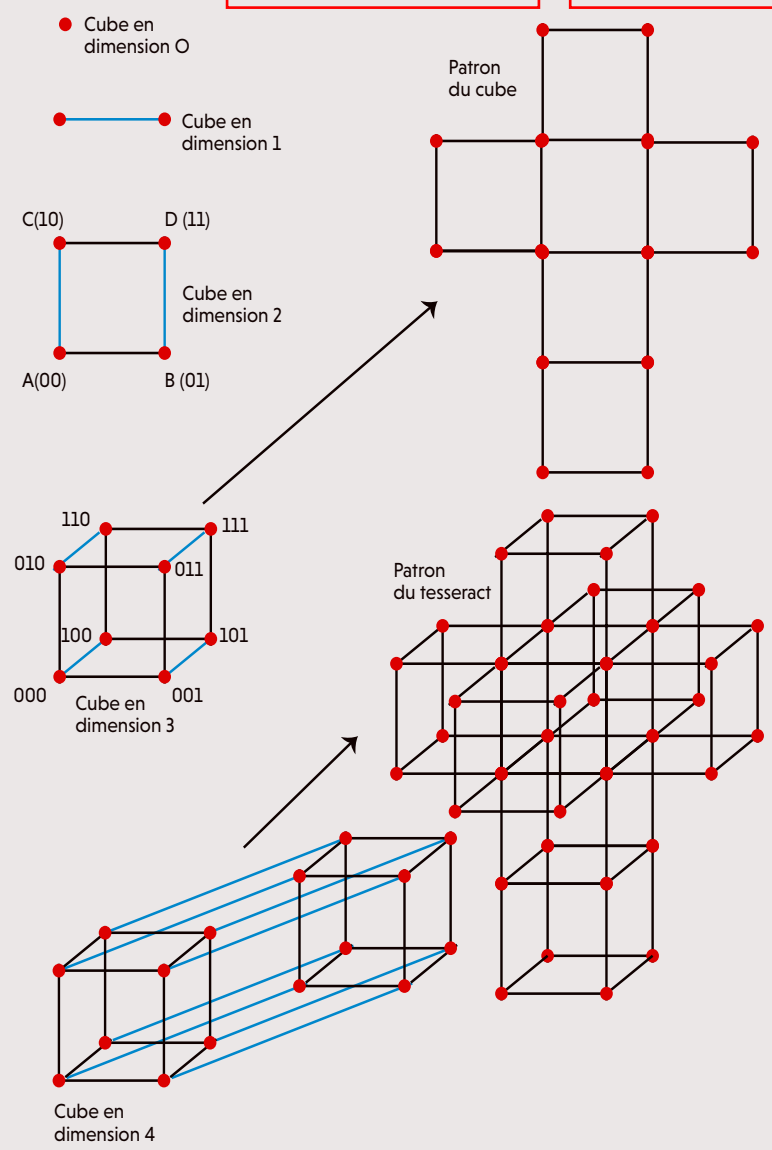
Pour dessiner l'hypercube H_n, de dimension n, à partir de l'hypercube H_{n-1} de dimension $n - 1$, on translate H_{n-1} pour obtenir une copie H_{n-1}', puis on joint *(en bleu)* les sommets analogues.

H_n a 2^n sommets qui sont les points dont toutes les coordonnées sont des 0 ou des 1. Il a $n\,2^{n-1}$ arêtes, qui sont tous les segments de droite liant deux sommets ayant exactement $n - 1$ coordonnées identiques. Par exemple, les sommets (1, 0, 0, 1, 0) et (1, 0, 0, 1, 1) sont liés par une arête dans le cas de l'hypercube de dimension 5.

Les coordonnées des sommets de H_n sont obtenues en ajoutant un 0 devant chacune des coordonnées des sommets de H_{n-1} et en ajoutant un 1 devant chacune des coordonnées des sommets de H_{n-1}'. Ainsi, les sommets (0, 0, 1, 0, 0) et (1, 0, 1, 0, 0) de H_5 proviennent du sommet (0, 1, 0, 0) de H_4.

La Grande Arche de la Défense, à Paris, est une représentation en trois dimensions d'un hypercube de dimension 4 parfois dénommé « tesseract » ou « octachore».

On peut déplier les faces d'un cube pour les aplatir, ce qui donne six carrés collés en forme de croix (l'une des branches étant plus longue) C'est ce que l'on désigne par un « patron ». De même, on peut déplier les « faces » de l'hypercube de dimension 4 qui sont des cubes de dimension 3 ; cela donne une sorte de croix composée de huit cubes *(voir le schéma)*. Cette croix a servi de base au tableau *La Crucifixion (Corpus hypercubus)*, de Salvador Dali, peint en 1954 ; la géométrie lui avait été enseignée par le peintre mathématicien Marcel Duchamp. Sur le carrelage représenté, on distingue le patron du cube à trois dimensions.



> on joint 0000 à 1000, puis 0001 à 1001, etc. Au total, on a les 12 arêtes du premier cube, les 12 du second et 8 pour les relier, ce qui fait 2×12+8 = 32 arêtes. Une arête correspond à un segment reliant un sommet, par exemple 0100, à un sommet dont les coordonnées ne diffèrent que par une coordonnée: les quatre voisins de 0100 sont 1100, 0000, 0110 et 0101.

On parcourt les sommets du graphe H_4 sans repasser deux fois par le même et en n'utilisant que les arêtes de H_4 en empruntant le chemin: 0000–0001–0011–0010–0110–0111–0101–0100–1100–1101–1111–1110–1010–1011–1001–1000.

On a repris le parcours hamiltonien de H_3 en ajoutant un 0 devant chaque triplet. Puis on a repris à nouveau le même parcours à l'envers en ajoutant un 1 à chaque triplet. Par construction, à chaque fois que l'on passe d'un sommet au suivant, une seule coordonnée change.

Ce que nous venons d'expliquer se généralise de façon évidente pour l'hypercube de dimension n, H_n, qui a 2^n sommets: il se construit en prenant deux copies de l'hypercube de dimension $n-1$ et en y ajoutant des arêtes pour joindre les sommets analogues.

Le nombre d'arêtes de H_n est donc le double du nombre d'arêtes du graphe H_{n-1}, auquel on ajoute le nombre de sommets du graphe H_{n-1}, ce qui donne $n2^{n-1}$. Par la même méthode que pour H_4, on dispose d'un parcours hamiltonien de H_n: on ajoute des 0 en tête des sommets du parcours hamiltonien de H_{n-1}, puis, en reprenant ce parcours à l'envers, on ajoute des 1 en tête de chaque sommet d'une copie de H_{n-1}.

Voici maintenant trois énigmes, de la plus facile à la plus difficile, concernant H_3, H_4 et H_5 qui éclairent la conjecture devenue théorème grâce à Hao Huang.

SOMMETS NON LIÉS

Problème 1. Quel est le nombre maximum de sommets que l'on peut choisir dans le cube H_3 tels qu'aucun ne soit relié à un autre par une arête?

La réponse est 4 (*voir l'encadré 3*). Il faut quelques secondes de réflexion pour se persuader qu'il est impossible de faire mieux. Si l'on veut être parfaitement rigoureux, on recherchera un raisonnement (ce n'est pas difficile), ou bien on énumérera les 56 façons de choisir 5 sommets parmi les 8 du cube et l'on constatera que pour chacune, il y a deux sommets reliés par une arête... et même qu'il existe toujours un sommet relié à deux autres.

Problème 2. Quel est le nombre maximum de sommets que l'on peut choisir dans l'hypercube H_4 de dimension 4, tels qu'aucun ne soit relié à un autre par une arête? La réponse est 8. L'encadré 3 indique comment choisir ces 8 sommets non reliés par une arête.

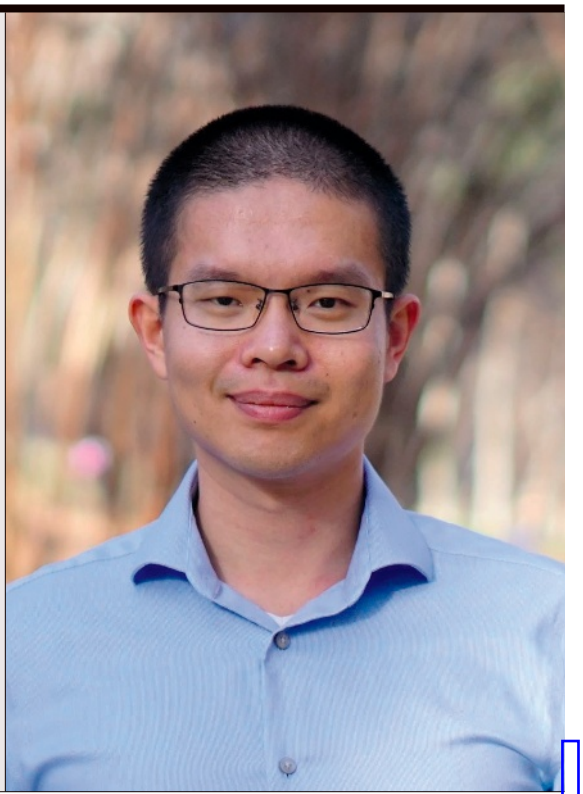
Montrer qu'il est impossible de faire mieux que 8 est plus compliqué que dans le problème 1. On se persuadera peut-être en essayant

2 UN JEUNE CHERCHEUR OBSTINÉ

Hao Huang, jeune mathématicien actuellement en poste à l'université Emory, aux États-Unis, a résolu en 2019 la « conjecture de la sensitivité ». Il avait entendu mentionner cette conjecture en 2012 par Michael Saks, du MIT (Massachusetts Institute of Technology). Il raconte : « À partir de ce moment, séduit par la simplicité et l'élégance de l'énoncé, je suis devenu obsédé par cette conjecture. À chaque fois que j'avais terminé un travail et qu'il avait été accepté pour publication, je revenais à ce problème. Bien sûr, j'abandonnais au bout de quelque temps et retournais vers des questions plus abordables. » Pendant six ans, Hao Huang a donc repensé au problème et y a épisodiquement consacré du temps.

En 2018, il remarqua qu'un théorème vieux de deux cents ans démontré par le mathématicien français Augustin Louis Cauchy pouvait peut-être l'aider. Ce théorème établit des relations entre les « valeurs propres » d'une matrice et celles de ses sous-matrices, valeurs propres qui sont en rapport avec le nombre de voisins des sommets d'un graphe... ce qui justement était la question à laquelle avait été ramenée la conjecture de la sensitivité.

Alors qu'il était en train de rédiger une demande de subvention pour approfondir son idée, il comprit soudain qu'en changeant les signes d'une matrice, tout se mettait en place pour faire tomber la conjecture. En fait, tout était assez simple, il fallait juste lier plusieurs résultats et les manipuler pour voir surgir la solution dont la démonstration n'occupe finalement que deux pages dans l'article que Hao Huang a publié. Depuis, Donald Knuth, célèbre informaticien auteur d'une bible sur la programmation *(The Art of Computer Programming)*, a d'ailleurs proposé une démonstration de la conjecture qui tient sur une seule page *(voir la bibliographie)*.



© Hao Huang

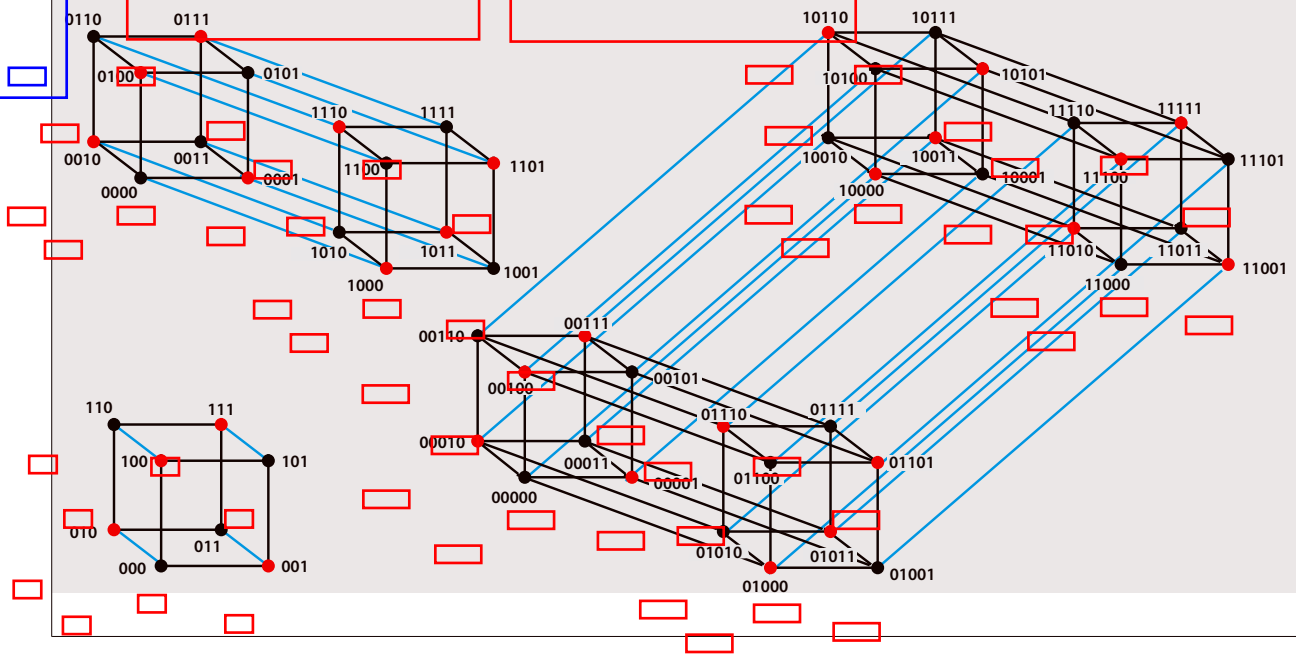
LA CONJECTURE DE LA SENSITIVITÉ

On avait montré que la conjecture de la sensitivité, qui porte sur les mesures de complexité des fonctions booléennes, est équivalente à une conjecture sur les sommets de l'hypercube H_n et c'est cette dernière formulation que Hao Huang a démontrée. Il a montré que si l'on prend $2^{n-1}+1$ sommets de H_n, alors l'un au moins de ces sommets est relié à au moins $\sqrt{n}$ autres sommets parmi ceux retenus.

Autrement dit : dès qu'on prend 5 sommets du cube H_3, l'un des sommets est lié à 2 autres ; dès qu'on prend 9 sommets de H_4, l'un des sommets est lié à 2 autres ; dès qu'on prend 17 sommets de H_5, l'un des sommets est lié à 3 autres ; et ainsi de suite.

Cette affirmation est d'autant plus étonnante que l'on peut trouver 4 sommets du cube H_3 sans aucun lien, 8 sommets de H_4 sans aucun lien, 16 sommets de H_5 sans aucun lien, etc.

Les dessins ci-dessous représentent ces façons de choisir 2^{n-1} sommets de H_n sans liens entre eux. La méthode utilisée pour ces choix est assez simple : prendre les sommets dont les coordonnées comportent un nombre pair de 1 *(en noir sur le dessin)*.



de trouver 9 sommets et en constatant que l'on n'y arrive jamais. Cependant, pour l'établir en toute rigueur, il faut soit trouver un raisonnement mathématique, soit envisager tous les sous-ensembles de 9 sommets pris dans les 16 sommets de H_4 et constater pour chacun que l'on a deux sommets reliés par une arête. Cela exige d'envisager $16!/(9!7!) = 11\,440$ cas (nombre de sous-ensembles de 9 éléments pris parmi un ensemble de 16 éléments).

Ce travail d'exploration de 11 440 cas est difficilement envisageable à la main. J'ai écrit un programme qui réalise cette énumération et, effectivement, il m'a indiqué que pour chacune des 11 440 façons de prendre 9 sommets de H_4, il y a au moins un sommet relié à un autre. Mon programme m'a aussi signalé que dans chaque cas, il y a au moins un sommet relié à deux autres !

Problème 3. Quel est le plus grand nombre de sommets que l'on peut choisir dans H_5 de telle façon qu'aucun ne soit relié à un autre par une arête ?

La réponse est 16. D'une part, en s'inspirant de ce qui s'est passé pour la dimension 4, il est assez facile de choisir 16 sommets sans que deux soient reliés par une arête. On prend la solution à 8 éléments pour le premier hypercube H_4 qui engendre H_5. On prend la solution complémentaire pour le second et tout est bon (*voir l'encadré 3*). On remarque alors que les sommets retenus sont ceux dont les coordonnées comportent un nombre pair de 1. Il est clair qu'un sommet ayant un nombre pair de 1 dans ses coordonnées n'est relié qu'à des sommets ayant un nombre impair de 1 dans ses coordonnées, ce qui confirme que la solution proposée est satisfaisante. Elle se généralise et montre que l'on peut toujours choisir 2^{n-1} sommets du graphe H_n sans que deux soient reliés.

Bien sûr, pour démontrer que 17 est impossible, le problème combinatoire est devenu colossal, car il y a $32!/(17!15!) = 565\,722\,720$ cas à envisager.

Ce qui s'est passé pour le problème 2 se reproduit en plus étonnant encore. Dès que l'on prend 17 sommets, on ne peut éviter qu'un sommet soit lié à trois autres. Le nombre maximum de voisins d'un sommet d'un graphe se nomme le « degré du graphe ». Le plus petit degré possible pour un sous-graphe de 16 sommets de H_4, qui est 0, passe donc à 3 avec un >

> sous-graphe de 17 sommets. De 16 sommets à 17 sommets, le degré minimum passe brusquement de 0 à 3.

Cette fois, ce n'est pas mon ordinateur qui m'a donné cette information, car mon programme n'était pas assez rapide : c'est le théorème de Hao Huang, qui résout la conjecture de la sensitivité.

Le résultat démontré par Hao Huang en 2019, qui a surpris tous les spécialistes, est maintenant facile à comprendre. Il s'énonce ainsi : « Si l'on choisit $2^{n-1}+1$ sommets dans l'hypercube H_n, alors l'un au moins des sommets est relié à au moins $\sqrt{n}$ autres sommets par des arêtes. »

Lorsque $n=3$, on retrouve qu'avec H_3, dès que l'on prend 5 sommets, l'un est relié à deux autres ($\sqrt{3}=1{,}7320\ldots$), qu'avec H_4, dès que l'on prend 9 sommets, l'un est relié à deux autres ($\sqrt{4}=2$) et qu'avec H_5, dès que l'on prend 17 sommets, l'un est relié à trois autres ($\sqrt{5}=2{,}2360\ldots$).

L'intérêt du résultat de Hao Huang est qu'il est vrai pour tout entier positif n, ce qu'aucun ordinateur procédant par énumération ne pourra jamais établir. En soi, le résultat est surprenant puisque, associé à celui indiquant que 2^{n-1} sommets de H_n peuvent n'avoir aucun lien entre eux, il montre que, par exemple pour $n=100$, dès qu'on veut prendre un sommet de plus que 2^{99} (soit $6{,}338\ldots\times10^{29}$) sommets dans H_{100}, alors on crée toujours un sommet lié à dix autres au moins. De 2^{99} à $2^{99}+1$, c'est-à-dire en ajoutant un seul sommet, on passe du degré minimal 0 au degré minimal 10…

COMPLEXITÉ DES FONCTIONS BOOLÉENNES

Cependant, l'intérêt principal du résultat de Hao Huang n'est pas dans ce petit problème combinatoire relatif à l'hypercube, mais dans ses conséquences sur la mesure de la complexité des fonctions booléennes.

Les fonctions booléennes sont utiles pour la conception des circuits électroniques et en particulier des microprocesseurs. Elles servent aussi en cryptographie pour concevoir des fonctions pseudoaléatoires ou des fonctions de chiffrement. Ce sont simplement des fonctions dont l'ensemble de départ est H_n, l'hypercube de dimension n, et qui prennent une valeur qui peut être 0 ou 1. Le 0 et le 1 sont assimilés à *Faux* et *Vrai* quand on envisage les variables des fonctions booléennes.

Un exemple de fonction booléenne est : $f(A, B, C) =$ $((A \text{ ET } B) \text{ OU } (\text{NON}(A) \text{ ET NON}(B)))$ IMPLIQUE C.

Les variables A, B et C peuvent chacune prendre deux valeurs 0 ou 1, ce qui donne 8 valeurs possibles pour le triplet (A, B, C).

Les connecteurs OU, ET et IMPLIQUE sont définis par leur sens logique habituel :
0 OU 0 = 0 ; 0 OU 1 = 1 ; 1 OU 0 = 1 ; 1 OU 1 = 1 ;
0 ET 0 = 0 ; 0 ET 1 = 0 ; 1 ET 0 = 0 ; 1 ET 1 = 1 ;
0 IMPLIQUE 0 = 1 ; 0 IMPLIQUE 1 = 1
1 IMPLIQUE 0 = 0 ; 1 IMPLIQUE 1 = 1,

On en tire par exemple que $f(1, 1, 1)$ = $((1 \text{ ET } 1) \text{ OU } (\text{NON}(1) \text{ ET NON}(1)))$ IMPLIQUE 1 = $(1 \text{ OU } (0 \text{ ET } 0)))$ IMPLIQUE 1 =$(1 \text{ OU } 0))$ IMPLIQUE 1 = 1 IMPLIQUE 1 = 1.

Les fonctions booléennes utilisées en informatique peuvent comporter des milliers de variables et avoir des expressions comportant des milliers de connecteurs logiques. Chaque fonction s'écrit d'une multitude de façons et, bien sûr, on recherche les écritures les plus simples, car elles conduisent aux circuits et aux programmes les plus petits et les plus efficaces. Il est important de mesurer la complexité des fonctions booléennes ; en cryptographie, c'est essentiel, car des fonctions booléennes trop simples seraient faciles à attaquer.

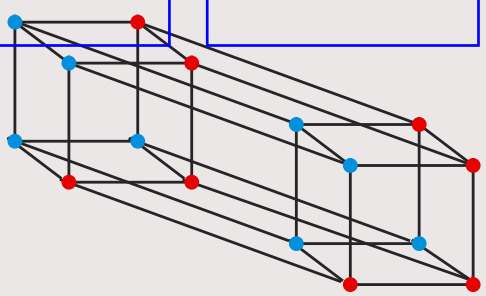
On a donc introduit des mesures de complexité des fonctions booléennes. Plusieurs se présentent naturellement. Quand on veut disposer d'une fonction booléenne avec la certitude qu'elle est complexe, il faut que toutes les mesures de complexité de cette fonction soient élevées, sinon cela signifie sans doute

4 LA SENSITIVITÉ, MESURE DE COMPLEXITÉ

Une fonction booléenne de n variables est une fonction qui associe un 0 ou un 1 à chaque sommet de l'hypercube H_n. On peut représenter une fonction booléenne de n variables en dessinant H_n et en coloriant en bleu les sommets où la fonction prend la valeur 1, les autres étant en rouge.

La sensitivité d'une fonction booléenne en un point est le nombre de sommets liés à ce point où la fonction change *(de rouge à bleu ou de bleu à rouge)*. La sensitivité d'une fonction f est le maximum de la sensitivité de f en x, quand on fait varier x. C'est une sorte de dérivée, liée aux mouvements plus ou moins nombreux de la fonction quand on se déplace sur l'hypercube en suivant les arêtes.

La fonction représentée ci-dessous a une sensitivité égale à 2, car les sommets rouges ne sont jamais liés à plus de 2 sommets bleus, et les sommets bleus ne sont jamais reliés à plus de 2 sommets rouges. La sensitivité est une mesure de complexité pour les fonctions booléennes.



qu'on peut la casser. Pour en être certain, le plus simple est de disposer de résultats mathématiques généraux reliant les diverses mesures de complexité les unes aux autres et qui assureront que, dès qu'une mesure pour f est élevée, c'est aussi le cas pour les autres.

De tels résultats servent à concevoir aisément des fonctions booléennes résistantes aux attaques. Mais un autre motif pour rechercher des liens entre les diverses mesures de complexité des fonctions booléennes est simplement que les mathématiciens aiment savoir, quand ils introduisent des notions portant sur les mêmes objets, quelles relations les lient.

Le résultat de Hao Huang sur les hypercubes a justement comme conséquence qu'une mesure naturelle de complexité, la «sensitivité» (définie plus loin) est liée aux autres. Les travaux antérieurs avaient relié toutes les mesures naturelles de complexité des fonctions booléennes, sauf la sensitivité, qui faisait bande à part.

LA SENSITIVITÉ BOOLÉENNE

Pour saisir l'éclaircissement que Hao Huang a apporté, considérons trois des mesures de complexité les plus courantes et indiquons où le résultat de Huang intervient. Commençons par la mesure de complexité récalcitrante, la «sensitivité».

La sensitivité d'une fonction booléenne f au point $x = (b_1, b_2, ..., b_n)$ est le nombre de x' liés à x sur l'hypercube H_n tels que $f(x') \neq f(x)$; autrement dit, c'est le nombre de coordonnées de x qui changent la valeur $f(x)$ quand on les modifie. Cette mesure est une sorte de dérivée de f en x: si f bouge beaucoup quand on envisage des points proches de x sur H_n, alors la sensitivité de f est élevée en x.

Par définition, la sensitivité d'une fonction booléenne f est le maximum de la sensitivité de f en x quand on fait varier le point x dans H_n. Cette mesure est une évaluation globale de l'agitation de f: on la note $s(f)$.

Par exemple, la fonction booléenne $f(A, B) = (A \text{ OU } B)$ a une sensitivité 0 en $x = (1, 1)$; en effet, $(1 \text{ OU } 1) = 1$ et quand on change la première coordonnée ou la seconde, le résultat ne change pas, puisque $(0 \text{ OU } 1) = (1 \text{ OU } 0) = 1$. Elle a en revanche une sensitivité égale à 2 en $x = (0, 0)$, car $(0 \text{ OU } 0) = 0$, valeur qui change en modifiant la première ou la seconde coordonnée: $(1 \text{ OU } 0) = 1$, $(0 \text{ OU } 1) = 1$. La sensitivité de la fonction booléenne $f(A, B) = (A \text{ OU } B)$ est donc 2: $s(f) = 2$.

Une deuxième mesure de complexité pour les fonctions booléennes est la «complexité en arbre de décision». Une fonction booléenne étant fixée, on considère les algorithmes qui posent des questions de type: «Quelle est la valeur de la variable X?» puis, prenant en compte les réponses précédentes, «Quelle est la valeur de la variable Y?», etc., jusqu'à avoir assez d'information pour déterminer $f(x)$. Le meilleur algorithme est celui qui sait déterminer $f(x)$ pour tout x en un minimum de questions; ce minimum est la complexité en arbre de décision de f, notée $ad(f)$.

Prenons l'exemple $f(A, B, C, D, E) = (A \text{ ET } B \text{ ET } E) \text{ OU } (C \text{ ET } D \text{ ET NON}(E))$.

Bien qu'il y ait cinq variables, trois questions suffiront toujours pour connaître la valeur de f en un point, car selon que E est vrai (1) ou faux (0), il faut s'intéresser à la première partie de l'expression définissant f ou à la seconde. Le meilleur algorithme d'interrogation est donc:
1) Demander la valeur de E;
2) Si E est vrai, demander A, puis, si A est vrai, demander B;
3) Si E est faux, demander C, puis, si C est vrai, demander D.

En trois questions et parfois deux, on connaît ainsi la valeur de f. On ne peut pas faire mieux que 3, donc $ad(f) = 3$.

Une troisième mesure de complexité d'une fonction booléenne est le «degré» défini de la façon suivante. Toute fonction booléenne peut s'écrire de façon unique comme une somme de conjonctions du type:
$f(A, B, C) = (A \text{ ET } B) + (B \text{ ET } C) + (A \text{ ET } C)$
où le + désigne le «ou exclusif»: $P + Q$ est vrai si «P est vrai et Q faux», ou si «P est faux et Q vrai». Le degré de f, noté $deg(f)$, est le plus grand nombre de variables qu'on trouve dans un terme de cette expression de f. Ici, c'est 2: $deg(f) = 2$.

Quels sont les liens entre ces trois mesures de complexité et d'autres encore? Pour les deux dernières et les autres, la réponse était connue: chacune est majorée par un polynôme en fonction de l'autre, puisque l'on a toujours:
$deg(f) < ad(f) < 16\,[deg(f)]^8$.

Pour avoir des relations liant la sensitivité $s(f)$ aux autres mesures de complexité, il était établi que la question se ramenait à celle concernant les sous-graphes de H_n que Hao Huang a résolue et que nous avons expliquée. Ce travail a permis de savoir que $[s(f)]^2 \geq deg(f)$, ce qui, avec les autres résultats connus, permet de conclure à l'équivalence, à un polynôme près, des mesures de complexité des fonctions booléennes.

Le résultat de Hao Huang est théorique, mais il est aussi pratique puisque la vitesse optimale de calcul de certains circuits électroniques est directement liée à ces mesures de complexité. La preuve en deux pages de Hao Huang est assez simple. En une heure de lecture, un mathématicien connaissant le sujet peut la vérifier.

Scott Aaronson, de l'université du Texas à Austin, remarque qu'une recherche pendant trente ans par des dizaines de mathématiciens, certains très brillants, a été nécessaire pour aboutir à une preuve qui se vérifie en une heure: prouver est bien plus difficile que vérifier! ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Karthikeyan et al., **On the resolution of the sensitivity conjecture**, *Bull. of the Amer. Math. Soc.*, vol. 57(4), pp. 615-638, 2020.

H. Huang, **Induced subgraphs of hyper-cubes and a proof of the sensitivity conjecture**, *Ann. of Math.*, vol. 190(3), pp. 949-955, 2019.

D. Knuth, **A computational proof of Huang's degree theorem** (démonstration en une page du résultat de Hao Huang), 2019 : https://www.cs.stanford.edu/~knuth/papers/huang.pdf

S. Jukna, **Boolean Function Complexity**, Springer, 2012.

H. Buhrman et R. de Wolf, **Complexity measures and decision tree complexity : a survey**, *Theoret. Comput. Sci.*, vol. 288(1), pp. 21-43, 2002.

C. Gotsman et N. Linial, **The equivalence of two problems on the cube**, *J. Combin. Theory Ser. A*, vol. 61(1), pp. 142-146, 1992.

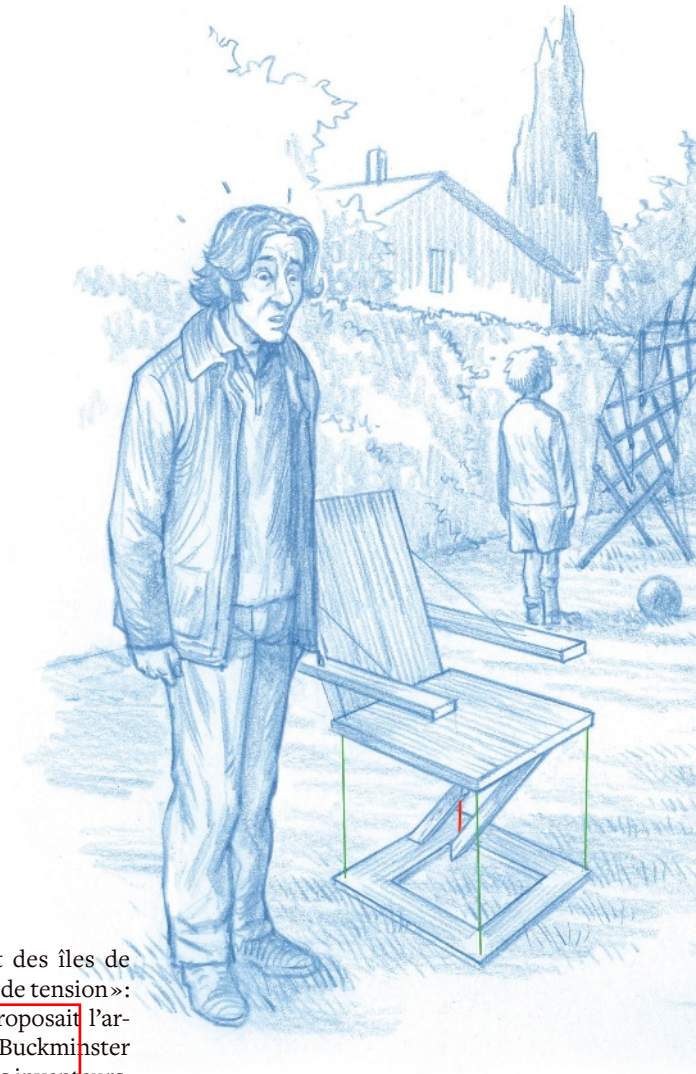
N. Nisan et M. Szegedy **On the degree of Boolean functions as real polynomials**, *Computational Complexity*, vol. 4, pp. 301-313, 1994.

LES AUTEURS

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

LA TENSÉGRITÉ ET LA TABLE IMPOSSIBLE

Construire des structures rigides mais aériennes composées uniquement de barres reliées par des câbles: telle est l'idée à la base du concept de tenségrité en architecture.



Récemment, les réseaux sociaux se sont entichés d'un mobilier étonnant, présenté comme une application du principe de «tenségrité»: une table dont le plateau semble flotter comme par magie, maintenu uniquement par des fils ou des câbles le reliant à la base au-dessous (*voir l'illustration ci-contre*). Cette «table impossible» surprend car, spontanément, si nous devons utiliser des câbles pour suspendre des objets, nous les attachons par le haut pour s'opposer à la gravité.

Cette impression de «suspension par en dessous» est l'une des particularités que l'on retrouve dans toutes les constructions reposant sur la tenségrité, concept architectural qui consiste à assurer la rigidité des structures en associant avec élégance des éléments en tension et des éléments en compression.

«La tenségrité, ce sont des îles de compression dans un océan de tension»: telle est la définition que proposait l'architecte américain Richard Buckminster Fuller (1895-1983), l'un de ses inventeurs. Pour comprendre ce que cela signifie et implique, remontons dans le temps.

DES ÎLES DE COMPRESSION DANS UN OCÉAN DE TENSION

Jusqu'au milieu du XIXe siècle, la plupart des matériaux utilisés pour la construction étaient particulièrement performants pour résister aux contraintes de compression: c'est notamment le cas de la pierre ou des briques. Ces matériaux (à l'exception notable du bois) sont en revanche moins robustes face à des contraintes de tension, c'est-à-dire à des situations où ils sont étirés. Pour ne donner qu'un exemple, la brique résiste à des forces de 1,5 kilonewton (soit le poids de 150 kilogrammes) par centimètre carré en compression, mais à des contraintes trois fois inférieures en tension.

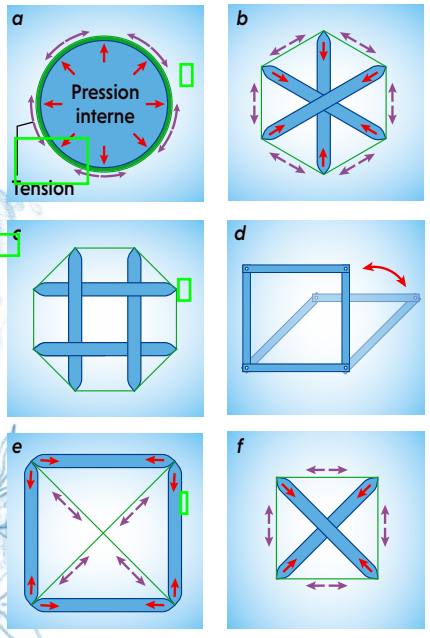
Les bâtiments étaient donc conçus pour que n'apparaissent pas dans les matériaux d'efforts de tension. Ils présentaient bien souvent un aspect assez massif et plein pour les plus grands d'entre eux. Il a fallu tout le génie des constructeurs de cathédrales et la technique des arcs-boutants pour réaliser des bâtiments «aériens» en pierre.

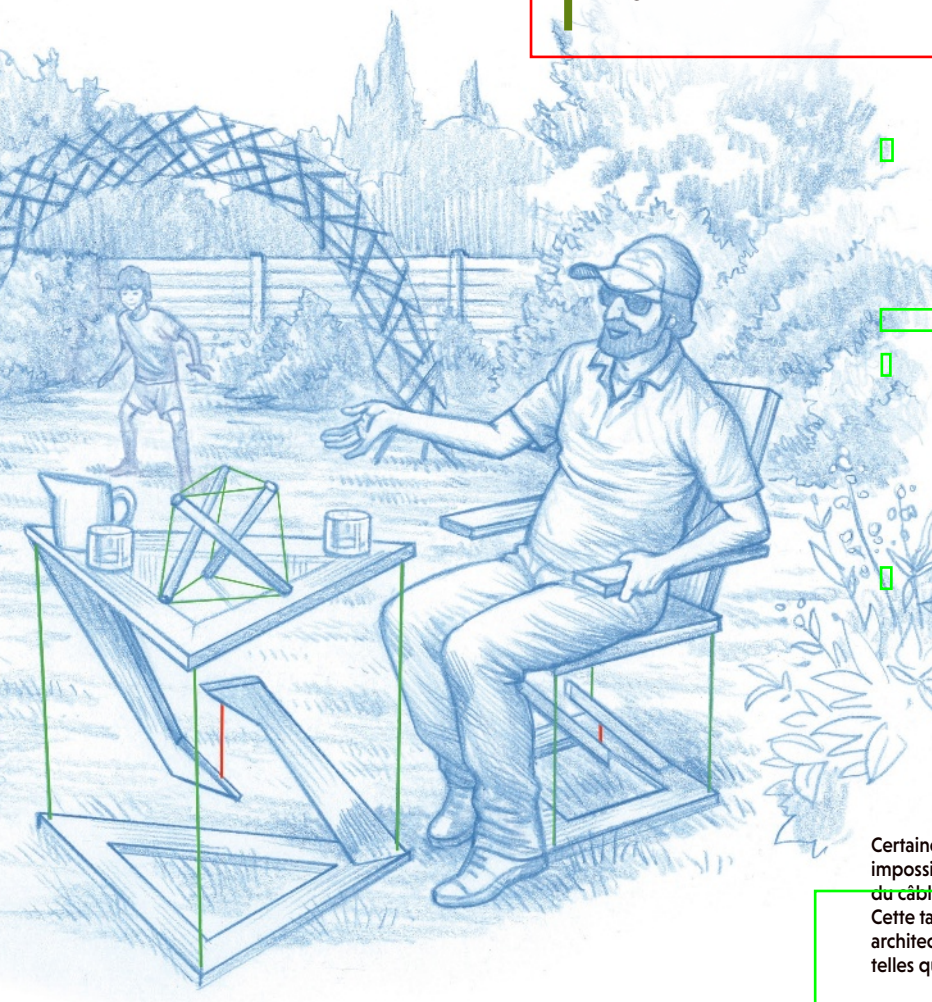
Pour trouver des constructions alliant solidité et légèreté, c'est vers la marine et les constructions navales qu'il faut se tourner. La nécessité de flotter (donc d'avoir le moins de masse possible) et de contrôler la force du vent a conduit à réaliser des

© Illustrations de Bruno Vacaro

TENSÉGRITÉ À DEUX DIMENSIONS

Un ballon gonflé est rigide, car la pression de l'air intérieur met en tension l'enveloppe *(a)*. Une configuration analogue de forces de tension et de compression est à l'œuvre dans des structures rigides comme celles représentées en *b* et *c* et qui relèvent du concept de tenségrité : les câbles du contour sont en tension tandis que les tiges, dans l'intérieur, sont en compression. Un carré constitué de quatre tiges articulées à leurs extrémités n'est pas rigide *(d)*. Pour le rigidifier, il suffit de relier les sommets opposés par des câbles *(e)* ; dans ce cas, les câbles sont en tension. Un théorème de dualité montre que l'on peut échanger les tiges et les câbles *(f)* : la structure ainsi obtenue est rigide aussi.





Certaines constructions surprennent, comme la « table impossible », dont le plateau est suspendu par le bas (à l'aide du câble rouge, les câbles verts n'assurant que la stabilité). Cette table et ces chaises évoquent des structures architecturales fondées sur le concept de tenségrité, telles que l'objet posé sur la table et l'arche.

structures dont la partie rigide en bois (mât et coque) est résistante à la compression, tandis que les éléments chargés de canaliser et transmettre au navire la force considérable du vent sont des éléments souples résistant à la tension: la toile des voiles ainsi que le cordage du gréement.

C'est ce souci de légèreté que l'on retrouve plus tard dans les premiers avions, avec une structure en bois recouverte de toile huilée et rigidifiée par de nombreux câbles tendus.

Mais où est la physique dans tout ce savoir-faire d'ingénieur? Du côté de la théorie de la rigidité structurale, dont les bases ont été posées au XIXe siècle par James Clerk Maxwell (1831-1879). Ce grand physicien écossais s'est intéressé aux conditions nécessaires pour assurer la rigidité d'une structure composée de barres rigides assemblées entre elles par des articulations flexibles (charnières, pivots...). Seuls les résultats pour des structures à deux dimensions nous seront utiles pour la suite.

Un triangle formé de trois barres jointes à leurs extrémités est ainsi une structure naturellement rigide. Ce n'est en revanche pas le cas d'un carré, qui peut se déformer en losange si l'on agit sur les deux sommets opposés d'une diagonale (*voir l'encadré ci-dessus, d*).

Une façon de rigidifier le carré est d'y adjoindre une barre qui rejoint justement ces deux sommets opposés. Selon que l'on cherche ensuite à écarter ou à rapprocher ces sommets, cette barre se trouvera soit en tension, soit en compression. Il est toutefois possible de rigidifier le carré avec uniquement deux câbles tendus, qui relient chacun les deux paires de sommets opposés. On obtiendra une structure d'autant plus rigide que ces câbles sont tendus et les barres se trouveront alors en compression. >

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

> À partir de cette situation, la magie de la tenségrité peut opérer : un théorème de dualité indique que l'on peut obtenir, à partir d'une structure rigide barres-câbles comme celle que nous venons d'envisager, une autre structure rigide en remplaçant tous les câbles par des barres et toutes les barres par des câbles. Attention, cependant : la structure obtenue est rigide, mais pas nécessairement stable !

Qu'obtient-on avec notre exemple ? Un carré formé de câbles tendus, maintenu rigide grâce à deux barres en croix, qui sont en compression. On a donc un contour sous tension et un intérieur en compression… De façon assez inattendue, on retrouve le même arrangement de forces que dans un ballon : son contour est une membrane souple tendue et l'intérieur est de l'air sous pression, le ballon étant d'autant plus rigide que la pression de l'air intérieur est importante.

UNIQUEMENT DES CÂBLES ET DES BARRES

La tenségrité est la généralisation de ce schéma, le rôle de la surface du ballon étant en général tenu par un filet de câbles et celui de l'air intérieur par des barres. À trois dimensions, l'objet le plus simple est composé de trois barres et neuf câbles (*voir l'encadré ci-contre*). L'enveloppe est constituée des arêtes d'un prisme triangulaire. Cette structure a été proposée dans des brevets déposés autour des années 1960 par trois personnes qui se sont disputé la paternité du concept : Fuller déjà cité, l'architecte et ingénieur français d'origine hongroise David Georges Emmerich et le sculpteur américain Kenneth Snelson.

Les titres de leurs brevets sont instructifs. Le brevet d'Emmerich est explicite sur la nature de l'objet : « Construction de réseaux autotendants » (1963). Celui de Fuller, « Tensile-integrity structures » (1962), donnera par contraction le nom de tenségrité. Et celui de Snelson, plus conceptuel, explicite les caractéristiques des dispositifs : « Continuous tension, discontinuous compression structures » (1965). Ces origines multiples se retrouvent dans la définition admise aujourd'hui : « Un système de tenségrité est un système qui est dans un état stable auto-équilibré qui comprend un ensemble discontinu de composants en compression à l'intérieur d'un continuum de composants en tension. »

De même que l'on obtient des structures gonflables complexes par assemblage de ballons, on peut concevoir des structures en tenségrité par l'assemblage de modules élémentaires. C'est ainsi que sont conçus les exemples les plus célèbres et les plus frappants de tenségrité : des arches (*voir l'illustration pages 88-89*) ou des tours comme la *Needle Tower II*, de Snelson, installée dans le jardin d'un musée néerlandais.

TENSÉGRITÉ, VRAIMENT ?

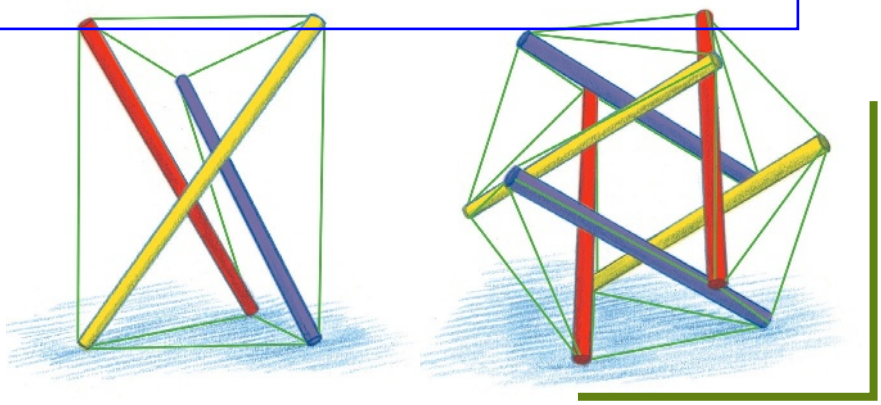
Qu'en est-il de notre « table impossible » ? Elle est bien composée d'éléments solides et de câbles. Le câble central assure la sustentation. Son extrémité supérieure est accrochée à la base tandis que l'extrémité inférieure est accrochée au plateau. Autrement dit, le plateau est suspendu à la base par ce câble.

Mais le centre de gravité du plateau est situé bien au-dessus du point d'attache. S'il n'y avait que ce câble, le plateau basculerait donc instantanément. C'est la raison d'être des câbles périphériques : ils assurent la stabilité du plateau, tout comme les haubans assurent la stabilité d'un poteau. Cependant, le câble central et les câbles périphériques n'exercent pas sur le plateau des contraintes de compression, mais de flexion ; et, surtout, ces câbles ne dessinent pas une structure continue.

Aussi étonnante soit-elle, cette table n'est donc pas du tout un prototype de tenségrité ! Au moins aura-t-elle eu le mérite de remettre au goût du jour des structures qui laissent le spectateur perplexe et admiratif, même lorsqu'il en comprend les principes. ■

TENSÉGRITÉ À TROIS DIMENSIONS

À trois dimensions, l'objet rigide le plus simple qui relève du concept de tenségrité est composé de trois barres, dont les extrémités sont reliées par neuf câbles (à chaque extrémité, trois câbles se rejoignent). Sur le même principe, on peut construire des structures rigides comportant davantage de barres, comme l'objet à six barres représenté ci-dessous à droite. En plus d'arches et tours construites ainsi dans un but artistique ou pour illustrer la tenségrité, certains édifices exploitent cette idée, comme le pont Kurilpa, à Brisbane, en Australie, inauguré en 2009.



BIBLIOGRAPHIE

Y. Bansod *et al.*, **Overview of tensegrity – I : Basic structures**, *Engineering Mechanics*, vol. 21(5), pp. 355-367, 2014.

R. Motro, **Tenségrité**, Hermès-Lavoisier, 2005.

A. Pugh, **An Introduction to Tensegrity**, University of California Press, 1976.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 521 (Mars 21)
réf. PL521

N° 520 (Fév 21)
réf. PL520

N° 519 (Jan 21)
réf. PL519

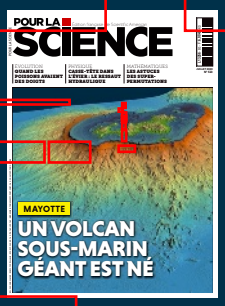
N° 518 (Déc. 20)
réf. PL518

N° 517 (Nov. 20)
réf. PL517

N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516

N° 515 (Sept. 20)
réf. PL515

N° 514 (Août 20)
réf. PL514



N° 513 (Juill. 20)
réf. PL513

N° 512 (Juin 20)
réf. PL512

N° 511 (Mai 20)
réf. PL511

N° 510 (Avril 20)
réf. PL510

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

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

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

1re réf. 01 x 9,40 € = 9,40 €
2e réf. ..... x 9,40 € = ... €
3e réf. ..... x 9,40 € = ... €
4e réf. ..... x 9,40 € = ... €
5e réf. ..... x 9,40 € = ... €
6e réf. ..... x 9,40 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ **Par chèque à l'ordre de *Pour la Science***
☐ **Carte bancaire**
N° .....
Date d'expiration .....
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

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

Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

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

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.GROUPEPOURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR

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

DES CROCOS AU SANG CHAUD

Sous un aspect somme toute banal, les crocodiles cachent des indices suggérant que leurs ancêtres ont vécu de multiples vies assez éloignées de la leur.

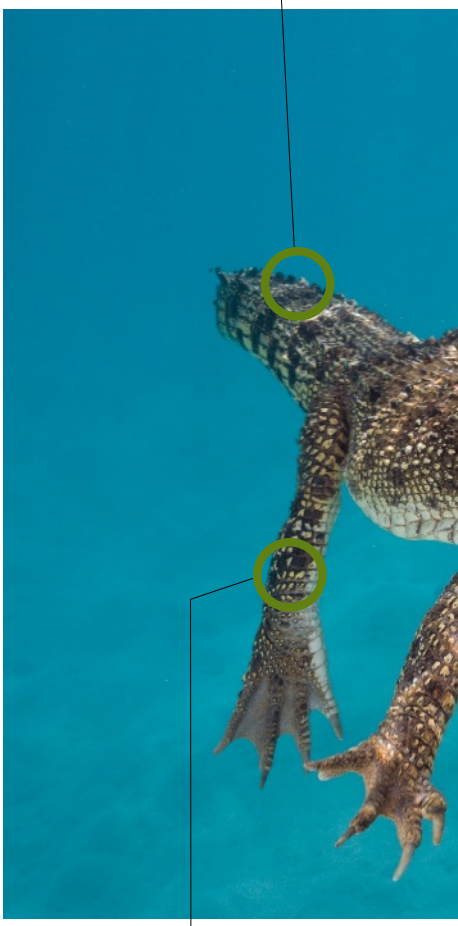
Je me souviens encore de la fois où mon fils, alors âgé de 4 ans, se précipita dans la maison en criant : « Papa, viens vite ! Il y a un crocodile dans le jardin ! » – ce jardin étant près de Paris. Le crocodile n'était qu'un vulgaire lézard des murailles. En fait, ce jeune garçon adorait un petit livre sur les animaux d'Afrique, où les tailles n'étaient pas indiquées. Il avait donc fait comme les premiers zoologistes : voir les crocodiles comme de gros lézards.

Or, à l'époque, les phylogénies moléculaires (les arbres de parenté des espèces construits en examinant les ressemblances de leurs génomes) plaçaient les crocodiles actuels comme groupe frère des oiseaux, les deux groupes constituant le taxon des archosaures. La ressemblance globale était donc trompeuse. On a cru y voir plus clair quand les paléontologues ont intégré les dinosaures parmi les archosaures, à peu près au même moment : les crocodiles auraient gardé une forme ancestrale, tandis que les dinosaures – dont les oiseaux – auraient fortement évolué. Mais tout n'est pas si simple ! Plusieurs indices, dont certains tout récents, révèlent que les crocodiles cachent des singularités anatomiques et physiologiques héritées d'ancêtres insoupçonnés.

DES ANCÊTRES BIPÈDES

Déjà, au XIXe siècle, les anatomistes s'étaient étonnés de l'articulation de la cheville des crocodiles, qui était originale par rapport à celle des autres archosaures. Il a fallu attendre l'introduction de la cladistique en paléontologie, c'est-à-dire de la classification fondée sur l'étude des liens de parenté entre spécimens, et en particulier le travail de Jacques Gauthier, de l'université Yale, aux États-Unis, pour décrypter, au cours des années 1980, la phylogénie des archosaures fossiles et les lignées qui ont mené aux oiseaux et aux crocodiles. Surprise ! Des ancêtres des crocodiliens modernes vivant au Trias, il y a entre 250 millions et 200 millions

Ce jeune crocodile marin a été photographié dans le Queensland, en Australie. On rencontre cette espèce en Asie du Sud et en Océanie.



© Reinhard Dirscherl/GettyImages

Chez les crocodiles, l'articulation de la cheville diffère de celle des ornithodires (ptérosaures, dinosaures et oiseaux). Chez ces derniers, la ligne de flexion passe sous l'astragale et le calcanéum (notre os du talon), alors que chez les crocodiles, elle passe entre l'astragale et le calcanéum

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

EN CHIFFRES

200 MILLIONS

Les crocodiles modernes ont acquis leur plan d'organisation il y a 200 millions d'années. On compte 24 espèces actuelles de crocodiliens, dont 14 crocodiles.

6,17 MÈTRES

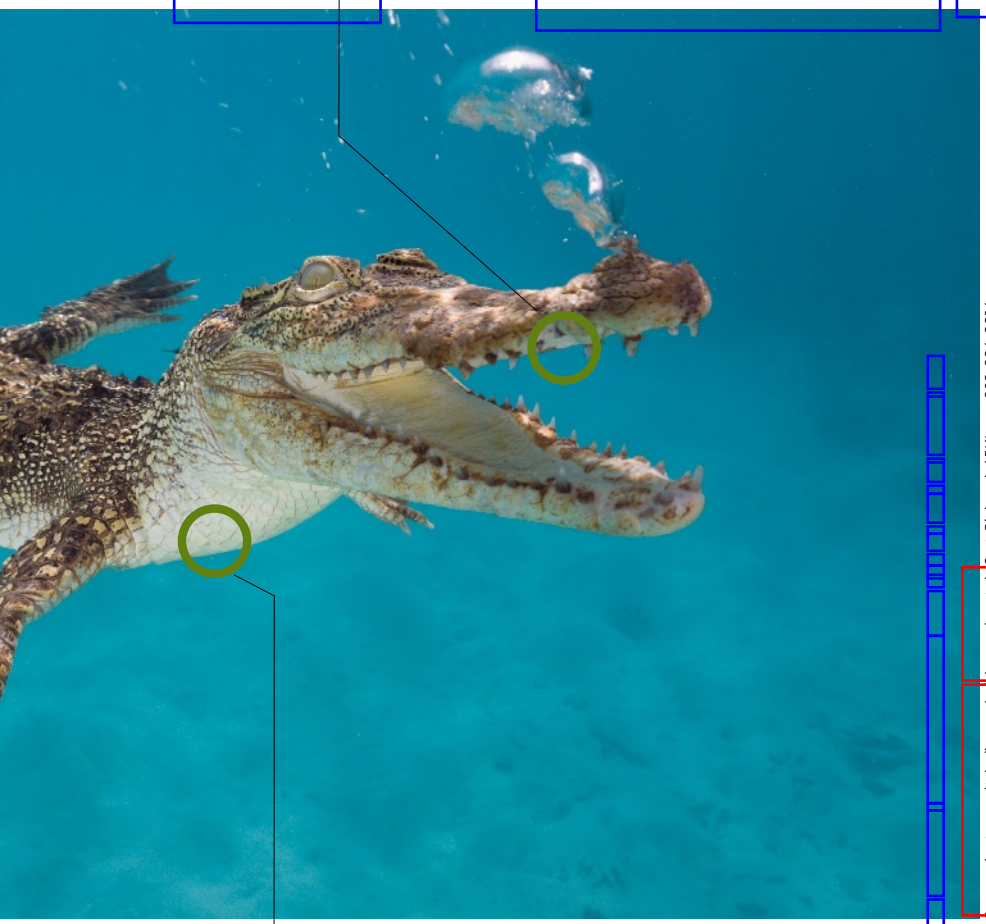
Avec ses 6,17 mètres et ses 1 075 kilogrammes, Lolong, capturé aux Philippines en 2011, reste le plus grand crocodile marin jamais attrapé. Celui-ci n'aurait cependant pas fait le poids face à *Sarcosuchus imperator*, un crocodylomorphe de 12 mètres et 8 tonnes qui vivait en Afrique du Nord durant le Crétacé, il y a entre 145 millions et 66 millions d'années.

0,3

Le crocodile du Nil consomme très peu d'énergie au repos : son taux métabolique au repos est de 0,3 (en millilitres de dioxygène par heure et par gramme^{0,67}), alors que celui du cochon d'Inde est de 3,5 et celui du canard, 11. En revanche, on estime que celui de *Postosuchus kirkpatricki*, un cousin pseudosuchien qui vivait il y a plus de 200 millions d'années, était plus proche de 2.

Source des taux métaboliques : L. Legendre et al., Syst. Biol., vol. 65(6), pp. 989-996, 2016

À l'âge adulte, un crocodile marin compte jusqu'à 68 dents.



Contrairement aux apparences, les crocodiles sont plus proches des oiseaux que des lézards. Ils partagent avec les oiseaux certains caractères dérivés, comme le gésier, ce diverticule musculeux du système digestif.

Crocodile marin
(Crocodylus porosus)
Taille : jusqu'à 7 m (mâle) et 3,5 m (femelle)
Poids : jusqu'à 1 200 kg (mâle) et 200 kg (femelle)

d'années, étaient des animaux exclusivement terrestres, avec une station bipède. Ainsi, la position quadripède des crocodiles paraît corrélée avec leur vie amphibie, et l'articulation de leur cheville est une réminiscence de la verticalité des pattes postérieures de leurs lointains ancêtres.

Une autre caractéristique étonnante est apparue quand on s'est intéressé à la taille des crocodiles et de leurs ancêtres. Aujourd'hui, on sépare le taxon des archosaures en deux groupes frères, les ornithodires (ptérosaures, dinosaures et oiseaux) et les pseudosuchiens, dont font partie les crocodiles et leurs ancêtres. La phylogénie montre que la lignée des crocodiles était extrêmement diverse, avec des formes exclusivement marines, d'autres uniquement terrestres comme de grands herbivores armés ou des hypercarnivores coureurs.

Cette lignée est si bien connue qu'on peut l'utiliser pour tester des hypothèses évolutives. C'est en effectuant un tel test que, tout récemment, Maximilian Stockdale et Michael Benton, de l'université de Bristol, en Grande-Bretagne, ont détecté une propriété inattendue de la taille des pseudosuchiens.

REINE ROUGE ET FOU DU ROI

Leur question était la suivante : l'évolution de ces animaux obéit-elle à l'« hypothèse de la reine rouge » ou à celle du « fou du roi » ? Ces deux hypothèses, non contradictoires, portent sur les forces évolutives en présence. La première privilégie les interactions des organismes (compétition, sélection sexuelle, parasitisme, confrontation proie/prédateur…). La seconde insiste plutôt sur l'importance des changements abiotiques environnementaux, comme les fluctuations à long terme de la température, de la composition de l'atmosphère ou du niveau de la mer, ou encore des changements abrupts, comme des impacts de bolides extraterrestres, des éruptions volcaniques massives ou d'autres effets de la tectonique des plaques. >

> Dans le premier cas, on s'attend à des changements évolutifs lents et continus, dans le deuxième cas à des épisodes évolutifs rapides entrecoupés de stases, suivant le modèle des équilibres ponctués proposé par les paléontologues américains Niles Eldredge et Stephen Jay Gould dans les années 1970.

Pour répondre à leur question, Maximilian Stockdale et Michael Benton ont suivi l'évolution de la taille du corps, relativement facile à estimer quand on dispose de fossiles quasi complets. Leurs études montrent que le rythme de changement de la taille corporelle est erratique, avec des accès de forte croissance suivis de stases. Par exemple, la disparité de taille diminue fortement à la transition Trias-Jurassique, il y a 200 millions d'années, en correspondance avec l'une des plus sévères extinctions de masse. Il en est de même, de manière moins marquée, à la frontière Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années. Par ailleurs, cette disparité – ainsi que la taille – augmente au début de l'optimum climatique du Miocène, il y a entre 17 millions et 15 millions d'années, pour chuter à la fin de ce dernier. De façon générale, on observe une corrélation entre l'augmentation de la taille corporelle et celle de la température.

POÏKILOTHERMES OU HOMÉOTHERMES ?

L'hypothèse du fou du roi paraît donc s'imposer. Les deux paléontologues postulent que, pendant les périodes chaudes, de tels animaux dits « à sang froid » ou, plus exactement, « poïkilothermes » – dont la température varie avec celle de leur milieu – auraient été capables d'investir plus de ressources dans leur croissance et plus longtemps, la croissance des animaux poïkilothermes étant continue, même si sa vitesse diminue avec le temps. Toutefois, on peut s'interroger sur cette interprétation. En effet, depuis une vingtaine d'années, une équipe autour d'Armand de Ricqlès, au Collège de France, puis de Jorge Cubo, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, se penche sur le métabolisme des archosaures, et ses résultats invitent à la prudence.

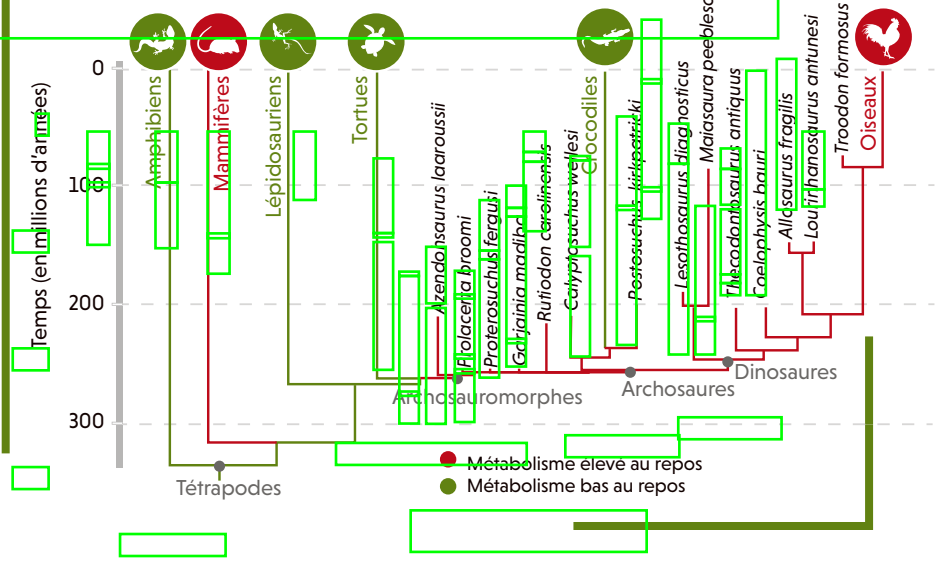
En examinant l'histologie osseuse des animaux, les chercheurs ont estimé la vitesse de leur métabolisme au repos. Ainsi, en 2016, l'équipe de Jorge Cubo a montré que des archosaures anciens avaient un niveau métabolique élevé au repos, proche de celui de vertébrés homéothermes (à température constante, dits aussi « à sang chaud ») comme les mammifères ou les oiseaux. Les ancêtres des oiseaux étaient donc homéothermes. Or, contrairement aux animaux poïkilothermes, les homéothermes ne grandissent plus une fois adultes. Était-ce aussi le cas des ancêtres des crocodiles ?

Non. Les crocodiles actuels sont à sang froid, poïkilothermes, ce qui leur permet de jeûner pendant des semaines entre deux repas, vu leur très bas taux métabolique. Mais, en 2019, Jorge Cubo et Nour-Eddine Jalil ont montré, toujours par l'histologie osseuse, que dans la lignée menant aux crocodiles modernes, il y a eu, à un moment donné, une réversion de l'homéothermie vers la poïkilothermie, peut-être en relation avec leur adaptation à la vie aquatique (*voir l'encadré ci-dessus*). Reste à savoir quand : si les ancêtres des crocodiles étaient encore homéothermes durant les périodes chaudes étudiées par Maximilian Stockdale et Michael Benton, leur raisonnement ne tient plus…

Quoi qu'il en soit, il fut un temps où des ancêtres des crocodiles étaient à sang chaud, de tailles diverses, capables de tenir sur deux pattes et vivaient exclusivement hors de l'eau. Les crocodiles sont donc bien loin de ressembler à leurs ancêtres… ■

ENCERCLÉS DE SANG CHAUD

Les paléontologues séparent les sauriens en deux groupes frères, les lépidosauromorphes, menant aux lépidosaures (dont les lézards, serpents et iguanes actuels), et les archosauromorphes, qui incluent les crocodiles et les oiseaux. Les archosaures, qui ont émergé après l'extinction de masse de la limite entre le Permien et le Trias, il y a 250 millions d'années, se séparent en deux groupes frères, les ornithodires (ptérosaures et dinosaures) et les pseudosuchiens, dont les crocodiles. En 2019, Jorge Cubo et Nour-Eddine Jalil ont montré que des archosauromorphes anciens et certains groupes frères présentaient déjà un métabolisme élevé au repos, proche de celui de vertébrés à sang chaud. Des ancêtres des crocodiles étaient donc eux aussi à sang chaud.



BIBLIOGRAPHIE

M. T. Stockdale et M. J. Benton, **Environmental drivers of body size evolution in crocodile-line archosaurs**, *Commun. Biol.*, vol. 4, article 38, 2021.

J. Cubo et N.-E. Jalil, **Bone histology of *Azendohsaurus laaroussii* : Implications for the evolution of thermometabolism in Archosauromorpha**, *Palaeobiology*, vol. 45(2), pp. 317-330, 2019.

L. J. Legendre *et al.*, **Palaeohistological evidence for ancestral high metabolic rate in archosaurs**, *Syst. Biol.*, vol. 65(6), pp. 989-996, 2016.

© Pour la Science, d'après J. Cubo et N.-E. Jalil, Palaeobiology, vol. 45(2), pp. 317-330, 2019

POUR LA SCIENCE
Édition française de Scientific American

HORS-SÉRIE

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 110 (Fév. 20)
réf. DO109

N° 109 (Nov. 20)
réf. DO109

N° 108 (Sept. 20)
réf. DO108

N° 107 (Mai 20)
réf. DO107

N° 106 (Févr. 20)
réf. DO106

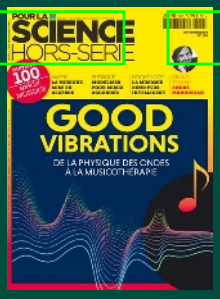
N° 105 (Nov. 19)
réf. DO105

N° 104 (Juil. 19)
réf. DO104

N° 103 (Avr. 19)
réf. DO103

N° 102 (Fév. 19)
réf. DO102

N° 101 (Nov. 18)
réf. DO101



N° 100 (Août 18)
réf. DO100

N° 99 (Mai 18)
réf. DO099

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. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter **boutique.pourlascience.fr**

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ **Par chèque à l'ordre de** *Pour la Science*
☐ **Carte bancaire**
N° .....
Date d'expiration .....
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

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

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

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

L'AUTEUR

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

SEL, SUCRE ET PÂTES LEVÉES

Le contact des levures avec le sel ou le sucre empêcherait-il les pâtes de lever? Des expériences simples contredisent nombre de livres culinaires.

Le kougelhopf, ou kouglof, est une brioche à pâte levée. L'ajout de sucre ou de sel ne perturbe pas la fermentation nécessaire à cette pâte.

Le savoir traditionnel n'est pas toujours emprunt de la grande sagesse que certains espèrent y trouver. Pour la cuisine, n'est-ce pas un peu comme pour la médecine, par exemple? L'ancien est périmé, et l'âge d'or est un fantasme... sans compter que la superstition a longtemps régné, quand la science n'avait pas mis son nez dans l'affaire.

Nous avons repris des études sur la fermentation et exploré le rôle du sel et du sucre dans des «pâtes levées», telles celles qui font les brioches, les kougelhopfs, les babas, les croissants... Ces pâtes sont composées de farine, de beurre, parfois d'œufs, parfois de sucre, et on les fermente à l'aide de «levures», des microorganismes vivants, et non pas de poudre levante – mélange de composés minéraux qui dégage du dioxyde de carbone quand il est chauffé en présence d'eau.

Or nombre de livres de cuisine ou de pâtisserie affirment qu'il faut absolument éviter de mettre la levure au contact du sel et du sucre dans la pâte, sous peine de la «tuer» et de ne plus obtenir de fermentation. Doit-on les suivre?

Observons qu'il y a deux façons principales de préparer les pâtes levées: soit on mélange tous les ingrédients et on laisse la pâte dans un endroit tiède, soit on disperse d'abord les levures dans un liquide (le lait est souvent conseillé).

Dans cette seconde manière, on voit mieux le démarrage de la fermentation: de la mousse apparaît et, quand celle-ci est suffisamment abondante, on ajoute la suspension de levures au reste de la pâte.

Le sel ou le sucre sont-ils néfastes? On pouvait le penser, parce que le sel est utilisé depuis des millénaires pour conserver les viandes, grâce à son action sur les microorganismes, tandis que le sucre, lui, est si puissant qu'il est même utilisé dans les infirmeries de campagne pour éviter l'infection des plaies.

LE PIRE CAS À L'ÉPREUVE

Nous avons testé le cas le pire: celui de l'ajout de sel ou de sucre dans le liquide. En effet, sel ou sucre sont alors directement au contact des levures, au lieu d'être dispersés dans toute la masse de la pâte. Plus précisément, nous avons préparé dix récipients (deux fois cinq) pour tester l'effet du sel ou du sucre soit sur des levures fraîches, soit sur des levures lyophilisées.

Les dix récipients contenaient tous le même mélange initial de 100 grammes (g) d'eau et de 20 g de farine. Les cinq premiers récipients contenaient la même quantité de levure fraîche (20 g), et les cinq autres la même quantité de levure lyophilisée (5 g). Au même moment, nous avons mis de côté le premier récipient de chaque lot, nous avons ajouté un peu de sel pour le deuxième (4 g), un peu de sucre pour le troisième (4 g), beaucoup de sel pour le quatrième (16 g) et beaucoup de sucre pour le cinquième (16 g). Puis nous avons laissé ces récipients reposer près d'un radiateur afin de stimuler la fermentation éventuelle.

La présence de sel ou de sucre n'a en rien gêné le fonctionnement des levures. Au contraire: après 45 minutes, c'était dans les récipients contenant beaucoup de sel que la fermentation était la plus active; et après 90 minutes, c'était dans les récipients où il y avait beaucoup de sucre que la mousse était la plus abondante. *Stricto sensu*, la précision culinaire est ainsi réfutée... J'invite les pâtissiers à ne plus craindre le sel ou le sucre dans leurs fermentations; et à s'interroger sur les raisons pour lesquelles une idée technique fausse a été transmise! ■

LE KOUGELHOPF

❶ Dans un verre, mettre 10 g d'eau et 2 g de farine, puis ajouter 2 g de levures.
❷ Ajouter 1 g de sel et 1 g de sucre, et stocker le verre dans un endroit tiède.
❸ Quand le contenu du verre commence à mousser, l'ajouter à 250 g de farine, 100 g de beurre, 50 g de sucre et 2 œufs. Bien travailler jusqu'à ce que la préparation soit lisse.
❹ Couvrir et faire lever la pâte.
❺ Rabattre la pâte, couvrir à nouveau et faire encore lever.
❻ Pendant ce temps, faire gonfler des raisins secs dans un peu d'eau bouillante.
❼ Quand la pâte est levée, ajouter les raisins. Mettre la préparation dans un moule bien beurré et sucré. Couvrir et faire lever.
❽ Mettre au four à 180 °C pendant 50 minutes.
❾ Quand le moule a un peu refroidi, démouler et servir.

© Victoria P./shutterstock.com

POUR LA SCIENCE
THEMA

L'ORDINATEUR QUANTIQUE
Promesses et réalité

- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €

Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi

https://boutique.groupepourlascience.fr

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

P.88 TENSÉGRITÉ

« La tenségrité, ce sont des îles de compression dans un océan de tension » : telle est la définition que proposait l'architecte américain Richard Buckminster Fuller (1895-1983), l'un des inventeurs de ce concept. Les structures architecturales fondées sur ce concept, formées de barres ne se touchant pas et reliées par des câbles, défient l'entendement.

P.54 8 MÈTRES

Le véritable *Dilophosaurus* était bien plus grand que son homologue de *Jurassic Park*, puisqu'il mesurait jusqu'à 2,5 mètres de haut et 8 mètres de long.

P.7

« Comme il n'existe sur Terre aucun pergélisol âgé de plus de 2,5 millions d'années, nous pourrons difficilement séquencer de l'ADN plus ancien »

RÉGIS DEBRUYNE
paléontologue au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

P.44 1859

Cette année-là, le physicien français Gaston Planté fête son vingt-cinquième anniversaire et met au point l'accumulateur plomb-acide, la première batterie électrique rechargeable.

P.92 POÏKILOTHERME

Les animaux dits « à sang froid », comme les crocodiles, ne le sont pas exactement. Leur température n'est pas basse en permanence, mais varie avec celle de leur milieu. Ils sont en fait poïkilothermes, par opposition à des animaux homéothermes comme les mammifères, dont la température reste constante. Eux aussi sont abusivement dits « à sang chaud » !

P.6 17

Le rat-taupe nu présente un répertoire vocal contenant au moins 17 signaux distincts et essentiels pour communiquer au sein de sa colonie. Chaque colonie présente ainsi une sorte de patois spécifique, qui permet aux animaux de s'identifier en tant que membres du groupe.

P.64 60 %

Aujourd'hui, la vapeur d'eau est à l'origine d'environ 60 % de l'effet de serre, tandis que la part du dioxyde de carbone (CO_2) en constitue 26 %. Pourtant, au cours de l'histoire de la Terre, c'est principalement la teneur atmosphérique en CO_2 qui a déterminé les variations de l'effet de serre et, avec elles, celles de la température terrestre.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Avril 2021 – N° d'édition : M0770522-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : MLP – ISSN : 0 153-4092 – N° d'imprimeur : 252603 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

PAS DE CHÂTEAU EN ESPAGNE MAIS JE FAIS PARTIE DU 1%

FLORENCE BAITINGER
est co-fondatrice de Gobi,
membre du collectif
1% for the Planet.
Chaque année,
Gobi reverse
1% de son chiffre d'affaires
à la protection
de l'environnement.

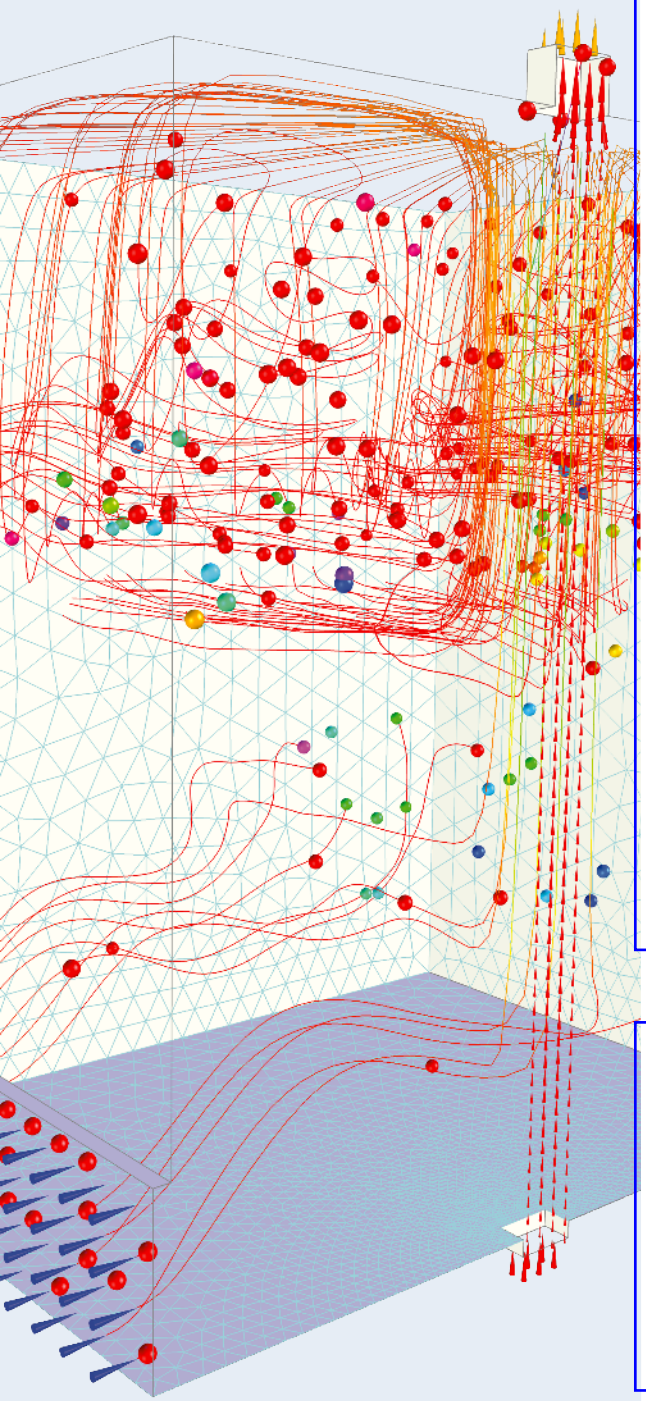
Rejoignez le mouvement sur
onepercentfortheplanet.fr

1% FOR THE PLANET®

CONCEPTION / PRODUCTION : .yz

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.