



Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Astrophysique

**LA MENACE DES
SUPERÉRUPTIONS
SOLAIRES**

■ Cancérologie

**CES CELLULES
QUI RENVERSENT
L'ÉVOLUTION**

■ Cosmologie

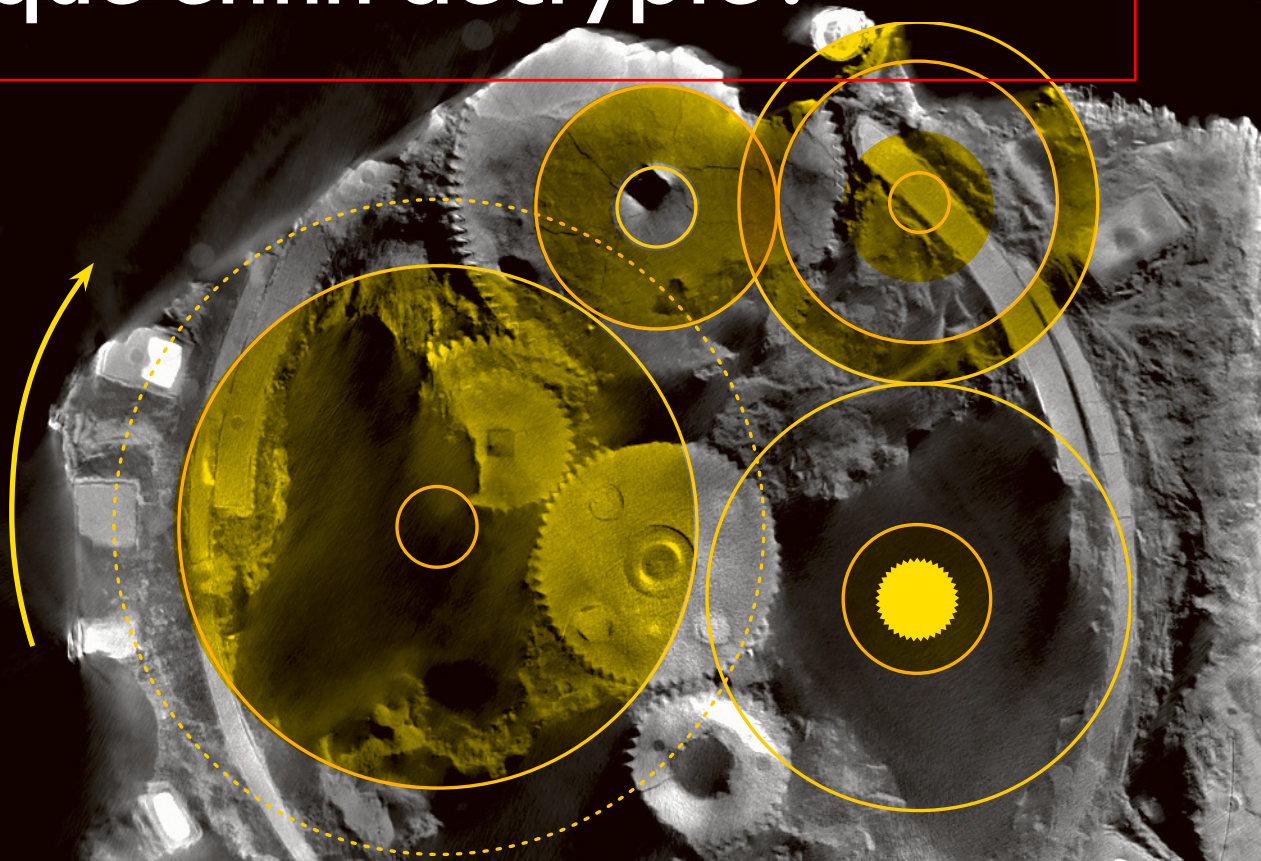
**LA GRAVITÉ
MODIFIÉE PASSE
UN TEST CRUCIAL**

03/22

HORLOGE ASTRONOMIQUE

ANTICYTHÈRE

**2 000 ans plus tard, le mécanisme
antique enfin décrypté ?**



cité

sciences
et industrie

conférences

les nourritures

cycles thématiques,
tables rondes, rencontres

février — juin 2022

accès gratuit

+ d'infos sur cite-sciences.fr

MARS

- 8 Se faire peur pour éviter le pire : le pouvoir des dystopies
- 11 > 12 Régions polaires : quels enjeux pour l'Europe ?

- 15 Plasticité cérébrale : à vos stimuli !
- 16 Publicité et alimentation : un cocktail explosif *
- 22 Fruits et légumes : l'équilibre dans l'assiette
- 24 Qu'est-ce que la science ? *
- 26 Climat : quelle politique énergétique pour l'UE ?
- 29 Insectes comestibles : l'assiette augmentée

AVRIL

- 5 La vie intraterrestre, rencontre dans les profondeurs
- 7 Où en est l'empowerment féminin ? cycle Ma planète demain

- 12 Comment le sol façonne notre monde ?
- 13 Paysages, un régal pour les yeux *
- 19 Des SOL-utions, pour la sécurité alimentaire et le climat
- 21 Algorithmes et jeux combinatoires : toute une histoire

MAI

- 18 Décarboner l'aviation : de nouvelles avancées
- 19 Microbiote : des microbes qui nous font du bien *

JUIN

- 1 Le miel : comment font les abeilles ? *
- 9 Volcans : bouches de la Terre ? *
- 11 Le satellite Gaïa, mètre de la galaxie
- 18 James Webb Space Telescope : un œil neuf sur l'Univers

* Cycle Ma première conférence à destination du jeune public.

Programme susceptible d'être modifié.

En partenariat avec

L'ANIMAL
& L'HOMME

Observatoire
de Paris

UNIVERSITÉ
DE PARIS

Ministère
de la Culture
et de la
Patrimoine

Ministère
de la
Transition
écologique
et
solidaire

POLES
ACTIONS

Avec le soutien de

Ministère
de la
Culture

Science
tips

Ministère
de la
Transition
écologique
et
solidaire

Ministère
de la
Culture

Ministère
de la
Transition
écologique
et
solidaire

Cerveau
& Psycho

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: François Lassagne
Rédacteurs en chef adjoints: Loïc Mangin,
Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaire: Élisabeth Doré

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

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

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy, Ingrid Lhande
Révisseuse: Anne-Rozenn Joubert
Assistante administrative: Doaa Mohamed
Marketing & diffusion: Stéphane Chobert
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalba
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:
Michael Baudouin, Yanis Bitsakis, Isabelle Bouchery,
Maud Bruguère, Eric Buffetaut, Nicolas Claidière, Patrice
Courvalin, Alexis Duchesne, Sylvain Guilbaud, Patrick
Laufs, Loïc Maignien, Étienne Pariat, Laurence Plévert,
Sylvie Raison, Sean Raymond, Sébastien Rodrigue, Olivier
Sandre, Jean-Sébastien Silvestre, Cédric Sueur,
Jean-Philippe Uzan, Caroline Vanhoove

PUBLICITÉ France
stephanie.julien@pourlascience.fr

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

Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h
Adresse postale:
Service abonnement
Groupe Pour la Science
235 avenue Le Jour se Lève
92100 Boulogne-Billancourt

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

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres; Alicia Abadie
Tél. 04 88 15 12 47

Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmut
President: Stephen Pincock

Executive vice president: Michael Florek
Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français
ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus
dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American»,
dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit
à «Pour la Science S.A.R.L.», 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75014 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction,
d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque
et le nom commercial «Scientific American» sont la propriété de
Scientific American, Inc. Licence accordée à «Pour la Science S.A.R.L.».
En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire
intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation
de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie
(20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

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



Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org

É
DITO



**François
Lassagne**
Rédacteur
en chef

MÉCANIQUE ANTIQUE

Faut-il savoir reproduire ce que l'on observe pour le comprendre? Le fait est qu'en matière de science il arrive que la reconstitution précède la pleine compréhension. Les efforts des chercheurs débouchent en ce cas, d'abord, sur la construction d'appareils à même de reproduire la régularité des phénomènes observés. Les édifices théoriques permettant d'en étendre la compréhension, au-delà de leur apparence première, viennent ensuite.

Tel est le message que nous livre, depuis son lointain passé, la machine d'Anticythère, auscultée, avec des moyens et une attention toujours affinés, par l'équipe de Tony Freeth.

Ce mathématicien, professeur à l'University College, à Londres, revient dans les pages de ce numéro sur le long chemin parcouru depuis la découverte, au début du xx^e siècle, des restes de cette machine unique en son genre. Unique, d'abord parce qu'on n'en connaît aucune analogue datant de la même période. Unique, ensuite parce qu'elle renouvelle le regard porté sur les savoir-faire des savants de l'Antiquité. Les subtilités de son fonctionnement, révélées par l'équipe de Tony Freeth, sont «stupéfiantes», selon les mots du chercheur.

Voici de nouvelles preuves que les concepteurs de la machine, au I^{er} siècle avant notre ère, savaient agencer des engrenages épicycliques aux dents millimétriques, pour leur faire prédire

la position des planètes dans le ciel, plus de 1500 ans avant Copernic. Ces artisans, maniant une technologie de précision, s'appuyaient pour cela sur la mécanique céleste babylonienne, ignorante du fait que les planètes de notre système orbitent autour du Soleil. Leur machine n'en est pas moins fidèle au mouvement apparent des corps célestes vus depuis la Terre.

La technique et la physique marchent bien souvent de concert, en un pas de deux qui offre à chacune la possibilité d'aller vers de nouveaux horizons. Les travaux des cosmologistes Constantinos

Skordis et Tom Złotnik, de l'université de Prague, également présentés dans ce numéro, redonnent du souffle aux théories de gravité modifiée, et offrent un nouvel espoir de résoudre l'énigme de la matière noire. Il faudra cependant, pour les confirmer, pointer vers le ciel profond, dans les années qui viennent, des instruments d'une grande complexité. La science n'a pas fini d'inventer les moyens de comprendre la mécanique céleste. ■

S

OMMAIRE

N° 533 / Mars 2022

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Une bactérie modélisée sur un cycle de vie
- Face à la sécheresse, mieux vaut croître peu et lentement
- Un gaz d'atomes ultrafroids devient invisible
- Conventions non humaines
- Le « poisson-lézard » géant d'Angleterre
- Comment l'embryon se fixe aux parois de l'utérus
- Un océan sur Mars il y a 3 milliards d'années

P. 20

LES LIVRES DU MOIS

A. Grothendieck:

Une œuvre inclassable?

Interview de Jean-François Bourguignon

P. 24

DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

De la pédagogie des métaphores

Catherine Aubertin

P. 26

LES SCIENCES À LA LOUPE

L'astrophysique

au service de la religion?

Yves Gingras

GRANDS FORMATS



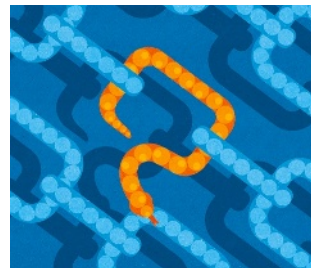
P. 52

ASTROPHYSIQUE

LA MENACE DES ÉRUPTIONS SOLAIRES GÉANTES

Jonathan O'Callaghan

De gigantesques orages géomagnétiques occasionnant d'importants dégâts sur Terre pourraient se produire plus fréquemment que les scientifiques ne le pensaient, avec des implications préoccupantes pour notre monde connecté.



P. 70

BIOLOGIE

CELLULES MALIGNES : LE RETOUR DE L'ÉGOÏSME PRIMITIF

Athena Aktipis

Dans un organisme multicellulaire, la vie des cellules repose sur leur coopération. Lorsque certaines reviennent à un comportement plus individualiste, des cancers apparaissent...

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À III (APRÈS LA P. 48)

De nouvelles thérapies pour traiter les dommages dus à de fortes irradiations
parrainé par

IRSN



P. 62

COSMOLOGIE

MATIÈRE NOIRE, LA PISTE DE LA GRAVITÉ MODIFIÉE PASSE UN TEST CRUCIAL

Sean Bailly

Décrire les caractéristiques du premier rayonnement de l'Univers était jusqu'à présent un test fatal pour tous les scénarios concurrents de la matière noire. Un nouveau modèle de gravité modifiée vient de passer cette épreuve.



P. 78

NEUROSCIENCES

GHB : ET POURTANT, IL SOIGNE...

Bernard Calvino

Le GHB, aujourd'hui connu comme la drogue du violeur, a d'abord été créé comme anesthésiant hypnotique. Cette molécule se montre aujourd'hui d'une aide précieuse dans le traitement de la narcolepsie, de l'addiction, de la fibromyalgie, voire de certaines maladies neurodégénératives...

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 :
© 2005 Nikon X-Tek Systems

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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



ARCHÉOLOGIE

P.28

LE MÉCANISME ANTIQUE D'ANTICYTHÈRE ENFIN DÉCRYPTÉ?

Tony Freeth

Un calculateur astronomique grec d'une incroyable complexité intrigue depuis sa découverte au xx^e siècle. Grâce à la tomographie à rayons X, l'équipe de recherche dédiée à cette machine à l'université de Londres en propose une reconstitution d'une précision inédite.

TECHNOLOGIE

P.40

2000 ANS ET TOUTES LEURS DENTS

Jean-Paul Delahaye

De la machine d'Anticythère aux moteurs des voitures électriques, l'ingénieuse mécanique des engrenages, toujours plus élaborée, est au cœur de bien des technologies essentielles... jusqu'à l'échelle moléculaire.

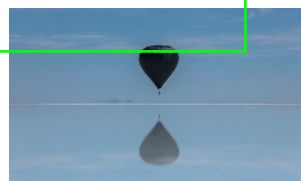
RENDEZ-VOUS

P.86

ART & SCIENCE

Un appel d'ère... nouvelle

Loïc Mangin



P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Un bon point

pour le télescope

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik



P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Sur la piste de l'origine des reins

Hervé Le Guyader



P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Coquilles congelées, coquilles altérées

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

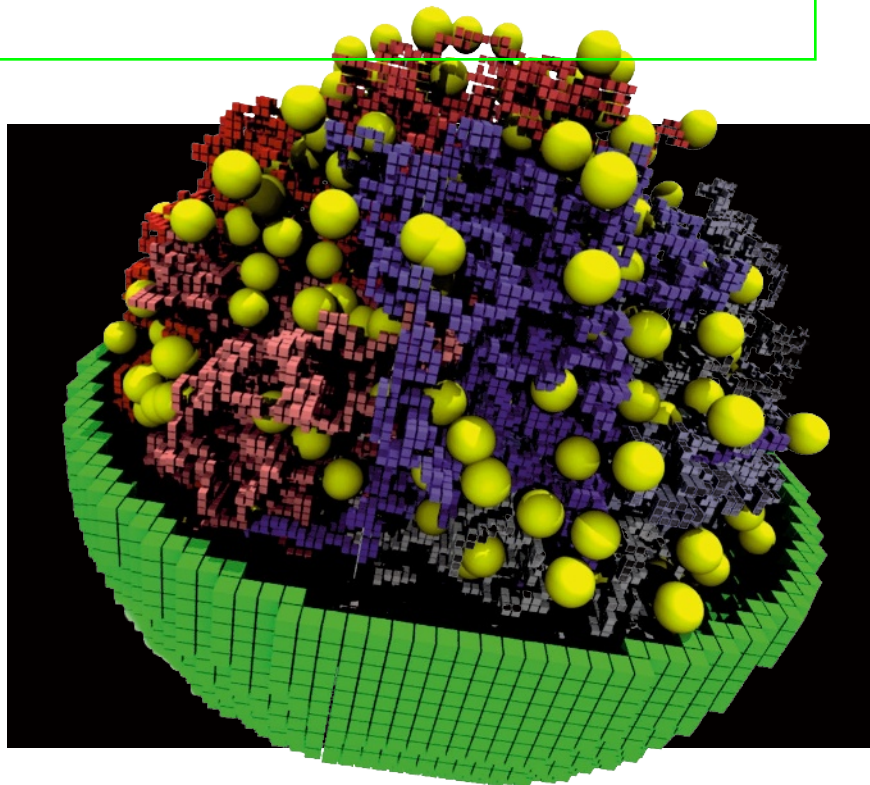
P.6 Échos des labos

P.20 Livres du mois

P.24 Disputes environnementales

P.26 Les sciences à la loupe

UNE BACTÉRIE MODÉLISÉE À L'ÉCHELLE MOLÉCULAIRE SUR UN CYCLE DE VIE ENTIER



Une étape de la modélisation a consisté à simuler en trois dimensions la cellule avec ses différents éléments et les contraintes qu'ils imposent, ici les ribosomes (en jaune), la membrane (en vert) et l'ADN (les petits cubes colorés).

Simuler l'ensemble des réactions chimiques, l'expression des gènes et la croissance d'une cellule au fil du temps, une fiction ? Plus maintenant...

Quels ingrédients faut-il, au minimum, pour créer la vie ? Depuis plus de vingt ans, un graal de la biologie moléculaire est de déterminer l'ensemble des activités et fonctions nécessaires pour qu'une cellule se développe et se divise. Une approche consiste à construire la cellule la plus simple possible, contenant seulement les gènes indispensables. Avec l'idée que son étude, et sa modélisation, nous renseigneront sur le fonctionnement des cellules réelles, plus complexes. Une équipe autour de Zaida Luthey-Schulten, de l'université de l'Illinois, à Urbana-Champaign, aux États-Unis, vient de franchir une étape clé de cette quête de longue haleine en simulant le cycle de vie complet d'une cellule minimale.

Lorsque, à partir de 1995, on a commencé à séquencer des génomes entiers de bactéries, on s'est vite aperçu qu'on ignorait la fonction de nombre de gènes séquencés. La première approche pour

Le modèle cinétique de la cellule intègre désormais quelque 2000 réactions liées à l'activité de 251 gènes

comblent cette lacune consiste à étudier le rôle de chaque gène inconnu, un travail long et laborieux. Mais en 2008, des chercheurs de l'institut J.-Craig-Venter, à Rockville, aux États-Unis, ont synthétisé

pour la première fois le génome entier d'une bactérie – *Mycoplasma genitalium* – et ont montré que ce génome synthétique était viable. Dès lors, il devenait possible d'adopter une autre approche : partir d'un tel génome et y supprimer les gènes non indispensables. C'est ainsi qu'en 2016 le groupe de l'institut J.-Craig-Venter a construit une cellule minimale à partir du génome synthétique d'une autre bactérie, *Mycoplasma mycoides*. Viable, l'organisme synthétique ainsi produit, nommé Syn3A, compte seulement 493 gènes, dont seule une petite fraction (20%) n'a pas de fonction claire.

Il y a quelques années, l'équipe de Zaida Luthey-Schulten, en collaboration avec des chercheurs de l'institut J.-Craig-Venter, s'est lancé un défi : modéliser le fonctionnement de cette cellule minimale sur un cycle de vie complet, incluant sa division. Elle n'était pas la première à modéliser une cellule entière. Notamment, en 2012, Markus Covert, à l'université Stanford, aux États-Unis, et ses collègues ont publié un modèle de

Mycoplasma genitalium, qui, pour la première fois, prenait en compte tous les gènes et processus chimiques connus dans un organisme capable de se répliquer. Ce modèle représentait presque tous les aspects de la vie de la cellule, de sa croissance à sa réplication. Cependant, les différentes fonctions cellulaires étaient réparties en 28 modules distincts, chacun modélisé à l'aide de la méthode mathématique la plus appropriée. En d'autres termes, le modèle était plus fin que tous les précédents, mais pas encore au point de prendre en compte la fonction de chaque gène de manière complètement intégrée.

C'est la prouesse que l'équipe de Zaida Luthey-Schulten a réalisée. Dans une première étape, en 2019, elle avait déjà modélisé le réseau de réactions chimiques qui ont lieu dans la cellule minimale Syn3A (c'est-à-dire son métabolisme) en s'appuyant sur les données expérimentales. À présent, elle a produit un modèle cinétique de cette cellule en ajoutant les fonctions des macromolécules : quelque 2 000 réactions liées à l'activité de 251 gènes qui interviennent dans les divers processus régissant la production de chaque protéine à partir de l'ADN.

De plus, le modèle prend en compte la géométrie de la cellule. À partir d'observations en cryotomographie électronique, l'équipe a reproduit la disposition des ribosomes (les unités de production des protéines) dans un modèle tridimensionnel de la bactérie, où elle a ensuite positionné les autres éléments à l'aide de règles de remplissage et d'exclusion.

Finalement, l'équipe a obtenu un modèle dynamique quasi complet de la cellule sur un cycle de vie entier, qui a révélé comment la cellule équilibre les demandes pour son métabolisme, la transcription de son génome et sa croissance. Des améliorations sont encore prévues, notamment pour simuler plusieurs cycles cellulaires d'affilée, mais on n'a jamais été aussi près de comprendre les principes de la vie – au moins de celle d'une cellule minimale. ■

Marie-Neige Cordonnier

Z. R. Thornburg et al., *Cell*, 2022

Face à la sécheresse, mieux vaut croître peu et lentement

Les espèces d'arbres tropicaux à croissance lente, plus petits et plus denses, supportent mieux les sécheresses, dont la fréquence augmente avec le réchauffement climatique, nous explique Joannès Guillemot, chercheur en écophysiologie forestière au Cirad, au Brésil.



Propos recueillis par Isabelle Bellin

**JOANNÈS
GUILLEMOT**
Chercheur au Cirad

Les changements induits par l'augmentation du nombre de sécheresses sur les forêts tropicales ont souvent été étudiés. Quelle est l'originalité de votre approche ?

Le point de départ de notre étude a été le travail d'une autre équipe, celle de Nadja Rüger, de l'université de Leipzig, en Allemagne. En 2020, elle a montré que la dynamique d'une forêt tropicale (Barro Colorado Island, au Panama), peut être prédite en considérant deux stratégies écologiques : l'une liée à la vitesse de croissance (les arbres qui se développent vite meurent rapidement), l'autre à la taille (les plus grands arbres se reproduisent peu). Dans un graphique dont les deux axes représentent ces deux stratégies, les espèces peuvent être positionnées en combinant sept caractéristiques, que l'on appelle des « traits fonctionnels » : hauteur de l'arbre, densité du bois, épaisseur et taille des feuilles, masse des graines, concentration en azote et en phosphore. Ce travail a fourni un important outil de prédiction démographique pour les forêts tropicales actuelles, mais il n'a pas abordé la manière dont la dynamique forestière sera affectée par le changement climatique. Dans notre étude, d'une ampleur inédite, nous avons cherché à comprendre si la tolérance à la sécheresse est une dimension indépendante de la démographie des forêts tropicales, ou si elle est associée à ces deux axes de stratégies écologiques.

Comment avez-vous procédé ?

À partir de bases de données qui rassemblent des mesures de traits fonctionnels d'arbres tropicaux, sur tous les continents, nous avons retenu 601 espèces pour lesquelles deux traits qui caractérisent particulièrement bien la tolérance à la sécheresse étaient renseignés : le point de perte de turgescence foliaire et la vulnérabilité du xylème (les vaisseaux du bois)

à l'embolie. Le premier caractérise le niveau de stress hydrique pour lequel, pour éviter de perdre de l'eau, l'arbre ferme ses stomates, ces petites bouches d'aération qui permettent les échanges gazeux ; le second trait caractérise le niveau de stress hydrique pour lequel la circulation d'eau entre le sol et les feuilles est interrompue. Pour ces 601 espèces, nous avons ensuite cherché des données sur les sept traits fonctionnels retenus dans l'étude de 2020.

Quels sont vos résultats ?

Nous avons montré que la tolérance à la sécheresse n'est pas une dimension indépendante des autres axes démographiques qui régissent la dynamique des forêts tropicales. Nous avons ainsi fourni un cadre d'interprétation physiologique à une tendance globale déjà observée dans plusieurs forêts : le changement climatique favorise les espèces tropicales les plus petites et à croissance lente. Ces résultats permettent d'imaginer la composition et les formes des forêts tropicales de demain.

Comment utiliser ce résultat pour des projets de reforestation ?

Dans les forêts tropicales, de nombreuses espèces sont encore mal connues. Il serait donc tentant d'utiliser nos résultats pour nous affranchir de la mesure – coûteuse – de tolérance à la sécheresse, et de choisir des espèces utilisées dans les projets de reforestation sur des traits plus faciles à mesurer comme la densité du bois. Or, bien que nous ayons mis en lumière une corrélation significative entre ces traits à l'échelle mondiale, elle reste trop faible pour garantir que toutes les espèces à croissance lente et forte densité du bois seront fortement tolérantes à la sécheresse. Il est donc important de continuer à caractériser la tolérance à la sécheresse de l'immense diversité des espèces d'arbres tropicaux. ■

J. Guillemot et al., *Global Change Biology*, 2022
N. Rüger et al., *Science*, 2020

PHYSIQUE QUANTIQUE

UN GAZ D'ATOMES ULTRAFROIDS DEVIENT INVISIBLE

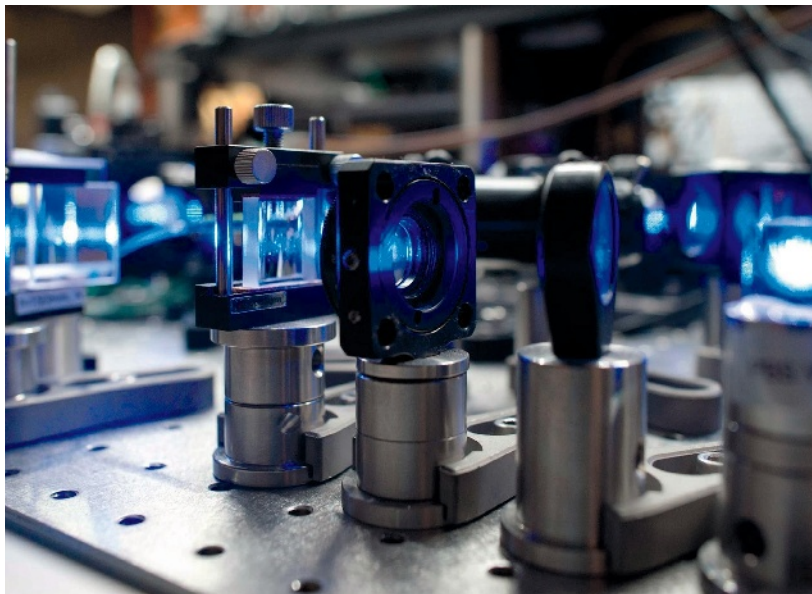
Grâce aux lois de la physique quantique, des chercheurs ont empêché toute diffusion de la lumière sur un gaz de fermions, le rendant de fait totalement transparent.

L'invisibilité, sous toutes ses formes, fascine. Des physiciens ont fait disparaître des gaz d'atomes en les comprimant et les refroidissant. Pour réaliser ce «tour de magie», ils ont utilisé des atomes appartenant à la famille des fermions. Ces derniers ont la particularité de se plier au principe d'exclusion de Pauli, qui stipule que deux fermions identiques (même particule, même état interne, etc.) ne peuvent occuper le même état quantique. Et c'est justement en s'appuyant sur ce principe que les chercheurs ont rendu leur gaz transparent, et donc invisible!

Le principe de Pauli se manifeste dans de nombreuses situations. Par exemple, au sein d'un atome dans son état de plus basse énergie, les électrons remplissent d'abord les couches de plus basses énergies. Dès qu'une orbitale est remplie, les électrons investissent les couches supérieures. Une façon de se représenter cette idée est celle d'une salle de concert où tout le monde voudrait les places les plus proches de la scène, mais où on ne peut s'asseoir que sur une chaise vide.

En 1990, David Pritchard, du MIT, et deux collègues ont imaginé une façon surprenante de mettre en évidence le principe d'exclusion de Pauli. En refroidissant un gaz d'atomes fermioniques à une température proche du zéro absolu, on obtient alors un gaz dit «dégénéré»: les atomes occupent les niveaux d'énergie les plus faibles (les places les plus proches de la scène de concert). Et si, en plus, on comprime le gaz, les atomes vont ressentir fortement les contraintes du principe d'exclusion de Pauli. Quelle conséquence?

Dans des conditions non dégénérées, quand un gaz est éclairé avec de la lumière, les photons (les particules de lumière) sont diffusés dans toutes les directions par les atomes du gaz. C'est cette lumière diffusée qui nous permet de voir le gaz. Lorsqu'un atome diffuse un photon, il subit un mouvement de recul en échangeant de l'énergie et de l'impulsion avec le photon. Mais si le gaz est dans un état dégénéré, les atomes n'ont pas la possibilité de changer d'énergie puisque les états d'énergie voisins sont déjà occupés par d'autres atomes. Toutes les places dans la salle de concert autour de l'atome sont prises. Le gaz



Dans l'expérience menée au laboratoire JILA, aux États-Unis, un laser bleu traverse un ensemble de lentilles avant de pénétrer dans un gaz de strontium ultrafroid. À cause des conditions de densité et de température, les photons ne peuvent interagir avec les atomes et traversent le gaz sans être diffusés.

37 %

AVEC UN GAZ DE LITHIUM 6

A UNE TEMPÉRATURE DE 20 MICROKELVINS ET UNE DENSITÉ DE L'ORDRE DE 10^{15} ATOMES PAR CENTIMÈTRE CUBE, L'ÉQUIPE DE WOLFGANG KETTERLE A CONSTATÉ UNE BAISSSE DE 37 % DE L'INTENSITÉ DE LA LUMIÈRE DIFFUSÉE.

ne peut donc plus diffuser de photons: ces derniers traversent le gaz sans dévier de leur trajectoire initiale. Le gaz devient ainsi invisible.

Le phénomène n'avait jamais été observé car il est très difficile de comprimer un gaz en le maintenant à basse température. Trois équipes viennent de relever le défi: le groupe de Wolfgang Ketterle, du MIT; Jun Ye, de l'université du Colorado, et ses collègues; Amita Deb et Niels Kjærgaard, de l'université d'Otago, en Nouvelle-Zélande. Tous ont observé une baisse de luminosité comme prévu. «Le résultat d'Amita Deb et Niels Kjærgaard est très élégant, note Hélène Perrin, chercheuse CNRS au Laboratoire de physique des lasers de l'université Sorbonne-Paris-Nord. Les deux chercheurs ont comparé la situation de leur gaz de fermions (potassium 40) avec un gaz de bosons (du rubidium 87). Ils ont constaté dans ce dernier cas une diffusion amplifiée, un résultat aussi prévu par David Pritchard et ses collègues dans leur article de 1990.» ■

Sean Bailly

C. Sanner *et al.*, *Science*, 2021; A. B. Deb et N. Kjærgaard, *ibid.*; Y. Margalit *et al.*, *ibid.*

Quelle épaisseur de glacier ?

Les glaciers fournissent de l'eau potable à de nombreuses populations. Mais l'estimation des volumes disponibles souffrait de fortes incertitudes. Romain Millan, de l'université Grenoble-Alpes, et ses collègues ont utilisé des images satellitaires récentes pour évaluer les vitesses d'écoulement des glaciers, données qu'ils ont reliées au volume. Résultats : les stocks d'eau sont revus à la hausse de 33 % dans certains bassins de l'Himalaya mais à la baisse de 23 % dans les Andes tropicales.

Nature Geoscience,
7 février 2022

Ultraléger et robuste comme l'acier

Les polymères sont de longues molécules constituées de briques de base, des monomères, qui s'assemblent bout à bout. Depuis quelques années, les chimistes ont développé des processus où la croissance opère en deux dimensions. L'équipe de Michael Strano, du MIT, a conçu un matériau dont les plans de polymères s'assemblent en couches superposées connectées par des liaisons hydrogène. Résultat : un matériau six fois plus léger et deux fois plus résistant que l'acier.

Nature, 2 février 2022

Des lumières sur les filets

Un des inconvénients de la pêche avec des filets maillants est le nombre important de captures accidentelles, et les impacts sur l'écosystème. Jesse Senko, de l'université d'État de l'Arizona, et ses collègues ont équipé des filets de LED vertes. Ces dispositifs avaient déjà été utilisés pour éviter la prise des tortues de mer. Les chercheurs ont montré que la capture de requins, par exemple, a diminué de 95 %, sans conséquence sur les opérations de pêche.

Current Biology, 20 janvier 2022

CONVENTIONS NON HUMAINES

Les conventions sociales font partie intégrante de nos vies d'humains. Bien qu'on s'attende à en voir aussi chez tous les animaux sociaux, notamment les autres primates, l'observation de leur apparition chez les non-humains est rare. Néanmoins, Anthony Formaux, de l'université d'Aix-Marseille, et ses collègues ont observé l'émergence d'une convention sociale chez des babouins de Guinée (*Papio papio*).

Les chercheurs ont soumis un problème de coordination à un groupe de 19 babouins de la station de primatologie de Rousset, dans les Bouches-du-Rhône. L'expérience commençait quand deux singes se plaçaient devant deux écrans tactiles voisins : le premier babouin devait choisir un symbole entre deux affichés (parmi plusieurs possibles). Les deux symboles s'affichaient ensuite sur l'écran du deuxième babouin. Si celui-ci touchait le même symbole, les deux singes étaient récompensés ; sinon, la tâche échouait. Dans un premier temps, les singes pouvaient observer ce que faisait leur voisin. Très vite, le score des singes a augmenté. Une hiérarchie entre les stimuli s'est peu à peu dessinée, maximisant les chances de récompense des primates. Pour s'assurer qu'il ne s'agissait pas de simples



Couple de babouins (*Papio papio*) s'occupant d'un petit.

imitations, les chercheurs ont placé une paroi opaque entre les deux écrans. Les scores des babouins sont restés élevés, ce qui montre qu'il s'agit bien d'un apprentissage et non d'une imitation. Grâce à différents tests, les chercheurs ont montré que le comportement des singes était efficace, stable et arbitraire, trois critères nécessaires pour définir une convention sociale. En outre, si deux conventions se développent dans un groupe, les chercheurs ont constaté que celle de la majorité finit par se généraliser. ■

Nicolas Butor

A. Formaux et al., *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2022

CLIMAT

PLACE AUX PETITS POISSONS

Quand l'océan est plus chaud, le dioxygène s'y dissout plus difficilement. Or les grands poissons ont besoin proportionnellement de plus d'oxygène que les petits. Les premiers disparaîtraient alors au profit des seconds. Mais ce remplacement se fait-il par des individus de taille plus modeste de la même espèce ou simplement d'autres espèces ? Arnaud Bertrand, de l'IRD, et ses collègues ont étudié le registre fossile de poissons (notamment leurs vertèbres) dans la région du courant de Humboldt, au large du Pérou, qui est aujourd'hui froid et riche en anchois, mais était 2 °C plus chaud il y a environ 130 000 ans. À l'époque, la taille des espèces était la même qu'aujourd'hui. En revanche, les anchois y étaient minoritaires, l'écosystème était dominé à 60 % par des gobies, des poissons plus petits.



Banc d'anchois (*Engraulis ringens*).

Les modifications climatiques ont donc entraîné un bouleversement des communautés au large du Pérou avec une dominance d'espèces petites adaptées à des conditions hypoxiques. ■

N. B.

R. Salvatelli et al., *Science*, 2022

PALÉONTOLOGIE



© Matt Power/Anglian Water/Bav Media/Shutterstock

Le paléontologue Dean Lomax pose pour indiquer la taille de l'ichtyosaure découvert.



Une zone humide vient de livrer le plus grand et le plus complet ichthyosaure jamais découvert en Grande-Bretagne. Joe Davis, le chef de l'équipe de conservation de la Rutland Water Nature Reserve, l'a découvert fortuitement sur une île formée après la vidange temporaire d'un lac, en le prenant d'abord pour de «vieux tuyaux enterrés»... Les ichthyosaures sont des reptiles marins qui hantèrent les mers du Trias inférieur (252 à 257 millions d'années) jusqu'à vers 93 millions d'années au Crétacé (100 à 66 millions d'années). Occupant les niches écologiques des requins, des dauphins et autres orques actuels, ils avaient, derrière un bec armé de nombreuses dents fines aptes à crocher un poisson, le même genre de corps hydrodynamique que les cétacés, se terminant toutefois par une longue queue, dont l'extrémité courbée vers le bas était surmontée d'une nageoire verticale.

L'ichthyosaure de la réserve naturelle anglaise mesure 10 mètres de long. L'espèce à laquelle il appartient, *Temnodontosaurus trigonodon*, se classe troisième par la taille parmi les ichthyosaures, qui en comptent plus de 100. Les paléontologues anglais lui attribuent un âge d'environ 180 millions d'années. Les membres de son genre sont remarquables de par la taille de leurs yeux, ce qui suggère qu'ils vivaient dans les zones profondes et obscures de l'océan. Ainsi, le fond de lac où il vient d'être mis au jour a sans doute été aussi au début du Jurassique un fond d'océan, où quelque processus sédimentaire rapide aura brusquement enterré ce grand animal. ■

François Savatier

LE « POISSON-LÉZARD » GÉANT D'ANGLETERRE

Communiqué de presse du Leicestershire and Rutland Wildlife Trust
<https://www.lrwf.org.uk/seadragon>, 10 janvier 2022

BIOLOGIE CELLULAIRE

COMMENT L'EMBRYON SE FIXE AUX PAROIS DE L'UTÉRUS

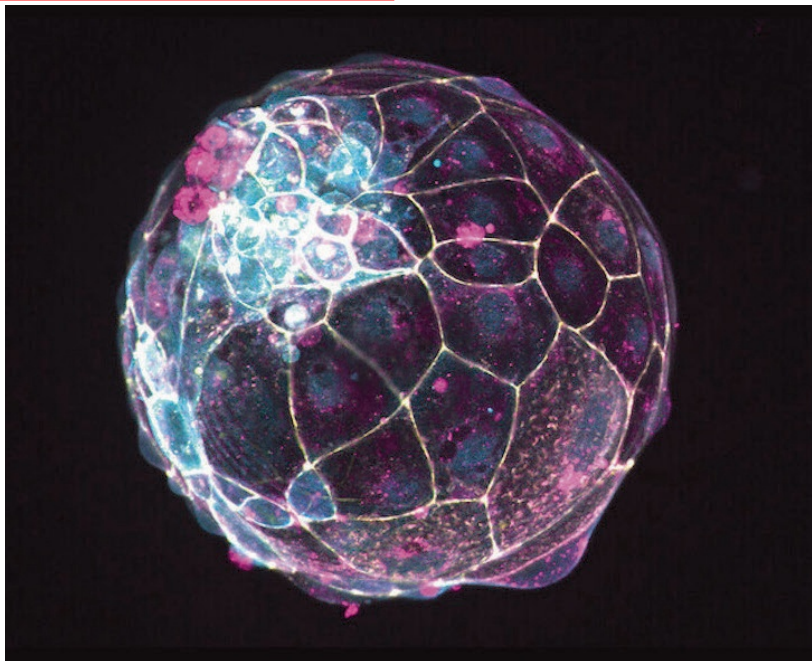
Grâce à des cellules souches humaines s'organisant pour former un modèle d'embryon, il est possible d'étudier cette étape cruciale.

Entre cinq et sept jours après la fécondation, l'embryon humain se fixe aux parois de l'utérus. Dans certains cas, cette implantation échoue. Mais pour étudier ce mécanisme, les biologistes sont confrontés à des questions éthiques évidentes. Dès lors, une solution consiste à reproduire artificiellement le développement d'un embryon, sans procéder à une fécondation *in vitro*, en partant de cellules souches pluripotentes humaines (hPSC). Jusqu'à présent, seules des structures correspondant à des phases trop tardives pour étudier cette étape avaient été obtenues. L'équipe de Nicolas Rivron, de l'Institut de biotechnologie moléculaire de l'Académie autrichienne des sciences, vient de relever ce défi avec succès.

«En 2018, nous avons obtenu un premier modèle complet d'embryon de souris, composé des structures embryonnaires et extraembryonnaires, à partir de cellules souches. Le stade qui nous intéressait était celui du blastocyste. Chez l'humain, il est atteint entre cinq et sept jours après la fécondation. Il correspond au stade obtenu dans les cliniques de fécondation *in vitro*, juste avant son implantation dans l'utérus de la mère, raconte Nicolas Rivron. Nous avons nommé ces structures artificielles issues de cellules souches des "blastoides".»

Pour en produire chez l'humain, Nicolas Rivron et ses collègues se sont intéressés à trois voies de signalisation qu'ils ont inhibées dans les cellules souches. Résultat : 70% des agrégats hPSC se sont spontanément organisés en blastoïdes. En analysant le profil d'expression génique des différentes cellules, l'équipe a montré qu'elle obtenait les trois lignées cellulaires caractéristiques du blastocyste : l'épiblaste (une structure embryonnaire qui formera plus tard le fœtus), le trophoctoderme (un tissu extraembryonnaire formant le placenta) et l'endoderme primitif (lui aussi extraembryonnaire, et qui se développera en une membrane, le sac vitellin, entourant l'embryon).

Ensuite, l'équipe a implanté ces blastoïdes *in vitro* sur un tissu constitué de cellules endométriales, caractéristiques de celles présentes dans l'utérus. Si les cellules endométriales ne sont pas stimulées par des hormones, œstrogènes et



Blastoïde humain dont différentes fonctions sont identifiées grâce à des marqueurs fluorescents.

progestérone, l'implantation ne réussit pas, mais elle atteint 40% avec une préstimulation, ce qui suggère l'existence d'un contrôle du côté endométrial pour permettre ou non l'implantation. De plus, les expériences réalisées montrent que les blastoïdes, tout comme les blastocystes, s'attachent aux cellules endométriales *via* une zone précise du trophoctoderme qui est au contact avec l'épiblaste. Un signal envoyé par ce dernier semble même nécessaire à l'implantation.

Les mécanismes moléculaires en jeu restent à décrypter. Les comprendre permettrait par exemple de développer un contraceptif non hormonal qui bloquerait cette activation de l'implantation. Une prise unique en cas de rapport non protégé permettrait de se passer de la contrainte d'une contraception hormonale quotidienne. «À l'inverse, notre travail ouvre aussi des perspectives pour améliorer la réussite implantatoire dans le cadre des FIV, les fécondations *in vitro*», note Nicolas Rivron. ■

Noëlle Guillon

H. Kagawa et al., *Nature*, 2021

L'HORMONE DU MatriarcAT

Les sociétés de suricates sont dominées par une matriarche qui empêche la reproduction des femelles subordonnées. Christine Drea, de l'université Duke, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que l'agressivité de la matriarche, et de sa descendance, était due à un taux élevé de testostérone. Pour tester le lien entre cette hormone sexuelle et le succès reproductif des matriarches, les chercheurs ont traité certaines d'entre elles au flutamide, qui inhibe la testostérone. Ces femelles et leurs petits devenaient alors moins agressifs, perdant leur avantage vis-à-vis des subordonnées. L'effet intergénérationnel de la testostérone serait ainsi héréditaire et permettrait aux jeunes de la matriarche de concourir au statut dominant. ■

Élisa Doré

C. M. Drea et al., *Nature Communications*, 2021

TRANSPARENTS ET TOXIQUES



Le papillon *Hypomenitis enigma* vit dans les Andes. Il est toxique et fait partie d'un groupe d'espèces partageant les mêmes traits mimétiques dans leur habitat. Ce groupe est caractérisé par des ailes presque entièrement transparentes.

ASTROPHYSIQUE

UNE GROSSE EXOLUNE ?

Des exoplanètes, c'est-à-dire des planètes gravitant autour d'une autre étoile que le Soleil, les astronomes en recensent déjà des milliers. Il semble assez naturel de penser que certains de ces corps sont accompagnés d'"exolunes". Jusqu'à présent, seule une poignée de candidates ont été répertoriées, mais elles reposent sur des indices encore difficiles à confirmer. Pour trouver d'autres exolunes, l'équipe de David Kipping, à l'université Columbia, a mis en place un vaste programme de recherche visant soixante-dix exoplanètes. Ces dernières répondaient à certains critères qui les rendaient plus susceptibles d'héberger un satellite naturel : une grande taille (au moins la moitié de Jupiter) et une orbite assez loin de leur étoile (au moins la distance Terre-Soleil). Les astronomes ont trouvé une seule candidate, nommée Kepler-1780 b-i, située à 5700 années-lumière de nous et grande comme 2,6 fois la Terre. ■

Valentin Rakovsky

D. Kipping et al., *Nature Astronomy*, 2022

Faut-il vivre caché pour être heureux ? De nombreuses espèces de papillons ont adopté ce principe en usant de stratégies de camouflage qui leur permettent d'échapper à leurs prédateurs. À contre-courant, d'autres se parent de couleurs vives pour signaler qu'ils sont porteurs de toxines. Mais d'autres encore, non toxiques et évoluant près des individus toxiques, ont évolué de sorte à présenter les mêmes motifs voyants. Les prédateurs, incapables de faire la différence, les épargnent. On peut alors s'interroger sur certains papillons toxiques dont les ailes sont en grande partie transparentes. On constate d'ailleurs des phénomènes de mimétisme chez des espèces aux ailes transparentes. Charline Pinna et Marianne Elias, du Muséum d'histoire naturelle, à Paris, et leurs collègues ont montré que les propriétés optiques des zones transparentes d'une espèce à l'autre ont bien trop de similitudes pour être simplement le fruit du hasard. Un mécanisme de convergence évolutive, et donc de mimétisme, est bien en jeu. Cette transparence aurait un double avantage. À grande distance, les papillons dotés d'ailes transparentes seraient moins visibles que ceux avec des ailes opaques. Ces lépidoptères profiteraient d'un certain effet de camouflage. Mais à courte distance, les zones transparentes signaleraient la toxicité et dissuaderaient le prédateur affamé.

Le bénéfice de la transparence pourrait cependant avoir un prix. Les écailles des ailes jouent chez les papillons un rôle important dans la thermorégulation de l'insecte et l'imperméabilité des ailes. Or la transparence repose sur des modifications majeures de la structure des écailles, ce qui pourrait nuire à ces deux fonctions. Ceci expliquerait pourquoi ce trait n'est pas omniprésent chez tous les papillons malgré son double avantage. ■

S. B.

C. S. Pinna et al., *eLife*, 2021

GÉOSCIENCES

UN OCÉAN SUR MARS IL Y A 3 MILLIARDS D'ANNÉES ?

Cette question suscite de nombreux débats chez les spécialistes de la Planète rouge. Mais un nouveau modèle climatique renforce la possibilité de son existence.

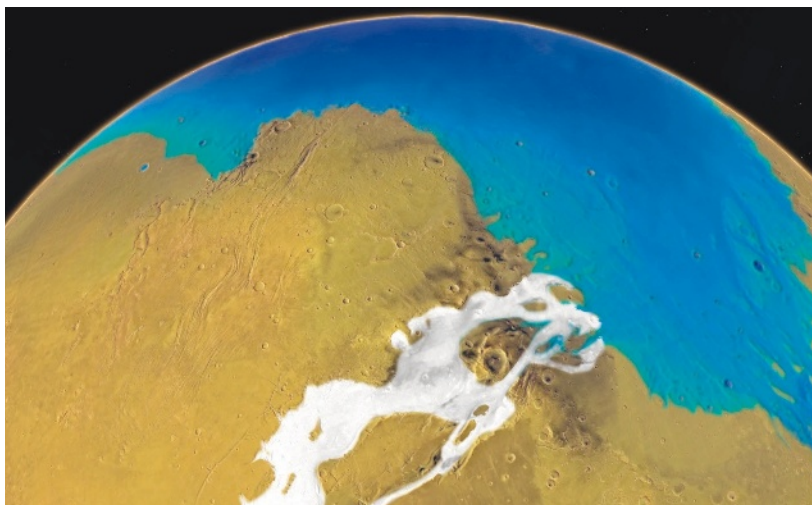
La Planète rouge a-t-elle été bleue il y a trois milliards d'années ? Si la présence d'eau liquide sur Mars dans le passé est aujourd'hui un fait admis, avec des traces de rivières et de lacs, le cas d'un océan stable fait toujours débat. De nombreux indices géologiques font pencher la balance vers une réponse positive, mais les conditions climatiques supposées à cette époque laissent planer le doute. Frédéric Schmidt, du laboratoire Geops et de l'université Paris-Saclay, et ses collègues proposent un nouveau modèle climatique qui suggère qu'un océan a bien existé.

L'hypothèse d'un tel océan est ancienne. En 1976, parmi les photographies des sondes américaines *Viking*, certains clichés dans l'hémisphère Nord ont mis en évidence des structures assez similaires à des rivages. Elles bordent une région sans relief, Vastitas Borealis, se trouvant 4 à 5 kilomètres en dessous de l'altitude moyenne de la planète. Aurait-elle été remplie d'eau – au moins partiellement – à une époque lointaine, formant ainsi un vaste océan ?

Ces indices, et bien d'autres, semblent assez solides pour se convaincre que Mars a hébergé une vaste étendue d'eau pendant une longue période il y a entre 3 et 3,5 milliards d'années. Et pourtant... cette hypothèse semblait en désaccord avec les différents scénarios imaginés pour le climat ancien sur Mars. Les modèles les plus complets jusqu'à présent suggéraient que l'eau s'accumulait sous forme de neige sur les montagnes et les hauts plateaux de l'hémisphère Sud, ne laissant que peu de chance pour la formation d'un océan stable autour du pôle Nord.

Il reste cependant beaucoup à comprendre du système climatique martien. Frédéric Schmidt et ses collègues ont développé un nouveau modèle qui inclut la dynamique océanique et atmosphérique, en y ajoutant deux ingrédients qui se sont révélés cruciaux : la circulation océanique et les glaciers.

En fixant leurs paramètres, les chercheurs obtiennent un modèle compatible (voir ci-contre) avec un océan stable pour une température moyenne de l'atmosphère martienne au sol proche de 0 °C. Mais l'océan n'aurait-il pas gelé ?



Le pôle Nord de Mars était-il recouvert d'un océan il y a 3 milliards d'années ? Un nouveau modèle climatique suggère que oui. L'océan aurait été alimenté en eau par des glaciers comme celui de Kasei Vallis (en blanc sur cette vue d'artiste).

10 %

AVEC
UNE ATMOSPHÈRE
MARTIENNE DOTÉE
D'UNE PRESSION
DE 1 BAR ET
COMPOSÉE
DE DIOXYDE
DE CARBONE (90 %)
ET DE DIHYDROGÈNE
(10 %), ON OBTIENT
UNE TEMPÉRATURE
MOYENNE PROCHE
DE 0 °C ET
DES CONDITIONS
PERMETTANT
LA PRÉSENCE D'EAU
LIQUIDE.

D'après ces nouvelles simulations, la circulation océanique aurait eu un rôle important en transportant de grandes quantités d'énergie depuis les plus basses latitudes vers le pôle. La température de surface de l'océan aurait été d'environ 7 °C, il n'aurait donc pas gelé.

Autre problème, les précipitations sous forme de pluie au-dessus de l'océan ne compensent pas l'évaporation. L'étendue d'eau aurait donc progressivement disparu. Frédéric Schmidt et ses collègues ont cependant pris en compte le fait que la majorité des précipitations se produisent sur les montagnes et les hauts plateaux, sous forme de neige. Celle-ci s'accumule pour constituer des glaciers dont certains s'avancent jusque dans l'océan. Ils approvisionnent donc ce dernier en eau, ce qui compense les pertes par évaporation. Le régime devient alors stable et permet l'obtention d'un océan sur une longue durée.

Cependant, avec ce modèle, les chercheurs supposent que le système martien était très riche en eau, assez pour au moins remplir un océan. C'est bien plus d'eau que ne contiennent actuellement les calottes polaires. Qu'est devenue l'eau martienne ? ■

S. B.

F. Schmidt et al., PNAS, 2022

Honorer les morts, un acte de rébellion

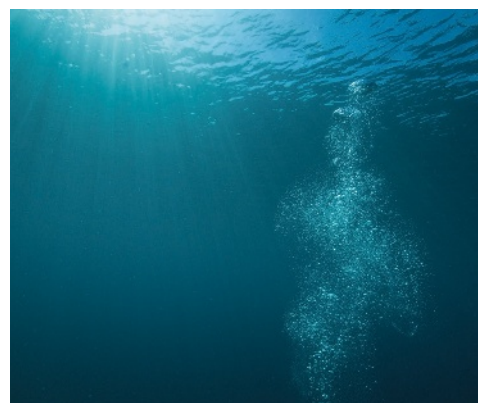
Depuis 2012, près de deux cents assemblages de vertèbres enfilées sur des tiges de roseaux ont été découverts au Pérou, dans l'ancien royaume de Chincha. Grâce à une datation au carbone 14, Jacob Bongers, de l'université d'East Anglia, au Royaume-Uni, et ses collègues ont estimé que les roseaux ont été cueillis entre 1550 et 1590, et que les ossements seraient un peu plus anciens. D'après ces chercheurs, lorsque les Espagnols catholiques sont arrivés dans la région en 1534, ces derniers ont voulu mettre fin à certaines pratiques des peuples locaux qui vénéraient leurs ancêtres et préservaient leurs squelettes. Dans un acte de rébellion, la société Chincha aurait reconstitué certaines dépouilles.

Antiquity, 2 février 2022

DU DIOXYGÈNE DANS LA NUIT

Vital pour de très nombreux organismes, le dioxygène n'a pas toujours été abondant dans l'atmosphère terrestre. Celui que nous respirons aujourd'hui est le résultat d'un peu plus de 2 milliards d'années de photosynthèse, effectuée par les cyanobactéries d'abord, puis par les algues et les plantes. Au cœur de ce mécanisme naturel se trouve un élément clé : la lumière du soleil. Pourtant, Beate Kraft, de l'université du Sud du Danemark, et ses collègues ont récemment découvert qu'un microorganisme marin, l'archée *Nitrosopumilus maritimus*, connu pour son rôle dans le cycle de l'azote, est capable de produire du dioxygène lorsqu'il se retrouve dans un environnement qui en est dépourvu, et ce, sans lumière.

Il existe d'autres microorganismes capables de produire de l'oxygène sans lumière, mais ils vivent dans des environnements très limités et en populations réduites. *Nitrosopumilus maritimus*, en revanche, est si répandue que, dans un



Dans les océans, des archées, acteurs importants du cycle de l'azote, seraient capables de produire du dioxygène dans l'obscurité.

seau d'eau de mer, elle représente 20% des cellules observées. Du reste, le mécanisme qu'elle emploie pour produire cet oxygène – utile à son métabolisme – est inédit et ne correspond à aucun autre modèle connu à ce jour. ■

William Rowe-Pirra

B. Kraft et al., Science, 2022

QUESTIONNEZ-VOUS SUR LES LIMITES DE L'ESPÈCE HUMAINE ET LE DEVENIR DE NOTRE PLANÈTE !

Sommes-nous des êtres à part entière dans le monde vivant ?

Comment les sportifs repoussent-ils les limites de leur corps biologique ?

Quelles sont les impacts des biotechnologies sur l'espèce humaine ?

La science peut-elle nous faire espérer l'immortalité ?

Quelles innovations technologiques réparent, augmentent ou connectent le corps humain ?

FÊTE DU SPORT !

LES 26 ET 27 MARS

Rendez-vous au musée pour un week-end événement dédié au sport : démonstrations, initiations, rencontres avec des grands noms du sport, expériences virtuelles...

Tout le programme sur museedelhomme.fr

Pour la Science

MUSÉE DE L'HOMME
Place du Trocadéro
Paris 16^e

BIOLOGIE VÉGÉTALE

COMMENT LA FEUILLE POUSSE

Pour les biologistes, le brin d'herbe constitue une énigme. La structure de cette feuille, et plus généralement de toutes les graminées (ou Poacées) se caractérise par des nervures parallèles et une gaine en tube qui entoure la tige. Elle se distingue ainsi de la feuille des Eudicotylédones, à l'image des chênes, qui comporte un pétiole (la tige) bien distinct du limbe, la partie mince, aplatie et parcourue par des nervures ramifiées. Les correspondances morphologiques des feuilles de graminées et celles des Eudicotylédones, qui sont tous des angiospermes, constituent un débat ancien.

Jusqu'à présent, la théorie qui avait la faveur des spécialistes reposait sur une correspondance entre les feuilles des graminées et le pétiole des feuilles d'Eudicotylédones. Cette piste reposait sur le fait que la nervation est parallèle dans le pétiole comme dans la feuille de graminée. Mais une approche concurrente, proposée dès le XIX^e siècle suggérait que seule la gaine des graminées correspond au pétiole des Eudicotylédones.

Pour comparer les différentes morphologies à l'échelle cellulaire, Annis Richardson, du centre John Innes, à Norwich, au Royaume-Uni, et ses collègues ont conçu un modèle numérique de croissance des feuilles. En



Chez le maïs, de la famille des graminées, la feuille forme une gaine autour de la tige.

ajustant de nombreux paramètres, ils ont simulé le développement des deux types de feuilles en combinant plusieurs approches (moléculaire, génétique du développement). Ils ont alors constaté que le modèle plus ancien, avec l'équivalence gaine-pétiole, était plus cohérent avec leurs simulations. Cette meilleure connaissance de la dynamique de croissance des feuilles pourrait un jour apporter des éléments pour contrôler le rendement des céréales. ■

I. B.

A. E. Richardson *et al.*, *Science*, 2021

ARCHEOLOGIE

LES KUNGAS, MOTEURS HYBRIDES DES PREMIERS CHARS DE COMBAT

Avant la domestication du cheval il y a 4500 ans, les élites mésopotamiennes allaient à la guerre sur des chars de combat tirés par des « kungas ». On savait ces mystérieux équidés prestigieux, mais on ignorait leur nature. Cela a changé depuis que l'équipe d'Eva-Maria Geigl, à l'institut Jacques-Monod de Paris, l'a identifiée.

Les chercheurs ont séquencé le génome d'un équidé présumé être un kunga trouvé dans les sépultures royales du Tell Umm-el-Marra – possiblement l'ancienne cité de Tuba – en Syrie, puis ils l'ont comparé à ceux des ânes domestiques et des hémippes – une sous-espèce d'âne sauvage d'Asie disparue au XX^e siècle en



Certains guerriers sumériens allaient à la guerre sur des chariots tirés par des équidés : des kungas.

Syrie. Il en ressort que les équidés du Tell Umm-el-Marra ont été obtenus en croisant des ânesses avec des hémippes mâles. Les kungas furent donc des « bardots avant l'heure », c'est-à-dire des hybrides produits par un étalon et une ânesse, sauf que l'étalon était un indomptable âne sauvage d'Asie. La première « cavalerie militaire » fut en fait une « ânerie militaire »...

F. S.

E. A. Bennett *et al.*, *Sci. Adv.*, 2022

EN BREF

Combien d'espèces d'arbres ?

Au sein d'un projet collaboratif mondial, Peter Reich, de l'université du Minnesota, aux États-Unis, et ses collègues ont produit une nouvelle estimation de la richesse spécifique d'arbres sur Terre ! À partir de bases de données et d'outils statistiques, ils l'estiment à 73 000 espèces d'arbres dans le monde dont 9 200 à découvrir, un chiffre 14 % plus élevé que l'état de nos connaissances actuelles. Parmi les espèces inconnues, 40 % se trouveraient en Amérique du Sud.

PNAS, 31 janvier 2022

Nouvelle catalyse pour le propène

Le propène est une importante matière première dans l'industrie pétrochimique et représente donc un enjeu économique majeur. Sa synthèse repose sur une réaction entre le dioxyde de carbone et le propène. Mais les catalyses pour accélérer cette réaction n'étaient pas très efficaces. Feilong Xing, de l'université de Hokkaido, au Japon, et ses collègues ont proposé un nouveau système de catalyse stable exploitant les propriétés de trois métaux (cobalt, platine et indium).

Nature Catalysis, 27 janvier 2022

Anticiper le rejet de greffe

Dans le cadre du Human Proteoform Project, les chercheurs répertorient toutes les formes qu'une protéine peut prendre : des millions pour seulement 20 000 protéines chez l'humain. Rafael Melani, de l'université Northwestern, et ses collègues ont démontré l'intérêt de telles données. Grâce à une prise de sang, il serait possible de détecter des protéoformes présentes uniquement en cas d'un rejet de greffe de foie. Il serait alors possible d'anticiper le rejet et d'adapter le traitement d'immunosuppression.

Science, 27 janvier 2022

SOUPLE À HAUTE FRÉQUENCE

L'lectronique souple et élastique présente un grand intérêt pour la biologie et la santé. Mais, jusqu'à présent, les spécialistes ne savaient pas fabriquer des composants opérant à une fréquence supérieure à 100 hertz. Faut-il pouvoir atteindre des fréquences de plusieurs mégahertz, ces dispositifs ne peuvent fonctionner sans fils pour l'alimentation ou le transfert de données. Zhenan Bao, de l'université Stanford, et ses collègues viennent de développer des diodes souples haute fréquence dont les caractéristiques sont assez stables. Pour une fréquence d'entrée de 6,78 mégahertz, par exemple, avec une tension efficace initiale de 1,4 volt, la diode livre une tension continue de 0,74 volt au repos, et 0,48 volt éteinte à 150% de sa longueur. ■

Martin Tiano

N. Matsuhisa et al., *Nature*, 2021

BIOLOGIE ANIMALE

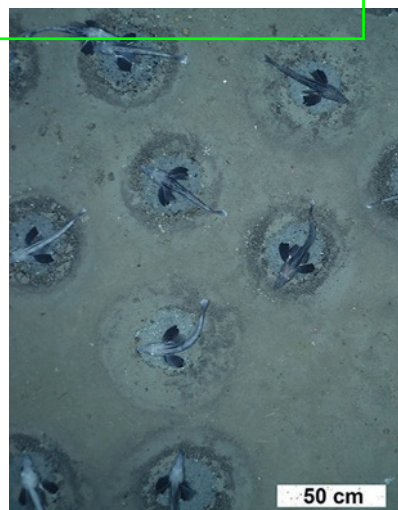
LE PANDA AU RÉGIME GRAS

Le panda géant se nourrit exclusivement de feuilles de bambous, mais à l'approche de l'été s'y ajoutent des pousses plus nutritives. Il prend alors du poids et son microbiote intestinal est modifié avec une forte augmentation de la part des bactéries *Glostridium butyricum*. Pour déterminer le rôle de ces dernières dans la prise de poids du panda, Guangping Huang et ses collègues, de l'Académie chinoise des sciences, ont réalisé des greffes de fèces de panda chez des souris. Les rongeurs prenaient du poids quand les fèces étaient riches en *C. butyricum*. Les chercheurs ont montré que ces bactéries produisent du butyrate. Cette molécule stimule l'expression d'un gène du système circadien, *Per2*, qui augmente la synthèse de lipides. Cette étude chez la souris suggère qu'une modification du microbiote du panda favorise le stockage de graisse et que ce mécanisme pourrait agir en synchronisant son rythme circadien. ■

E. D.

G. Huang et al., *Cell Reports*, 2022

60 MILLIONS DE NIDS EN MER DE WEDDELL



Le poisson des glaces de Jonah *Neopagetopsis ionah* édifie des nids à l'aide de graviers et d'autres composants. Dans les eaux glacées de l'Antarctique, 60 millions de tels nids ont été découverts sur une zone de 240 kilomètres carrés (2,4 fois la superficie de Paris, une ville qui compte 2 millions d'habitants). La densité en nids est dix fois supérieure à celle de la capitale en habitants!

Le poisson des glaces de Jonah nidifie, mais on ignorait que des dizaines de millions d'individus le faisaient au même endroit. Une expédition marine en Antarctique vient de le révéler.

La mer de Weddell s'étend au-delà de la barrière de Filchner-Ronne, le prolongement sur l'eau d'un glacier s'étendant sur la terre ferme de l'Antarctique. Là, tout semble désolé. Pourtant, au fond de l'eau glaciale, la vie est en ébullition! Et de façon spectaculaire. Autun Purser, de l'institut Alfred-Wegener, à Bremerhaven, en Allemagne, et son équipe ont en effet eu la surprise de découvrir un grand nombre de nids de poisson des glaces de Jonah *Neopagetopsis ionah*. Combien? À peine 60 millions...

Cette espèce, avec d'autres, a la particularité d'avoir un sang dépourvu d'hémoglobine mais riche en protéines antigels, grâce auxquelles elle résiste aux grands froids. Autre caractéristique, au moment de la reproduction, ces poissons construisent une sorte de nid que le mâle surveillera lorsque les œufs y auront été déposés.

Ce sont ces nids que la caméra de l'Ofobs (Ocean floor observation and bathymetry system), immergée et traînée par le bateau *Polarstern*, a repérés lors d'une mission à l'est de la barrière de Filchner-Ronne. Surpris par leur nombre, l'équipage a décidé d'explorer la région de façon plus systématique et de compléter les images par des analyses au sonar. Résultat, 16 160 nids observés entre 420 et 535 mètres de profondeur sur une surface de 45 600 mètres carrés. Extrapolés aux 240 kilomètres carrés de l'aire de nidification supposée (2,4 fois la superficie de Paris), ce sont bien 60 millions de nids qui ont été... dénichés, chacun abritant quelque 1 700 œufs!

Avec une biomasse en poissons estimée à 60 000 tonnes, c'est tout l'écosystème de la région qui en profite, à commencer par les phoques de Weddell qui se repaissent de ces proies. Et les auteurs de l'étude d'en appeler à la Convention sur la conservation de la faune et la flore marines de l'Antarctique pour mieux protéger cette pouponnière géante. ■

Loïc Mangin

A. Purser et al., *Current Biology*, 2022

MÉDECINE

DES LYMPHOCYTES MODIFIÉS AU SECOURS DU CŒUR

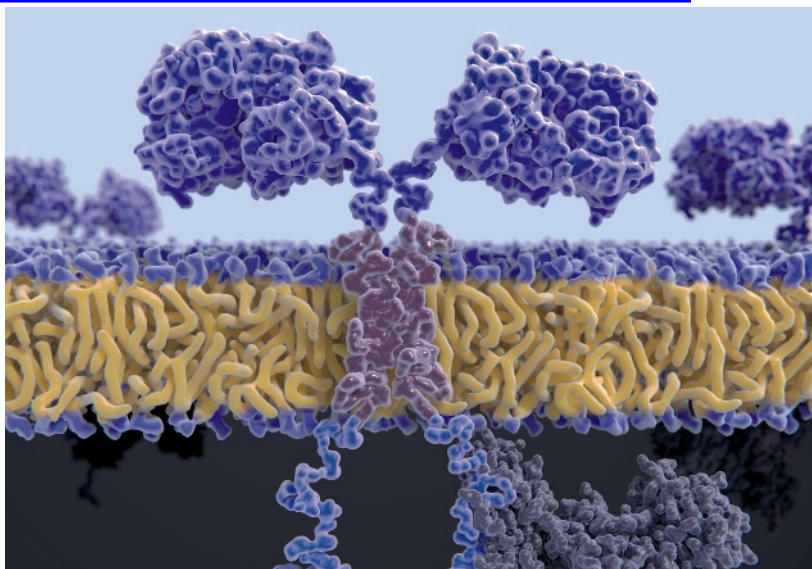
Ces cellules du système immunitaire modifiées *in vivo* réduiraient la fibrose cardiaque délétère qui s'installe parfois après un accident cardiaque.

L'immunothérapie, une stratégie consistant à stimuler le système immunitaire, a représenté une avancée importante dans le traitement des cancers. Elle pourrait maintenant investir d'autres champs comme celui des maladies cardiovasculaires, notamment l'insuffisance cardiaque. Dans cette maladie, l'activation incontrôlée ou le développement excessif de cellules de soutien, les fibroblastes, à l'origine du processus de fibrose, provoque une asphyxie des cellules contractiles, ce qui perturbe le fonctionnement du muscle cardiaque. Les approches thérapeutiques existantes ne montrent qu'un effet modeste et n'offrent pas la possibilité de réduire une fibrose déjà installée. L'immunothérapie serait une piste prometteuse. Jonathan Epstein, de l'université de Pennsylvanie, et ses collègues viennent de prouver qu'une telle approche peut être optimisée pour restaurer la fonction cardiaque chez des rongeurs présentant une insuffisance cardiaque, tout en limitant les possibles effets secondaires d'un tel traitement.

L'approche employée est celle des CAR-T, des lymphocytes T modifiés, qui sont plus efficaces que leurs homologues naturels pour éliminer des cellules délétères du soi. Une manipulation génétique vise à leur faire exprimer un récepteur chimérique (CAR, pour *chimeric antigen receptor*), qui leur permet à la fois de détecter un antigène donné et d'activer le lymphocyte T afin qu'il déclenche l'élimination de la cellule ciblée. Ici, l'antigène visé est une protéine exprimée spécifiquement à la surface des fibroblastes à l'origine de la fibrose cardiaque, la protéine FAP (*fibroblast activated protein*).

En 2019, l'équipe de Jonathan Epstein avait mis au point une technique consistant à modifier *ex vivo* des lymphocytes T et les réinjecter pour détruire la fibrose chez des souris. Mais cette modification permanente n'était pas sans risque, notamment parce que les fibroblastes jouent un rôle physiologique pour réparer le myocarde après un accident cardiaque comme un infarctus. Il est donc problématique de les détruire de façon permanente.

Rebondissant sur les énormes progrès réalisés dans le domaine des thérapies à base



Le récepteur chimérique (CAR, pour *chimeric antigen receptor*) est exprimé à la surface de lymphocytes T afin de reconnaître un antigène spécifique et activer le lymphocyte pour détruire la cellule ciblée. Cette stratégie est utilisée pour traiter certains cancers. Elle a été adaptée pour éliminer certaines cellules à l'origine du processus de fibrose cardiaque.

d'ARN, avec le développement de vaccins à ARN contre le SARS-CoV-2, les chercheurs ont adopté une nouvelle approche qui repose sur un ARN messager, porteur de l'information génétique permettant l'expression de la protéine chimérique CAR dirigée contre la protéine FAP. Celui-ci est délivré par voie intraveineuse, dans une nanoparticule lipidique, elle-même modifiée pour cibler précisément les lymphocytes T et non d'autres cellules de l'organisme. Comme l'ARN messager ne pénètre pas dans le noyau des cellules, qu'il est incapable d'intégration génomique, mais aussi qu'il est intrinsèquement instable et dilué lors des divisions cellulaires, la modification des lymphocytes T est par définition transitoire. Réalisée chez des souris, la stratégie montre qu'une proportion suffisante de lymphocytes T sont modifiés, expriment le CAR contre FAP et sont fonctionnels. Ils ne sont présents que pendant sept jours après l'injection. Les souris traitées retrouvent une fonction cardiaque normale. ■

N. G.

J. G. Rurik et al., *Science*, 2022

CHAMPIGNON CONTRE BACTÉRIE

Sur le dos du hérisson, une féroce bataille oppose une bactérie, le staphylocoque doré, au champignon *Trichophyton erinacei*. Jesper Larsen, de l'Institut d'Etat dandis du sérum, et ses collègues ont montré que certains staphylocoques dorés ont développé une résistance aux antibiotiques sécrétés par le champignon. L'analyse génomique d'une bactérie résistante a indiqué que le gène qui lui confère cette protection est apparu il y a environ deux cents ans, bien avant l'usage des antibiotiques par l'homme. Un résultat qui éclaire sur les mécanismes de l'antibiorésistance et l'urgence d'agir contre ce phénomène: une étude récente estime à 1,27 million le nombre de décès directement attribuables à la résistance aux antibiotiques dans le monde en 2019. ■

W. R.-P.

J. Larsen et al., *Nature*, 2022

MÉDECINE

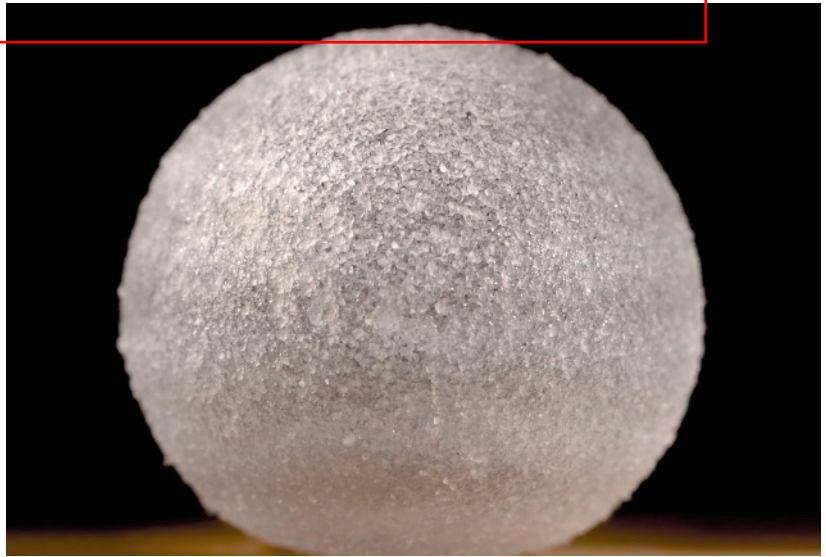
D'EPSTEIN-BARR À LA SCLÉROSE EN PLAQUES

Le virus d'Epstein-Barr appartient à la famille des Herpèsvirus et est présent, sous forme latente, chez une grande majorité des adultes dans le monde. Il provoque de nombreuses maladies, dont la mononucléose infectieuse, et était suspecté d'être le déclencheur de la sclérose en plaques, une maladie neurodégénérative, qui touche 80 000 personnes en France. L'équipe d'Alberto Ascherio, de l'université Harvard, a suivi 10 millions de personnes dans l'armée américaine entre 1993 et 2013. Les chercheurs ont montré que le risque de sclérose en plaques était multiplié d'un facteur 32 après une infection par le virus d'Epstein-Barr. Le rôle déclencheur de ce virus semble se confirmer, même si de nombreux aspects du mécanisme restent à élucider. Ce résultat ouvre des pistes intéressantes: s'attaquer au virus avec un vaccin permettrait peut-être de lutter contre l'apparition de la maladie neurodégénérative. ■

S. B.

M. Bjornevik et al., *Science*, 2022

UNE RECETTE POUR DES BULLES « ÉTERNELLES »



Cette bulle a duré 465 jours. Elle contient de l'eau, du glycérol et des particules de plastique. Ces deux derniers ingrédients empêchent l'évaporation et le drainage de l'eau, deux phénomènes à l'origine de l'éclatement des bulles de savon classiques.

Honoré de Balzac comparait le bonheur à une bulle de savon qui change de couleur comme l'iris et qui éclate quand on la touche. Malheureusement, même sans la toucher, une bulle de savon a une durée de vie assez courte, quelques minutes tout au plus. Plusieurs phénomènes complotent à l'éclatement de cet objet qui fait la joie des enfants... et des plus grands. Alors que l'eau du film liquide est drainée vers le bas par la pesanteur, le film s'amincit en haut et finit par éclater. Autres sources de destruction de la bulle: la présence de poussières et l'évaporation de l'eau du film. Malgré ces obstacles, Aymeric Roux, de l'université de Lille, et ses collègues ont mis au point une «recette» pour fabriquer des bulles qui perdurent plus d'un an!

Les chercheurs ont repris une idée proposée en 2017: les bulles marbrées. Le film d'eau de ces bulles est enrichi avec des particules de plastique. Grâce à l'effet de mouillage, des «ponts» liquides s'établissent entre les particules de plastique. Cette structure rend la bulle plus robuste aux perturbations et surtout supprime le drainage dû à la pesanteur. Mais cette bulle reste sensible à l'évaporation.

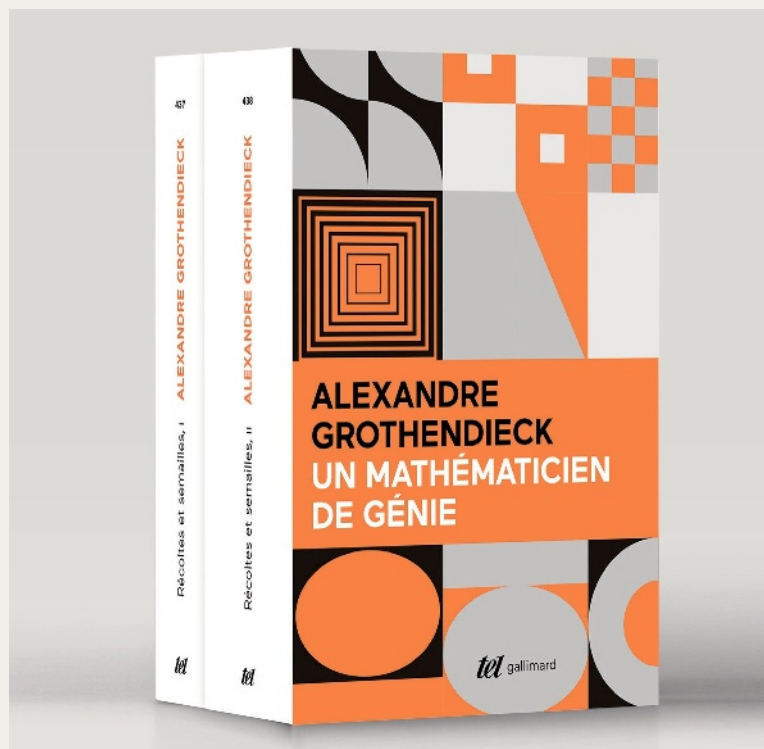
Pour contrer ce processus, les chercheurs ont eu l'idée d'ajouter du glycérol dans l'eau. Cet ingrédient a une grande affinité avec l'eau, à tel point qu'il absorbe les molécules d'eau présentes dans l'air ambiant. En ajustant la concentration de glycérol, les chercheurs ont obtenu des bulles de quelques millimètres de diamètre dont la masse restait stable, c'est-à-dire qu'elle ne perdait pas d'eau. L'évaporation de l'eau était compensée par l'action absorbante du glycérol. Surpassant les quelques minutes d'une bulle classique, les chercheurs ont réussi à produire des bulles qui ont perduré 465 jours! ■

S. B.

A. Roux et al., *Physical Review Fluids*, 2022

Une œuvre inclassable

En janvier a paru « Récoltes et Semailles », l'autobiographie d'Alexandre Grothendieck, l'un des plus grands mathématiciens du xx^e siècle, au parcours de vie exceptionnel. C'est un événement à plus d'un titre et pour comprendre cet objet littéraire incroyablement complexe, un regard expert est indispensable. Jean-Pierre Bourguignon s'est prêté à l'exercice.



L'histoire de *Récoltes et Semailles* est riche en rebondissements.

Pouvez-vous nous la raconter ?

Jean-Pierre Bourguignon : Son écriture a probablement commencé en 1983 pour s'achever vers 1986. Diverses versions ont circulé et des chapitres ont été ajoutés, mais le moment critique se situe à la fin des années 1980, quand Grothendieck remet le manuscrit à Stéphane Deligeorges, journaliste scientifique. Et de lui préciser dans une lettre que seule cette version doit être publiée. Plusieurs maisons d'éditions sont approchées, mais aucune ne se lance...

En 2010, coup de théâtre. Grothendieck appelle *urbi et orbi* à détruire tout ce qu'il a pu rédiger. Personne n'accède à sa requête, mais il n'est plus question de publier *Récoltes et Semailles*. Après son décès, en 2014, la situation change. Ses enfants sont confrontés aux milliers de pages dont ils héritent. Stéphane Deligeorges se manifeste et, fort de sa « lettre de mission », se relance dans la quête d'un éditeur. Gallimard a finalement relevé le défi !

À quelle période de la vie de Grothendieck correspond l'écriture de *Récoltes et Semailles* ?

Retraçons d'abord sa vie à grands traits. Après une enfance marquée par la dureté des années 1930-1940 pour les juifs, comme lui, il commence des études de mathématiques à Montpellier. En 1948, un professeur le recommande au mathématicien Élie Cartan, à Paris, et c'est finalement son fils, Henri Cartan, qui l'accueille avant de l'orienter vers Jean

BIOGRAPHIE

JEAN-PIERRE BOURGUIGNON
mathématicien et professeur
honoraire à l'Institut des hautes
études scientifiques (IHES),
à Bures-sur-Yvette

À LIRE

Récoltes et semilles, I, II. Réflexions et témoignage sur un passé de mathématicien, Gallimard, 2022

Merci à Lucas Gierczak pour son aide dans la préparation de cet entretien.

Dieudonné et Laurent Schwartz, alors à Nancy. Là, Schwartz lui propose, pour le tester, quatorze problèmes d'analyse fonctionnelle, chacun constituant un sujet de thèse. Grothendieck les résout tous en quelques mois...

Il se tourne alors vers la géométrie algébrique (l'étude des objets géométriques comme les courbes, les surfaces définies par des équations algébriques). Il rejoint ensuite l'IHES en 1958 et y restera jusqu'en 1970. Du point de vue des mathématiques, ces années furent hors norme. Il a révolutionné toute la géométrie algébrique et a fait de l'IHES la capitale mondiale de cette discipline, où tous les meilleurs spécialistes se pressaient. C'est là qu'en 1968 est arrivé de Bruxelles Pierre Deligne, un étudiant extraordinaire que Grothendieck a de suite considéré comme son égal dans sa capacité à comprendre les choses.

C'est juste avant une rupture importante ?

Oui, Grothendieck démissionne de l'IHES au début des années 1970. L'une de ses motivations repose sur la conscience qu'il prend du danger que représente l'armement nucléaire, une réflexion qui le mène à fonder, avec les mathématiciens Pierre Samuel et Claude Chevalley, le groupe antimilitariste et écologiste radical Survivre et vivre. Il n'a plus alors pour principal objectif que d'exhorter ses collègues à arrêter de faire des mathématiques, et plus encore des sciences, à cause de leur utilisation potentielle à des fins néfastes. Un voyage au Vietnam en 1967 a contribué à ce tournant. Là-bas, il a observé



Pour beaucoup de gens, le contenu de *Récoltes et Semailles* peut entrer en résonance avec leur expérience personnelle. Et le verbe a une telle puissance !

comment la technologie et la science, piliers de la puissance américaine, sont exploitées dans la guerre qui mobilisait tout un peuple. Après des invitations au Collège de France et à l'université Paris-Sud, c'est finalement à l'université de Montpellier qu'il part enseigner jusqu'à sa retraite en 1988, vivant d'abord dans une ferme dans un esprit post-1968 de retour à la terre et de vie collective, puis de plus en plus isolé.

Il écrit *Récoltes et Semailles* dans une période de rupture. Peut-on y voir une sorte de point de bascule entre une œuvre dominée par les mathématiques et une qui l'est beaucoup moins ?

Oui, et un événement semble avoir joué un rôle important : il a eu accès à la correspondance entre ses parents, tous deux anarchistes militants à une époque où il les a peu connus. La révélation de la violence de leurs rapports le bouleverse et déclenche une phase d'introspection intense, avec une dimension spirituelle. Et ce retour sur soi occupe une place importante dans *Récoltes et Semailles*. Cette quête le conduit à constater à quel point sa façon de faire des mathématiques était en accord profond avec ce en quoi il croyait à ce moment-là. Ce n'était selon lui pas le cas de ses anciens collègues, et il l'écrit !

C'est la part de règlements de compte de l'ouvrage ?

Oui, il les accuse de plagiat, ou bien leur reproche d'avoir d'une certaine façon trahi son

programme. Pierre Deligne est particulièrement maltraité, et, je crois, de façon injuste. Après tout c'est Grothendieck qui a convaincu l'IHES de donner un poste permanent à Deligne alors qu'il n'avait pas 30 ans. Ce dernier a ensuite résolu les conjectures dites « de Weil », un des grands objectifs de son mentor, ce qui lui a valu la médaille Fields en 1978. Deligne n'a jamais caché qu'il était venu à bout du problème grâce aux outils que Grothendieck avait développés... mais aussi à sa propre créativité.

L'enfance tient aussi une place particulière dans *Récoltes et Semailles* ?

C'est même un des leitmotivs de l'œuvre, et, à mon avis, les pages parmi les plus intéressantes. Selon Grothendieck, il est d'une grande importance, pour lui comme pour tous les scientifiques, de retrouver l'état d'esprit de l'enfance, considérant que c'est le moment où l'on est le plus créatif, car l'imagination n'est pas bridée.

Quelle place tiennent les mathématiques ?

Le contenu mathématique porte plutôt sur l'évolution de la discipline après qu'il l'eut quittée. On peut toutefois retenir l'idée de « topos », dont il parle régulièrement, mais à cette époque, ils ne jouent pas, ou pas encore, un rôle aussi puissant que les « schémas ». Depuis, beaucoup de mathématiciens, comme Laurent Lafforgue, Alain Connes ou Olivia Caramello, ont repris cette étude des topos et y voient un outil d'une fécondité incroyable.

Avec *Récoltes et Semailles*, Grothendieck se révèle-t-il comme un écrivain à part entière ?

Les avis divergent. Ayant reçu un exemplaire de *Récoltes et Semailles*, Pierre Samuel, un compagnon de route aussi dans la révolte, écrit en substance à l'auteur que s'il voulait vraiment être utile et plus percutant, il aurait dû réduire les 1500 pages à seulement 200 ou 300 en supprimant les répétitions ! D'un autre côté, le texte recèle des passages d'une très grande beauté poétique et des pages que certains jugent hautement admirables.

À qui recommanderiez-vous ce livre ?

L'ouvrage est un peu roboratif, parfois répétitif, souvent provocant, mais nombre de pages sont émouvantes et abordent des sujets d'une grande profondeur. Je pense que beaucoup de gens peuvent trouver que le contenu entre en résonance avec leur expérience personnelle. Et le verbe a une telle puissance ! En un mot, *Récoltes et Semailles* est pour quiconque n'est pas effrayé par des passages un peu compliqués. Avec la promesse que la lecture de cet ouvrage ne laissera personne indifférent ! ■

Propos recueillis par Loïc Mangin



À lire dans son intégralité sur www.pourlascience.fr

ÉCOLOGIE

EN PLEIN VOL

Thom van Dooren

Wildproject, 2021,
270 pages, 21 euros



Cet ouvrage est composé de cinq histoires d'extinction centrées sur un groupe d'oiseaux menacés: albatros, vautour, manchot, grue, corneille. Il montre comment elles résultent d'un enchevêtrement de causes dues aux actions humaines. L'auteur est un philosophe de l'environnement qui a accompagné sur le terrain ses collègues ornithologues pour étayer ses analyses avec des données de biologie.

Il fait partie de ce courant minoritaire mais grandissant de chercheurs en sciences humaines qui établissent enfin le pont avec les sciences de la nature pour nourrir leur réflexion sur notre espèce en la replaçant parmi les autres. Dans la francophonie, on peut citer Élisabeth de Fontenay, Catherine Larrère, Dominique Lestel, Dominique Bourg, Baptiste Morizot et Vinciane Despret, qui préface ce livre. La maison d'édition, pour sa part, animée par des représentants des sciences humaines, se veut l'instrument de cette rencontre: elle a publié les grands textes fondateurs de l'écologie américaine, beaucoup plus proche de la science que ne le sont nos écologistes politiques.

Analyser le sentiment de deuil, d'empathie, de bien-être chez l'animal est un domaine passionnant, mais glissant. L'auteur ne donne-t-il pas trop la priorité au cœur, lorsque, après avoir expliqué qu'il ne restait plus que vingt grues blanches et que *Grus americana* a été sauvée par l'insémination artificielle, il critique longuement cette «pratique hautement invasive et souvent stressante»? Je peux le réconforter en lui signalant que mes équipes et moi-même avons découvert de nouvelles espèces de manchots et d'albatros simplement en les différenciant par le chant puis en confirmant leur statut par le séquençage de l'ADN des plumes.

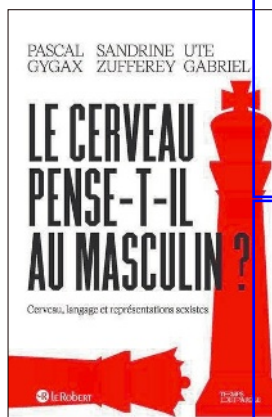
PIERRE JOUVENTIN
CNRS (émér.)

PSYCHOLINGUISTIQUE

LE CERVEAU PENSE-T-IL AU MASCULIN ?

Pascal Gygax,
Sandrine Zufferey et Ute Gabriel

Le Robert, 2021
176 pages, 18,80 euros

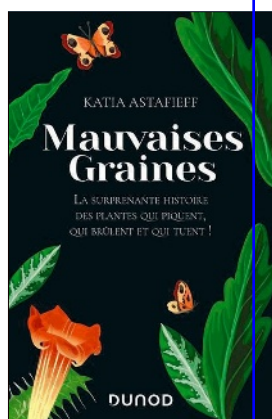


Faut-il recourir à l'écriture inclusive? Est-il nécessaire de féminiser certains mots, comme les noms de métier? Ces questions divisent depuis des années, entre avis négatifs de l'Académie française, tribunes véhémentes contre ces pratiques ou, inversement, argumentations militantes pour leur adoption. Cet ouvrage, passionnant, aborde ces questions sous l'angle des données scientifiques dans le champ de la psycholinguistique et de la psychologie expérimentale. Finalement, que sait-on de l'influence de la masculinisation du langage sur notre compréhension du monde?

Le livre rappelle les évolutions historiques de cette thématique et présente une vingtaine d'expériences aux résultats très clairs: dire «un chirurgien» quel que soit le genre de la personne n'est pas sans influence sur la représentation du métier. Dire «le candidat» pour un poste rend plus compliqué pour le cerveau de trouver une femme en adéquation avec le profil de l'emploi. Les auteurs relatent par exemple une expérience qui montre que si on demande de citer dix candidats de droite crédibles pour exercer la fonction de Premier ministre, le nombre de femmes dans cette liste est bien plus faible que si la consigne évoque «dix candidates ou candidats de droite...».

Les auteurs, convaincus du bien-fondé du recours à l'usage de l'écriture inclusive et de la féminisation d'un certain nombre de mots (autrices, mairesse...) proposent ici un ouvrage militant. Mais ils étayent leurs convictions avec des connaissances scientifiques. Un livre à recommander à qui ne veut pas se mettre à utiliser l'écriture inclusive, car il est sacrément convaincant!

ANDRÉ DIDIERJEAN
Université de Franche-Comté



COSMOLOGIE

L'ÂGE DE L'UNIVERS

Marc Lachièze-Rey
Humensciences, 2021
264 pages, 17 euros

L'humanité n'a eu de cesse de repousser les frontières de ce qu'elle considèrerait comme étant l'Univers. En quelques siècles, elle est passée du Système solaire à la Voie lactée et enfin à une multitude de galaxies qui s'étendent au-delà de la seule partie visible du cosmos. Et depuis qu'en 1915 Albert Einstein nous a livré sa théorie de la relativité générale, l'Univers est devenu un objet physique à part entière et la cosmologie une branche de l'astrophysique construite sur des faits observationnels tangibles et robustes. Grâce à la relativité générale, on a pu formuler en termes scientifiques rigoureux le modèle cosmologique standard, qui conduit à un âge pour l'Univers. D'environ 13,7 milliards d'années, cet âge est considérablement plus élevé que ceux des récits religieux, mais il s'agit tout de même d'une valeur finie.

Que signifie donc cette notion d'âge, si l'on se rappelle que la notion de temps absolu est balayée par la théorie de la relativité? En effet, dans notre description moderne du monde, l'espace-temps est la scène sur laquelle se déroulent tous les phénomènes physiques, et la gravité est la manifestation de sa géométrie. Dans un langage accessible à tous, l'auteur retrace ici l'histoire de la construction des modèles cosmologiques, depuis les années 1920 jusqu'à nos jours. Il y détaille le fait que cet âge ne se mesure pas directement, mais se calcule et n'a de sens que dans le cadre de tout modèle cosmologique possédant un Big Bang. Même si ce n'est l'âge de personne, d'aucune particule, d'aucune étoile ou galaxie, on peut quand même le définir géométriquement de façon rigoureuse afin de se repérer dans la géométrie de l'Univers. Un simple outil mathématique, mais tellement pratique!

CYRIL PITROU
CNRS/IAP

BOTANIQUE

MAUVAISES GRAINES

Katia Astafieff
Dunod, 2021
208 pages, 17,90 euros

L'ouvrage invite à une promenade et propose une ode scientifique et botanique aux plantes malicieuses qui semblent en vouloir à nos vies, à notre peau, à nos yeux, à celles qui piquent, qui puent et qui collent... L'autrice décrit de nombreuses espèces végétales du monde entier, qui toutes présentent une particularité agréable ou désagréable pour nous, humains. Et l'on passe par le goût des piments, l'odeur des arums, le Velcro des bardanes, les piqûres d'ortie de chez nous et d'ailleurs, les latex vénéneux des arbres de la mort, les substances enivrantes des plantes psychotropes ou addictives comme le tabac, le chocolat ou la coca, etc. Un chapitre est consacré aux belles venues d'ailleurs, les espèces exotiques envahissantes, introduites en Europe pour agrémenter nos parcs et jardins, mais qui s'en sont échappées pour s'établir sur nos terres. Le dernier chapitre, en point final de la lecture, dresse le portrait des tueuses, des empoisonneuses, comme l'if, le datura ou le vomiquier, pourvoyeur de la strychnine.

Les connaissances botaniques de terrain, comme celles des laboratoires, sont distillées tout au long des 170 pages de ce livre, dans une approche anthropomorphique efficace, dont la lecture apporte, sous couvert du style enlevé, des connaissances scientifiques solides. Le style est accessible, direct et amusant, d'autant plus que les récits sont émaillés d'anecdotes ou de faits historiques dont les plantes sont les héroïnes. Le livre est complété d'un feuillet central en couleurs, présentant les photos de quelques espèces, et se termine par une liste de références bibliographiques fournies, quelques livres « pour aller plus loin » et un index des espèces citées et des lieux visités.

CATHERINE LENNE
Université Clermont-Auvergne

ET AUSSI



LA VIE AILLEURS : ESPÉRANCES ET DÉCEPTIONS

James Lequeux et Thérèse Encrenaz
EDP Sciences, 2022
152 pages, 17 euros

Ce petit livre fort scientifique et fort bien écrit est une dose de rappel contre le virus du délire extraterrestre. La possibilité d'une vie ailleurs obsède l'humanité depuis des siècles. Après la pluralité des mondes (XVI^e), Galilée suggérant une Lune peuplée (XVII^e), le Soleil habité de Herschel (XIX^e), les canaux de Mars (XIX^e et XX^e), nous en sommes rendus, après que nos sondes n'y ont pas trouvé de bactéries, à espérer une origine organique au méthane de la Planète rouge, et, si nous découvrons des exoplanètes (XX^e), ce sont les « habitables » qui nous intéressent... Vain ? Dangereux en tout cas, si cela nous détourne de l'urgence de protéger notre seul habitat.

LES PLUS BELLES ÉNIGMES MATHÉMATIQUES

Paul Wagner, Pierre Antilogus, Doãn Atlande, 2021
300 pages, 19 euros

« Qu'est-ce que la mathématique, sinon le cœur logique et abstrait de la réalité », écrit Cédric Villani dans la préface de ce recueil de 76 petits problèmes mathématiques enrobés d'ironiques historiettes. Leur humour et les illustrations de Mac Doãn concourent à apporter beaucoup de plaisir à ceux qui adorent résoudre. En fait, le seul véritable problème posé dans le livre est qu'il faut se garder de consulter trop vite les solutions, toutes très bien rédigées à la fin.

LE CHÊNE

Jacques Tassin
Belin, 2022
228 pages, 29 euros

Quercus, le chêne, accompagne depuis toujours la vie et la culture européennes. Dans le film *Le Chêne*, les cinéastes Laurent Charbonnier et Michel Seydoux célèbrent par de somptueuses images naturalistes la vie qui foisonne dans un chêne de Sologne, sur lui et autour de lui. L'auteur, écologue forestier, accompagne ici certaines de ces magnifiques images par un propos aussi poétique que de haute volée scientifique, qui donne envie de s'asseoir sur une haute branche de l'arbre du savoir des druides pour s'y cultiver en regardant et en lisant ce beau livre.



La chronique de
CATHERINE AUBERTIN

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

DE LA PÉDAGOGIE DES MÉTAPHORES

**Nénuphars, rivets, voire comète, comme dans
« Don't look up »... Les fables et les métaphores
peuvent-elles aider à alerter sur les urgences écologiques ?**



Une comète
de fiction peut-elle
aider à alerter
sur la réalité
du changement
climatique ?

Les scientifiques lanceurs d'alerte ont volontiers recours à des métaphores pour attirer l'attention. L'une des plus connues, liée à la modélisation de l'écosystème mondial, est dans le rapport Meadows, *Halte à la croissance!*, qui a précédé la première conférence sur l'environnement en 1972. « Un nénuphar prolifère sur un étang et double la surface qu'il couvre chaque jour. Sachant qu'il lui faut trente jours pour envahir tout le plan d'eau, étouffant alors toute forme de vie aquatique, quand en aura-t-il conquis la moitié, dernière limite pour agir ? » Pour les auteurs, l'extension du nénuphar illustre la croissance économique qui ne peut être sans fin : selon eux, le point de non retour aurait dû être atteint en 2020...

On peut aussi convoquer les rivets des Américains Paul et Anne Ehrlich quand il s'agit d'évaluer les conséquences de la disparition des espèces sur les fonctions écologiques d'un écosystème. Ainsi, un avion peut poursuivre son vol même s'il perd un rivet, puis un autre, et encore un autre... jusqu'au rivet fatal qui entraînera

sa chute. Quel est le rivet le plus important, le premier ou le dernier ?

Dernière métaphore en date : dans le film *Don't look up*, la chute imminente d'une comète « destructrice de planète » qui laisse de marbre politiciens et médias, illustrerait notre inertie face au changement climatique. Grande différence cependant, l'astre meurtrier est un *one shot*, pas

Dans le film « Don't look up », la chute d'une comète illustrerait notre inertie face au changement climatique

un bouleversement au long cours pour lequel la notion, très en vogue, de point de bascule serait pertinente comme elle l'est pour le nénuphar ou les rivets.

Cette idée renvoie à l'image du fléau de la balance qui s'incline progressivement à mesure que l'on ajoute des poids dans un plateau pour se bloquer d'un coup, révélant la catastrophe attendue. On appréciera ici le double sens du mot fléau ! L'image est

souvent appliquée à la forêt amazonienne. Il y a une dizaine d'années, il était admis qu'elle franchirait un point de bascule rendant sa destruction irréversible avec 40% de surface déforestée. Le modèle incluant désormais les effets du changement climatique et les phénomènes externes comme El Niño ou la répétition des incendies fait maintenant pencher la balance autour de 20%. Or 20%, nous y sommes. La déforestation s'attaque désormais au centre du massif forestier, provoquant sa fragmentation, accélérant la perte des fonctions de régulation du cycle du carbone et des pluies, de lieu de préservation de la biodiversité et de vie des populations autochtones.

Selon le rapport du Giec d'août 2021, « le point de bascule est un seuil critique au-delà duquel un système se réorganise, souvent de manière abrupte et/ou irréversible ». Plus inquiétant, il souligne : « Les résultats à faible probabilité et à fort impact sont ceux dont la probabilité d'occurrence est faible ou mal connue, mais dont les impacts potentiels sur la société et les écosystèmes pourraient être élevés. »

Ainsi, l'élévation du niveau de la mer est bien un phénomène irréversible et graduel à l'échelle du millénaire. Mais si le réchauffement dépasse 2 °C, on peut alors craindre la survenue de ces événements « à faible probabilité et à fort impact » comme l'effondrement de la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest ou des modifications des courants océaniques qui accéléreront le phénomène. Les climatologues s'inquiètent de l'emballlement possible de leurs modèles soumis à trop de boucles de rétroactions. Ils mettent cependant en garde : la notion de point de bascule ne doit pas faire oublier les effets quotidiens du réchauffement.

Ce qui renvoie à une autre métaphore. Une grenouille plongée dans de l'eau froide posée sur le feu se laissera cuire, alors que jetée dans de l'eau déjà bouillante, elle s'échappera vite... C'est bien à réagir sans attendre pour contrôler la température qui monte doucement que nous invite le Giec, et non pas à guetter ce point de bascule dont la vertu pédagogique reste à prouver. Et l'on attend de voir si le film *Don't look up* aidera à la prise de conscience. ■

* La réponse est : vingt-neuf jours.

Vaincre[®]

LE CANCER

NOUVELLES RECHERCHES BIOMEDICALES

**PRENONS UNE LONGUEUR D'AVANCE SUR LE CANCER
QUI RESTE LA 1^{ÈRE} CAUSE DE MORTALITÉ PRÉMATURÉE EN FRANCE**



Credit photo : @michelguyen

Madame Anne Gravoin, musicienne et Présidente de Music Booking Orchestra
Administratrice au sein de VAINCRE LE CANCER

Chaque année, 400.000 nouveaux cas de cancer, tout type confondu, sont dépistés.
Statistiquement, il y a un peu plus de 1000 nouveaux malades par jour,
parmi lesquels 600 vont guérir et 400 vont mourir.

AIDEZ NOS CHERCHEURS À SAUVER VOS VIES

VAINCRE LE CANCER - NRB

Hôpital Paul Brousse
12/14, avenue Paul Vaillant-Couturier
94800 VILLEJUIF

www.vaincrecancer-nrb.org
contact@vaincrecancer-nrb.org

Rejoignez le combat, donnez sur
vaincrecancer-nrb.org

**Vous souhaitez faire un don IFI : les dons
au profit de la Fondation INNABIOSANTE C/i
VAINCRE LE CANCER sont déductibles de l'IFI.**

SERVICE MÈCENAT

01 80 91 94 60

Coût d'un appel local

RETROUVEZ-NOUS SUR



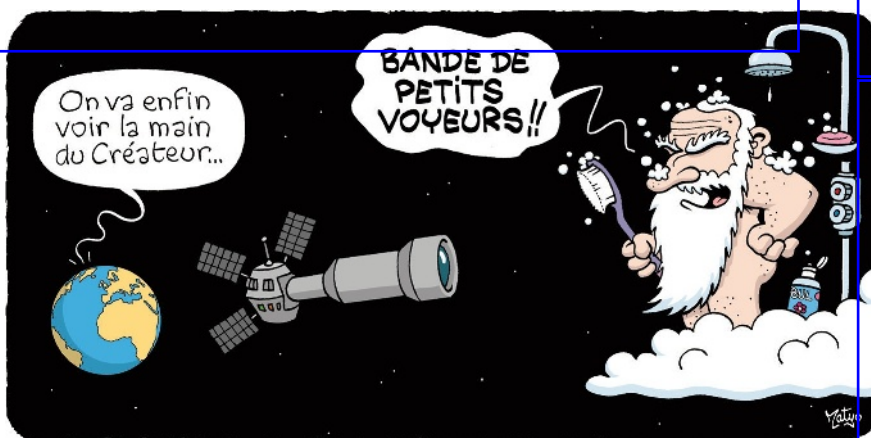


La chronique de
YVES GINGRAS

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

L'ASTROPHYSIQUE AU SERVICE DE LA RELIGION?

Lors du lancement du télescope spatial « James-Webb »,
~~le responsable américain de la Nasa a salué l'événement~~
d'un discours inattendu... ou pas.



Fruit de la collaboration entre la Nasa et les agences spatiales canadienne et européenne, le télescope spatial *James-Webb* a été lancé par la fusée Ariane 5 le 25 décembre 2021. Quel beau hasard de calendrier pour un instrument censé certes, « observer » le début de l'Univers, mais aussi chercher activement des traces de vie sur d'autres planètes!

Le projet, qui remonte à 1989, constitue une prouesse technologique qui a bien failli ne jamais être menée à terme. D'abord prévu pour 2007, puis reporté maintes fois, le lancement a été retardé par des problèmes techniques et les coûts ont plus que décuplé par rapport aux estimations initiales.

Pour convaincre les populations de la pertinence de ces projets de recherche très onéreux, les agences spatiales, tout comme les autres organisations relevant de la *big science*, ont appris à adapter leurs messages à leur auditoire en faisant vibrer les cordes les plus susceptibles de leur assurer des appuis. Il est donc intéressant

de comparer la manière dont les responsables canadiens et américains du projet ont interprété pour leur public la signification de ce lancement d'un télescope spatial au fonctionnement plutôt ésotérique pour le commun des mortels.

**Pour s'assurer de l'appui
des populations à ces projets
de recherche très onéreux,
les agences spatiales
ont appris à adapter leurs
messages à leur auditoire**

Dans un discours d'un peu plus d'une minute, François-Philippe Champagne, ministre responsable de l'Agence spatiale canadienne, s'est dit « fier » de la présence « toujours plus importante et positive » du Canada dans le domaine spatial, notant que ces efforts « font avancer la science au service de l'humanité ». Pour sa part,

la directrice de l'Agence, Lisa Campbell, a noté que ce lancement était un événement extraordinaire pour la « communauté astronomique mondiale ».

Le contraste avec le discours du responsable américain de la Nasa ne pouvait être plus grand, même s'il était prévisible pour quiconque connaît la place centrale des sentiments religieux, et chrétiens avant tout, parmi la population américaine.

Dans une allocution quatre fois plus longue que celle de son homologue canadien, l'administrateur de la Nasa, Bill Nelson, avocat et politicien de carrière (sénateur démocrate de 2000 à 2018), a d'abord noté qu'il ne s'agissait pas seulement d'un grand jour pour les Américains, les Européens et les Canadiens, partenaires du projet, mais également d'un grand jour « pour la planète Terre ». Au milieu de son discours, il note qu'il est « significatif » que les délais aient mené au lancement en ce jour de Noël et cite alors (en anglais bien sûr) le Psaume XIX: « Le ciel proclame la gloire de Dieu, le firmament révèle ce qu'il a fait* ». Car selon Bill Nelson, le nouveau télescope permettra de détecter la lumière « du tout début de la création ». Non pas celle du « début de l'Univers », comme diraient plutôt les vrais scientifiques, mais bien de la « création ». Il termine son discours en disant: « Que Dieu vous protège, que Dieu protège la planète Terre. »

On peut douter que les responsables de l'Agence spatiale européenne eussent prononcé un tel discours explicitement religieux. Cependant, le succès récent en France d'un ouvrage aussi problématique que *Dieu, la science, les preuves* (de Michel-Yves Bolloré et Olivier Bonnassies) suggère que, même en Europe, les tentatives concordistes ne sont pas impensables en ces temps de retour du religieux. Chose certaine, l'astrophysique sera toujours plus susceptible que d'autres domaines plus terre à terre, comme la physique de l'état solide ou la chimie moléculaire, d'être utilisée à des fins apologétiques. ■

* « The heavens declare the glory of God, the firmament shows his handywork. »



Demain, un robot président ?
Faut-il faire confiance
à l'Intelligence artificielle
qui est aujourd'hui partout
en France ?



Livre numérique disponible
sur toutes les plateformes et librairies en ligne

Le mécanisme antique d'Anticythère enfin décrypté?

TONY FREETH

Un calculateur astronomique grec d'une incroyable complexité intrigue depuis sa découverte au ^{xx}e siècle. Grâce à la tomographie à rayons X, l'équipe de recherche dédiée à cette machine à l'université de Londres en propose une reconstitution d'une précision inédite.

Pendant le printemps 1900, le scaphandrier Elias Stadiatis remonta affolé en racontant avoir vu «un tas d'hommes morts nus» et des chevaux. Une violente tempête avait forcé sa goélette à mouiller dans un havre naturel de l'île d'Anticythère située entre le Péloponnèse et la Crète. Une fois le mauvais temps calmé, ce pêcheur d'éponges naturelles explora le fond, tombant sur les restes d'un bateau romain rempli de trésors grecs. Dès novembre 1900, cette découverte – celle de la plus importante épave antique à ce jour – donna lieu à la première grande fouille sous-marine de l'histoire.

Les «hommes morts» étaient des statues antiques. Aujourd'hui, elles occupent pas moins de trois salles et l'atrium du musée national archéologique d'Athènes, de sorte qu'il n'est pas étonnant qu'un amas indistinct remonté en même temps que les statues ait échappé à l'attention. Toutefois, lorsque quelques mois plus tard cette masse de concrétions marines de la taille d'un dictionnaire éclata en morceaux, des roues dentées en bronze de la taille d'une monnaie et des inscriptions en grec apparurent. Comme la possibilité d'engrenages d'une telle qualité datant d'avant la Renaissance semblait alors (et semble toujours) peu pensable, la découverte provoqua une intense controverse.





Les rayons X font apparaître des structures mécaniques noyées dans des concrétions marines, au sein du principal fragment de la machine d'Anticythère. À la surface apparaît la roue motrice principale.

L'amas en question est le mécanisme d'Anticythère – on parle aussi de machine d'Anticythère –, un objet qui stupéfie les chercheurs depuis cent vingt ans. Au cours du ^{xx}^e siècle, l'amas d'origine s'est fragmenté en 82 morceaux, créant un puzzle en trois dimensions extrêmement difficile à reconstituer. La machine d'Anticythère semble en effet être un calculateur astronomique à roues dentées d'une très grande complexité. Nous avons aujourd'hui une idée plutôt précise de certaines de ses parties, mais des énigmes non résolues demeurent. Nous savons que cette machine est au moins aussi ancienne que le naufrage d'entre 60 à 70 avant notre ère qui l'a emmenée au fond de la mer, et, par ailleurs, certains indices poussent à penser qu'elle pourrait avoir été créée vers 200 avant notre ère.

En mars 2021, l'*Antikythera Research Team*, l'équipe dédiée à l'étude de la machine d'Anticythère que je dirige à l'université de Londres, a publié une nouvelle étude de ce mécanisme. Ses membres comprennent le spécialiste des matériaux Adam Wojcik, celui de l'imagerie Lindsay MacDonald, l'archéométallurgiste Myrto Georgakopoulou, l'horloger David Higgin, le physicien Aris Dacanalis, deux étudiants diplômés et le mathématicien et cinéaste que je suis.

Dans notre article, nous proposons une nouvelle reconstitution des trains d'engrenages – c'est-à-dire des ensembles de plusieurs roues dentées fonctionnant de concert – situés à l'avant du mécanisme, dont l'analyse n'avait pas encore été faite. Ainsi, nous parvenons aujourd'hui à une compréhension nouvelle de la machine qui remet en question beaucoup d'idées sur les capacités techniques des Grecs anciens.

L'ASTRONOMIE DANS L'ANTIQUITÉ

Nous savons que les Grecs de l'Antiquité étaient rompus à l'observation des astres à l'œil nu. Chaque nuit, alors que la Terre tournait sur son axe, ils observaient la sphère céleste en rotation, ce qui leur donnait une perspective géocentrique sur le ciel nocturne. Les positions relatives de la plupart des astres restant inchangées, les anciens astronomes les considéraient comme des « étoiles fixes ». Toutefois, ils voyaient aussi des corps en mouvement par rapport à ce fond étoilé fixe : la Lune, par exemple, accomplit une rotation complète par rapport aux étoiles tous les 27,3 jours ; le Soleil fait la même chose en un an.

Les autres corps en mouvement sont les planètes, que les Grecs nommaient les « vagabondes » à cause de leurs mouvements erratiques en apparence. Pour les astronomes de

L'ESSENTIEL

> La complexité d'un mécanisme à engrenages vieux de plus de 2 000 ans intrigue depuis sa découverte en 1900 près de l'île grecque d'Anticythère.

> De nouvelles analyses par tomographie à rayons X complètent notre compréhension

du fonctionnement de la machine à partir de ses 82 fragments.

> L'étude des trains d'engrenages subsistants conduit à une nouvelle reconstitution, qui confirme l'ingéniosité de ce calculateur astronomique antique.

L'AUTEUR



TONY FREETH
est un mathématicien membre de l'équipe de recherche dédiée au mécanisme d'Anticythère à l'université de Londres.

L'Antiquité, ces astres errants représentaient la plus grande des énigmes. Ils finirent toutefois avec le temps par remarquer que les vagabondes accomplissent d'étranges cycles, se déplaçant parfois dans la même direction que le Soleil dans un mouvement «prograde», avant d'inverser leur mouvement, le rendant «rétrograde». Ces cycles dits «synodiques» sont l'apparence que prend, depuis la Terre, la révolution des planètes autour du Soleil. Les étranges inversions se produisent dans notre ciel étoilé parce que les planètes tournent autour du Soleil, comme nous le savons aujourd'hui, et pas autour de la Terre, comme le croyaient les Grecs.

L'ASTRONOMIE GÉOCENTRIQUE

En termes modernes, tous les corps en révolution dans le Système solaire suivent des orbites proches du plan de l'écliptique, celui contenant la trajectoire terrestre autour du Soleil. Cela implique qu'ils suivent tous à peu près le même chemin à travers les étoiles. Prédire la position des planètes le long de l'écliptique n'a pu qu'être très difficile pour les premiers astronomes, qui se servaient pour cela des périodes synodiques, celles des cycles du même nom. Il s'avère que l'une des principales fonctions de la machine d'Anticythère est de prédire les positions des planètes à l'aide des estimations des périodes synodiques élaborées pendant l'Antiquité. Une autre de ses fonctions est de suivre les mouvements lunaires et solaires, qui eux aussi varient par rapport aux étoiles.

La conception d'une grande partie du mécanisme d'Anticythère dérive donc du savoir des astronomes du Moyen-Orient antique. L'astronomie a en effet beaucoup progressé au cours du I^{er} millénaire avant notre ère à Babylone et dans la ville d'Ourouk. Les astronomes babyloniens, en notant quotidiennement les positions des corps astronomiques sur des tablettes d'argile, ont ainsi mis en évidence les mouvements périodiques du Soleil, de la Lune et des planètes. Pour faire des prédictions, c'était essentiel! En

dix-neuf ans, la Lune parcourt 254 fois son orbite avant de se retrouver au début de son cycle devant le même ciel étoilé, en d'autres termes à la même date, ou, ce qui revient au même, au même point de son orbite. Cette «correspondance périodique» – c'est-à-dire cette correspondance entre les périodes de deux astres – est le cycle métonique, nommé d'après l'astronome grec Méton d'Athènes (mort vers 460 avant notre ère), même si les Babyloniens l'avaient découvert bien avant lui. La machine d'Anticythère traduit plusieurs des correspondances périodiques babyloniennes.

Le philologue allemand Albert Rehm, spécialiste des inscriptions en grec ancien, l'un des acteurs clés des recherches initiales sur le mécanisme d'Anticythère, a été le premier à le considérer comme une machine à calculer. Entre 1905 et 1906, il fit des découvertes cruciales qu'il consigna dans des notes non publiées. Il découvrit par exemple le chiffre 19 sur l'un des fragments du mécanisme, chiffre qui fait référence au cycle métonique. Sur le même fragment, Rehm découvrit aussi les chiffres 76, soit quatre fois 19, donc un raffinement grec du cycle de dix-neuf ans, ainsi que le chiffre 223 correspondant au nombre de lunaisons du «saros», la période de 223 lunaisons (environ dix-huit ans) que les Babyloniens employaient pour prédire les éclipses lunaires et solaires. Ces cycles se répétant étaient la force motrice de l'astronomie prédictive babylonienne.

Le deuxième acteur clé de la recherche sur la machine d'Anticythère fut le physicien britannique devenu historien des sciences Derek John de Solla Price. En 1974, après plus de vingt ans de recherche, il publia un article important intitulé «Les engrenages des Grecs» («*Gears from the Greeks*»), dans lequel il citait de remarquables passages de Cicéron (106-43 avant notre ère). Dans l'un d'entre eux, l'avocat et homme politique romain décrivait une machine fabriquée par le mathématicien Archimède (287-212 avant notre ère) sur laquelle «étaient

UN CALCULATEUR ASTRONOMIQUE

Découvert il y a plus d'un siècle dans une épave, le mécanisme d'Anticythère est l'objet technique antique le plus complexe jamais découvert. Ce dispositif en bronze, datant probablement d'entre 205 et 60 avant notre ère, contient des dizaines de roues dotées de dents mesurant environ 1 millimètre de long. Leurs mouvements prédisaient les positions à tout moment du Soleil, de la Lune et des cinq planètes connues dans l'Antiquité. À l'université de Londres, une équipe de recherche consacrée à la machine d'Anticythère vient de proposer une nouvelle reconstitution du fonctionnement des engrenages situés à l'avant de la machine.

Façade avant : À l'intérieur de l'appareil, une roue motrice principale fait tourner tous les engrenages, lesquels déplaçaient des aiguilles et des anneaux concentriques affichant les positions de différents corps célestes. De petites sphères indiquaient la position du Soleil et de la Lune et la phase de la Lune. Des perles colorées indiquaient la position des planètes le long de l'écliptique, le plan du Système solaire.

Façade arrière : Deux grands cadrans étaient visibles à l'arrière de l'appareil, ainsi que plusieurs cadrans plus petits. Le grand cadran supérieur est un calendrier représentant le cycle métonique, une période de dix-neuf ans au cours de laquelle 235 phases lunaires se répètent. Le grand cadran inférieur est le cadran « saros » de 223 mois, servant à prédire les éclipses solaires et lunaires.



ENGRENAGES DONNANT LES SOLEIL, MARS ET SATURNE « VRAIS »

Les engrenages permettant d'afficher les positions du Soleil et de Mars, Jupiter et Saturne étaient montés sur une plaque circulaire reliée à la roue motrice principale par des piliers.

- Soleil
- Mars
- Jupiter
- Saturne

Mécanisme du Soleil « vrai »

ROUE MOTRICE PRINCIPALE

Cette roue centrale orchestrait les différents trains d'engrenages chargés de calculer les positions du Soleil, de la Lune et des planètes à un moment donné.

- Soleil
- Lune
- Nœuds lunaires

Roue motrice principale

Roue dentée à 53 dents en mouvement variable dans le système pour la Lune

Roue dentée plate se connectant à la manivelle extérieure (non montrée)

Plaque rectangulaire

Pilier

Roue à 38 dents

● Mercure

● Vénus

ENGRENAGE POUR MERCURE ET VÉNUS

Les positions de Mercure et de Vénus étaient produites par des engrenages reliés à une plaque rectangulaire, elle-même reliée à la roue motrice principale par des piliers.

Plaque frontale, vue depuis l'intérieur

Aiguille lunaire

Aiguille indiquant les nœuds lunaires

PLAQUE CENTRALE

Une plaque placée au centre du mécanisme portait les trains d'engrenages produisant les affichages sur les plaques avant et arrière.

Axe de sortie pour le mouvement variable du système lunaire

Engrenages à aiguilles et fentes créant le mouvement variable de la Lune.

ENGRENAGES POUR LA LUNE VARIABLE

Tant les Babyloniens que les Grecs savaient que le mouvement de la Lune varie par rapport aux étoiles – ce que l'on explique en termes modernes par son orbite elliptique. Un train d'engrenages particulièrement compliqué calculait ce mouvement variable de la lune d'une manière spectaculairement efficace.

Roue à 127 dents pour créer le mouvement variable de la Lune

Roue à 188 dents soudée à la roue à 223 dents

DANS LE VENTRE DE LA MACHINE

La nouvelle reconstitution de la machine d'Anticythère comprend un total de 69 roues dentées, dont les mouvements produisent ensemble des calculs astronomiques d'une spectaculaire complication. La plus grande partie de cette complexité se retrouve dans les entrailles de la machine, où des trains d'engrenages concouraient à diverses déterminations de la position des astres – dans certains cas à plusieurs en même temps! L'utilisateur n'avait qu'à placer le cadran calendaire sur un point du passé, du présent ou du futur, et les engrenages internes déplaçaient les pointeurs et les anneaux sur les affichages de la façade de façon à indiquer les positions des astres.

- Calendriers métonique et callippique
- Calendrier des Olympiades
- Cycles saros et exeligmos

CADRANS ARRIÈRE

Le cadran supérieur arrière était un calendrier métonique/callippique conciliant le mois lunaire avec l'année solaire. Il comprenait également un cadran plus petit indiquant le cycle quadriennal des Olympiades des Jeux panhelléniques, couramment utilisé pour marquer le temps. Le cadran inférieur arrière était un calendrier saros qui prédisait les éclipses solaires et lunaires selon le cycle « saros » de 223 mois. Sur la façade arrière, des inscriptions lui étaient associées, qui décrivaient les caractéristiques des éclipses prédites.

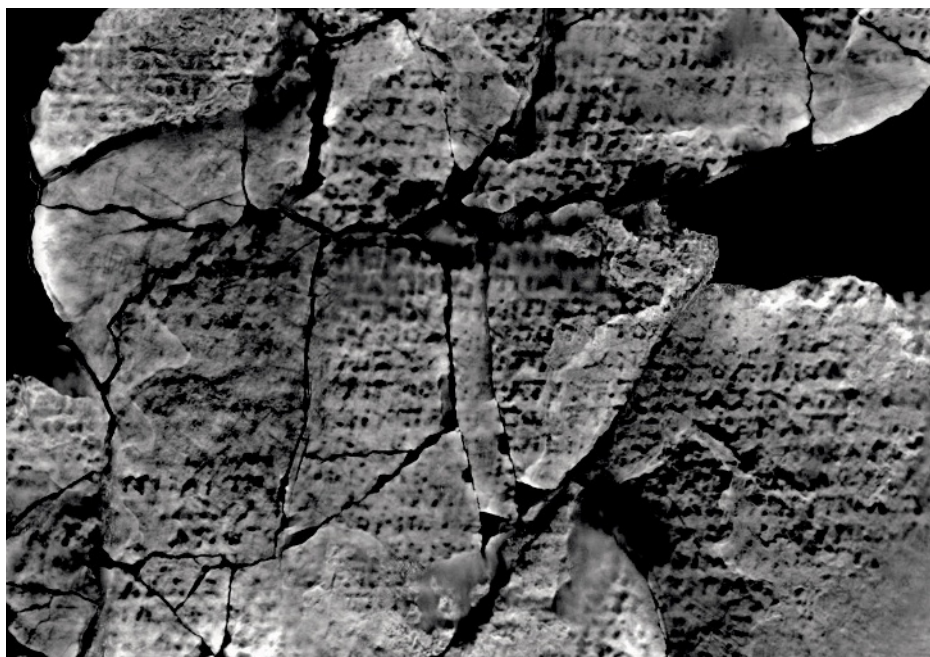
figurés les mouvements du Soleil, de la Lune et des cinq étoiles que nous nommons vagabondes [...]. Archimède [...] avait su combiner dans un seul système et effectuer par une seule rotation tous les mouvements dissemblables et les révolutions inégales des différents astres.» Ce passage de Cicéron suggère qu'Archimède pourrait avoir fondé la tradition ayant conduit à la machine d'Anticythère, même si, selon nous, il a vécu avant sa réalisation. Se pourrait-il même qu'elle dérive d'une conception du mathématicien de Syracuse ?

DES ENGRENAGES COMPLEXES

Le mystère de ses origines n'a pas empêché des scientifiques, des décennies durant, de chercher à deviner le fonctionnement du mécanisme, en observant la surface des fragments issus de la désintégration de l'amas remonté du fond. Au début des années 1970, ils ont enfin pu en observer l'intérieur. Price et le physicien nucléaire Charalambos Karakalos produisirent alors les premières radiographies. Les deux chercheurs, stupéfaits, mirent en évidence pas moins de trente roues dentées différentes. Vingt-sept d'entre elles sont contenues dans le plus grand fragment et trois dans trois autres. Karakalos et sa femme Emilia estimèrent pour la première fois le nombre des dents présentes sur les roues dentées, étape essentielle pour comprendre les calculs effectués par le mécanisme, qui semblait bien plus compliqué que tout ce que l'on avait imaginé...

Les radiographies étant en deux dimensions, la structure des trains d'engrenages apparaissait à plat, ce qui ne révélait que des parties de la plupart des roues dentées. Déterminer le nombre de dents s'avéra impossible pour de nombreuses roues. Malgré ces lacunes, Price identifia un train d'engrenages calculant la position moyenne de la Lune à une date donnée en utilisant la correspondance périodique de 254 lunaisons en dix-neuf ans. Mis en mouvement par la roue motrice principale – une grande roue elle-même entraînée par une manivelle – située vers l'avant du mécanisme, ce train d'engrenages commence par une roue de 38 dents – deux fois 19, car une roue de 19 dents seulement aurait été trop petite. Cette roue dentée à 38 dents entraîne par l'intermédiaire d'autres roues dentées une roue de 127 dents, soit la moitié de 254 – une roue dentée de 254 dents aurait été trop grande (voir pages 32 et 33).

Le concepteur de la machine d'Anticythère l'a certainement calibrée à partir des positions connues du Soleil, de la Lune et des cinq planètes



Des tomographies X réalisées en 2005 ont révélé des inscriptions inédites sur le mécanisme d'Anticythère, notamment, sur la façade avant, une liste de cycles planétaires (ci-dessus) et, sur la façade arrière, un « mode d'emploi ».

observées dans l'Antiquité, de sorte qu'elle pouvait être utilisée pour prédire les positions de ces astres n'importe quel jour du passé ou du futur. Un utilisateur n'avait qu'à tourner la manivelle se trouvant sur le côté pour la régler sur la période recherchée et lire les prédictions astronomiques correspondantes. La machine affichait par exemple les positions des astres sur le « cadran zodiacal » visible sur sa façade avant. Le plan de l'écliptique y était divisé en douze secteurs de 30 degrés représentant les constellations du zodiaque. Cette ceinture de la sphère terrestre, dont la largeur est d'environ 17 degrés et divisée en deux parties égales par l'écliptique, contient les courses apparentes de toutes les planètes. La première reconstitution du mécanisme capable de remplir les fonctions identifiées sur les cadrans de la machine fut celle de Price, qui la proposa à partir de ce que révélaient les radiographies des fragments subsistants.

Cette reconstitution ne m'a pas convaincu : mon premier article sur le mécanisme d'Anticythère, publié en 2002, propose une réfutation de la plupart des propositions de Price. Le physicien britannique ne nous en a pas moins fait franchir des étapes essentielles : c'est lui qui a le premier déterminé les positions relatives des principaux fragments, dont il a pu déduire l'architecture globale du mécanisme. Nous savons ainsi que des cadrans donnant la date et représentant le zodiaque se trouvaient sur la façade avant de la machine et que deux grands systèmes de cadrans se trouvaient sur sa façade arrière. De significatifs pas en avant !



Révélee par la tomographie, une inscription présente sur la façade arrière semble avoir été le mode d'emploi du dispositif

Le troisième acteur clé de la recherche sur la machine d'Anticythère est Michael Wright, un ancien conservateur du génie mécanique au musée de la Science de Londres. En 1990, il mena avec l'informaticien australien Allan Bromley un nouvel examen de l'intérieur des fragments du mécanisme, mais cette fois par tomographie, donc en trois dimensions. Bromley décéda avant que ce travail ne porte ses fruits, mais Michael Wright s'acharna et réussit plusieurs percées, déterminant par exemple les nombres exacts de dents des roues et le sens du cadran supérieur situé à l'arrière du dispositif.

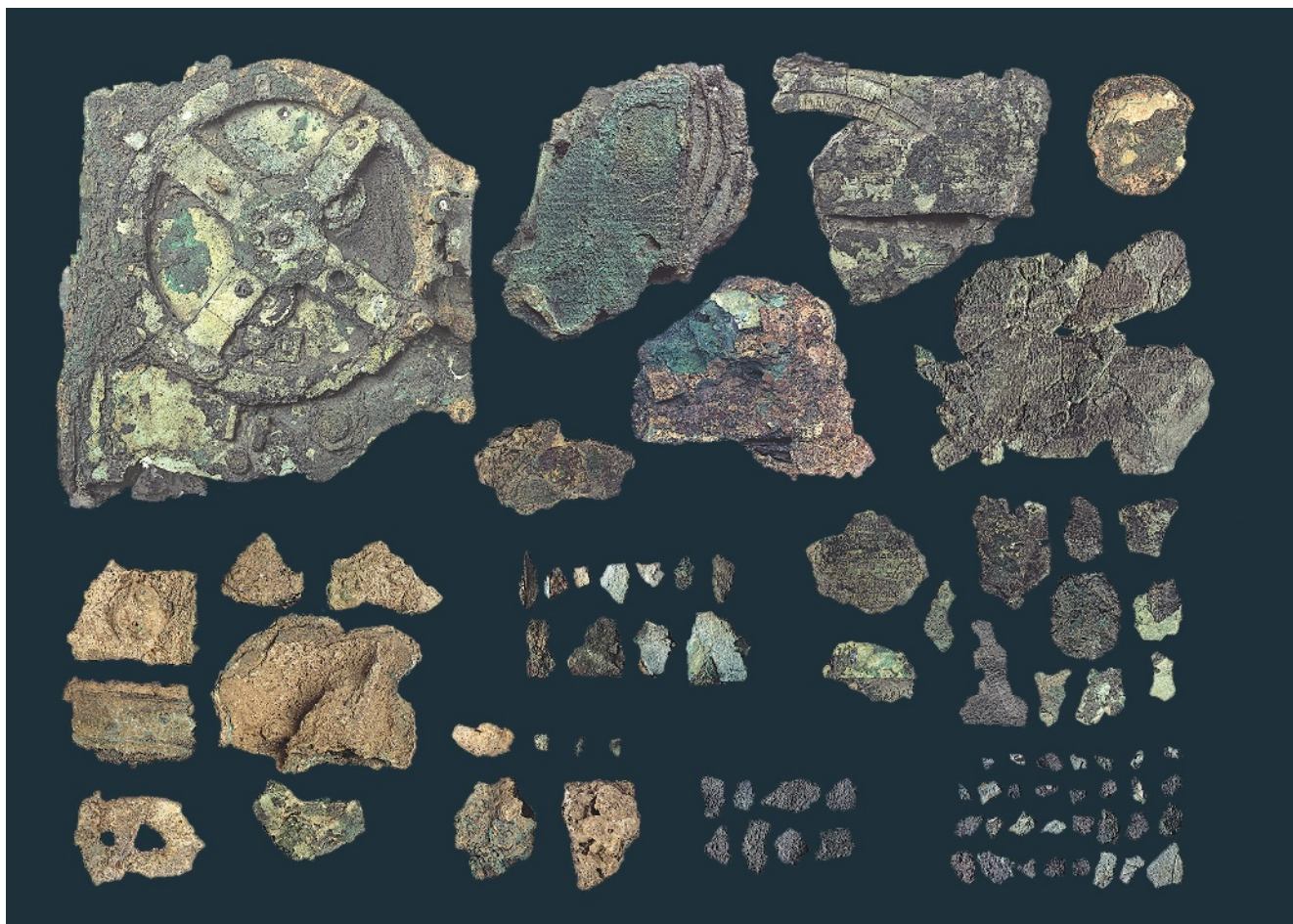
En 2000, j'ai proposé une nouvelle étude tomographique, qui fut menée en 2005 par le Projet de recherche sur le mécanisme d'Anticythère (*Antikythera mechanism research project*), une équipe anglo-grecque d'universitaires en collaboration avec le Musée archéologique national d'Athènes. La société X-Tek Systems – aujourd'hui une filiale de Nikon – mit spécialement au point un scanner doté d'une source de rayons X à microfoyer apte à fournir des images tridimensionnelles de très haute résolution. La société Hewlett-Packard nous aida en les exploitant par PTM (*polynomial texture mapping*), c'est-à-dire par une méthode d'analyse de texture fondée sur l'utilisation d'une base de fonctions polynomiales. La PTM rend encore plus visibles les détails de surface, ce qui ne pouvait que nous être utile.

De fait, les nouvelles données nous surprirent au plus haut point en nous révélant qu'en plus des mouvements astraux, le mécanisme

prédisait aussi les éclipses. Cette percée est liée à l'inscription que Rehm avait trouvée, qui mentionnait le saros. Les nouvelles images révélaient en effet à l'arrière du mécanisme la présence d'une grande roue à 223 dents, laquelle faisait tourner un indicateur sur un cadran en forme de spirale, de sorte que quatre tours couvraient 223 sections successives représentant 223 lunaïsons successives. Ce « cadran saros » servait à prédire les mois à éclipses de Soleil et de Lune, dont les caractéristiques étaient décrites sur le mécanisme par des inscriptions. Cette découverte nous a donc révélé une nouvelle fonction de la machine, mais en posant un problème énorme : un jeu de quatre roues dentées situé à l'intérieur de la circonférence de la roue motrice principale semblait sans fonction.

Des mois m'ont été nécessaires pour résoudre cette énigme, mais quel n'a pas été mon étonnement quand j'y suis enfin parvenu : ce train d'engrenages calculait très joliment les variations du mouvement de la Lune ! La vitesse de la Lune varie en effet dans le temps à cause du caractère elliptique de l'orbite lunaire, de sorte que, par rapport aux étoiles, elle est plus lente loin de la Terre et plus rapide proche d'elle. L'orbite lunaire n'est en outre pas fixe : elle accomplit une rotation complète autour de la Terre en un peu moins de neuf ans. Les Grecs anciens ignoraient les orbites elliptiques, mais décrivaient les mouvements subtils de la Lune par la théorie des épicycles, c'est-à-dire par la combinaison de deux mouvements circulaires. J'ai réalisé de quelle façon le mécanisme traduisait la théorie épicyclique en m'appuyant sur une remarquable observation de Michael Wright faite pendant son étude de l'énigmatique train de quatre roues dentées. Il avait observé deux des quatre mystérieuses roues situées à l'arrière du mécanisme et remarqué qu'une aiguille solidaire de sa face s'engageait dans une fente sur une autre roue dentée. On aurait pu penser ce dispositif inutile, étant donné que les roues avaient le même axe, mais Michael Wright s'est justement rendu compte qu'en fait, elles tournaient sur deux axes différents séparés d'un peu plus d'un millimètre. Ces détails de construction étaient apparus à la tomographie : les axes des deux roues dentées ne sont pas fixes, mais engendrent un mouvement circulaire non uniforme en formant un train épicycloïdal – une roue tourne sur l'autre de sorte que leurs axes tournent l'un autour de l'autre – monté sur la grande roue dentée à 223 dents.

Michael Wright avait écarté l'idée que ce train épicycloïdal reproduisait le mouvement variable de la Lune parce que, dans sa



reconstitution du mécanisme, l'engrenage à 223 dents tournait bien trop vite pour que cela ait un sens. Dans ma reconstitution, l'engrenage à 223 dents tourne afin de déplacer correctement l'aiguille du cadran saros. Reproduire le mouvement lunaire dans la théorie épicyclique à l'aide d'un train épicycloïdal et d'une aiguille glissée dans une fente est de la part des Grecs anciens une véritable performance technique, ingéniosité qui renforce l'hypothèse qu'Archimède pourrait être le concepteur originel de la machine d'Anticythère. Nos recherches sur les cadrans arrière ont complété notre vision de l'arrière du mécanisme, réconciliant toutes les données recueillies. Mes collègues et moi avons publié ces résultats en 2006 dans le journal *Nature*. Une grande énigme subsistait cependant : l'avant de la machine.

L'AVANT DU MÉCANISME

La structure la plus frappante à l'avant du plus grand fragment est la roue motrice principale conçue pour tourner une fois par an. Au contraire de la plupart des autres roues dentées, il ne s'agit pas d'un disque plat, mais d'une roue à quatre rayons comportant de

Au fil des ans, la masse originale du mécanisme d'Anticythère s'est fragmentée en 82 morceaux. Comprendre comment les assembler fut un véritable défi pour les chercheurs. C'est dans le plus grand fragment (en haut à gauche) que se trouve la roue motrice principale.

nombreuses structures étonnantes. Des trous circulaires dans les rayons où s'inséraient des axes montrent qu'ils portaient des roulements. Le bord extérieur de l'engrenage contient un anneau de petits piliers, sorte de petits doigts dotés d'un épaulement et dont l'extrémité est percée, clairement pour fixer une plaque. Plus courts, quatre de ces piliers supportaient une plaque rectangulaire ; plus longs, quatre autres supportaient une plaque circulaire.

Suivant en cela Price, Michael Wright a proposé qu'un vaste train épicycloïdal – la conception grecque de deux cercles expliquant les étranges mouvements rétrogrades des planètes – était monté sur la roue motrice principale. Il en a même construit une reconstitution en laiton pour en démontrer le fonctionnement. En 2002, il a publié un modèle planétaire révolutionnaire de mécanisme d'Anticythère affichant les cinq planètes que connaissaient les Anciens : Uranus et Neptune ne se voyant pas à l'œil nu, elles n'ont en effet été découvertes qu'avec les premiers télescopes au XVIII^e siècle. Michael Wright a démontré que les théories épicycliques pouvaient être traduites en trains d'engrenages épicycliques à l'aide d'aiguilles coulis-

rainures afin d'afficher correctement les mouvements variables des planètes.

Lorsque j'ai découvert le modèle de Wright, j'ai été choqué par sa complexité mécanique. Il comportait notamment huit tubes coaxiaux apportant des informations sur l'écran frontal de l'appareil. Était-il plausible que les Grecs anciens aient construit un système aussi compliqué? Je suis aujourd'hui persuadé que Wright a correctement reconstruit les mouvements coaxiaux en surface, mais le train d'engrenages qu'il propose n'a ni l'ingéniosité ni l'économie d'engrenages perceptible dans les rouages connus de la machine. Notre équipe de l'université de Londres s'est donc attaquée à réconcilier les mouvements coaxiaux de Wright avec ce que nous avons observé sur le reste du dispositif.

Un indice crucial nous est venu de l'étude tomographique aux rayons X de 2005. En plus de montrer les engrenages en trois dimensions, les images ont révélé quelque chose d'inattendu: des milliers de lettres cachées à l'intérieur des fragments, qui n'avaient plus été lues depuis 2000 ans ou davantage. Dans les notes de recherche prises entre 1905 et 1906, Rehm proposait que les positions du Soleil et des planètes soient affichées dans un système concentrique d'anneaux. À l'origine, le mécanisme comportait deux façades – avant et arrière – portant les affichages et de nombreuses inscriptions. Révélée par les tomographies de 2005, une grande inscription présente sur la façade arrière semble avoir été le mode d'emploi du dispositif. En 2016, le professeur d'histoire de l'astronomie à l'université de New York Alexander-Jones a découvert dans cette inscription la preuve définitive que l'idée de Rehm était correcte: elle décrit en effet en détail l'affichage du Soleil et des planètes sur les anneaux concentriques marqués par des perles servant à indiquer les positions de ces astres.

Dès lors, il devenait clair que toute reconstitution de la machine devrait correspondre à la description de l'affichage du Soleil et des planètes inscrites au dos de l'appareil. Un problème technique nous avait empêchés jusque-là de le faire, de sorte que nos reconstitutions n'intégraient pas les anneaux concentriques donnant le mouvement des planètes. Wright avait en effet découvert qu'une boule argentée sur la moitié de sa surface servait à afficher sur l'appareil la phase de la Lune (lune nouvelle, premier croissant, lune pleine, etc.). Comme il est possible de la décrire par l'angle Lune-Terre-Soleil dans le plan de l'écliptique, la machine la calculait mécaniquement par soustraction de l'angle solaire à l'angle lunaire (tous les deux

LA MACHINE D'ANTICYTHÈRE, EN CHIFFRES

2 060 ans sous l'eau
7 astres situés dans le ciel

223 dents dans la plus grande roue dentée
3 affichages par cadran
30 roues dentées retrouvées
69 roues dentées dans la dernière reconstitution.

fournis par leurs trains d'engrenages respectifs). Toutefois, les affichages de Mercure et de Vénus dans les systèmes des anneaux concentriques donnaient les positions planétaires empêchant le dispositif calculant la phase lunaire d'accéder au train d'engrenages du Soleil, et donc à son angle. Nous butions sur cette difficulté quand, en 2018, David Higgon, l'étudiant diplômé en horlogerie de notre équipe, réussit par une idée étonnamment simple à résoudre élégamment ce problème technique. Sa proposition expliquait en plus la présence sur la roue motrice principale d'un mystérieux bloc percé, qui s'avérait capable de transmettre directement au dispositif de calcul de la phase lunaire l'«angle moyen du Soleil» (par opposition à l'angle variable dit «soleil vrai»). Grâce à cette trouvaille, nous avons obtenu un système d'anneaux concentriques sur la façade avant du mécanisme d'Anticythère reflétant entièrement la description de l'inscription présente sur la façade arrière.

Une autre de nos préoccupations pendant l'étude de l'avant du dispositif était d'identifier les cycles planétaires intégrés au mécanisme, car ils déterminent les trains d'engrenages calculant les positions planétaires. Les recherches antérieures suggéraient qu'ils étaient fondés sur des correspondances périodiques dérivées de celles des Babyloniens. Mais en 2016, Alexander Jones a découvert quelque chose qui nous fit écarter cette hypothèse. La tomographie à rayons X de l'inscription de la façade avait révélé qu'elle est divisée en sections pour chacune des cinq planètes. Dans la section Vénus, Jones a trouvé le nombre 462; dans la section Saturne, il a trouvé le nombre 442. Ces chiffres représentent des correspondances périodiques plus précises que celles des Babyloniens, ce qui est étonnant, car rien n'a jamais suggéré que les astronomes de l'Antiquité les connaissaient. Il semble en fait que les constructeurs de la machine d'Anticythère avaient découvert des correspondances périodiques améliorées pour deux des planètes: 289 cycles synodiques en 462 ans pour Vénus et 427 cycles synodiques en 442 ans pour Saturne.

Alexander Jones n'ayant pas expliqué comment les Grecs anciens ont obtenu ces deux périodes synodiques, nous avons entrepris d'essayer de le saisir par nous-mêmes. Aris Dacanalis, notre autre étudiant de l'université de Londres, a établi une liste complète des relations entre les correspondances périodiques et leurs erreurs estimées dans l'astronomie babylonienne. Les combinaisons de ces

correspondances périodiques antérieures pouvaient-elles expliquer les relations plus précises du mécanisme d'Anticythère? Nous avons fini par trouver une méthode, développée par le philosophe Parménide d'Élée (du VI^e au V^e siècle avant notre ère) et rapporté par Platon (du V^e au IV^e siècle avant notre ère), pour combiner les correspondances connues afin d'en obtenir de meilleures.

STRATÉGIE DE CONSTRUCTION

Nous avons alors considéré que les constructeurs de la machine ont employé des modes de calcul répondant à trois critères: être précis, rendre possible des factorisations et être économe. Un mode de calcul devait être précis pour traduire les correspondances planétaires connues pour Vénus et Saturne; il devait permettre des factorisations, pour que les roues dentées nécessaires au calcul puissent loger dans le mécanisme; l'exploitation mécanique des nombres premiers communs aux correspondances planétaires pouvait enfin aider à rendre le dispositif économe en réduisant le nombre d'engrenages nécessaire. Cette conception économisant le nombre de roues dentées est la caractéristique des trains d'engrenages survivants. Sur la base de ces critères, notre équipe a dérivé les périodes 462 et 442 en utilisant l'idée de Parménide et a employé les mêmes méthodes pour découvrir les périodes manquantes pour les autres planètes dont les inscriptions étaient perdues ou endommagées.

Grâce aux correspondances entre les périodes planétaires, nous avons pu comprendre comment adapter les trains d'engrenages des planètes dans les espaces restreints disponibles. Pour Mercure et Vénus, nous avons conçu des mécanismes économiques à cinq engrenages comportant des dispositifs à aiguilles et rainures, semblables aux mécanismes de Michael Wright pour ces planètes. Nous avons trouvé des indices solides de la justesse de notre reconstruction dans un fragment de quatre centimètres de diamètre. À l'intérieur de cette pièce, le tomographe à rayons X avait révélé un disque lié à un engrenage de 63 dents, tournant à l'intérieur d'une plaque en forme de D. Le nombre 63 ($3 \times 3 \times 7$) partage les facteurs premiers 3 et 7 avec 462 (la période de Vénus). Un train d'engrenages utilisant l'engrenage à 63 dents pourrait être dessiné afin de correspondre à un roulement placé sur l'un des rayons de la roue motrice principale. Une conception similaire pour Mercure correspond aux caractéristiques du rayon opposé. Ces observations nous ont donné une grande



Les chercheurs ont reconstitué l'affichage de la façade avant par ordinateur. Au centre, un dôme représente la Terre. La phase de la Lune est affichée par une sphère à demi argentée associée à un pointeur donnant sa position dans le zodiaque, décrit par l'avant-dernier anneau (gradué). Les dates remarquables des cycles synodiques de Mercure, de Vénus, de Mars, de Jupiter et de Saturne sont marquées par des lettres et des perles sur cinq anneaux concentriques. Entre celui de Vénus et celui de Mars s'intercale l'anneau donnant le soleil «vrai». Tout à fait à l'extérieur, après l'anneau gradué du zodiaque, un anneau gradué donne la date dans le calendrier égyptien.

confiance dans le fait que nous étions sur la bonne voie pour Mercure et Vénus.

Pour les autres planètes connues – Mars, Jupiter et Saturne –, notre équipe a conçu des systèmes très compacts adaptés à l'espace disponible. Ces conceptions constituaient un grand changement par rapport aux systèmes de Michael Wright pour ces mêmes planètes. Travaillant indépendamment, Christián Carman, de l'université nationale de Quilmes en Argentine, et moi-même avons montré que le subtil système d'engrenages indirect utilisé pour le mouvement variable de la Lune pouvait être adapté à ces planètes. Notre équipe de l'université de Londres a prouvé que ces trains d'engrenages pouvaient être augmentés afin d'incorporer les nouvelles correspondances périodiques. Grâce à cette stratégie, les constructeurs de la machine ont pu monter plusieurs engrenages sur la même plaque et les concevoir pour qu'ils produisent précisément les correspondances périodiques.

Ces trains économes à sept engrenages seulement pouvaient s'imbriquer entre les plaques

disposées sur les piliers de la roue motrice principale de façon à faire apparaître les informations produites dans l'ordre cosmologique habituel des corps célestes – Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter et Saturne – qui préside à la disposition du système annulaire. Les dimensions des espaces disponibles entre les plaques étaient parfaitement adaptées pour accueillir ces systèmes, laissant même un certain volume en réserve. Quelques détails restent cependant inexpliqués.

Ainsi, nous avons ajouté un mécanisme pour le mouvement variable du Soleil et un mécanisme épicyclique pour calculer les «nœuds lunaires» – les points où l'orbite de la Lune traverse l'écliptique, ce qui rend une éclipse possible. Les éclipses se produisent seulement lorsque le Soleil est proche de l'un de ces nœuds pendant une pleine ou une nouvelle lune. Les astronomes du Moyen-Âge et de la Renaissance appelaient «main de dragon» l'aiguille à double extrémité destinée à repérer les nœuds lunaires. L'engrenage épicyclique de cette main de dragon explique aussi exactement un roulement prédominant sur l'un des rayons qui semblait auparavant n'avoir aucune fonction. En mars 2021, ayant enfin expliqué toutes les structures de la roue motrice principale, nous avons publié nos conclusions dans *Scientific Reports*.

UNE CONCEPTION MAGNIFIQUE

Ainsi, nous comprenons aujourd'hui comment l'affichage frontal correspondait à la description du mode d'emploi de la façade arrière, avec le Soleil et les planètes représentés par des perles de marquage disposées sur des anneaux concentriques. Sur la façade avant étaient affichés la phase, la position et l'âge de la Lune – le nombre de jours depuis le début d'une lunaison –, les années à éclipses – par l'aiguille de dragon –, et les saisons.

Les anneaux concentriques planétaires nous ont fait comprendre que nous pouvions désormais donner un sens à l'inscription de la façade avant. Cette inscription est une liste formelle des événements synodiques de chaque planète (conjonctions avec le Soleil, stations) et des intervalles en jours les séparant. Sur la façade arrière, les inscriptions relatives aux éclipses correspondent aux marques sur le cadran du saros. D'une façon analogue, sur la plaque avant, les inscriptions concernant les levers et couchers d'étoiles correspondent aux marques sur le cadran zodiacal. Nous avons pensé que les inscriptions sur la face avant pouvaient correspondre à des lettres sur les anneaux planétaires: si l'aiguille du Soleil se

trouve sur l'une de ces lettres, l'inscription correspondante décrit le nombre de jours jusqu'au prochain événement synodique. L'absence de la partie gauche de l'inscription, où l'on s'attendrait à trouver ces lettres, ne nous permet pas de prouver cette hypothèse, qui fournit cependant une explication convaincante.

En tant que dispositif technique issu de l'Antiquité, la machine d'Antikythère est extraordinaire, et change à elle seule notre notion du niveau technique atteint par les Grecs anciens. Nous les savions déjà très compétents: bien avant la machine d'Antikythère, ils ont construit le Parthénon et le phare d'Alexandrie, connaissaient la plomberie et expérimentèrent avec la vapeur pour créer du mouvement. Cependant, avant la découverte de la machine d'Antikythère, on croyait que les engrenages des Grecs anciens se limitaient aux roues dentées rudimentaires des moulins à vent et à eau. Le mécanisme d'Antikythère mis à part, les premiers mécanismes à engrenages de précision connus sont un cadran solaire et un calendrier à engrenages relativement simples, mais impressionnants pour l'époque byzantine, qui datent environ de l'an 600 de notre ère. Après cela, ce ne fut pas avant le ^{xiv}^e siècle que des savants créèrent des horloges astronomiques complexes. Le mécanisme d'Antikythère et ses roues dentées portant des dents d'un millimètre de long ne ressemblent à rien de connu dans le monde antique.

Pourquoi a-t-il fallu des siècles aux savants pour réinventer un objet aussi avancé que la machine d'Antikythère? Pourquoi les archéologues n'ont-ils jamais découvert d'autres mécanismes de ce type? Nous avons des raisons de croire que cet objet ne peut avoir été le seul mécanisme de son genre et, du reste, qu'il a eu des précurseurs. Le bronze étant un métal précieux toutefois, les mécanismes complexes réalisés dans cet alliage ayant cessé de fonctionner étaient probablement refondus une fois non fonctionnels. Les épaves antiques constituent peut-être notre meilleure chance d'en découvrir d'autres.

S'agissant du mécanisme d'Antikythère, nous ne sommes pas au bout de nos peines. Nous pensons que notre travail représente une avancée significative, mais il reste encore des énigmes à résoudre. Notre équipe n'est pas certaine que sa reconstitution est entièrement correcte, tant l'énorme perte d'information entraînée par la détérioration du mécanisme rend difficile l'explication de tous les détails subsistants. Quoi qu'il en soit, nous saisissons de plus en plus clairement la performance inouïe que représente la réalisation cet objet. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Freeth, D. Higgin, A. Dacanalis, et al., **A model of the cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism**, *Sci. Rep.*, 2021.

T. Freeth, **Revising the eclipse prediction scheme in the Antikythera Mechanism**, *Palgrave Commun.*, 2019.

J. H. Seiradakis, M. G. Edmunds, **Our current knowledge of the Antikythera Mechanism**, *Nat. Astro.*, 2018.

A. Jones, **A Portable Cosmos: Revealing the Antikythera Mechanism, Scientific Wonder of the Ancient World**, Oxford University Press, mars 2017.

T. Freeth, **L'horloge astronomique d'Antikythère**, *Pour la Science*, n° 389, mars 2010.

T. Freeth, **The Antikythera Mechanism: Challenging the classic research**, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 2002.

L'ESSENTIEL

> Les plus anciens engrenages mentionnés remonteraient au IV^e siècle avant notre ère en Chine, mais ils ont sans doute été inventés plusieurs fois indépendamment.

> Horloges, moulins, machines à calculer, vélos, moteurs... nombre de machines n'auraient jamais vu le jour sans eux.

> Aujourd'hui encore, ils restent indispensables dans de nombreux domaines comme l'automobile, l'aviation et la production d'électricité.

> Depuis quelques dizaines d'années, ils ont aussi investi le domaine micrométrique et sont partis à l'assaut de l'échelle nanométrique.

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)

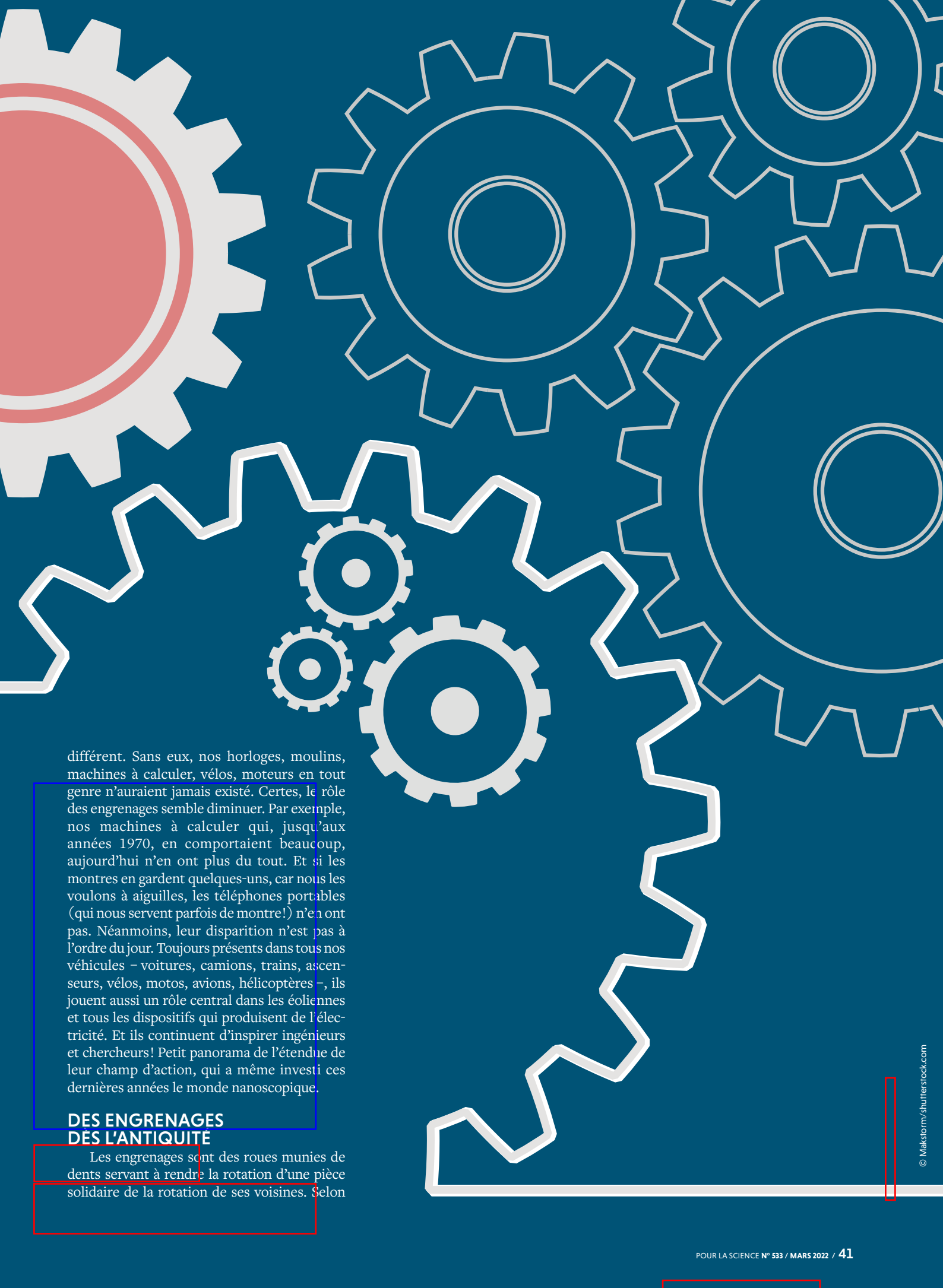
2000 ans et toutes leurs dents

De la machine d'Anticythère aux moteurs des voitures électriques, l'ingénieuse mécanique des engrenages, toujours plus élaborée, est au cœur de bien des technologies essentielles... jusqu'à l'échelle moléculaire.

L'évolution a doté la cigale bossue, *Issus coleoptratus*, d'un outil étonnamment rare dans le monde vivant : des engrenages. Contrairement à nombre de ses congénères, cet hémiptère de quelques millimètres de long ne vole pas. En revanche, sa détente est remarquable, et ce dès le stade larvaire. De fait, les nymphes présentent une rangée de dents sur chaque surface courbe de leurs deux trochanters postérieurs – les parties des pattes proches de la hanche. Pendant la phase préparatoire du saut, les dents de droite s'engagent dans celles de gauche. La complémentarité parfaite entre les parties droite et gauche assure que les deux pattes arrière se déplacent à des vitesses angulaires identiques lors du saut, ce qui propulse le corps sans le faire pivoter.

La découverte de ce mécanisme est récente. C'est seulement en 2013 que les biologistes Malcolm Burrows et Gregory Sutton, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, ont présenté ce système d'engrenages partiels chez cet insecte. C'était la première fois que l'on décrivait un tel mécanisme chez un organisme vivant. Dans le monde vivant, on n'a d'ailleurs jamais trouvé de roues complètes – dentées ou non – qui tourneraient autour d'un axe, comme le font les pièces des horloges mécaniques. Cette absence est assez étonnante vu le rôle central que ce type de systèmes rotatifs a joué et joue toujours dans les technologies humaines. Pourquoi ce qui, pour nous, a été déterminant dans notre évolution technique ne l'a-t-il pas été pour la vie, qui semble être passée à côté de ce mécanisme élémentaire ? L'explication est peut-être liée à la difficulté d'imaginer un processus morphogénétique produisant de manière progressive un objet ajusté – la roue –, mais non connecté à son support – l'axe de la roue.

Le fait est que pour nous, humains, les engrenages constituent une invention remarquable sans laquelle le monde serait bien



différent. Sans eux, nos horloges, moulins, machines à calculer, vélos, moteurs en tout genre n'auraient jamais existé. Certes, le rôle des engrenages semble diminuer. Par exemple, nos machines à calculer qui, jusqu'aux années 1970, en comportaient beaucoup, aujourd'hui n'en ont plus du tout. Et si les montres en gardent quelques-uns, car nous les voulons à aiguilles, les téléphones portables (qui nous servent parfois de montre!) n'en ont pas. Néanmoins, leur disparition n'est pas à l'ordre du jour. Toujours présents dans tous nos véhicules – voitures, camions, trains, ascenseurs, vélos, motos, avions, hélicoptères –, ils jouent aussi un rôle central dans les éoliennes et tous les dispositifs qui produisent de l'électricité. Et ils continuent d'inspirer ingénieurs et chercheurs! Petit panorama de l'étendue de leur champ d'action, qui a même investi ces dernières années le monde nanoscopique.

DES ENGRENAGES DÈS L'ANTIQUITE

Les engrenages sont des roues munies de dents servant à rendre la rotation d'une pièce solidaire de la rotation de ses voisins. Selon

leur taille, les voisines tournent plus ou moins vite. Le rapport entre les vitesses des unes et des autres est directement et très précisément lié aux nombres de dents de chacune: si une roue de m dents est liée à une roue de n dents, quand la roue de m dents fait un tour, celle de n dents fait exactement m/n tours. Pour faciliter une usure uniforme des dents, il est souhaitable que m et n soient premiers entre eux (c'est-à-dire sans diviseur commun), car cela entraîne que chaque dent d'une roue sera périodiquement en contact avec chaque dent de sa voisine. Le lien par engrenage entre deux roues est équivalent à ce qu'on obtient avec des courroies reliant les roues, mais il est plus compact et permet de transmettre des forces plus grandes sans risque de glissement. De plus, il autorise aisément des changements de direction des axes de rotation: deux roues dentées perpendiculaires peuvent, si les dents sont correctement conçues, se transmettre un mouvement (voir l'encadré ci-dessous). Le rendement énergétique d'une transmission par engrenage est très bon et dépasse souvent 95%.

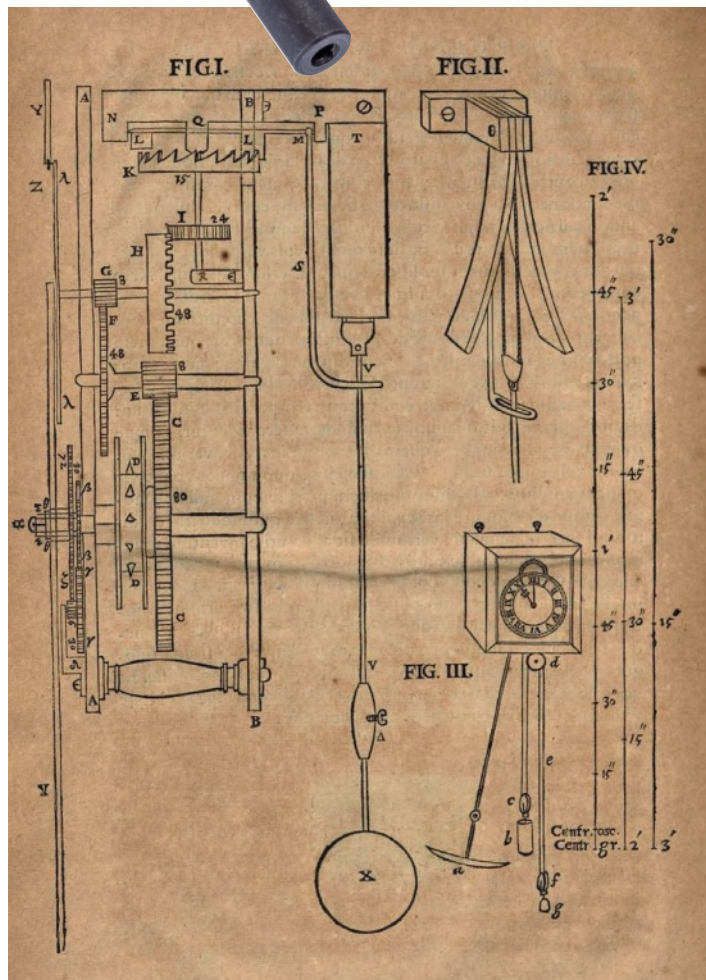
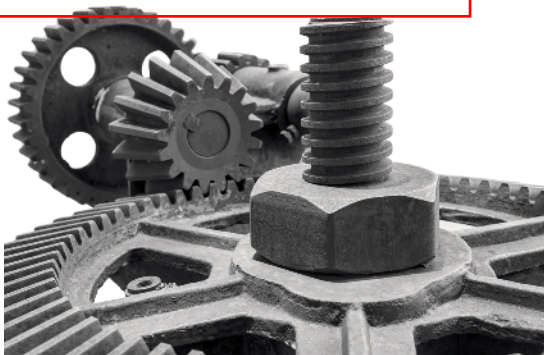
On ignore qui a inventé les engrenages, mais il est probable qu'ils aient été découverts indépendamment plusieurs fois. Les plus anciens mentionnés remonteraient au IV^e siècle avant notre ère en Chine. Les Grecs connaissaient ce type de dispositifs et ils en ont eu une maîtrise exceptionnelle dès le I^{er} siècle avant notre ère, comme en témoigne la fantastique machine d'Anticythère, dont l'étude a été menée avec soin. Grâce en particulier aux textes gravés sur ses différentes pièces, on est certain de sa fonction de machine à calcul astronomique.

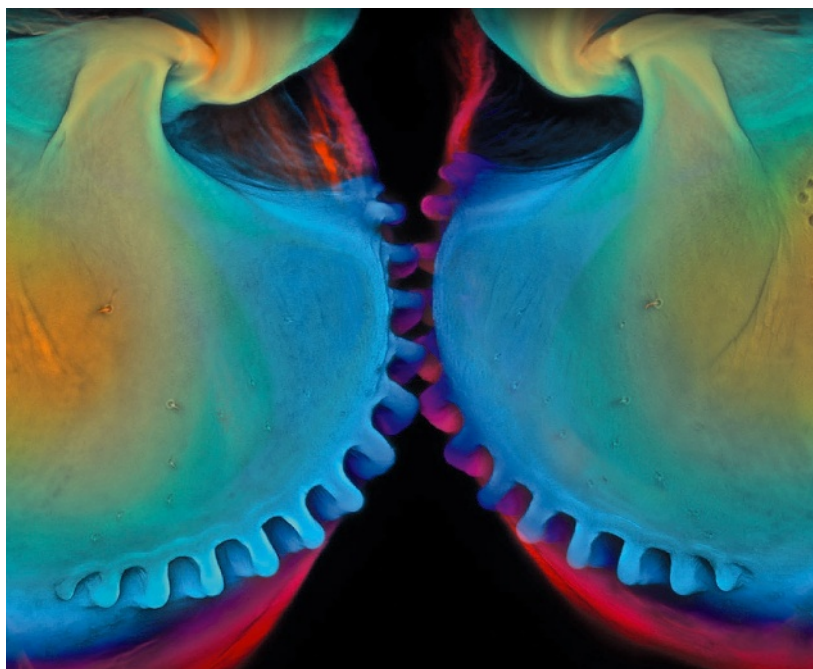
Mis au jour en 1901 dans une épave près de l'île d'Anticythère, au nord de la Crète, cet appareil en bronze est le plus ancien mécanisme à engrenages qui nous soit parvenu. En 1959, en utilisant des radiographies aux rayons gamma, le physicien anglais Derek de Solla Price a mené une première étude de la machine et a commencé à en élucider la fonction. En 2000, grâce à un scanner à rayons X, l'astronome Mike Edmunds, de l'université de Cardiff, au Royaume-Uni, et le mathématicien



TRANSMISSION ORTHOGONALE

Certains engrenages permettent de transformer un mouvement de rotation selon un axe en un mouvement selon un axe perpendiculaire. Le savant néerlandais Christiaan Huygens a utilisé cette transmission orthogonale dans son horloge à pendule cycloïdal, qu'il présente en 1673 dans *Horologium Oscillatorium* (ci-contre). Sur son schéma, la figure II montre le guide cycloïdal qui assure un balancement constant du pendule. Sur la figure I, qui montre le mécanisme de côté, on voit que le pendule est relié à la roue des heures C via deux roues dentées perpendiculaires H et I. Une roue à dents de scie K fixée sur le même axe que la roue I entretient le mouvement du pendule grâce à un mécanisme d'échappement: les palettes L s'appuient tour à tour sur les dents de scie, ce qui fait osciller sur son axe l'arbre Q qui les porte. Il existe différentes façons de changer l'axe d'un engrenage, en jouant soit sur la forme de la roue (engrenage conique, en bas), soit sur la forme des dents (engrenage hélicoïdal), soit sur la géométrie de l'ensemble (engrenage à vis sans fin, ci-dessus).





Tony Freeth, alors dans la même université, ont obtenu des images tridimensionnelles de la machine avec une précision de 50 micromètres, ce qui leur a permis de déchiffrer des inscriptions restées jusqu'alors illisibles et de mieux appréhender globalement l'objet, dont des reconstitutions de plus en plus précises ont été proposées (voir l'article pages 28 à 39).

DE LA MACHINE D'ANTICYTHÈRE À L'HORLOGE D'AL-MURADI

L'appareil est remarquable par la finesse de sa miniaturisation et par la complexité de son mécanisme, comparable à celui des horloges mécaniques. La machine complète comportait probablement plus de soixante-dix roues, hérissées de dents en forme de triangles équilatéraux. Le fonctionnement de la machine était le suivant. Une date était choisie en positionnant une sorte de manivelle. Cela provoquait la rotation des diverses roues conduisant à l'affichage de la position du Soleil, de la Lune et de plusieurs planètes. Contrairement aux machines à calculer dans la lignée de la Pascaline, la calculatrice inventée par Blaise Pascal au XVII^e siècle, elle ne dispose donc pas de mécanismes d'avance par sauts discrets et de système de report de retenue qui permettraient de la considérer comme une machine arithmétique.

Parmi les hypothèses avancées concernant le concepteur du mécanisme, on évoque Archimède ou l'un de ses élèves, mais rien n'est certain. Il est extraordinaire qu'une ou plusieurs machines de ce type aient existé il y a deux mille ans et que cela soit resté ignoré jusqu'au XX^e siècle. L'idée que l'on a aujourd'hui de la science grecque en a été profondément bouleversée.

De fait, des autres engrenages de la même époque, nous n'avons que des traces écrites de systèmes plutôt simples. Réalisés en bois, ils servaient principalement à actionner des roues persanes (machines pour extraire l'eau d'un puits), des pompes, des moulins à eau et des horloges à eau. La première trace connue d'un autre mécanisme complexe d'engrenages remonte à quelque mille ans plus tard : dans l'ouvrage *Kitāb al-asrār fi natā'ij al-afkār* (« Le Livre des secrets résultant des pensées »), paru dans l'Espagne musulmane du XI^e siècle, le savant Ali Ibn Khalaf al-Muradi décrit une horloge à eau de son invention munie d'un système complexe de roues, comprenant en particulier des engrenages dits « épicycloïdaux », qui jouent aujourd'hui encore un rôle clé dans l'industrie automobile et éolienne, nous y reviendrons. Il n'existe malheureusement aucun exemplaire de cette horloge ou d'une horloge équivalente de cette époque, et il n'a pas été possible de la reconstituer avec précision. Selon

La nymphe de la cigale bossue, *Issus coleoptratus*, effectue des sauts en synchronisant le mouvement de ses deux pattes postérieures grâce à un mécanisme d'engrenages présent sur des parties de ses pattes connectées aux fémurs (à droite en fausses couleurs, observé au microscope électronique à balayage). Les adultes, en revanche, troquent ce dispositif pour un système de frottement entre les hanches, peut-être plus avantageux du fait de leur plus grande taille, et peut-être aussi plus résistant à l'usure.

Les premiers engrenages servaient à actionner des roues persanes et des moulins

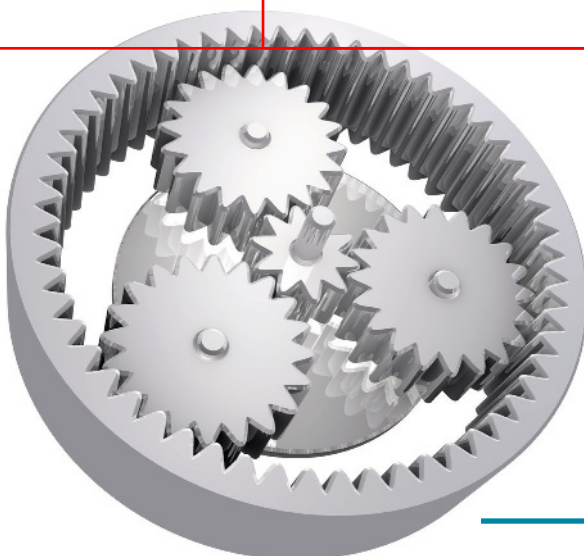
L'historien des sciences Ahmed Djebbar, spécialiste du monde de l'islam, le haut niveau d'élaboration des mécanismes décrits suggère que les techniques utilisées résultaient d'une longue tradition remontant au ^x^e siècle. Cette horloge n'eut pas d'équivalent jusqu'aux horloges mécaniques du milieu du ^{xiv}^e siècle en Europe. Il se peut que le travail d'al-Muradi, qui était connu des érudits, ait joué un rôle dans le développement de ces instruments.

Les premières horloges entièrement mécaniques ont vu le jour très probablement à la fin du ^{xiii}^e siècle. L'engrenage en était un élément fondamental qui permettait de retenir le mouvement de la roue des heures. En effet, l'élément moteur était en général un poids suspendu à une corde, dont la chute naturelle est uniformément accélérée et ne convient donc pas pour indiquer la régularité de l'écoulement du temps. Montée sur l'axe de la roue des heures, une roue dentée entraînait le mouvement d'un pignon, lui-même relié à un élément régulateur – un système de balancier autour d'un axe vertical (un foliot) entretenu par le mouvement du pignon et dont l'inertie était ajustée pour ralentir la roue des heures de façon adéquate.

ENGRENAGES PLANÉTAIRES OU ÉPICYCLOÏDAUX

Les engrenages planétaires – une grande roue avec des dents internes, un système de roues intermédiaires – une petite roue centrale (ci-dessous) – servent à multiplier ou à diviser la vitesse de rotation de deux axes colinéaires. Lorsque les trois roues intermédiaires ont des axes fixes, si la roue la plus grande tourne à la vitesse de 1 tour par seconde, et que le nombre de dents des roues par taille décroissante est N, M, P , alors la roue centrale tournera à la vitesse de $(N/M) \times (M/P) = N/P$ tours par seconde. Parfois la grande roue

est fixe et les roues intermédiaires sont liées les unes aux autres et tournent en même temps que leur ensemble tourne aussi (voir par exemple la vidéo bit.ly/3H61xht). On peut mettre bout à bout plusieurs engrenages planétaires : l'arbre de sortie d'un réducteur devient l'arbre d'entrée du suivant. Le coefficient de réduction global de la vitesse de rotation est bien sûr le produit des coefficients intermédiaires. Par exemple, avec trois étages de coefficient 10, on obtient une réduction de 1 000.



Tout au long de l'histoire de l'horlogerie, ces trois éléments de base – le moteur, le rouage et le régulateur – ont été perfectionnés. On doit ainsi au mathématicien, astronome et physicien néerlandais Christiaan Huygens une avancée notable dans le domaine. Tout d'abord, en 1656, afin de mener ses observations astronomiques, il a inventé l'horloge à pendule en s'inspirant des recherches de Galilée sur l'isochronisme du pendule. En 1602 en effet, le savant italien avait observé que, du moins pour de petites oscillations, la période d'un pendule était indépendante de l'amplitude de son oscillation – une propriété qui faisait du pendule un régulateur potentiel. Un peu plus tard, Huygens a perfectionné le fonctionnement de son horloge en concevant le pendule cycloïdal, qui permet une oscillation parfaitement constante quelle que soit l'amplitude du mouvement (voir l'encadré page 42).

Du côté des engrenages, cette innovation nécessitait un changement : le pendule ayant un mouvement de balancier autour d'un axe horizontal et non vertical, comme le régulateur classique, il fallait modifier en conséquence l'axe de rotation du pignon du rouage. C'est ainsi que l'horloge de Huygens, la première à pendule, s'est trouvée aussi dotée d'un engrenage à axes perpendiculaires, alors qu'auparavant les axes des engrenages des horloges à foliot étaient tous parallèles.

DES ENGRENAGES DÉSAXÉS

Les engrenages à axes non parallèles n'en étaient pas moins connus depuis longtemps. On les utilisait dans les calculateurs astronomiques (la machine d'Anticythère en présentait déjà un), dont les changements d'orientation des axes étaient bien plus complexes que dans l'horloge de Huygens. Pour les moulins à eau, largement diffusés dans le monde romain dès le ⁱ^{er} siècle, ou ceux à vent à axe horizontal, qui se sont développés en Europe à partir du ^{xii}^e siècle, il était aussi inévitable de changer au moins une fois la direction des axes de rotation. On passait ainsi d'un axe de rotation horizontal – la roue entraînée par l'eau ou l'axe qui porte les ailes que le vent pousse – à un axe vertical qui faisait tourner la meule de pierre, nécessairement horizontale pour que les grains ou épis déposés ne s'échappent pas.

Plus récemment, dans l'aviation, un problème du même type s'est posé pour les avions à réaction. Dans leur forme pure, les statoréacteurs ne comportent aucune pièce mobile et n'ont donc aucun engrenage. La force de poussée est créée par l'éjection des gaz brûlés issus de la combustion d'un carburant, en général du kérosène. Cependant, ces moteurs ne fonctionnent qu'à vitesse élevée, ce qui ne convient pas pour les avions. On a donc conçu les turboréacteurs qu'on trouve par exemple sur tous les gros avions de ligne aujourd'hui et les avions de chasse. Cette

fois, le moteur associe le carburant à de l'air pour produire la poussée, et des pièces rotatives sont nécessaires pour compresser l'air qui entre à l'avant du dispositif.

Dans les versions minimales de ces moteurs, aucun engrenage n'est utile. Mais cela ne signifie pas qu'un avion ne compte pas d'engrenage. En effet, il est nécessaire d'extraire du turbo-réacteur d'autres sources d'énergie que la simple poussée, par exemple pour le fonctionnement de la pompe à carburant, ou pour la production d'énergie électrique utile dans l'avion. Aussi une partie de l'énergie produite par le turboréacteur est récupérée par une turbine à la sortie de la chambre de combustion. La turbine tourne selon l'axe du turboréacteur; il faut donc sortir l'énergie de cet axe, pour l'amener à l'extérieur et pouvoir en disposer. On utilise pour cela des «boîtiers d'accessoires à engrenages» (*accessory gearbox*) qui exploitent la capacité des engrenages à changer l'axe de rotation d'engrenages liés les uns aux autres et réussissent cette ponction d'énergie sur le turboréacteur. Même pour ces moteurs dont la partie principale ne comporte aucun engrenage, finalement, on n'a pas su s'en passer, et on n'est pas près d'y parvenir!

Un autre domaine où des engrenages aux axes non parallèles sont indispensables est l'automobile, et plus précisément son différentiel, c'est-à-dire le système mécanique qui permet dans une courbe d'avoir des vitesses de rotation différentes pour la roue droite et la roue gauche. Breveté en 1827 par le mécanicien français et maître horloger Onésiphore Pecqueur, ce système s'appuie sur trois axes de rotation: celui du moteur, celui des deux roues qu'il actionne, et un troisième, perpendiculaire à l'axe des roues et en rotation autour de lui. C'est ce troisième axe et ses engrenages qui confèrent aux roues une liberté supplémentaire pour adapter leur vitesse dans les virages (*un beau film de la chaîne YouTube Lesics décrit le fonctionnement d'un différentiel: bit.ly/346aFnI*).

DÉMULTIPLIER LA VITESSE DE ROTATION

Il y a bien sûr par ailleurs une multitude d'engrenages dans les boîtes de vitesses, qu'elles soient automatiques ou non. Même les voitures électriques, qui n'ont pas de boîte de vitesses, utilisent aussi des engrenages pour réduire ou augmenter la vitesse de rotation des roues par rapport à celle du moteur. Cependant, alors que dans les voitures non automatiques, on change de vitesse en changeant de pignon, dans celles automatiques (dont les voitures électriques), le changement de vitesse se fait au moyen de «trains d'engrenages épicycloïdaux» ou «trains d'engrenages planétaires» similaires à ceux de l'horloge à eau d'al-Muradi.



Constitués de plusieurs roues dentées dont l'une contient les autres, et dont au moins une est concentrique avec elle, ces systèmes sont utilisés pour multiplier ou démultiplier une vitesse de rotation sans changer l'axe concerné (*voir l'encadré page ci-contre*). Comparés à des engrenages placés côte à côte, comme dans une boîte de vitesses classique, ils sont plus compacts, plus robustes et permettent des rapports assez importants entre la rotation du plus rapide et celle du plus lent. On peut bien sûr en disposer plusieurs à la suite (*une vidéo de Thomas Schwenke explique bien le principe de fonctionnement de ces engrenages dans une boîte de vitesses automatique: bit.ly/3FTQMxi*).

Toutes les éoliennes modernes présentent, elles aussi, des engrenages épicycloïdaux, car l'hélice de l'éolienne tourne relativement lentement et les générateurs électriques exigent des pièces en rotation bien plus rapide. Dans les hélicoptères, le problème est inverse: le moteur tourne à une vitesse élevée que l'on doit réduire avant de la transmettre aux pales, plus lentes à cause de leur poids et de leur taille. Des trains d'engrenages planétaires sont aussi souvent présents dans les vélos électriques, car le moteur électrique produit une vitesse de rotation trop élevée pour être exploitée directement.

En 2020, l'artiste néerlandais Daniel de Bruin a conçu une machine avec un train d'engrenages réalisant une démultiplication de 10^{100} . Cent roues y opèrent chacune une réduction de vitesse d'un facteur 10. Si la première roue effectue 10^{100} tours, la dernière en fait un seul.

Toutes les éoliennes modernes présentent des engrenages épicycloïdaux



Dans les centrales hydroélectriques, la vitesse de rotation du moteur recevant la chute d'eau est le plus souvent inférieure à celle des génératrices électriques standard, prévues pour être entraînées à 750, 1000 ou 1500 tours par minute. Là aussi, on résout le problème par un multiplicateur de vitesse à engrenages, épicycloïdal ou non.

Un record de démultiplication a été atteint pour le plaisir du défi. Le 1^{er} mars 2020, à l'occasion de sa milliardième seconde de vie, l'artiste néerlandais Daniel de Bruin a mis en marche une machine absurde de sa conception réalisant une démultiplication de 10^{100} , nombre dénommé «gogol» par le mathématicien américain Edward Kasner au début du xx^e siècle et à l'origine du nom de la firme Google. Le système comporte un train d'engrenages de cent roues opérant chacune une réduction de vitesse d'un facteur 10. Il faut donc que la première roue effectue 10^{100} tours pour que la dernière en fasse un. À raison par exemple de 1000 tours par seconde pour la première, il faut donc attendre $3,18 \times 10^{80}$ milliards d'années pour que la dernière en fasse un, ce qui est beaucoup plus que l'âge de l'Univers... et sans doute largement suffisant pour user totalement la première roue et mettre le dispositif en panne!

LES ENGRENAGES DE L'EXTRÊME

D'autres records concernent la taille des engrenages. On trouve mention de ce qui serait le plus grand engrenage du monde dans le journal bimensuel *Gear Technology* (oui, cela existe!) qui, dans son numéro de mars-avril 2013, montre la photo d'un engrenage utilisé en Chine de diamètre 13,2 mètres pesant 73,5 tonnes (voir la photo ci-dessus à gauche). Les grandes roues d'observation des parcs d'attractions auraient pu battre ce record, mais ce n'est pas le cas, car pour s'élever au-dessus

La plus grande roue dentée a été construite pour une mine de cuivre en Chine (à gauche). Son diamètre est de 13,2 mètres et elle pèse 73,5 tonnes. Les plus petits engrenages fonctionnels mesurent quelques dizaines de micromètres (à droite). Leurs roues dentées sont produites par des procédés de gravure utilisés dans l'industrie des microprocesseurs. Elles sont utilisées dans la conception de systèmes microélectromécaniques (MEMS, en anglais), des mécanismes micrométriques aux applications multiples dans des domaines variés comme la défense, l'acoustique ou la conception de capteurs électroniques.

des villes, ces roues sont entraînées non pas par des engrenages, mais par friction.

Les plus petits engrenages sont, à l'autre extrémité du spectre, l'œuvre de chercheurs en micromécanique ou en nanosciences, qui utilisent les procédés de gravure de l'industrie des microprocesseurs pour produire des roues dentées de quelques micromètres de diamètre (voir la photo ci-dessus à droite), voire de quelques dizaines de nanomètres, mais l'idée d'aller plus loin fait son chemin. Depuis une quarantaine d'années, des chimistes explorent diverses stratégies pour fabriquer des engrenages moléculaires. Un facteur limitant étant la stabilisation des molécules à l'échelle atomique, depuis quelques années, diverses équipes tentent de fixer une des roues moléculaires sur un support.

C'est ainsi qu'en 2019, l'équipe de Christian Joachim, au Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales, à Toulouse, a réussi à actionner un engrenage constitué de deux roues de 1 nanomètre de diamètre à six dents. Chaque dent avait pour base une molécule de benzène, l'ensemble formant une étoile centrée sur un même cycle de benzène. À l'aide d'un microscope à effet tunnel, l'équipe a déposé l'une des deux roues sur un atome de cuivre, qui a servi de pivot, puis a approché l'autre de telle façon que les dents s'imbriquent, avant d'actionner l'ensemble. Et les chimistes rêvent à présent de nanoroues avec plus de dents ou qui s'assembleraient toutes seules en réseaux d'engrenages. On le voit, les roues dentées n'ont pas fini de nous accompagner! ■

BIBLIOGRAPHIE

- T. Freeth et al., **A model of the cosmos in the ancient Greek Antikythera mechanism**, *Scientific Reports*, 2021.
- Y. Gisbert et al., **Molecular gears: From solution to surfaces**, *Chemistry – A European Journal*, 2021.
- H. Bruderer, **The Antikythera mechanism**, *Communications of the ACM*, avril 2020.
- B. Bhushan, **Nanotribology and Nanomechanics**, Springer, 4^e édition, 2017.
- M. Burrows et G. Sutton, **Interacting gears synchronize propulsive leg movements in a jumping insect**, *Science*, 2013.
- T. Freeth, **L'horloge astronomique d'Antikythera**, *Pour la Science*, n° 389, 2010.
- E. Bautista Paz et al., **A Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms**, Springer, 2010.

PAS DE SUPERCAR AU GARAGE MAIS JE FAIS PARTIE DU 1%

DAVID LORRAIN

est fondateur de RecycLivre,
membre du collectif
1% for the Planet.
Chaque année,
RecycLivre reverse
1% de son chiffre d'affaires
à la protection
de l'environnement.

Rejoignez le mouvement sur
onepercentfortheplanet.fr



**FOR THE
PLANET®**

LE TEMPS EXISTE-T-IL ?

- 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>

Les exosomes, des vésicules sécrétées par les cellules, peuvent avoir un fort potentiel thérapeutique. (vue d'artiste)

De nouvelles thérapies pour traiter les dommages dus à de fortes irradiations

CONTEXTE

Lors d'accidents de radiothérapie, d'accidents industriels, les personnes exposées à de fortes doses de rayonnements ionisants développent des brûlures cutanées ou des lésions intestinales particulièrement graves. Pour améliorer les traitements actuels, l'IRSN

fonde beaucoup d'espoirs sur la médecine régénérative, sur laquelle ses chercheurs travaillent depuis plus d'une vingtaine d'années avec la perspective d'un transfert clinique et d'une solution thérapeutique à grande échelle.

Cahier partenaire réalisé avec

IRSN

www.irsnn.fr

Grâce à ses études démontrant l'efficacité de thérapies innovantes basées sur l'administration de cellules souches, l'IRSN a pu apporter un support thérapeutique à des équipes hospitalières pour soigner des patients surirradiés. Les premières cellules souches injectées, bien qu'efficaces ont vite révélé leurs limites. Une autre stratégie basée sur un type de vésicules produites par ces mêmes cellules souches, les exosomes, suscite aujourd'hui beaucoup d'espoirs. Ils révèlent un formidable potentiel thérapeutique.

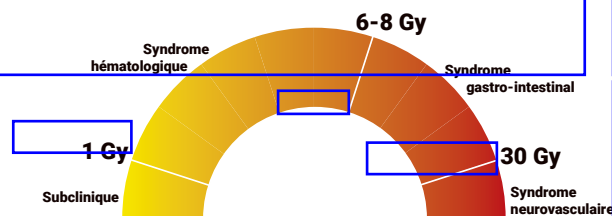
En 2005, vingt-quatre personnes traitées pour un cancer de la prostate à l'hôpital public d'Épinal souffrent de rectites ou de cystites invalidantes. Il s'avère qu'ils ont été surirradiés de 20 % à 30 %. Au total, plus de 5 000 patients traités par radiothérapie dans cet hôpital entre 1987 et 2006 ont été exposés à des surdoses de rayonnements ionisants de 3 % à 30 %, consécutifs à une série de dysfonctionnements techniques et d'erreurs humaines. Cet accident de radiothérapie avec une irradiation très grave mais localisée est le plus important jamais enregistré en France. Heureusement, ce fut un cas unique.

En octobre 2006, le ministre de la Santé sollicite l'IRSN pour assister l'hôpital d'Épinal sur le suivi de plus de 425 de ces patients (1). Pour les plus sévèrement atteints, les traitements conventionnels s'avèrent insuffisants. En étroite collaboration, l'IRSN, les équipes hospitalières

du Centre de transfusion sanguines des Armées (CTSA), les hôpitaux Saint-Antoine et La Pitié-Salpêtrière ont proposé une nouvelle stratégie thérapeutique, à titre compassionnel, basée sur l'administration de cellules souches. Quatre patients ayant été surirradiés de plus de 20 % sont alors traités avec des cellules stromales mésenchymateuses (CSM) issues de la moelle osseuse. C'était une première. L'efficacité du traitement sur la douleur ainsi que sur les hémorragies a été remarquable.

L'IRSN étudie depuis plus de vingt ans l'intérêt des thérapies cellulaires pour soigner les dommages dus à des irradiations. Avec l'espoir de fournir aux hôpitaux des pistes pour soigner le plus possible de patients, y compris en cas d'irradiations affectant tout le corps. La gravité des syndromes dépend du rayonnement ionisant (rayons X, rayonnements alpha, bêta ou gamma, ou encore flux de neutrons), de la durée d'exposition, de la dose reçue et des organes touchés. La moelle osseuse est atteinte dès 1 gray (Gy)*, un niveau d'irradiation

> qui déclenche un syndrome hématologique affectant la production des cellules sanguines; puis le système digestif à partir de 6 à 8 Gy, avec un syndrome gastro-intestinal pouvant détruire la barrière intestinale jusqu'à provoquer une septicémie; enfin, le système nerveux central à partir d'environ 30 Gy avec un syndrome neurovasculaire. Au-delà d'un certain seuil (autour de 1 Gy), sans traitement, une irradiation sur tout le corps pourrait être fatale.



Heureusement, dans la plupart des accidents, hormis Tchernobyl, les victimes subissent des irradiations localisées, comme les lésions locales cutanées à la suite d'accidents industriels résultant d'une mauvaise manipulation de sondes de gammagraphie. Ces sondes contiennent une source radioactive émettrice de rayonnements gamma. Elles sont utilisées pour contrôler la qualité de soudures ou l'état de pièces métalliques dans l'industrie. Au contact avec la peau à une exposition de plus de 25 Gy, cela provoque une nécrose du tissu cutané, musculaire et osseux. La lésion se développe en surface et en profondeur et devient incontrôlable. Avant l'application des thérapies cellulaires, les seules solutions jusqu'à récemment reposaient sur une greffe de peau ou une intervention chirurgicale pour enlever les tissus atteints.

LES CELLULES SOUCHES ONT FAIT LEURS PREUVES

Rappelons ce qu'est une thérapie cellulaire: il s'agit d'utiliser des cellules souches, des cellules qui ont la capacité de se renouveler pour générer des cellules spécialisées capables de réparer, restaurer la fonction d'un organe. Prélevées chez le patient ou chez un donneur,

notamment à partir de la moelle osseuse ou encore de tissus adipeux (la graisse corporelle), ces cellules sont mises en culture puis injectées au patient. Les CSM sont une des catégories de cellules souches adultes les plus utilisées en médecine régénérative. Elles font l'objet d'un millier d'essais cliniques dans le monde pour la réparation osseuse, les maladies hématologiques, la réparation cardiaque, la maladie de Crohn ou encore l'ulcère des membres inférieurs pour les diabétiques.

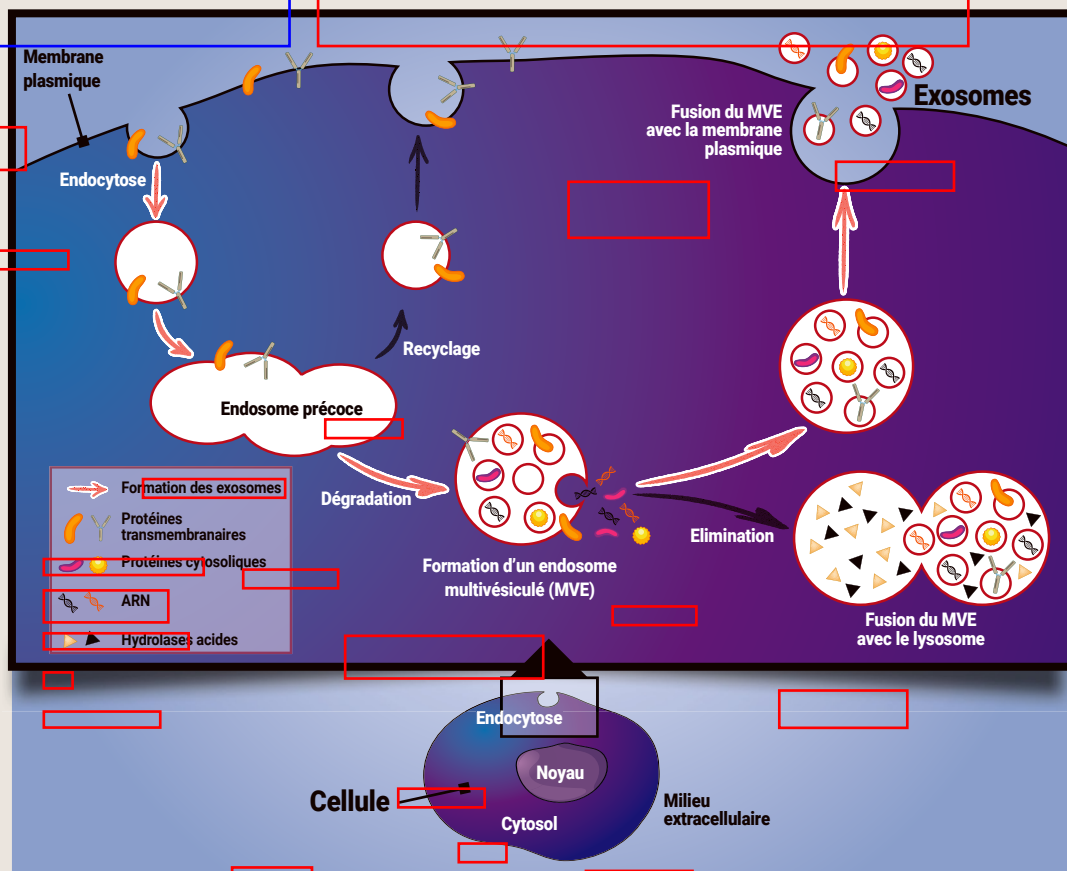
Dès les années 2000, les chercheurs de l'IRSN ont eu l'idée d'utiliser ces cellules souches dans le cas de dommages radio-induits. Depuis, ils ont démontré leur efficacité dans le cadre de nombreuses expérimentations précliniques sur petit animal (souris et rats) d'abord, puis, depuis 2013, sur gros animal (cochons). Ces expérimentations menées dans le strict cadre de la charte française sur l'éthique de l'expérimentation animale sont des passages obligés avant d'envisager un transfert clinique chez le patient.

La recherche suit son cours. En attendant, en l'absence de solution thérapeutique, les victimes de fortes irradiations sont traitées à titre compassionnel comme ce fut le cas en 2006 pour les patients de l'hôpital d'Épinal. C'est également en 2006 que, pour la première fois, deux victimes d'accidents industriels présentant de sévères lésions cutanées ont été soignées par thérapie cellulaire, sur la base d'une stratégie thérapeutique mise en place conjointement par l'hôpital Percy, de Clamart, et l'IRSN. Les résultats ont été spectaculaires et ces patients ont pu retrouver l'usage de leur membre lésé et ont été sauvés de l'amputation. Depuis, une quinzaine d'autres patients, victimes de fortes irradiations à la suite d'accidents industriels, ont bénéficié avec succès de ce même traitement. La thérapie cellulaire se révèle capable de contrôler l'inflammation, de stimuler la vascularisation et de régénérer les tissus.

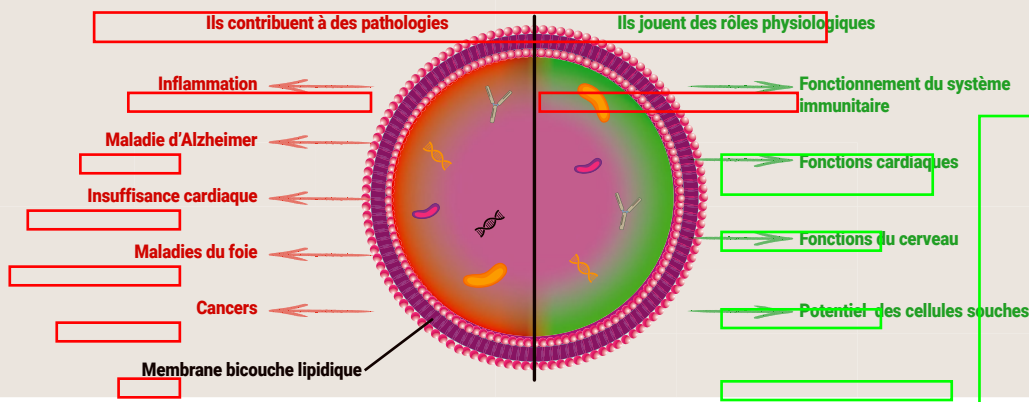
En 2015, l'Agence nationale de sécurité du médicament a délivré une autorisation de mise sur le marché pour la préparation de CSM de moelle osseuse pour le traitement de telles brûlures radiologiques. Aujourd'hui, d'autres équipes dans le monde tentent de suivre cette voie comme en Corée, en Argentine ou au Chili mais l'expérience de l'IRSN

BIOGÈNESE DES EXOSOMES

Décrits pour la première fois en 1981, les exosomes sont des vésicules de 30 à 100 nm déversées par une cellule dans son environnement. Comment se forment les exosomes? Le bon équilibre physiologique d'une cellule est régulé par un trafic intracellulaire faisant notamment intervenir des protéines qui y entrent et en sortent. Elles pénètrent la cellule par endocytose, mécanisme qui leur permet de traverser la membrane plasmique pour rejoindre le cytosol, le milieu liquide où baignent des organites, des structures spécialisées comme les endosomes ou les lysosomes. Quand les protéines atteignent les endosomes précoces, elles sont soit recyclées, soit dégradées. Celles qui sont dégradées sont regroupées dans des vésicules appelées «endosomes multivésiculés» (MVE). Une partie de ces MVE est éliminée, digérée par les lysosomes, l'autre fusionne avec la membrane plasmique et libère dans le milieu extracellulaire les vésicules qu'ils contiennent: les exosomes.



LES MULTIPLES MODES D'ACTIONS DES EXOSOMES



Les exosomes contiennent des protéines, des lipides et des acides nucléiques. Ils servent, d'une part, de voie d'élimination de ces constituants, d'autre part, de vecteur de communication entre les cellules, car leurs constituants sont capables de modifier la physiologie des cellules qui les reçoivent. Ainsi, ils sont impliqués dans divers processus tant physiologiques, comme le système immunitaire, que pathologiques, comme dans les cancers.

reste à ce jour unique. « Chaque patient est un cas particulier », rappelle Radia Tamarat, experte en radiopathologie à l'IRSN. C'est ce qui explique que les experts de l'IRSN sont régulièrement sollicités par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) pour venir en soutien des médecins dans le cadre de la prise en charge de patients surirradiés.

LES EXOSOMES SONT TRÈS PROMETTEURS

Mais cette stratégie thérapeutique à base de cellules souches a ses limites, notamment si un accident de grande ampleur avec de nombreuses victimes sévèrement exposées survient comme dans le cas d'un acte terroriste, par exemple. Leur utilisation est en effet soumise à plusieurs contraintes : les CSM ne peuvent pas être produites à grande échelle ; le donneur doit être un parent proche afin d'éviter un rejet ; le délai d'obtention des cellules, lié à leur mise en culture, est de plus de dix jours ; leur qualité est affectée par l'âge du donneur ou ses maladies. « On ne peut traiter qu'un petit nombre de patients de la sorte. Il fallait trouver une autre solution, raconte Radia Tamarat. Lors d'un congrès au Mexique en 2010, j'entends un post-doctorant singapourien présenter ses travaux sur les exosomes, des vésicules issues de CSM. Je travaillais depuis ma thèse sur un autre type de vésicules extracellulaires. J'ai pressenti que ces exosomes pouvaient être une solution pour soigner les brûlures radiologiques. » Un voyage à Singapour à la rencontre de l'équipe de Sai Kiang Lim (Institute of Medical Biology) achève de la convaincre quand elle découvre que les chercheurs les avaient utilisés pour soigner des brûlures cutanées.

À l'époque, les exosomes commençaient à être utilisés en médecine régénérative. Ces vésicules que l'on retrouve dans les fluides biologiques comme l'urine ou le sang ont longtemps été considérées comme des déchets cellulaires permettant d'éliminer les protéines et les molécules indésirables (voir infographie). En fait, elles font bien plus (2). Sécrétées par la plupart des cellules saines, elles jouent un rôle clé dans la communication entre les cellules ou encore dans le système immunitaire. A contrario, lorsque les exosomes sont sécrétés par des cellules malades, ils participent et amplifient les pathologies, comme la propagation du cancer par le développement de métastases. Ils se révèlent néanmoins utiles dans ce cas pour diagnostiquer ces mêmes maladies en tant que biomarqueurs.

Des études récentes ont d'ailleurs montré que l'effet thérapeutique des CSM serait majoritairement lié à la sécrétion de ces vésicules extracellulaires, exosomes en tête. En outre, ceux-ci sont également faciles à manipuler car leur membrane est rigide et ils présentent l'avantage de résister à la congélation. Ainsi, ils pourraient être facilement transportés et stockés pour être utilisés sur le terrain ou en situation d'urgence en cas d'un grand nombre de victimes. De plus, contrairement aux CSM, du fait de leur compatibilité, les exosomes pourraient être injectés à de multiples patients.

« En 2013, j'ai pu lancer nos premières études précliniques pour traiter des lésions cutanées avec des exosomes issus de CSM, en collaboration avec Sai Kiang Lim, qui produisait les vésicules (4), poursuit la biologiste. Sur un modèle de brûlure radiologique du membre

inférieur de différentes lignées de souris, nous avons montré que les exosomes sont une alternative aux cellules souches pour la réparation de lésions cutanées radio-induites : ils permettent une revascularisation du tissu irradié et sa cicatrisation par le recrutement de cellules inflammatoires. » Cela ouvre la perspective d'une application clinique à très grande échelle pour ces brûlures radiologiques.

Mais la route est encore longue avant un transfert clinique. Il reste à faire la démonstration préclinique de l'innocuité des exosomes et à préciser leur efficacité thérapeutique par des études précliniques sur des cochons. En parallèle, subsiste un défi de taille : la standardisation du processus de culture de CSM et de production d'exosomes pour assurer une production de grade clinique à grande échelle. « Aujourd'hui, seule l'équipe de Sai Kiang Lim est capable d'en produire en quantité importante mais pas dans les conditions réglementaires françaises, précise la chercheuse. Pour assurer cette production nationale pour le traitement des brûlures radiologiques, nous sommes engagés dans un projet financé par l'Agence nationale de la recherche baptisé Exocet (2017-2021), en collaboration avec l'Inserm et le CTSA. » Malgré ces défis, l'avenir des exosomes est assurément prometteur.

UN ESPOIR POUR LE SYNDROME GASTRO-INTESTINAL

En cas d'accident à grande échelle provoquant un syndrome gastro-intestinal, l'IRSN a bon espoir de proposer une thérapie innovante efficace à base d'exosomes issus de CSM. Les études précliniques sont encourageantes. « En collaboration avec une équipe américaine financée par les Instituts américains de la santé (National Institutes of Health ou NIH), nous avons évalué le bénéfice des exosomes sur des souris soumises à une irradiation du corps entier à des doses létales de 10 Gy (3), explique Radia Tamarat. Résultat : les exosomes augmentent le temps de survie des animaux, les dommages de la muqueuse intestinale sont réduits, la réparation et la régénération de l'épithélium de l'intestin grêle, le tissu à son interface avec l'organisme, est stimulé, tout comme la vascularisation. » Reste à montrer que la technique est applicable à l'humain.

*Le gray (Gy) mesure la dose absorbée, c'est-à-dire la quantité d'énergie cédée par les particules radioactives à la matière exposée, par unité de masse. 1 gray correspond à 1 joule cédé par kilogramme de matière.

RÉFÉRENCES

- > (1) R. Tamarat, M. Benderitter, The Medical Follow-up of the Radiological Accident: Epinal 2006, *Radiation Research*, 2019.
- > (2) S. Flamant, R. Tamarat, Extracellular and vascular injury: New insights for radiation exposure, *Radiation Research*, 2016.
- > (3) A. Accarie et al., Extracellular vesicles derived from mesenchymal stromal cells mitigate intestinal toxicity in a mouse model of acute radiation syndrome, *Stem Cell Research & Therapy*, 2020.
- > (4) C. Loinard et al., HuMSC-EV induce monocyte/macrophage mobilization to orchestrate neovascularization in wound healing process following radiation injury, *Scientific report* (en cours de soumission).

L'ESSENTIEL

> Les éruptions solaires s'accompagnent d'émissions de rayonnement et de particules de haute énergie susceptibles de perturber les satellites et les réseaux de télécommunication terrestres.

> Grâce à l'analyse du carbone 14 contenu dans les cernes d'arbres, il est possible

d'identifier et de dater à l'année près certaines fortes éruptions du passé.

> Les scientifiques pensaient que les superéruptions se produisaient une fois tous les 10 000 ans environ. Mais la découverte récente de deux événements de ce type suggère qu'elles seraient plus fréquentes.

L'AUTEUR

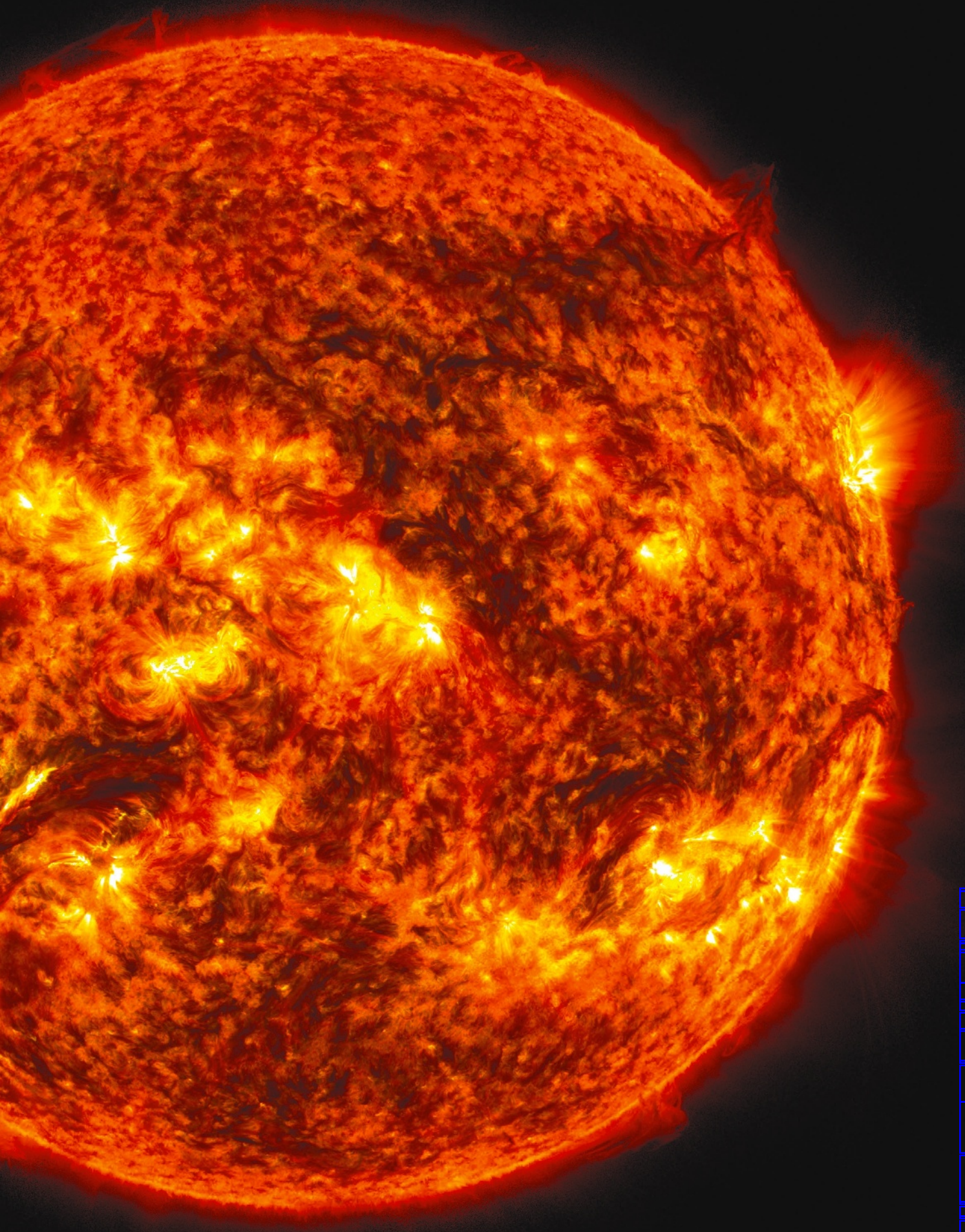


JONATHAN O'CALLAGHAN
journaliste indépendant, spécialiste de l'exploration spatiale et de l'astrophysique

La menace des éruptions solaires géantes

De gigantesques orages géomagnétiques occasionnant d'importants dégâts sur Terre pourraient se produire plus fréquemment que les scientifiques ne le pensaient, avec des implications préoccupantes pour notre monde connecté.





De temps à autre, le Soleil expulse de gigantesques gerbes de particules et de rayonnement susceptibles de faire des ravages sur Terre. Depuis plus de cent cinquante ans, les scientifiques qui étudient ces superéruptions et la façon dont elles affectent notre planète s'intéressent spécifiquement à un cas particulier, spectaculaire par ses caractéristiques: l'événement de Carrington de 1859. Cette année-là, une éruption solaire a frappé la Terre. Son énergie était si élevée qu'elle a fortement perturbé, mais de façon temporaire, le champ magnétique de notre planète, ce qu'on nomme un «orage géomagnétique». Certes, cet événement a créé de magnifiques aurores boréales, mais il a aussi provoqué des décharges électriques dans les lignes télégraphiques. L'incident a été traité comme une perturbation bizarre et mineure, avec des dommages limités à l'infrastructure électrique de l'époque. Aujourd'hui, toutefois, les chercheurs considèrent que l'événement de Carrington, ainsi qu'un orage géomagnétique de 1921 de force comparable, constituent un avertissement préoccupant à propos de possibles catastrophes à venir.

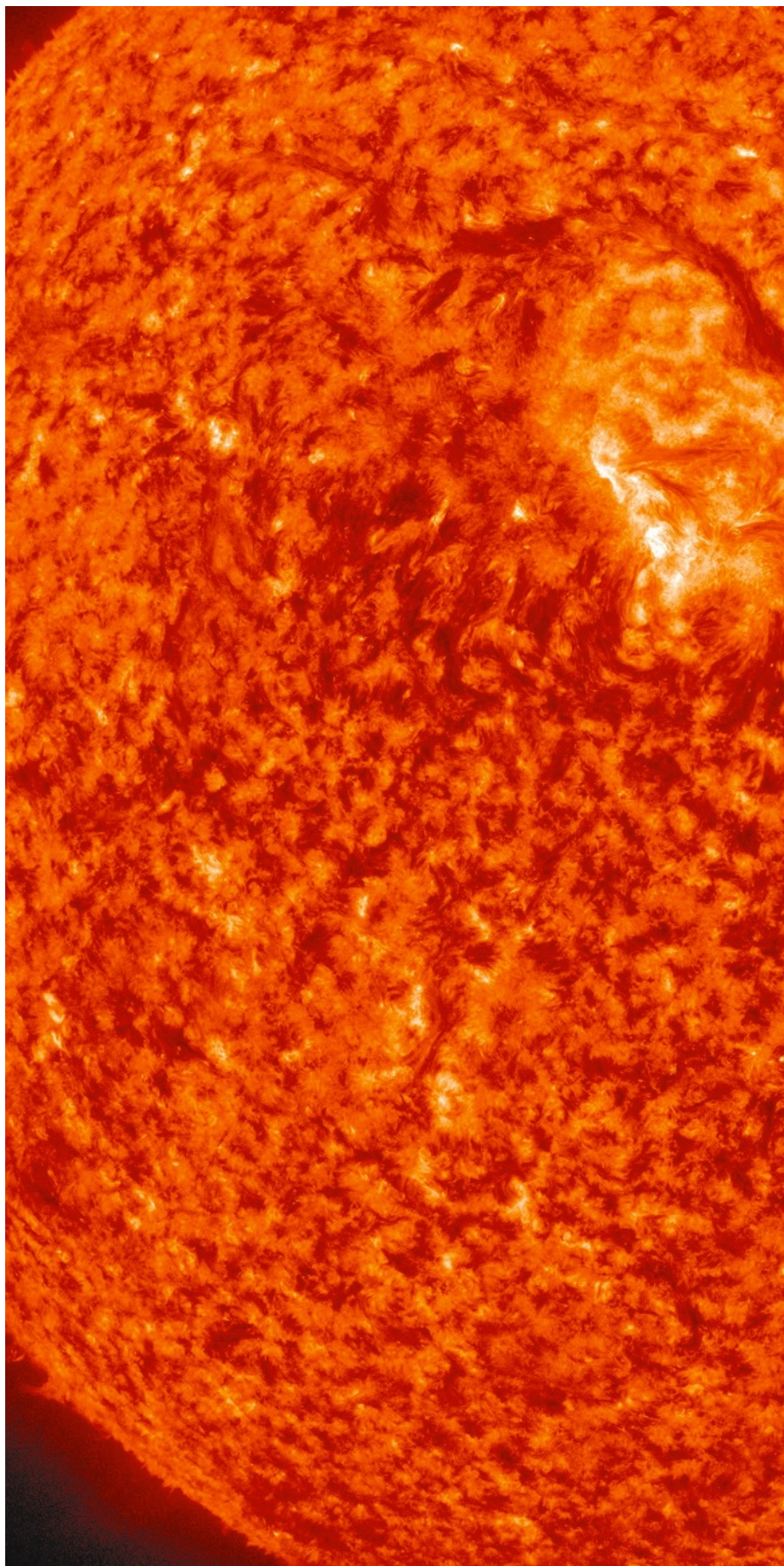
Ces événements pourraient même prendre un caractère plus alarmant. En effet, en 2012, les scientifiques ont découvert qu'un gigantesque orage géomagnétique, quelque dix à cent fois plus puissant que l'événement de Carrington, était survenu vers l'an 775. «C'était vraiment, vraiment stupéfiant, se souvient Nicolas Brehm, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse. Nous ne pensions pas que quelque chose de cette ampleur pouvait se produire.»

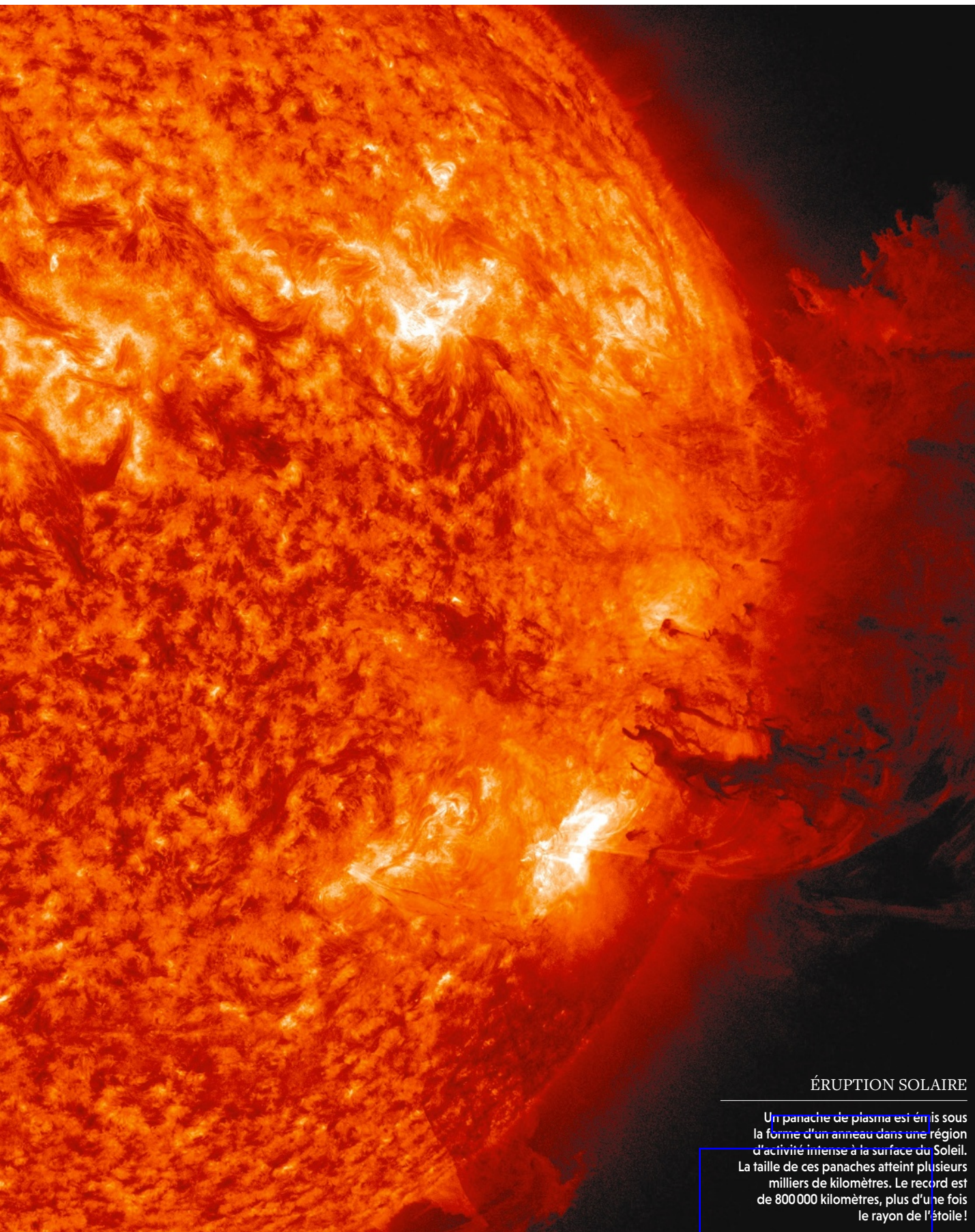
GIGANTESQUE ORAGE GÉOMAGNÉTIQUE

Cet événement historique pourrait provenir d'une «superéruption» du Soleil, un phénomène qui, pensait-on, ne se produit qu'une fois tous les 10000 ans en moyenne et qui serait des milliers de fois plus puissant qu'une éruption solaire ordinaire, selon les hypothèses avancées par les scientifiques en 2012. L'arrivée sur Terre de matière éjectée par une superéruption du Soleil aurait de nos jours des conséquences dévastatrices pour notre société mondialement connectée.

De nouvelles découvertes semblent indiquer aujourd'hui que ces superéruptions seraient plus courantes que nous ne le pensions: des chercheurs qui étudient les annales géochimiques de l'histoire récente de la Terre ont trouvé des preuves de l'existence de deux autres éruptions phénoménales.

En juillet 2021, Nicolas Brehm et ses collègues ont annoncé la découverte possible de deux autres événements solaires d'une puissance redoutable. L'un s'est produit en 7176 avant notre





ÉRUPTION SOLAIRE

Un panache de plasma est émis sous la forme d'un anneau dans une région d'activité intense à la surface du Soleil. La taille de ces panaches atteint plusieurs milliers de kilomètres. Le record est de 800 000 kilomètres, plus d'une fois le rayon de l'étoile !

ère, alors que les sociétés de chasseurs-cueilleurs nomades cédaient la place aux implantations agricoles. L'autre est survenu en 5259 avant notre ère, lorsque la planète émergeait de la dernière période glaciaire. Ces deux événements auraient été au moins aussi puissants que celui de l'an 775. Depuis dix ans, les scientifiques recherchent des événements extrêmes. L'équipe de Nicolas Brehm est la première à en trouver. «C'est une grande réussite», estime Fusa Miyake, la chercheuse de l'université de Nagoya, au Japon, qui a révélé l'existence de l'événement de 775 dans l'étude de 2012. Certains appellent désormais ces superéruptions des «événements Miyake».

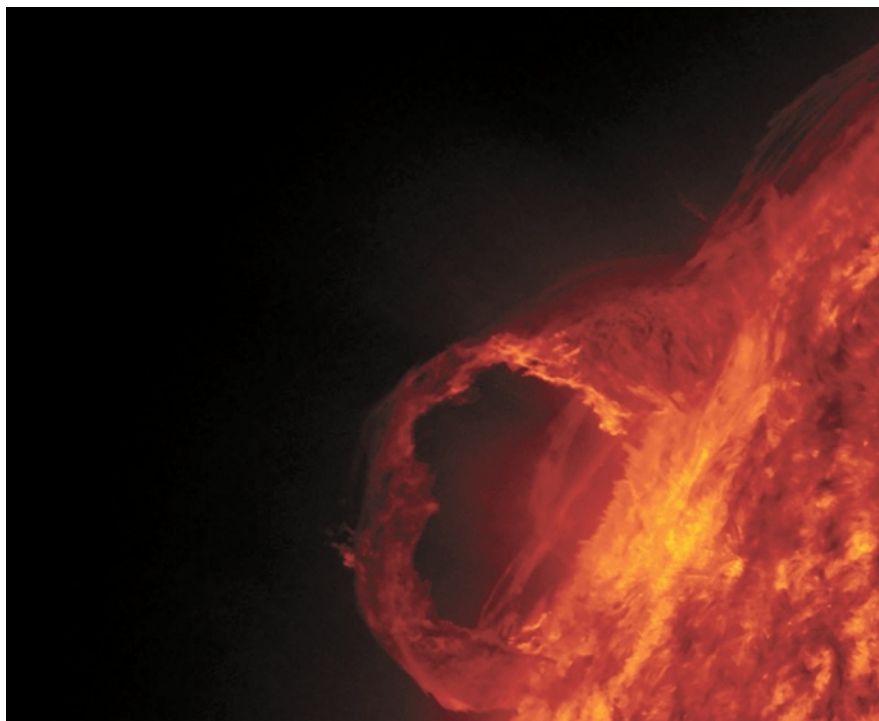
Pour identifier ces éruptions solaires, les chercheurs s'appuient sur des analyses chimiques d'échantillons provenant des calottes polaires et d'arbres anciens conservés dans des tourbières gorgées d'eau ou au sommet des montagnes. Lorsque les particules émises par le Soleil frappent l'atmosphère, elles produisent des isotopes radioactifs instables de divers éléments. Par exemple, l'activité solaire forme du carbone 14, qui est absorbé par les arbres au cours de leur croissance lors de la photosynthèse. Comme chaque anneau du tronc d'un arbre correspond à une année de croissance, les scientifiques peuvent déterminer les dates précises associées à des pics d'isotopes provoqués par une augmentation de l'activité solaire: plus il y a de carbone 14 dans un anneau, plus les particules solaires ont frappé notre atmosphère à ce moment-là. Ces cercles «nous permettent de reconstruire les profils de carbone 14 à travers le temps», explique Charlotte Pearson, du laboratoire de dendrochronologie (l'étude et la datation des anneaux de croissance des arbres) de l'université de l'Arizona et cosignataire de l'article. «L'un des facteurs clés de ces fluctuations est l'activité du Soleil.»

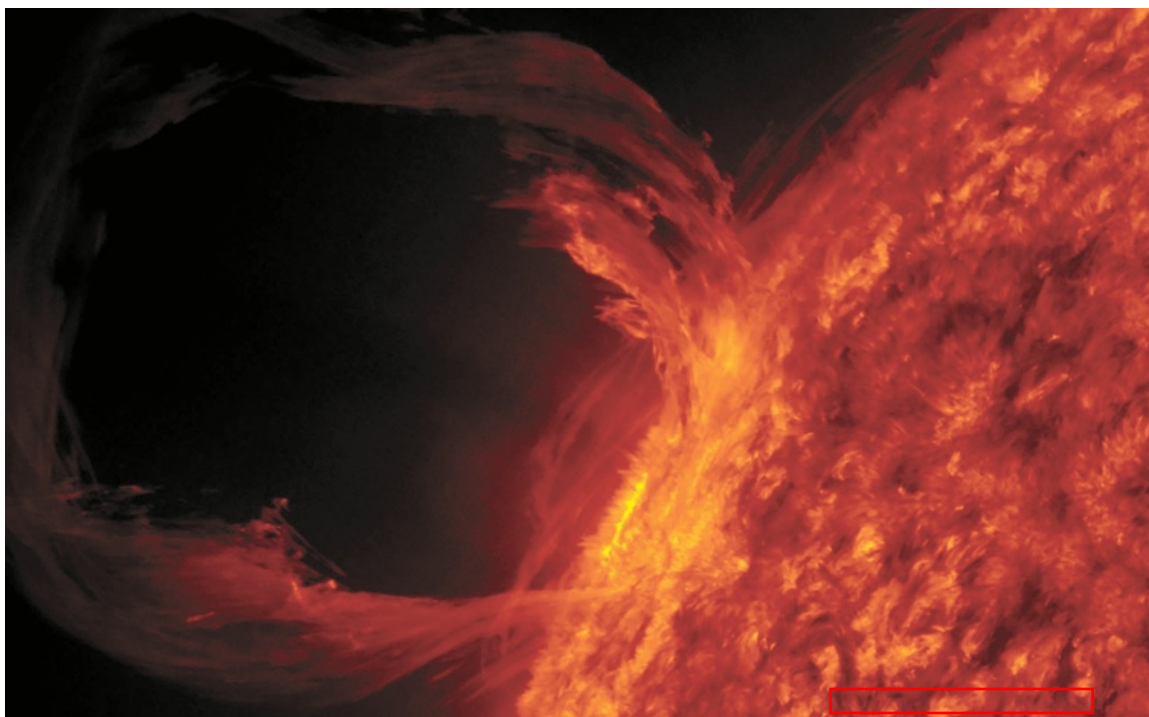
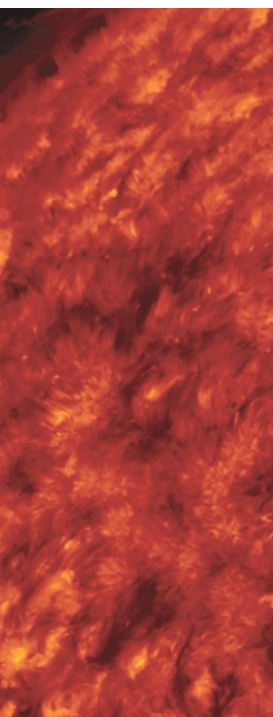
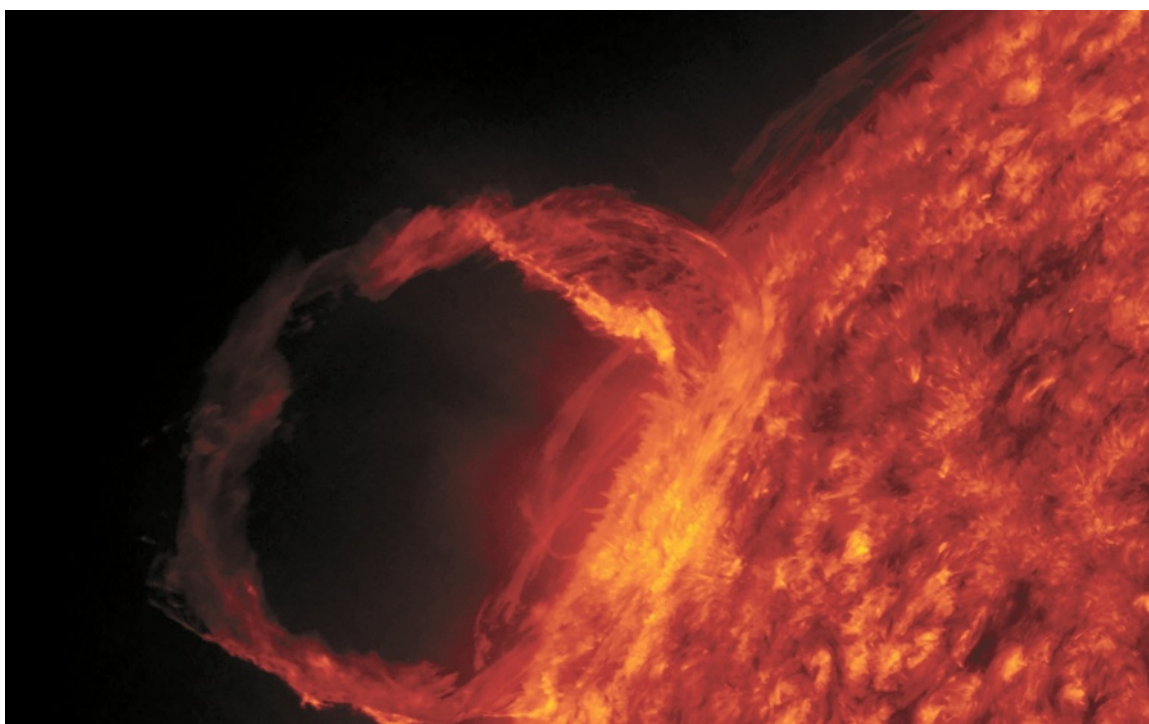
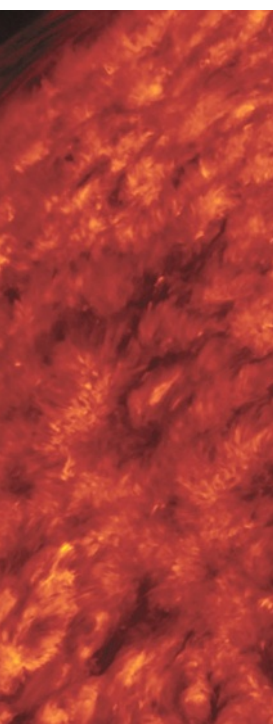
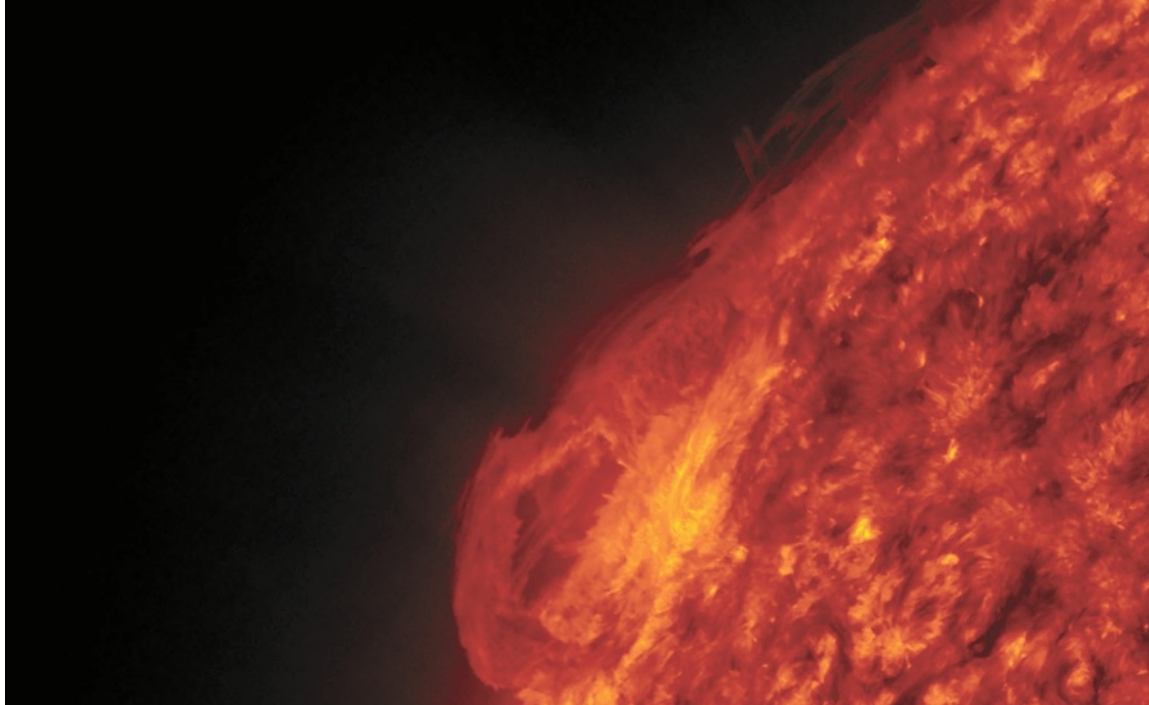
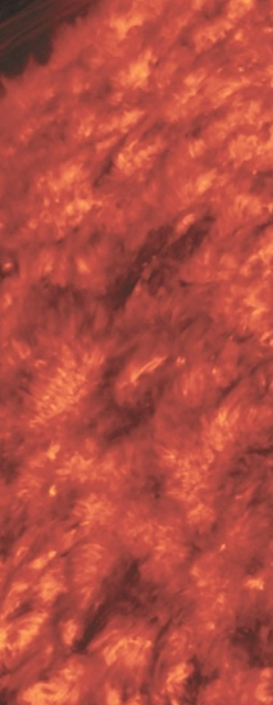
En étudiant les concentrations de béryllium 10 et de chlore 36 dans les carottes de glace, les scientifiques effectuent des mesures similaires, bien que légèrement moins précises. Ensemble, ces deux méthodes fournissent un compte rendu des événements historiques. Nous disposons de données sur les cernes des arbres, pour la majeure partie de l'Holocène – l'époque géologique actuelle, qui a commencé il y a environ 12000 ans. Cependant, rechercher des pics de carbone 14 prend beaucoup de temps. L'examen d'une seule année nécessite généralement des semaines d'analyses et de corrélations croisées de plusieurs échantillons de cercles d'arbres. «Il y a 12000 ans d'Holocène à étudier, et nous en avons analysé 16%», déclare Alexandra Bayliss, cosignataire de l'article et spécialiste de la datation à Historic England, un organisme public anglais chargé de protéger l'environnement historique du pays. «C'est une question de temps et d'argent.»

Nicolas Brehm et ses collègues ont eu de la chance. Pour l'événement de 7176 avant notre

UN ÉVÉNEMENT EN PARTIE INVISIBLE

Une éruption solaire commence par une forte émission électromagnétique dans une gamme spectrale très large. La plupart de cette énergie se trouve ainsi en dehors des longueurs d'onde du visible. Ce rayonnement s'accompagne de la formation d'un panache de plasma dont les particules sont éjectées à des vitesses comprises entre 20 et 2000 kilomètres par seconde.



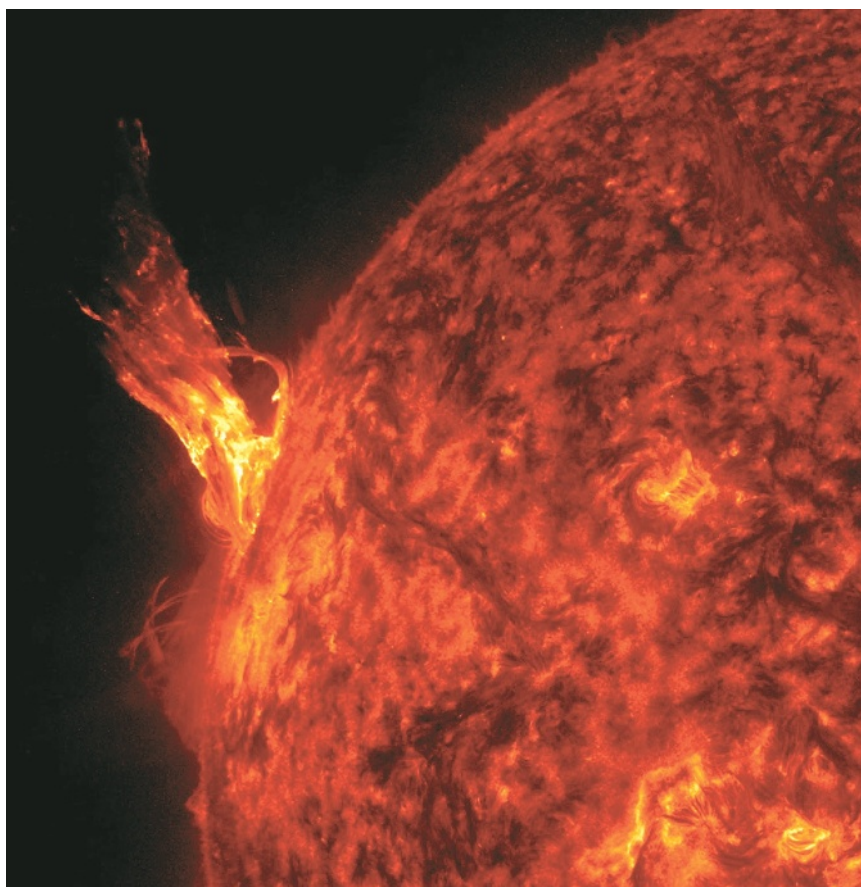
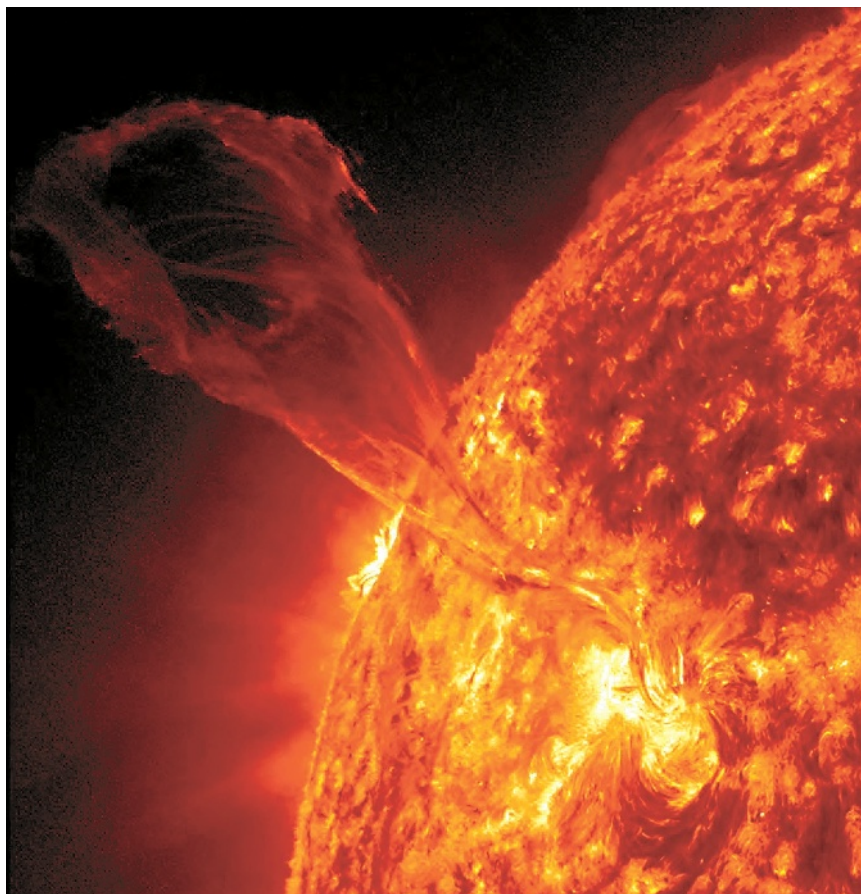


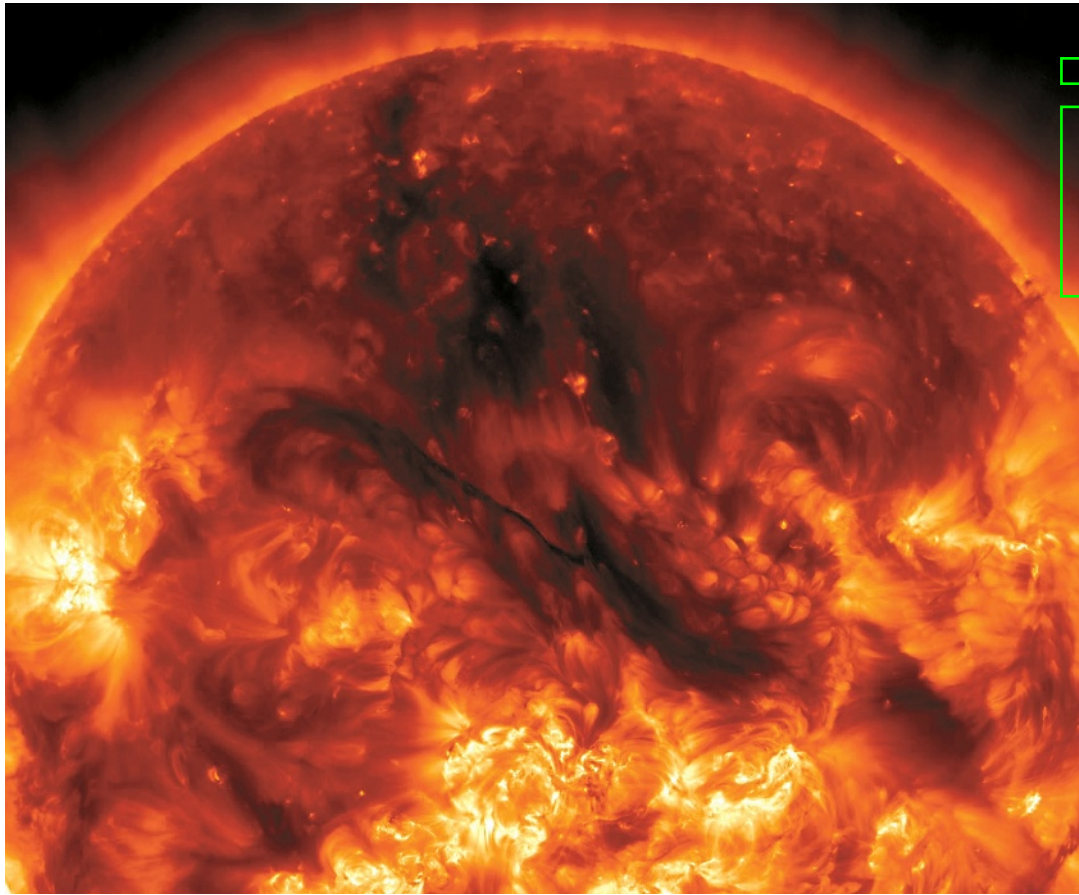
ère, ils ont d'abord trouvé des indices préliminaires d'un pic de béryllium 10 dans les carottes de glace. Les chercheurs ont alors scruté les cernes des arbres et y ont vu un pic de carbone 14 correspondant à l'événement. En ce qui concerne celui survenu en 5259 avant notre ère, Alexandra Bayliss avait remarqué, par ailleurs, un manque de données archéologiques à cette époque et c'est en étudiant les données du carbone 14 dans les cernes des arbres de cette même période que l'équipe a identifié un autre pic. Les deux pics de carbone 14 sont similaires à celui trouvé par Fusa Miyake dans les échantillons qui ont confirmé l'événement de l'an 775.

UNE ORIGINE INCERTAINE

Au début, les scientifiques n'étaient pas sûrs des origines de ces pics, et certains pensaient même que les événements solaires étaient hors de cause. En 2013, Brian Thomas, de l'université Washburn, aux États-Unis, et ses collègues ont toutefois montré que les éruptions solaires étaient les coupables les plus vraisemblables. « Certaines personnes avaient émis des hypothèses [selon lesquelles le pic de 775] pourrait provenir d'une supernova ou même d'un saut gamma, indique Brian Thomas. Mais ceux-ci sont tout simplement trop rares pour provoquer une telle fréquence d'événements. Cela ne colle pas aussi bien que l'explication solaire. » Des pics aussi importants et fréquents, soutient-il, sont plus probablement le résultat d'une activité solaire accrue – peut-être accompagnée d'un orage géomagnétique similaire à l'événement de Carrington, mais beaucoup plus puissante. « L'événement de Carrington n'est même pas détectable » dans les anneaux de croissance des arbres et les carottes de glace, note Alexandra Bayliss, ce qui suggère qu'il était minuscule, en comparaison.

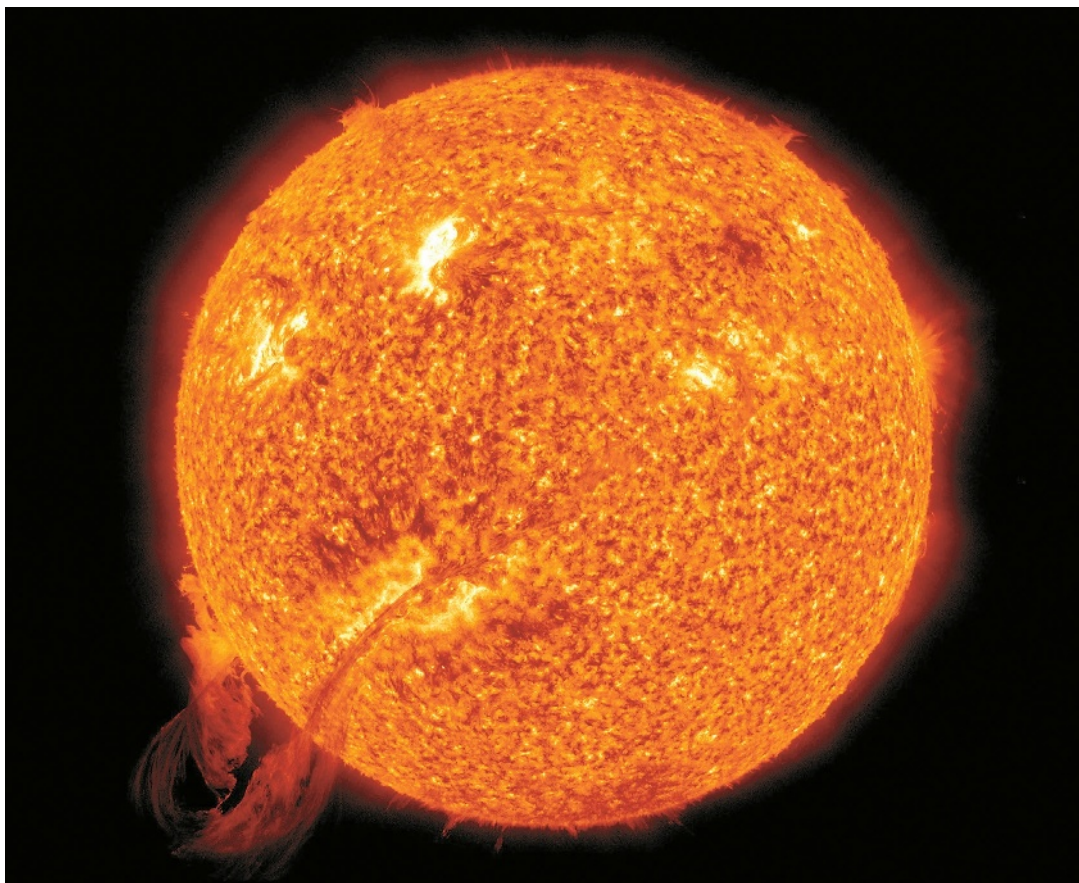
Malgré cela, la relation exacte entre les pics de particules solaires et l'intensité des phénomènes géomagnétiques qui les accompagne reste floue. « Un orage géomagnétique est souvent accompagné d'un flot de particules énergétiques, mais ce n'est pas toujours le cas », souligne Brian Thomas. Il existe des indices selon lesquels l'événement de 775 a été associé à de puissantes aurores boréales, observées en Chine, ce qui indiquerait qu'un fort orage géomagnétique a bien accompagné l'énorme afflux de particules solaires à l'origine du pic de carbone 14. Mais un événement comme celui de Carrington, qui s'est manifesté par un orage géomagnétique, ne semble pas s'être accompagné de particules énergétiques, ce qui expliquerait son absence dans les données des anneaux de croissance des arbres et des carottes de glace datées de cet événement. « Il est probable que les pics de carbone 14 soient le signe d'orages géomagnétiques très intenses », avance Brian Thomas.





UN CHAOS MAGNÉTIQUE

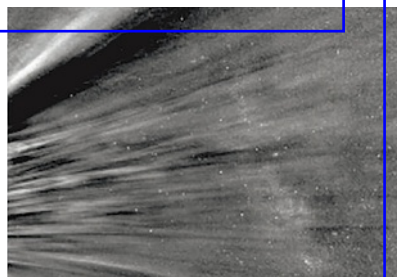
Le Soleil est doté d'un champ magnétique intense, dont la dynamique complexe est le moteur des éruptions. Ces dernières sont aussi rythmées par le cycle de onze ans de l'astre, qui connaît des périodes de forte activité et d'autres plus calmes.



LA SONDE PARKER « TOUCHE » LE SOLEIL

Lancée le 12 août 2018, la sonde *Parker* est un observatoire qui scrute le Soleil au plus près. Son objectif est d'étudier la dynamique de l'étoile et, en particulier, de déterminer les mécanismes qui conduisent à la naissance du vent solaire (qui se propage à travers tout le Système solaire et est capable de perturber les satellites artificiels de la Terre) et au réchauffement de la couronne, la partie la plus externe de l'atmosphère du Soleil. Alors que la température de la surface de l'astre est de 5 800 kelvins, celle de la couronne atteint 2 millions de degrés ! Le Soleil est une boule géante de plasma chaud dont la cohésion est assurée par sa propre gravité. Sous l'impulsion de la pression de radiation et de la température, une partie de cette matière diffuse hors de cette sphère. À proximité de l'astre, la gravité et le champ magnétique du Soleil retiennent ces particules, qui constituent alors son

atmosphère. Mais une fraction de cette matière parvient néanmoins à s'échapper, et forme le vent solaire. La région où les deux forces deviennent trop faibles pour retenir les particules expulsées est nommée la « surface critique d'Alfvén ». Cette frontière serait située à une distance d'entre dix et vingt fois le rayon du Soleil (soit entre 6,9 et 13,8 millions de kilomètres).



Avec sa trajectoire spirale, la sonde *Parker* s'est rapprochée de plus en plus près de cette surface critique. Lors de son huitième survol en 2021, elle a identifié la signature du champ magnétique et des particules caractéristiques de l'atmosphère (sur la photo, on observe un flux de plasma et, en arrière-plan, la Voie lactée). Ces données confirment que, pour la première fois, une machine conçue par l'humain a « touché le Soleil ». Si le premier contact a eu lieu à une distance de 18,8 rayons solaires, la sonde est entrée et sortie à plusieurs reprises de l'atmosphère, indiquant que la surface critique d'Alfvén est irrégulière, avec des creux et des bosses, ce qui était attendu. La mission se poursuivra jusqu'à l'épuisement du carburant, prévu pour 2025, et sera détruite, faute de pouvoir orienter son bouclier face au Soleil.

Sean Bailly
journaliste à *Pour la Science*

Si cette hypothèse est correcte, elle suggère qu'au cours des 10 000 dernières années seulement, la Terre a été frappée par au moins trois superéruptions solaires; sans compter que d'autres événements se cachent peut-être dans les 84% de cernes d'arbres qui restent à étudier. « Qu'il n'y en ait eu qu'une seule au cours des 10 000 dernières années ne semblait pas vraiment réaliste, confie Charlotte Pearson. Mais, jusqu'à présent, il pouvait ne s'agir que d'un cas isolé. Que nous en ayons trouvé deux autres, cela n'est pas très surprenant, mais peut être inquiétant. »

La principale préoccupation concerne les conséquences d'un tel événement qui, s'il se produisait aujourd'hui, pourrait être dévastateur pour les satellites en orbite et les infrastructures au sol. En mars 1989, un orage géomagnétique beaucoup plus faible que l'événement de Carrington a provoqué un *black-out* de douze heures au Québec en surchargeant le réseau électrique de toute la province. Aujourd'hui, un orage géomagnétique résultant d'un événement de Miyake aurait probablement des effets beaucoup plus vastes, notamment des pannes potentiellement catastrophiques du réseau électrique et des satellites.

Sangeetha Abdu Jyothi, de l'université de Californie à Irvine, a récemment calculé qu'un événement du niveau de Carrington aujourd'hui provoquerait une « apocalypse du Net ». Les particules énergétiques d'une telle tempête seraient capables d'endommager les câbles sous-marins entre les pays, perturbant ainsi le trafic internet mondial pendant des semaines, voire des mois. Rien qu'aux États-Unis, une telle catastrophe coûterait de l'ordre de 7 milliards de dollars par jour, estime la chercheuse. Un événement plus

puissant, tel que celui de Miyake, causerait des dommages presque incalculables. « Pour quelque chose de l'échelle de Carrington, nous pourrions éventuellement nous en remettre, car nos données elles-mêmes ne seraient pas effacées, explique Sangeetha Abdu Jyothi. Avec quelque chose de dix ou cent fois plus fort, je ne sais pas. Je ne pense pas que quelqu'un ait simulé cela. À mon avis, cela entraînerait une perte de données importante. Nous pourrions perdre tous nos dossiers, nos informations bancaires et de santé critiques et ne plus rien avoir pour les restaurer. »

Pour l'instant, la probabilité que notre civilisation mondiale connaisse un âge sombre à cause d'un événement de type Miyake semble faible. Mais, selon certaines estimations, la probabilité d'un événement de type Carrington serait comprise entre 7% et 12% par décennie. Nous sommes en mesure de nous préparer à une éruption de cette ampleur en surveillant l'activité solaire afin d'arrêter les satellites et les réseaux électriques avant l'arrivée d'une superéruption et de l'orage géomagnétique qui s'ensuivrait. Mais il sera plus difficile de se protéger contre un événement de type Miyake.

En attendant, les scientifiques continuent de chercher des preuves d'autres événements solaires extrêmes dans les cernes d'arbres et les carottes glaciaires. « Nous commençons à comprendre que le Soleil peut être beaucoup plus énergétique et actif que nous ne le pensions, explique Brian Thomas. Lorsque les gens étudiaient ces superéruptions sur d'autres étoiles, l'une des discussions était de savoir si le Soleil pouvait aussi faire cela. D'après ces enregistrements historiques, il semble que le Soleil soit capable de produire des événements de cette même ampleur. » ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Brehm et al., **Tree rings reveal two strong solar proton events in 7176 and 5259 BCE**, soumis à *Nature*, 2021.

F. Miyake et al., **Another rapid event in the carbon-14 content of tree rings**, *Nature Communications*, 2013.

S. Odenwald et J. Green, **En attendant la tempête solaire du millénaire**, *Pour la Science*, n° 374, décembre 2008.

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](https://triercestdonner.fr)



Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

L'ESSENTIEL

- > Dans le modèle standard de la cosmologie, la matière noire est un ingrédient indispensable pour expliquer la dynamique des galaxies en rotation, les amas de galaxies ou le spectre du fond diffus cosmologique.
- > Mais la matière noire reste de nature inconnue. Et les expériences de détection échouent pour l'instant à la mettre en évidence et à confirmer l'hypothèse de son existence.
- > Une approche différente consistant à modifier la gravitation aux accélérations les plus faibles fonctionne bien à l'échelle des galaxies.
- > Elle ne permettait pas de décrire le spectre du fond diffus cosmologique. Mais une nouvelle version de gravité modifiée vient de franchir cet obstacle.

L'AUTEUR



SEAN BAILLY
journaliste
à *Pour la Science*

Des galaxies spirales en rotation aux plus grandes échelles cosmologiques, un ingrédient semble manquer pour décrire correctement les observations. Les deux pistes principales sont celles de la matière noire et de la gravité modifiée.

Matière noire

La piste de la gravité modifiée passe un test crucial

Décrire les caractéristiques du premier rayonnement de l'Univers était jusqu'à présent un test fatal pour tous les scénarios concurrents de la matière noire. Or un nouveau modèle de gravité modifiée vient de passer cette épreuve. Il ouvre une voie inédite pour résoudre l'énigme de la matière noire.

La question de la matière noire est une épine dans le pied des cosmologistes. Qu'ils observent l'Univers à l'échelle des galaxies, des amas de galaxies ou aux plus grandes échelles, les chercheurs s'accordent pour dire qu'un ingrédient de nature encore inconnue est indispensable pour décrire correctement ces différentes structures. Une majorité de spécialistes pensent que cet élément prend la forme de « matière noire », composée de particules qu'il reste à identifier. Cette matière noire serait cinq fois plus abondante que la matière ordinaire (celle constituée d'atomes). Cette voie n'est pas la seule, d'autres pistes existent. Notamment, en modifiant les lois de la gravitation, il est possible d'obtenir des résultats intéressants, surtout

à l'échelle des galaxies. Cette approche, proposée il y a quarante ans, butait sur un obstacle que l'on pensait fatal: le fond diffus cosmologique, un rayonnement émis dans l'Univers alors âgé de 380 000 ans et que l'on observe encore aujourd'hui. Mais Constantinos Skordis et Tom Złośnik, de l'Académie tchèque des sciences, à Prague, ont récemment fait sauter ce verrou. Ils ont développé un modèle de gravité modifiée qui passe le test.

« C'est un véritable tour de force qui a été accompli, souligne Benoît Famaey, de l'observatoire de Strasbourg. À ce stade, il s'agit surtout d'une preuve de concept, mais ces deux chercheurs viennent de montrer qu'il est possible par l'approche de la gravité modifiée de reproduire à la fois le fond diffus cosmologique et la dynamique des galaxies. » Ce modèle

servira peut-être d'inspiration à une théorie physiquement mieux motivée qui en reprendra les ingrédients de base.

L'histoire de la matière noire a presque quatre-vingt-dix ans. Dans les années 1930, l'astronome Fritz Zwicky a noté des incohérences en étudiant la dynamique des galaxies au sein de l'amas de la Chevelure de Bérénice (aussi nommé amas de Coma). Le mouvement des galaxies régi par la gravitation n'était pas compatible avec la quantité de matière que l'amas semblait contenir. Il a suggéré la présence, avant l'heure, de matière sombre. La question a suscité peu d'interrogations jusqu'en 1970, quand Vera Rubin a commencé à observer le même problème en mesurant le profil de vitesse des galaxies spirales, c'est-à-dire la vitesse de rotation des objets en fonction de leur distance au centre de leur galaxie. Les lois de Newton décrivent assez simplement comment la vitesse devrait évoluer en fonction du rayon, ou, plus précisément, en fonction de la quantité de masse galactique incluse à l'intérieur de ce rayon. Or l'astrophysicienne constatait que les objets les plus éloignés dans la galaxie se déplaçaient bien trop rapidement et auraient donc dû être éjectés. En effet, au lieu de décroître à partir

la dynamique des amas de galaxies qui posait problème à Fritz Zwicky. Et, aux échelles plus vastes, cet ingrédient contribue à reproduire de façon satisfaisante la formation des grandes structures et le spectre du fond diffus cosmologique. La matière noire est ainsi devenue un élément incontournable du modèle cosmologique.

UN INGRÉDIENT MANQUANT ET OMNIPRÉSENT

Son rôle dans la compréhension du fond diffus cosmologique est particulièrement important. Ce rayonnement microonde est presque homogène et isotrope quand on mesure sa température sur l'ensemble de la voûte céleste. Elle est d'environ 2,7 kelvins, mais elle présente de petites fluctuations, de l'ordre de 10^{-5} en valeur relative autour de sa valeur moyenne. Ces fluctuations sont très intéressantes, car elles témoignent des conditions primordiales lors de l'émission du fond diffus quand l'Univers avait 380 000 ans. Elles sont dues à des variations de densité dans le plasma qui, en se refroidissant, a libéré ce fameux rayonnement primordial. Les régions plus denses ont produit des zones plus chaudes sur la carte céleste du fond diffus cosmologique, et, inversement, les régions moins denses, des zones plus froides.

Dans le plasma primordial, la matière ordinaire interagissait fortement avec les photons. Des forces antagonistes (la force gravitationnelle de la matière, attractive, et la pression radiative des photons, répulsive) ont fait osciller la matière produisant des zones de forte densité et d'autres de faible densité, à l'image d'«ondes acoustiques». Avec ces seuls ingrédients, il n'est pas possible de reproduire de façon satisfaisante ces fluctuations. Il faut ajouter un élément comme la matière noire, qui a accentué la formation des surdensités. Comme elle n'est soumise qu'à la force gravitationnelle, elle s'est accumulée dans certaines régions. Ces dernières, créant des puits gravitationnels d'autant plus intenses, ont attiré davantage de matière ordinaire.

Vers 380 000 ans, le plasma est devenu électriquement neutre et les photons se sont alors propagés librement et ont constitué le fond diffus cosmologique. Telle une photographie, ce dernier a enregistré l'état du plasma juste au moment de la fuite des photons. Le spectre de ce rayonnement indique ainsi la distribution des zones froides et chaudes dans le fond diffus cosmologique en fonction de leur taille angulaire sur la voûte céleste.

En considérant que la matière noire est cinq fois plus abondante que la matière ordinaire dans le cadre d'un modèle noté Λ CDM (CDM fait référence à la matière noire, dite *cold dark matter*; Λ renvoie à un autre ingrédient du

Les modèles de gravité modifiée butaient sur un obstacle que l'on pensait fatal : le fond diffus cosmologique

d'une certaine distance du centre galactique, le profil de vitesse formait un plateau constant.

En 1973, en s'appuyant sur des simulations numériques, le Prix Nobel de physique 2019 pour ses travaux en cosmologie, James Peebles, et Jeremiah Ostriker ont proposé que les galaxies étaient entourées d'un halo de matière n'émettant pas de lumière et n'interagissant pas avec la matière ordinaire sauf par son influence gravitationnelle sur le système. Cette «matière noire» expliquerait alors le profil de vitesse des galaxies.

Les cosmologistes ont ensuite montré que la matière noire permettait d'expliquer aussi

modèle, l'énergie sombre sous la forme d'une constante cosmologique qui explique l'expansion accélérée de l'Univers), on reproduit de façon très précise le spectre du fond diffus cosmologique.

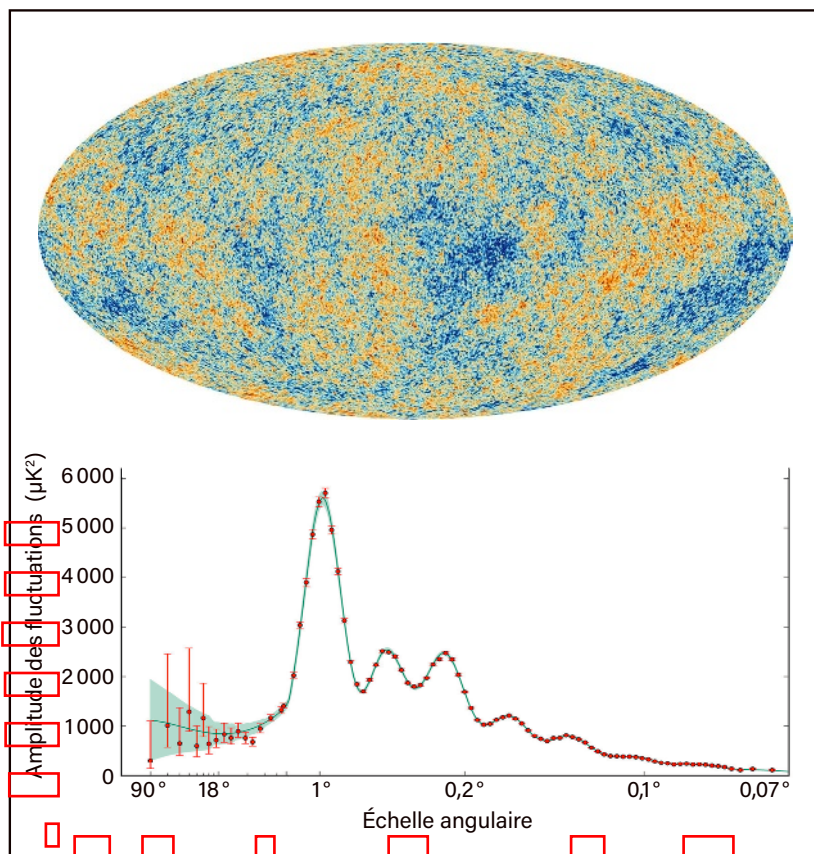
La matière noire s'est imposée en cosmologie comme un élément essentiel. Restait à en déterminer la nature. Or, à l'époque des travaux de Vera Rubin et de James Peebles, les physiciens des particules finalisaient le modèle standard et avaient compris que ce dernier n'est probablement qu'une approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale. La piste d'extension la plus encourageante était celle de la supersymétrie, qui répond à certains problèmes du modèle standard, et prédit l'existence de nouvelles particules, dont certaines sont des candidats possibles pour la matière noire.

Notamment, une classe de particules supersymétriques, surnommées *wimp* (*weakly interacting massive particle*), a suscité beaucoup d'intérêt. En interagissant faiblement avec la matière ordinaire, et avec une masse d'environ 100 gigaélectronvolts (ce qui est l'ordre de grandeur naturel de masse pour des particules dans les modèles supersymétriques simples), le *wimp* serait présent dans l'Univers avec une abondance correspondant à celle requise pour la matière noire cosmique. Ce «miracle du *wimp*» a motivé de nombreux programmes de recherche pour confirmer l'existence de ce candidat à la matière noire.

Une possibilité est de produire ces particules dans un collisionneur de particules comme le LHC (Large Hadron Collider), au Cern, près de Genève. Les modèles les plus simples et naturels de supersymétrie devaient être à la portée des expériences du LHC. Mais aucun signe de cette extension du modèle standard n'a été observé. Et, de façon plus générale, aucune expérience de physique des particules ne semble avoir mis en évidence des indices assez solides de la physique au-delà du modèle standard. Ces dernières années, quelques anomalies dans le secteur des mésons B ou dans la mesure du moment anomal du muon ont été isolées, mais ces résultats restent à confirmer et sont bien trop préliminaires pour y voir des indices de supersymétrie.

Les physiciens ne peuvent cependant pas exclure que la supersymétrie existe bien dans la nature. Mais elle se présenterait sous une forme plus complexe et moins élégante, avec par exemple des particules plus massives que prévu (et donc hors de portée du LHC), laissant de plus en plus de chercheurs perplexes.

Une autre voie de recherche des *wimps* consiste non pas à les produire, mais à détecter ceux présents dans l'Univers et qui traverseraient la Terre. Les chercheurs réalisent pour cela de grandes expériences opérant pendant



des années pour identifier des interactions très rares entre un *wimp* et un atome de leurs dispositifs. Ces expériences ont gagné en sensibilité au fil des dernières décennies, mais elles n'ont encore récolté aucun signal positif de matière noire. Les rares annonces de détection potentielles ont finalement été écartées grâce à des mesures toujours plus précises.

Le cas du signal périodique et annuel de l'expérience *Dama/Libra*, en Italie, a longtemps tenu en haleine les spécialistes, mais il est à son tour mis à mal. Selon les physiciens de ce projet, ils observent une modulation annuelle due à la révolution de la Terre autour du Soleil. Pendant six mois, la planète (et donc le détecteur) se déplace dans le même sens que le halo galactique de matière noire, et les six autres mois à contre-courant. Ce faisant, le détecteur capterait plus ou moins de particules, une idée similaire au fait d'être plus vite trempé quand on court face au vent pendant une averse. Or en mai et en novembre 2021, les expériences *Anais*, en Espagne, et *Cosine-100*, en Corée du Sud, conçues avec les mêmes techniques que *Dama/Libra*, ont mis à mal les résultats de cette dernière. Avec trois ans de données, *Anais* n'a pas vu de signal périodique. Et avec 1,7 an d'enregistrement, *Cosine-100* n'a détecté aucun événement à basse énergie, là

UN TEST FATAL?

Le fond diffus cosmologique est le premier rayonnement émis dans l'Univers alors âgé de seulement 380 000 ans. Observé dans toutes les directions sur la voûte céleste, il semble presque homogène et correspond à une température de 2,7 kelvins. Grâce à une sensibilité élevée, le télescope spatial *Planck* a mesuré la distribution spatiale de fluctuations autour de cette valeur moyenne (en haut), avec des régions un peu plus chaudes (en rouge et jaune) et d'autres, plus froides (en bleu et vert). L'analyse de la taille de ces zones conduit à un spectre (en bas) dont les caractéristiques peuvent être reliées aux conditions physiques de l'Univers au moment de l'émission du fond diffus cosmologique. L'axe horizontal correspond à la taille angulaire de ces taches. Le modèle standard de la cosmologie LCDM décrit parfaitement les mesures. Les approches concurrentes échouent souvent à faire aussi bien. Or le nouveau modèle de gravité modifiée RMond a franchi avec succès cette épreuve.

où on attendrait un candidat pour expliquer *Dama/Libra*. Les incertitudes sur ces résultats sont encore un peu trop élevées pour exclure définitivement *Dama/Libra*... mais la situation n'est pas très favorable.

LA PISTE DE L'AXION

La piste du wimp semble se refroidir, mais un autre candidat a le vent en poupe: l'axion. Cette particule avait été postulée en 1977 par Roberto Peccei et Helen Quinn, initialement pour résoudre un problème lié aux quarks et à l'interaction forte. Mais en 1983, le Prix Nobel de physique Frank Wilczek et ses collègues ont compris que l'axion était aussi une solution possible pour la matière noire. Des expériences comme ADMX, à l'université de Washington, ou encore le projet européen MADMAX, tentent de détecter ces particules en s'appuyant sur l'effet Primakoff: dans un champ magnétique fort, l'axion peut se convertir en photon. Pour l'instant, aucun signal n'a été constaté. En 2020, l'expérience de recherche directe de wimps, XENON1T, a enregistré un signal anormal à basse énergie dont une interprétation possible serait la manifestation d'axions dans l'enceinte de l'expérience. Cette hypothèse devra être confirmée par son successeur, XENONnT.

La recherche de l'axion commence à atteindre des sensibilités intéressantes et pourrait réserver des surprises. Celle sur la détection directe de wimps n'a pas livré d'indices forts, mais l'ambiance n'est pas à l'abattement. «Trois grandes expériences au xénon liquide, XENONnT, LZ et PandaX, ont démarré ou devraient être opérationnelles d'ici peu», souligne Julien Masbou, de l'université de Nantes et membre de la collaboration XENON. «Nous devrions voir assez vite si le signal à basse énergie de XENON1T est dû à un excès de tritium (un isotope de l'hydrogène présent en faibles quantités dans l'eau) ou s'il s'agit d'autre chose comme des axions.» La génération suivante de détecteurs se précise également. «L'expérience Darwin devrait contenir 50 tonnes de xénon. Même si l'objectif principal est la détection de matière noire, ce projet est un véritable observatoire pour les événements rares. Il devrait permettre d'étudier les wimps, les axions, mais aussi les neutrinos solaires ou astrophysiques, certains processus de désintégration dite "double bêta" et plein d'autres phénomènes.»

Dans les années à venir, de nouveaux résultats aideront peut-être à y voir plus clair. Mais il semble tout aussi indispensable d'explorer d'autres voies pour expliquer le profil de vitesse des galaxies et le spectre du fond diffus cosmologique. La piste de la gravité modifiée s'affirme donc comme un concurrent intéressant, d'autant plus que certaines de ses variantes décrivent avec efficacité la dynamique de rotation des galaxies. Cette approche justifie, par



L'expérience XENONnT succède à XENON1T, installée dans le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie. Elle consiste en une cuve de 8,3 tonnes de xénon, très pur. Une grande partie est à l'état liquide. Lorsqu'un wimp, une hypothétique particule de matière noire, interagit avec un atome de xénon, deux phénomènes sont possibles: une scintillation ou une ionisation. Dans le cas d'une scintillation, de la lumière à une longueur d'onde de 178 nanomètres serait émise et détectée par un ensemble de capteurs (des photomultiplicateurs) installés sur les parties supérieure et inférieure de la cuve cylindrique. Si une ionisation se produit, l'électron arraché à son atome est entraîné par un champ électrique vers le haut de la cuve et déclenche un signal. La sensibilité de XENONnT est l'une des plus élevées parmi les expériences de détection directe de matière noire.

exemple, bien mieux la loi empirique, dite «loi de Tully-Fisher», qui relie la luminosité des galaxies spirales à leur masse, que ne le font les scénarios à base de matière noire.

MATIÈRE NOIRE OU MOND ?

Cette approche a été proposée en 1983 par Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël. Ce chercheur était motivé par l'idée d'expliquer le profil de vitesse des galaxies sans avoir besoin d'invoquer un nouveau type de particule. Il a suggéré de modifier la gravitation aux accélérations très faibles, on parle de théorie Mond (*Modified newtonian dynamics*). Au-dessus d'un seuil de l'ordre de 10^{-10} mètre par seconde au carré, la gravitation universelle de Newton, en tant que limite de champ faible de la relativité générale, est inchangée. En dessous du seuil, sa formulation diffère. Cette théorie décrit alors parfaitement le mouvement des galaxies en rotation. Un inconvénient est que le seuil est si faible qu'il est impossible de tester cette hypothèse en laboratoire sur Terre.

Pour étudier les conséquences cosmologiques d'une approche de gravité modifiée, il était nécessaire de développer une version

BIBLIOGRAPHIE

C. Skordis et T. Złośnik, **New relativistic theory for modified newtonian dynamics**, *Physical Review Letters*, 2021.

Collaboration Cosine-100, **Strong constraints from COSINE-100 on the DAMA dark matter results using the same sodium iodide target**, *Science Advances*, 2021.

J. Freundlich et al., **Probing the radial acceleration relation and the strong equivalence principle with the Coma cluster ultra-diffuse galaxies**, *Astronomy & Astrophysics*, 2021.

J. Amaré et al., **Annual modulation results from three-year exposure of ANAIS-112**, *Physical Review D*, 2021.

Collaboration XENON, **Excess electronic recoil events in XENON1T**, *Physical Review D*, 2020.

relativiste de Mond. En 2004, Jacob Bekenstein, alors à l'université hébraïque de Jérusalem, a proposé un premier exemple, nommé TeVeS, dans lequel il a considéré trois champs (tensoriel, vectoriel et scalaire) pour remplacer l'unique champ gravitationnel (la métrique) de la relativité générale. Malheureusement, TeVeS se heurtait à un obstacle majeur : ce modèle ne permet pas de reproduire correctement le spectre du fond diffus cosmologique, réputé pour être le test ultime pour les théories concurrentes à Λ CDM.

Pire, en 2017, la détection d'ondes gravitationnelles par les interféromètres *Ligo* et *Virgo* lors de la fusion de deux étoiles à neutrons (notée GW170817) a asséné un second coup fatal à TeVeS. De nombreux observatoires sur Terre et en orbite ont enregistré la contrepartie électromagnétique de cette coalescence, le rayonnement émis lors de cette collision. Les ondes gravitationnelles et lumineuses sont arrivées presque simultanément (à une seconde d'intervalle en prenant en compte les incertitudes sur l'instant d'émission depuis la source située à 130 millions d'années-lumière de la Terre). Conclusion : ces ondes se sont donc propagées à la même vitesse. Avec TeVeS, les physiciens s'attendaient à un autre résultat. En effet, à cause de la présence sur le trajet de matière qui déforme l'espace-temps, les ondes gravitationnelles et lumineuses sont ralenties, c'est l'effet Shapiro. Dans le cadre de la relativité générale, ce retard est le même pour les deux types d'ondes. Mais dans TeVeS, il diffère. Et dans le cas de GW170817, le retard entre les ondes

gravitationnelles et le sursaut gamma aurait dû se compter en centaines de jours. Grâce à ce résultat, les physiciens ont pu définitivement éliminer le modèle TeVeS et de nombreux autres scénarios de gravité modifiée relativistes.

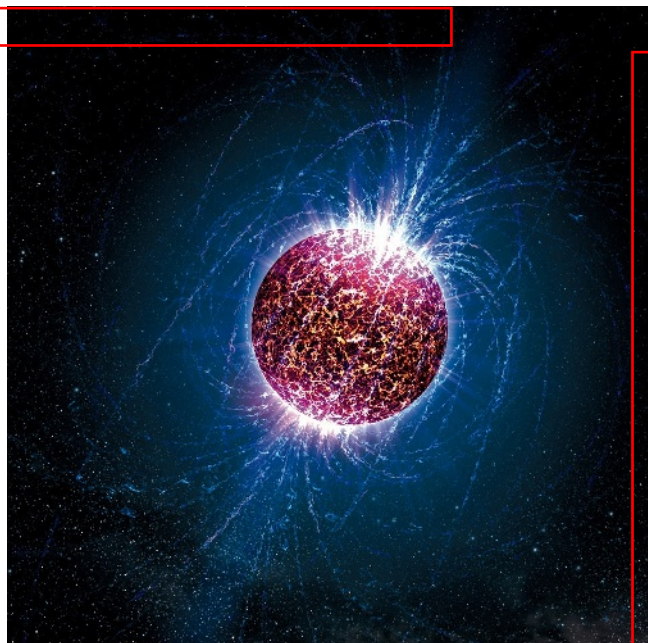
La question était donc de savoir s'il est possible de construire un modèle de gravité modifiée qui passe les contraintes sur les ondes gravitationnelles (avec l'effet Shapiro) et sur le spectre du fond diffus cosmologique.

À L'ASSAUT DU FOND DIFFUS

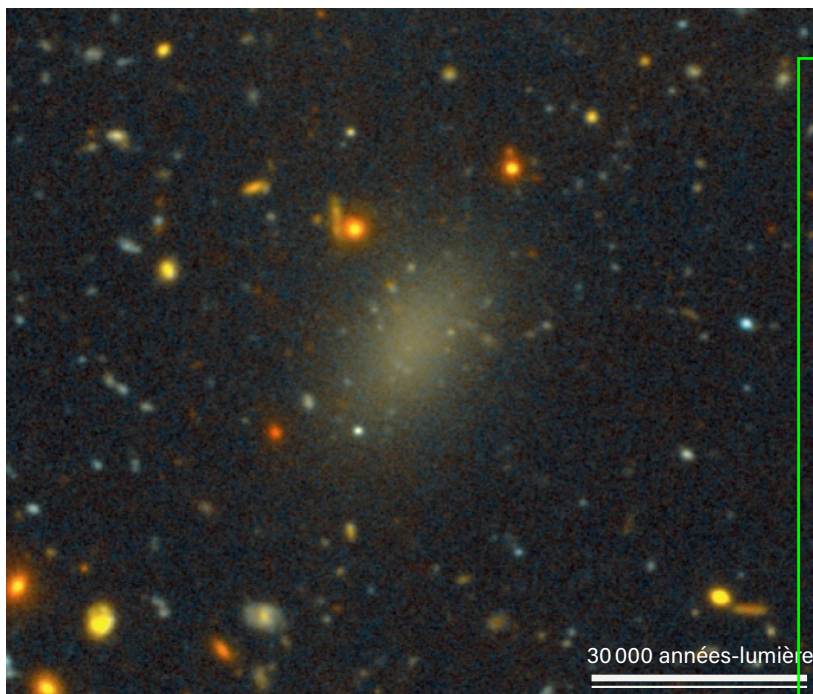
L'objectif de Constantin Skordis et de Tom Złośnik était de construire un modèle relativiste dérivé de TeVeS qui se comporte comme Mond à l'échelle des galaxies et comme la matière noire aux échelles cosmologiques pour reproduire les résultats de Λ CDM. Cette nouvelle approche devait, aussi, rendre correctement compte de l'arrivée simultanée des ondes gravitationnelles et électromagnétiques dans l'événement GW170817.

Les deux chercheurs ont développé un modèle, nommé RMond, qui répond à toutes ces contraintes. Extension du modèle TeVeS, il s'en distingue cependant de deux façons. Dans TeVeS, la matière ordinaire, en particulier les photons, interagissait avec les trois champs supplémentaires alors que les ondes gravitationnelles ne couplaient qu'avec la métrique. C'était la source du problème de l'effet Shapiro pour GW170817. Dans RMond, la matière n'interagit qu'avec la métrique et des paramètres sont ajustés pour avoir les mêmes vitesses pour les différentes ondes.

DES AXIONS DANS LES PULSARS ?



Les observations en astrophysique offrent des pistes intéressantes de détection des axions. Comme ces particules seraient des millions de fois plus légères que les électrons, elles devraient être produites en grand nombre dans certains processus astrophysiques. En s'échappant, elles emporteraient une grande quantité d'énergie et conduiraient au refroidissement plus rapide que prévu de certaines étoiles. En janvier 2021, Benjamin Safdi, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont proposé d'interpréter un rayonnement en rayons X provenant d'étoiles à neutrons comme la manifestation de la présence d'axions. Les étoiles à neutrons (*ci-contre*) sont des astres très compacts dotés d'un fort champ magnétique, dans lequel on peut imaginer que des axions sont convertis en photons. Cependant, la plupart des étoiles à neutrons sont en rotation rapide (au moins plusieurs dizaines de tours par seconde) et émettent pour cette raison de grandes quantités de rayons X. Il serait donc impossible d'y distinguer la contribution des axions. Benjamin Safdi et son équipe se sont intéressés aux « Sept Mercenaires », des étoiles à neutrons qui ont la particularité de tourner très lentement sur elles-mêmes (avec des périodes comprises entre 3 et 12 secondes). Six d'entre elles présentent un excès dans leurs émissions X, une mesure que les chercheurs proposent d'interpréter comme un signal venant d'axions et pour laquelle ils suggèrent de nouvelles observations pour confirmer cette piste et l'existence de ces particules hypothétiques.



Dans RMonD, par construction, l'importance de certains termes dépendant du champ scalaire varie en fonction de l'échelle considérée. Aux échelles cosmologiques, le champ scalaire mime l'effet de la matière noire. Le modèle reproduit Λ CDM et le spectre du fond diffus cosmologique. À l'échelle des galaxies, on retrouve Mond et la bonne description de la dynamique de ces systèmes. Constantinos Skordis et Tom Złośnik ont montré que leur modèle se comporte effectivement de façon satisfaisante à ces deux échelles cruciales.

De façon générale, les spécialistes s'accordent sur la prochaine étape. « Un verrou conceptuel a clairement été levé ici pour les modèles de gravité modifiée à la Mond, note Julien Masbou, il sera intéressant de voir comment ce modèle se comporte aux échelles intermédiaires, dans les amas de galaxies. » Les collisions d'amas, comme le Bullet Cluster, où l'on observe une séparation physique entre la matière conventionnelle et la masse, sera encore un autre test, note Pierre Brun, chercheur du CEA, à Saclay.

« Le modèle a été construit pour reproduire à grande échelle le spectre du fond diffus cosmologique et Mond dans les galaxies, insiste Benoît Famaey. Il n'a pas du tout été calibré sur les amas de galaxies, où ses prédictions seront un véritable test. Il est possible que les différents effets dans la dynamique du champ scalaire se superposent pour donner quelque chose qui fonctionne, mais l'inverse est aussi envisageable. »

En septembre 2021, Jonathan Freundlich, Benoît Famaey et leurs collègues de l'université de Strasbourg ont étudié un type

La galaxie ultra-diffuse Dragonfly 44 a été observée dans l'amas de Coma, en 2011, par l'équipe de Pieter van Dokkum, de l'université Yale, aux États-Unis. Dans le cadre du modèle Λ CDM, sa dynamique implique qu'elle serait dominée à plus de 95 % par de la matière noire. Jonathan Freundlich et ses collègues viennent de montrer qu'il est possible de la décrire dans le cadre du modèle de gravité modifiée Mond, si on suppose qu'elle est loin du centre de l'amas ou si le champ externe de l'amas est « écranté ».

particulier de galaxies dans l'amas de Coma. Ces galaxies sont dites « ultradiffuses », car elles présentent une densité de matière ordinaire très faible (*voir ci-contre*). Mais pour expliquer les mouvements stellaires observés en leur sein, elles devraient être extrêmement riches en matière noire, souvent à plus de 95%. Ces chercheurs ont montré qu'il est possible de reproduire leur dynamique avec Mond. Mais pour cela, il faut faire comme si elles n'étaient pas dans l'amas. En effet, si on prend en compte le « champ externe » dû à l'ensemble de l'amas, l'accord avec les observations est largement perdu. « Cela pourrait être précisément lié au fait que Mond ne fonctionne pas dans les amas, note Benoît Famaey. En revanche, à cette échelle, RMonD pourrait être dans un régime dominé par le champ scalaire et se comporter comme la matière noire. Et l'effet du champ externe serait comme « écranté » dans les amas. » Il reste à simuler RMonD dans un amas de galaxies.

D'autres observations permettraient encore de tester RMonD. Ses auteurs indiquent par exemple que cette gravité modifiée laisserait une signature particulière dans le fond diffus cosmologique sous la forme de « modes B » de polarisation. Le rayonnement issu de l'Univers primordial serait polarisé d'une certaine façon rappelant la structure d'un champ magnétique (souvent noté avec la lettre B). Ces modes de polarisation, aussi prévus par certains modèles d'inflation (une période dans l'Univers âgé d'une fraction de seconde où celui-ci a connu une phase d'expansion exponentielle), font déjà l'objet de programmes d'observation; c'est le cas des expériences *Polarbear* ou *South Pole Telescope*, toutes les deux situées en Antarctique, ou encore du satellite japonais *LiteBIRD* (prévu pour 2027). Il reste cependant à préciser la signature de RMonD et si celle-ci sera assez importante pour être à la portée de la sensibilité des différentes expériences.

Pour l'instant, RMonD est une construction *ad hoc*. Il contient notamment deux nouveaux champs et cinq paramètres libres. Il faut donc voir comment les physiciens parviendront à intégrer ces éléments dans une théorie plus fondamentale pour en fournir une justification physique. Il sera aussi nécessaire d'en affiner les prédictions pour comprendre comment le comparer à Λ CDM dans différentes observations de l'Univers.

Le résultat de Constantinos Skordis et Tom Złośnik est important dans la discussion sur la nature de la matière noire ou de la gravité modifiée. Il ouvre une porte que les spécialistes ont longtemps pensée infranchissable. RMonD n'est probablement pas la réponse définitive, mais ce modèle servira de référence pour de nouvelles explorations. ■

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 532 (Fév 22)
réf. PL532



N° 531 (Jan. 22)
réf. PL531



N° 530 (Déc. 21)
réf. PL530



N° 529 (Nov. 21)
réf. PL529



N° 528 (Oct. 21)
réf. PL528



N° 527 (Sept. 21)
réf. PL527



N° 526 (Août 21)
réf. PL526



N° 525 (Juillet 21)
réf. PL525



N° 524 (Juin 21)
réf. PL524



N° 523 (Mai 21)
réf. PL523



N° 522 (Avril 21)
réf. PL522



N° 521 (Mars 21)
réf. PL521

À retourner accompagné de votre règlement à :

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

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

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

1^{re} réf. 01 x 9,40 € = 9,40 €
 2^e réf. x 9,40 € = €
 3^e réf. x 9,40 € = €
 4^e réf. x 9,40 € = €
 5^e réf. x 9,40 € = €
 6^e 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
 en nous retournant ce bulletin complété

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
 En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>.
 Offre valable jusqu'au 21/12/2022 en France Métropolitaine uniquement.
 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 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. Vous nous 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 pour poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.



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

L'ESSENTIEL

→ Le gène suppresseur de tumeur *TP53* et d'autres constituent une sorte de « police de la coopération » de l'organisme, qui assure le bon fonctionnement de la coopération entre les cellules et traque les tricheuses, cellules cancéreuses en herbe.

→ Au cours de l'évolution, cette police se serait renforcée et aurait ainsi compensé le risque croissant d'apparition de cellules cancéreuses dans

des organismes de plus en plus grands.

→ Les cellules qui enfreignent les règles ne coopèrent plus avec les cellules saines, mais se mettent parfois à coopérer entre elles, ce qui exacerbe la dangerosité des cancers.

→ La compréhension des mécanismes de tricherie et de coopération entre cellules cancéreuses laisse entrevoir des perspectives thérapeutiques prometteuses.

L'AUTRICE



ATHENA AKTIPIS
maîtresse de conférences
au département de
psychologie de l'université
d'État de l'Arizona et cheffe
de projet au centre Évolution
et cancer de cette université

Cellules malignes

Le retour de l'égoïsme primitif

Dans un organisme multicellulaire, la vie des cellules repose sur leur coopération. Lorsque certaines reviennent à un comportement plus individualiste, des cancers apparaissent...

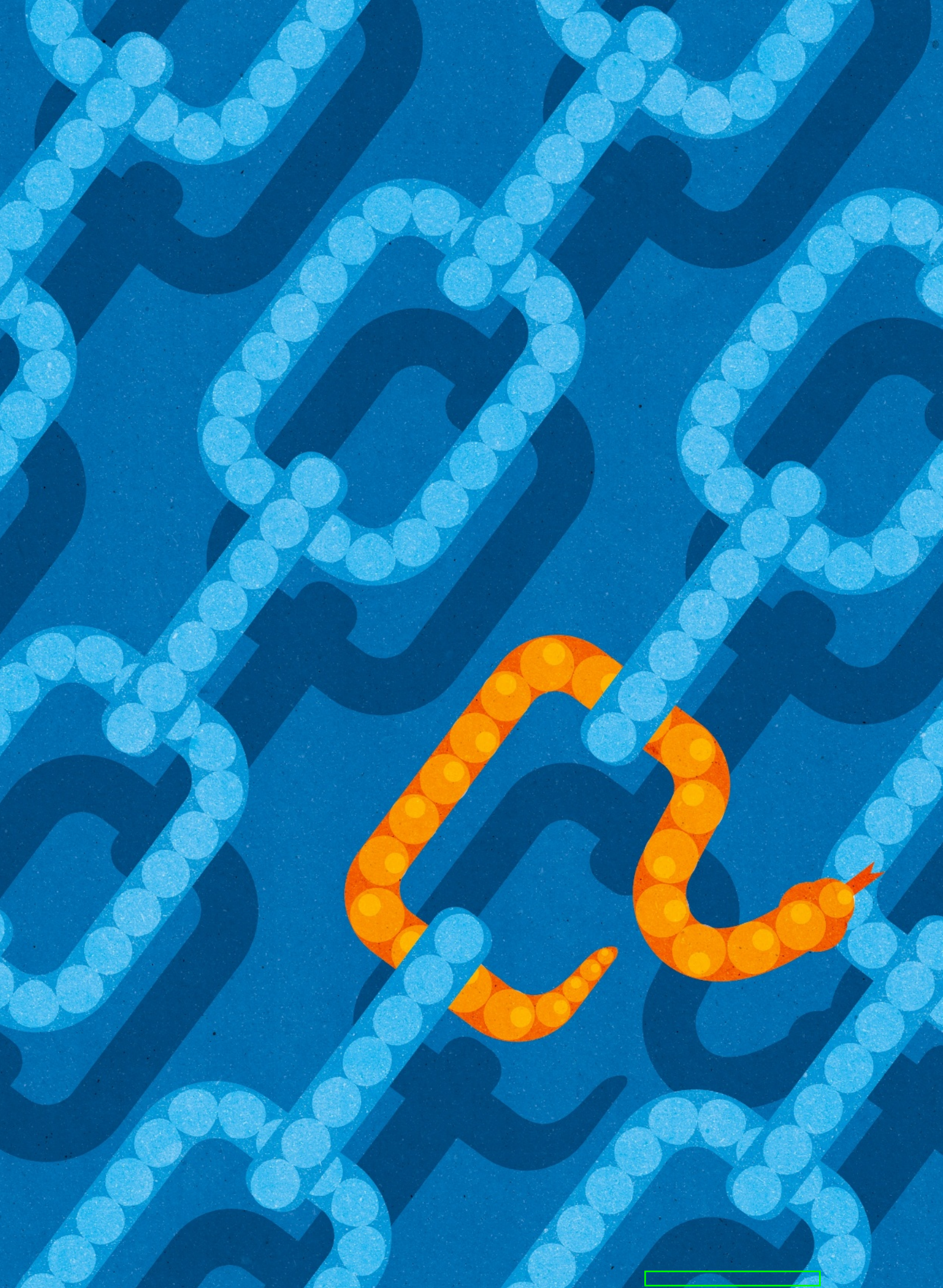
Les baleines figurent parmi les animaux les plus gros ayant jamais existé sur la planète. Constitué de milliards de cellules coopérant les unes avec les autres, chaque individu forme une société colossale et complexe. Ses cellules, de différents types, sont à la base de fonctions aussi diverses que respirer, se nourrir, nager, se reproduire, réagir face aux autres animaux, etc., en bref, toutes les fonctions nécessaires pour survivre et prospérer. De telles sociétés cellulaires, organisées et efficaces, se retrouvent aussi bien chez l'éléphant, chez l'humain que chez le cactus saguaro.

Au fil de l'évolution, les organismes multicellulaires se sont développés parce que la coopération entre cellules leur a conféré des avantages par rapport aux organismes unicellulaires comme les bactéries. Le partage des ressources a permis aux formes de vie de devenir plus grandes – un avantage qui les aide à résister aux prédateurs –, car les nutriments et les signaux chimiques dont les cellules ont besoin ont pu être transportés dans tout le corps. Puis, en se répartissant les tâches, les

cellules se sont spécialisées et ont élaboré des organes aussi utiles qu'un estomac ou une jambe. Leur « travail d'équipe » leur a aussi permis de maintenir un environnement extracellulaire sain et de vivre ainsi plus longtemps qu'individuellement.

Mais la coopération repose sur de fragiles équilibres. Il arrive que des cellules enfreignent les règles à leur profit et prospèrent. Ces cellules « tricheuses », tirant parti du fonctionnement de leur société, monopolisent les ressources et se répliquent plus rapidement que les cellules qui coopèrent. Elles prolifèrent, jusqu'à, parfois, prendre le contrôle et rompre l'harmonie, garante de la viabilité de l'organisme, ce qui, en définitive, aboutit au cancer.

Les cellules cancéreuses enfreignent les règles de coopération de différentes façons. D'abord, alors que les cellules normales s'échangent les nutriments et les signaux chimiques indispensables à la survie de toutes, les cellules cancéreuses développent de nouveaux vaisseaux sanguins pour s'attribuer davantage de ressources, privant les autres de ces dernières. Ensuite, elles se divisent quand



elles ne le devraient pas, ne meurent pas quand elles le devraient. Contrairement aux cellules «coopérantes» qui freinent leur croissance et leur multiplication dès qu'elles sont en excès, les cellules cancéreuses échappent aux signaux leur indiquant d'arrêter leur expansion. De même, tandis que les cellules saines ont une durée de vie limitée, les cellules cancéreuses résistent à la mort cellulaire (apoptose ou mise à mort contrôlée de la cellule) et échappent au système immunitaire qui devrait les détruire. Enfin, elles n'assurent plus leurs tâches et polluent l'espace extracellulaire.

On le voit, la notion de tricherie n'est pas juste une métaphore : elle décrit bien la réalité du cancer. Ce point de vue combinant évolution et coopération offre aux scientifiques de nouvelles pistes pour comprendre dans quelles circonstances un cancer se développe ou non. Les animaux les plus grands, comme la baleine ou l'éléphant, sont rarement atteints de cancer, alors qu'ils sont composés de multitudes de cellules susceptibles d'enfreindre les règles. Pourquoi ? De nombreux chercheurs, dont ceux de notre équipe, du centre Évolution et cancer de l'université d'État de l'Arizona, aux États-Unis, ont examiné les génomes de ces animaux. Ils ont découvert qu'ils présentent un grand nombre de copies de gènes, capables de détruire les cellules lorsqu'elles mutent et se mettent à produire n'importe quelle protéine (une caractéristique du cancer), ou capables de déclencher la réparation de l'ADN. L'ensemble de ces gènes constitue, en quelque sorte, la «police de la coopération». L'un d'eux, *TP53* (*tumor protein 53*), un gène suppresseur de tumeur, a aussi été identifié chez l'humain, qui en porte deux copies, chacune héritée de ses parents, alors que les grands animaux en possèdent bien plus. Et, sans surprise, l'humain est plus enclin aux tumeurs malignes que les grands animaux. Les scientifiques recherchent désormais des gènes similaires dans l'ensemble du monde vivant et s'attachent à décrypter leur mode d'action afin de concevoir de nouvelles thérapies.

COOPÉRATION VERSUS TRICHÉRIE : QUI GAGNE ?

C'est durant mes études de psychologie que je me suis intéressée pour la première fois à la coexistence entre coopération et tricherie, ainsi qu'à son évolution. J'écrivais alors des programmes informatiques qui testaient les effets de différentes stratégies sur des populations fictives. Dans de tels modèles, en l'absence de forces compensatrices qui les maintiennent «dans le droit chemin», les tricheurs l'emportent toujours sur les coopérateurs. Les forces compensatrices sont, par exemple, les normes sociales dites «de réciprocité», qui rendent les individus «redevables».



Ainsi, une personne qui en aide une autre s'attend, en retour, à un remerciement, une rétribution, ou autre chose. À l'inverse, quand elle commet un acte répréhensible, elle s'attend, en retour, à une punition. Une autre force compensatrice est la parenté génétique, favorable à la coopération (des individus proches coopèrent plus facilement). Mon objectif était de comprendre ce qui contribue à maintenir la stabilité de la coopération dans les sociétés humaines. Puis, en m'intéressant à la biologie du cancer, il m'est apparu que certains comportements de cellules cancéreuses ressemblaient à des dysfonctionnements de la coopération. Le cancer, qui m'avait toujours semblé une maladie insensée – l'organisme s'autodétruit –, commençait à prendre sens.

En approfondissant le sujet, j'ai découvert que la tricherie cellulaire se manifeste sous la

Les cactus saguaro présentent parfois des protubérances appelées «fasciations» ou «cristations». Semblables à des tumeurs, elles résultent d'une croissance cellulaire anormale et rendent les plantes plus vulnérables aux maladies.

forme de cancers, ou de phénomènes similaires au cancer, dans de nombreux organismes complexes, des humains aux palourdes en passant par les cactus. Certaines plantes, par exemple, présentent des protubérances en forme de faisceaux (des « fasciations ») ou de crêtes (des « cristations ») semblables à des tumeurs. L'un des exemples les plus frappants est le cactus saguaro. Des mutations surviennent parfois dans les cellules de son méristème, le tissu en croissance à ses extrémités. Elles entraînent une prolifération cellulaire anarchique, de sorte que des protubérances anormales en forme de crêtes apparaissent (*voir la photo page ci-contre*). Ces excroissances sont souvent belles, mais, à l'instar des cancers chez l'humain, elles font parfois des ravages. Les cactus saguaro ont souvent une floraison perturbée, ce qui nuit à la reproduction. Et ils s'avèrent plus vulnérables aux maladies et aux blessures que les autres cactus.

LES MÉTASTASES : UNE RÉACTION À UNE PÉNURIE

D'un point de vue évolutionniste, la tricherie pourrait même être la cause d'autres caractéristiques des cancers que la prolifération cellulaire, comme l'invasion des autres tissus. En effet, quand les cellules cancéreuses surexploient les ressources, elles détruisent souvent leur environnement local, par exemple en produisant des enzymes qui digèrent les tissus voisins. Or, grâce à l'écologie, on sait que les organismes qui épuisent les ressources de leur environnement subissent une pression pour développer leur capacité à se déplacer – on parle d'« évolution de la dispersion » (en réaction à un événement, les espèces déploient des stratégies pour se disperser).

De même, soumises à une telle pression, les cellules cancéreuses réagissent en devenant mobiles. En 2012, mes collègues et moi avons mis au point un modèle informatique de cancer et montré qu'une diminution des ressources induit une évolution telle que les cellules développent leur propension à se déplacer, d'abord à l'intérieur des tumeurs, avant même que d'autres tissus soient envahis, puis à l'extérieur, se disséminant peu à peu. Ainsi, la surexploitation des ressources par les cellules cancéreuses constitue potentiellement une pression qui pousse le cancer à métastaser.

Cette perspective alliant écologie et évolution met en évidence de nouvelles façons d'identifier les cellules cancéreuses, au-delà de leurs caractéristiques habituelles telles que la réplication excessive. En 2017, avec le biologiste Carlo Maley et d'autres collègues de notre université, nous avons recensé un ensemble de comportements cellulaires anormaux à surveiller particulièrement, comme une consommation trop rapide des ressources

La surexploitation des ressources par les cellules cancéreuses constitue une pression qui pousse le cancer à métastaser

ou la production d'enzymes qui dégradent l'environnement local.

Mais la coopération au sein d'un organisme multicellulaire n'est pas seulement une question d'autorégulation de chaque cellule. Elle s'appuie aussi sur la détection des cellules fraudieuses et leur suppression. L'évolution a doté les organismes multicellulaires de telles capacités. En temps normal, les cellules ne se répliquent qu'avec la « permission » de leurs voisines qui libèrent les signaux adéquats. Si une cellule s'écarte de son script, elle est aussitôt repérée et détruite par les cellules voisines ou le système immunitaire.

Or les cellules cancéreuses parviennent à se soustraire aux détecteurs qui existent au sein même de leur code génétique, dont le gène suppresseur de tumeur *TP53*. Ce gène code une protéine, p53, qui joue un rôle central dans de nombreux aspects du contrôle cellulaire, comme l'arrêt du cycle cellulaire, le déclenchement de la réparation de l'ADN et celui de l'apoptose, si une cellule est trop endommagée. Parmi les autres gènes de cette « police de la coopération » figure le gène *BRCA1*, découvert en 1990 par la généticienne américaine Mary-Claire King, qui intervient dans la réparation de l'ADN ; quand ce gène mute et ne remplit plus sa fonction, le risque de cancer du sein, des ovaires et de la prostate augmente.

Les gènes de la famille *TP53* (dont *TP63* et *TP73*, qui contribuent à maintenir l'intégrité du génome) sont apparus tôt dans l'évolution des organismes multicellulaires. Comme ils offraient un avantage évolutif, ils se sont répandus dans l'ensemble du monde vivant multicellulaire. En 2019, Anna Trigos, du centre de traitement du cancer Peter-MacCallum, en Australie, et ses collègues ont

montré que les mutations les plus fréquentes dans le cancer touchent, dans leur grande majorité, des voies de signalisation (c'est-à-dire des voies de communication qui régissent les activités d'une cellule) impliquant des gènes tels que *TP53*. Ils ont aussi observé que certaines mutations sont à l'origine d'une perte de communication entre deux réseaux de régulation des gènes, des ensembles de gènes qui régulent l'expression d'autres gènes. Le premier réseau contrôle les gènes qui se sont développés avant l'apparition de la multicellularité, c'est-à-dire originaires des organismes unicellulaires et qui subsistent dans les organismes multicellulaires; le second agit sur les gènes apparus au cours de la transition vers la multicellularité, de telle façon qu'il maintient sous contrôle les comportements «individualistes» des cellules. En d'autres termes, il active des gènes qui favorisent la coopération. Les perturbations de communication entre ces deux réseaux de régulation renforceraient le système primitif de gènes et fourniraient un avantage sélectif aux lignées cellulaires «individualistes».

En pratique, l'équipe a déterminé l'âge de ces gènes grâce à une technique nommée «phylostratigraphie», qui compare les caractéristiques des gènes d'organismes actuels afin de remonter à leur ancêtre commun le plus probable. Cela lui a permis de déterminer où et quand ces gènes sont apparus dans l'arbre de la vie. Ensuite, elle a examiné les gènes mutés dans les tumeurs de plus de 9000 patients et découvert ainsi que les gènes qui contribuent à réguler la coopération multicellulaire étaient souvent détériorés – dont *TP53*.

Comment de tels gènes repèrent-ils la tricherie? Il semble qu'ils collectent des informations sur l'activité de la cellule, des signaux indiquant, par exemple, une augmentation de la production de protéines anormales ou du nombre de mutations. Ces signaux signifient que la cellule ne coopère probablement plus correctement avec l'organisme multicellulaire. Ce qui déclenche l'action de *TP53* et de gènes similaires, capables d'arrêter son cycle de répliation et d'amorcer la réparation cellulaire. Si ces mesures sont insuffisantes, ils provoquent la mort de la cellule, protégeant ainsi l'organisme de la menace qu'elle représente.

LA BOTTE SECRÈTE DES ÉLÉPHANTS

Le génome humain porte deux copies de *TP53*. Une mutation de l'une d'elles augmente notablement le risque de cancer (tous cancers confondus), comme le montre le syndrome de Li-Fraumeni: les personnes atteintes de cette maladie rare découverte en 1969, qui n'ont hérité que d'une seule copie de *TP53*, sont extrêmement vulnérables au cancer. On

estime que leur risque de développer un cancer est de 50% avant 30 ans et 90% avant 60 ans.

En revanche, les éléphants comptent pas moins de quarante copies du gène *EP53*, nom donné à leur version de *TP53*, ce qui expliquerait pourquoi ils développent rarement des cancers malgré leur taille. L'absence de cancer chez les animaux géants est une énigme de longue date, connue sous le nom du «paradoxe de Peto». En 1977, Richard Peto, un épidémiologiste de l'université d'Oxford, en Angleterre, et ses collègues ont fait remarquer que plus un organisme est grand et vit longtemps, plus il compte de cellules, qui ont toutes un risque équivalent de muter. Un grand organisme vivant longtemps devrait donc présenter un risque de cancer plus élevé qu'un autre de petite taille et de courte durée de vie. Pourtant, ce n'est pas le cas. Le risque de cancer et la taille ne sont pas liés.

Ces dernières années, nous avons montré que ce paradoxe existe dans tout le règne animal. À partir d'une base de données rassem-

Le génome de la baleine à bosse présente davantage de copies de gènes impliqués dans l'apoptose que celui des petits cétacés

blant des informations sur les maladies des animaux recueillies dans des zoos et des cliniques vétérinaires, nous avons mis en évidence que les espèces les plus grandes et qui vivent plus longtemps déclenchent autant de cancers que les espèces plus petites et vivant moins longtemps, ce qui vient encore d'être confirmé sur près de deux cents espèces (voir l'encadré page 76).

Cela suggère que les organismes de grande taille et qui vivent longtemps disposent de mécanismes efficaces pour supprimer les tricheries des cellules, à l'instar du nombre élevé de copies du gène *EP53* chez les éléphants. En 2016, Michael Sullak, de l'université de Chicago, aux États-Unis, et ses collègues



génétiens de l'évolution ont comparé le génome d'éléphants avec ceux de plusieurs espèces proches, dont des animaux disparus comme le mammouth laineux et le mastodonte d'Amérique. Ils ont découvert que, à mesure que les animaux de cette lignée devenaient plus grands, ils disposaient d'un nombre plus élevé de copies de gènes de type *TP53*. Ces gènes auraient donc joué un rôle important dans l'évolution de la taille des organismes. Grâce à leur taille, les éléphants et leurs congénères ont mieux survécu aux prédateurs, et grâce aux gènes suppresseurs de cancer, ils ont aussi survécu aux cellules tricheuses dans leur corps.

En réalité, même chez les éléphants, le nombre élevé de copies du gène *EP53* n'est sans doute pas le seul mécanisme en jeu dans la lutte contre le cancer. En 2021, avec Marc Tollis et d'autres collègues du laboratoire, nous avons à notre tour comparé le nombre de copies de ce gène chez différentes espèces d'éléphants. Nous avons observé que certaines espèces d'éléphants plus petites avaient un nombre de copies du gène parmi les plus élevés. Le nombre de copies du gène *EP53* n'aurait donc pas augmenté linéairement avec la masse corporelle au cours de l'évolution des éléphants en réponse à un risque accru de cancer. En revanche, des régions particulièrement conservées du génome des éléphants suggèrent que d'autres facteurs ont pu être sélectionnés, comme des régions du génome qui réguleraient l'expression du gène *EP53* ou la réponse immunitaire.

Plus un organisme comporte de cellules, plus le risque qu'il développe un cancer devrait être élevé. Or ce n'est pas le cas. De nombreux gènes sont à l'œuvre, capables de contrer la maladie, comme chez la baleine à bosse.

Quoi qu'il en soit, un modèle se dessine selon lequel la taille des organismes aurait évolué, tant sur terre que dans la mer, de pair avec les gènes impliqués dans la « police de la coopération ». Pour le vérifier, des chercheurs, dont Marc Tollis et des collègues du laboratoire, ont examiné les génomes de différents cétacés. Il existe une grande variation de taille entre les espèces de ce taxon, qui comprend les baleines et les dauphins : la baleine à bosse est environ quatre fois plus grande que le petit rorqual commun, étroitement apparenté, et l'orque jusqu'à vingt fois plus grosse que son proche parent, le grand dauphin. En 2019, Marc Tollis et son équipe ont observé que, chez les cétacés, le nombre de gènes de contrôle des cellules tricheuses augmente avec la taille du corps. En particulier, le génome de la baleine à bosse présente davantage de copies de gènes impliqués dans l'apoptose que celui des petits cétacés.

LES BALEINES AUSSI

Par ailleurs, ils ont montré que, chez les grandes baleines, un certain nombre de gènes impliqués dans la suppression du cancer sont le fruit d'une sélection naturelle positive (c'est-à-dire leur conférant un avantage évolutif). Il s'agit, par exemple, de gènes de contrôle du cycle cellulaire, de gènes de signalisation cellulaire et d'autres impliqués dans la prolifération. L'un d'eux, *PRDM2*, contrôle l'expression de la version de *TP53* présente chez les cétacés, ce qui montre, une fois de plus, le rôle central de cette séquence d'ADN.

DAVANTAGE DE CANCERS CHEZ LES CARNIVORES MANGEURS DE MAMMIFÈRES

Toutes les espèces animales ne présentent pas la même vulnérabilité au cancer. Par exemple, le rat-taupo ne développe quasiment jamais de tumeurs spontanées. En revanche, le diable de Tasmanie (un *Dasyuromorphe*) est touché par deux graves cancers si fréquents – et contagieux – que l'espèce est menacée d'extinction. De façon générale, il semblerait que les espèces de grande taille vivant longtemps ne soient pas plus à risque que les espèces de petite taille vivant peu de temps. C'est le « paradoxe de Peto » : chaque division cellulaire ayant la même probabilité d'engendrer des mutations, les grands animaux à longue vie, qui nécessitent davantage de divisions cellulaires, devraient être plus sujets au cancer, qui résulte d'une accumulation de mutations. Pour vérifier ce paradoxe, nous avons mené des recherches à partir d'une gigantesque base de données sur la faune sauvage captive, comprenant 191 espèces de mammifères et 110 148 individus.

Nos résultats confirment le paradoxe chez les mammifères. Les espèces de grande taille ont donc bel et bien développé, au cours de l'évolution, des défenses suffisamment puissantes pour compenser un risque de cancer plus élevé. Il convient de rechercher ces mécanismes, aussi multiples que variés, à l'origine de la résistance de

certaines espèces au cancer, car ils constituent des pistes thérapeutiques potentielles.

Notre étude souligne aussi la variabilité très élevée du risque de mortalité par cancer, même entre espèces proches (voir la figure ci-dessous). Toutefois, de façon générale, les carnivores présentent des taux de cancer supérieurs aux autres ordres des mammifères, notamment les artiodactyles – des ongulés herbivores comme le renne et la girafe. Nous avons montré en particulier que les carnivores qui consomment des mammifères ont un risque de mortalité par cancer supérieur à ceux qui consomment des poissons, des reptiles ou des oiseaux. Le régime alimentaire a donc un effet sur l'apparition des cancers.

Comment l'expliquer ? D'abord, les carnivores ont un régime riche en graisses et pauvre en fibres, ce qui constitue un facteur de risque connu de cancer. Ensuite, comme ils se situent au sommet de la chaîne alimentaire, ils ingèrent des composés cancérigènes (polluants) qui se sont accumulés le long de cette chaîne. En outre, ils pourraient présenter des microbiotes moins diversifiés que les autres animaux, ou une communauté riche et variée de bactéries intestinales semble protéger du cancer.

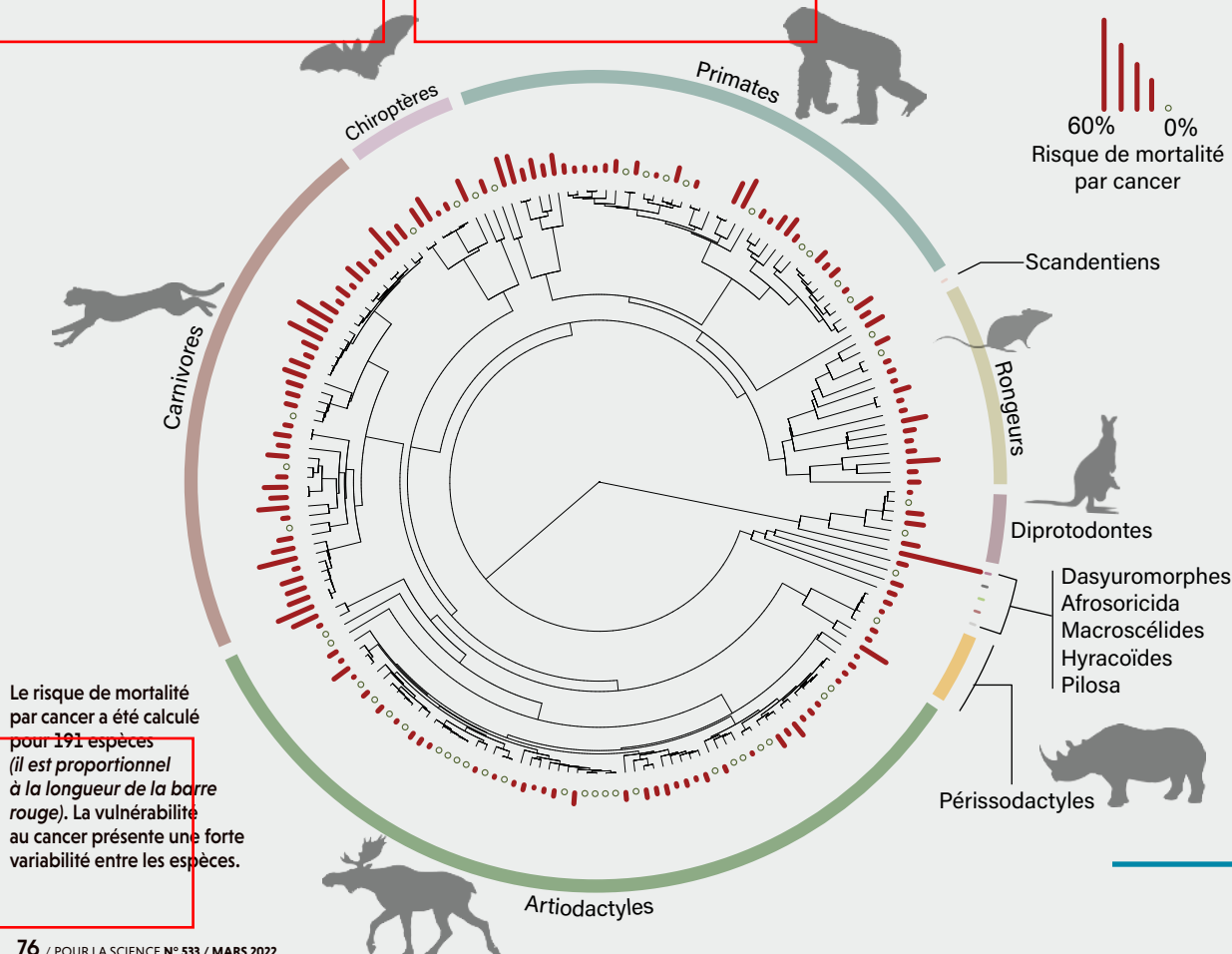
Surtout, les carnivores consomment de la viande crue, susceptible de s'accompagner du transfert d'agents pathogènes oncogènes, comme des virus. Chez l'humain, 10 à 20 % des cancers sont d'origine virale. Bien qu'on

ne connaisse pas ce pourcentage pour les autres mammifères, la consommation de viande crue pourrait exacerber la propagation des agents pathogènes cancérigènes. Le transfert étant favorisé par la proximité phylogénétique entre les espèces impliquées (proies et prédateurs), cela pourrait expliquer que les carnivores qui consomment des mammifères présentent plus de cancers que ceux qui consomment des poissons, des reptiles ou des oiseaux.

Nous avons mené cette étude sur des animaux en captivité. Le manque d'activité physique chez les carnivores à peut-être aussi contribué à accroître le risque de cancer. Des recherches dans la faune sauvage sont donc essentielles pour confirmer que les carnivores mangeurs de mammifères présentent un risque de mortalité par cancer supérieur aux autres et en déterminer les causes, notamment en évaluant les effets des contaminants dans un monde de plus en plus pollué.

FRÉDÉRIC THOMAS
directeur de recherche au laboratoire CNRS/IRD Mivegec, à l'université de Montpellier

MATHIEU GIRAudeau
chargé de recherche CNRS au laboratoire Littoral environnement et sociétés, à l'université de La Rochelle
O. Vincze et al., Cancer risk across mammals, *Nature*, 2021.



Bloquer les cellules tricheuses n'est pas chose facile parce que, ironie du sort, les cellules malignes qui cessent de coopérer avec les cellules normales se mettent à coopérer... entre elles, si bien que la situation empire. Les cellules cancéreuses produisent des facteurs de croissance les unes pour les autres, ainsi que des molécules qui aident leurs voisins à leurrer le système immunitaire, comme des molécules HLA, un marqueur qui signale que les cellules font partie de l'organisme.

De plus, d'après les modèles informatiques de populations de cellules mis au point dans mon équipe, les cellules cancéreuses entament et développent plus fréquemment ce type de coopération quand elles interagissent avec leurs propres clones (c'est-à-dire les cellules de leur descendance) – ce qui est courant dans les tumeurs – plutôt qu'avec les cellules cancéreuses d'autres lignées. Cette coopération favoriserait leur capacité à métastaser et à envahir d'autres tissus. Les cellules cancéreuses sont capables de se déplacer en petits groupes, lesquels constituent parfois des lignées qui se disséminent dans l'organisme. En 2014, Nicola Aceto, de la faculté de médecine de l'université Harvard, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que de tels *clusters* de cellules tumorales dans le flux sanguin avaient 23 à 50 fois plus de chances de produire des métastases que des cellules cancéreuses individuelles.

RENFORCER LA POLICE

Cette coopération entre cellules cancéreuses est un cauchemar. Mais appréhender ses rouages nous aide à concevoir de nouvelles stratégies pour stopper ces cellules, même lorsqu'elles s'associent. Une première piste consiste à renforcer la « police de la coopération », qui détecte la tricherie. Joshua Schiffman, de l'université de l'Utah, aux États-Unis, et des chercheurs de notre équipe mènent des travaux pour développer des traitements anticancéreux fondés sur le gène *EP53* de l'éléphant. Dans des expériences *in vitro*, ils ont montré que l'introduction de ce gène dans le génome de cellules issues d'ostéosarcomes d'humains et de chiens restaure la production de protéines p53, auparavant défectueuse, et renforce le système de défense par apoptose.

Une deuxième piste se révèle prometteuse : des traitements dits « par inhibiteur de point de contrôle immunitaire », dont le principe est de bloquer la capacité des cellules cancéreuses à envoyer des signaux qui empêchent les cellules immunitaires de les détecter. Ces traitements sont en cours d'évaluation et ont déjà remporté quelques succès dans la lutte contre le mélanome.

Une troisième approche, nommée « thérapie adaptative », vise à affaiblir les tumeurs tout en y préservant des cellules cancéreuses.

Habituellement, les oncologues administrent de fortes doses de traitements anticancéreux qui éliminent toutes les cellules cancéreuses, à l'exception des plus résistantes, qui parviennent à survivre. De proche en proche, de tels traitements induisent *in fine* la résistance des cellules à la chimiothérapie, tout comme les pulvérisations répétées d'un pesticide dans un champ finissent par favoriser l'essor des insectes résistants à ce pesticide. La thérapie adaptative consiste à administrer des traitements anticancéreux à plus faibles doses afin de préserver des cellules sensibles à la chimiothérapie. Elles se disputent alors les ressources avec les cellules résistantes, de sorte que ces dernières ne profilèrent pas, circonscrites à un niveau modéré. Tout l'enjeu consiste à maintenir la tumeur à une petite taille. Robert Gatenby et son équipe au centre de traitement du cancer Moffitt, en Floride, mènent des essais cliniques auprès de patients atteints d'un cancer de la prostate particulièrement agressif. D'après de premiers résultats publiés en 2017, les tumeurs traitées par thérapie adaptative restent sous contrôle au moins trente-quatre mois, au lieu de treize mois avec les thérapies classiques.

Enfin, avec mes collègues, nous cherchons des traitements qui feraient obstacle à la coopération des cellules cancéreuses entre elles, par exemple en bloquant les signaux que les cellules tricheuses se transmettent pour développer de nouveaux vaisseaux sanguins, ou en ciblant la capacité des *clusters* à former des métastases. Le principe serait d'interférer avec les molécules que les cellules cancéreuses utilisent pour s'assembler, par exemple les plakoglobines, des protéines de jonction intercellulaire essentielles pour la formation et le maintien des *clusters*. Les patients dont les concentrations de plakoglobine sont élevées présentent plus de métastases que les autres et ont une probabilité de survie inférieure, ce qui suggère que ces protéines sont des cibles intéressantes.

La vie sociale des cellules cancéreuses dans l'organisme est bien plus complexe que nous ne l'avions imaginé. Mais nos cellules sont encore plus élaborées et recèlent de nombreuses armes contre les cellules qui déraillent. Chacune contient un réseau de gènes efficace pour détecter et contrer la tricherie. Après tout, nos ancêtres multicellulaires sont parvenus à se débarrasser des tumeurs cancéreuses suffisamment longtemps au cours de leur vie pour se reproduire et transmettre à leur progéniture l'arsenal génétique nécessaire à leur survie. De même, la coopération cellulaire a connu un immense succès au fil de l'évolution et, bonne nouvelle, nos cellules ont hérité des outils nécessaires pour la restaurer, à l'instar de celles des baleines et de toutes les autres formes de vie multicellulaire sur cette planète, perfectionnées par des milliards d'années de sélection naturelle. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Tollis et al.,

Elephant genomes reveal accelerated evolution in mechanisms underlying disease defenses, *Mol. Biol. Evol.*, 2021.

M. S. Carlino et al., **Immune checkpoint inhibitors in melanoma**, *The Lancet*, 2021.

A. Trigos et al., **Somatic mutations in early metazoan genes disrupt regulatory links between unicellular and multicellular genes in cancer**, *eLife*, 2019.

M. Tollis et al., **Return to the sea, get huge, beat cancer: An analysis of cetacean genomes including an assembly for the humpback whale (*Megaptera novaeangliae*)**, *Mol. Biol. Evol.*, 2019.

J. Zhang et al., **Integrating evolutionary dynamics into treatment of metastatic castrate-resistant prostate cancer**, *Nature Communications*, 2017.

M. Sullak et al., **TP53 copy number expansion is associated with the evolution of increased body size and an enhanced DNA damage response in elephants**, *eLife*, 2016.

L'ESSENTIEL

→ Le GHB est un dérivé du GABA, un neurotransmetteur inhibiteur du système nerveux central qui « éteint » les neurones.

→ Il a été synthétisé dans les années 1960 et rapidement utilisé en anesthésie, car il facilite le sommeil. Mais ensuite, il est devenu une drogue récréative, dont

certaines personnes malintentionnées abusent.

→ Aujourd'hui, on sait que le GHB agit via deux types de récepteurs cérébraux et a des effets bénéfiques pour diverses pathologies : narcolepsie, syndrome de sevrage alcoolique, fibromyalgie – entre autres.

L'AUTEUR



BERNARD CALVINO
professeur d'université honoraire en neurophysiologie et ancien membre du conseil scientifique de l'institut UPSA de la douleur

GHB

Et pourtant, il soigne...

Le GHB, aujourd'hui connu comme la drogue du violeur, a d'abord été créé comme anesthésiant hypnotique. Cette molécule se montre aujourd'hui d'une aide précieuse dans le traitement de la narcolepsie, de l'addiction, de la fibromyalgie, voire de certaines maladies neurodégénératives...

Le GHB, ou acide gamma-hydroxybutyrique, est une molécule qui a récemment acquis une sinistre réputation en faisant la une des médias en tant que « drogue du violeur ». Dans les bars, boîtes de nuit ou *rave parties*, des individus malintentionnés l'utilisent pour « faciliter » un viol en le versant dans le verre de la future victime, à son insu : cette dernière perd alors le contrôle d'elle-même, comme anesthésiée, perdant toute capacité de résistance.

UN SOMBRE TRAFIC

Or il est difficile d'identifier *a posteriori* l'intoxication, car la victime ne garde en général aucun souvenir de ce qu'il lui est arrivé et, dans la mesure où cette molécule est rapidement métabolisée par le foie et éliminée par



Analogue au principal neurotransmetteur inhibiteur du cerveau, le GHB offre de nombreux bénéfices thérapeutiques.

l'organisme, elle n'est pas détectable par les tests toxicologiques de routine. Résultat: seul le souvenir – éventuel – de l'événement permet d'établir – difficilement – un diagnostic...

De sorte qu'aujourd'hui, se développe sur internet un mouvement appelant à boycotter les bars où, hélas, se multiplient ces pratiques, tandis que les dépôts de plainte pour agression sexuelle ou viol, en particulier dans le milieu étudiant, ne cessent d'augmenter.

Il faut dire qu'également euphorisant et relaxant, le GHB favorise aussi la pratique récréative du *chemsex*, mot-valise anglais pour *chemical sex*, le fait d'avoir – *a priori* volontairement – un rapport sexuel sous substance: les individus recherchent alors l'euphorie, la connexion avec le partenaire et l'exacerbation du plaisir que ce produit procure. Mais cela augmente les risques de dérapages: sous l'emprise de la drogue, est-on vraiment consentant? A-t-on encore la lucidité de se protéger correctement?

Par ailleurs, le GHB est aussi répandu dans le milieu du... culturisme. Parce qu'en 1977, des Japonais ont rapporté que la molécule augmenterait les effets des stéroïdes et la libération de l'hormone de croissance. Bien que ces résultats n'aient toujours pas été validés scientifiquement, la molécule est largement utilisée par les adeptes du *bodybuilding* depuis les années 1980, en particulier aux États-Unis, pour augmenter la masse musculaire et éliminer les graisses tout en passant entre les mailles des contrôles antidopage...

UTILE EN ANESTHÉSIE

Pourtant, consommer du GHB, même en petite quantité, n'est pas anodin: il existe des risques d'intoxication aiguë et de comportements dangereux – conduite automobile à risque, agressivité... –, voire de troubles psychiatriques: insomnie, anxiété, hallucinations auditives et visuelles. Et lorsque la consommation devient quotidienne, elle comporte un

UN RÉGULATEUR DE L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE

Comment le GHB agit-il? Depuis les travaux d'Henri Laborit, de nombreux scientifiques se sont intéressés à cette molécule, afin de comprendre comment et pourquoi elle présente ses activités pharmacologiques. Le GHB est une substance endogène naturelle des organismes de nombreux mammifères. Dans le cerveau, il est synthétisé à partir du GABA, dont il est un métabolite, grâce à l'action de diverses enzymes qui remplacent le groupe chimique amine ($-NH_2$) par un hydroxy ($-OH$). Ensuite, le GHB est stocké dans des vésicules synaptiques neuronales, mais il est aussi présent dans les liquides extracellulaires.

L'activité du GHB résulte de sa liaison à deux types de récepteurs: il mime les effets du GABA en se fixant sur les récepteurs GABA-B du cerveau (mais pas sur les GABA-A) et agit aussi sur ses propres récepteurs, les récepteurs GHB, dits « à sept domaines transmembranaires couplés à une protéine G ». C'est seulement en 2003 que l'équipe de Michel Maitre, à l'Institut de chimie biologique de la faculté de médecine de Strasbourg, a pour la première fois identifié ces récepteurs chez les rats, puis chez l'homme en 2007. Ils se retrouvent principalement dans l'hippocampe, siège de la mémoire, le cortex, où se déroulent les fonctions cognitives supérieures comme la planification et le raisonnement, le striatum, entre autres responsable du contrôle des mouvements, le thalamus, carrefour de nombreuses

aptitudes cognitives et régulateur du sommeil, le cervelet, qui intervient notamment dans le contrôle moteur, et les bulbes olfactifs. Ces récepteurs ne ressemblent pas du tout aux récepteurs GABA-B et ne fixent que le GHB, qui, de fait, représente un véritable neurotransmetteur neuronal.

On pense que les neurones synthétisant et sécrétant du GHB collaborent aussi du GABA, de sorte que le GHB participerait également à la régulation de l'activité de la synapse GABAergique: en se liant à un récepteur GHB situé sur la terminaison présynaptique afférente du neurone GABAergique, le GHB bloquerait l'entrée présynaptique de calcium et diminuerait ainsi l'activité de la synapse (en hyperpolarisant la membrane du neurone); d'où un ralentissement de la sécrétion de GABA (voir la figure ci-contre). Ou de tout autre neurotransmetteur, comme le glutamate et la dopamine, sécrétés par un neurone présentant également à sa membrane présynaptique des récepteurs GHB.

En réalité, l'effet pharmacologique du GHB, thérapeutique ou récréatif, nécessite la consommation d'une quantité assez élevée de la molécule – en moyenne de 2 à 3 grammes chez l'homme – afin que la concentration cérébrale de GHB augmente suffisamment. L'équipe de Michel Maitre a montré, dans les années 1990, que la conséquence de cette augmentation est en réalité une variation « biphasique » des concentrations extracellulaires

de GABA, mais aussi de dopamine et de glutamate: dans un premier temps, court (de dix à vingt minutes), la libération de ces neurotransmetteurs est diminuée du fait de l'action du GHB sur ses propres récepteurs; puis, dans un deuxième temps, long (de une à deux heures selon la dose administrée), l'effet s'inverse et la libération de ces neurotransmetteurs augmente considérablement (en particulier pour la dopamine, plus de deux fois), de sorte que leurs taux cérébraux se retrouvent à des valeurs très au-dessus des normales physiologiques... Ainsi, selon Michel Maitre, « après une période courte d'hypersollicitation des récepteurs GHB (qui installent une hyperpolarisation neuronale et une chute de la libération des neurotransmetteurs étudiés), succède une période de désensibilisation de ces mêmes récepteurs GHB avec dépolarisation neuronale et libération accrue de GABA, de dopamine et de glutamate. Ce phénomène se produit dans la plupart des régions cérébrales étudiées. Le rôle bénéfique du GHB en thérapie ou son utilisation comme substance récréative serait donc la conséquence d'une adaptation des circuits GHB endogènes contrôlant la libération de certains neurotransmetteurs, à la suite de l'augmentation importante des taux de GHB cérébral – consécutive à la consommation de la substance ».

risque d'addiction, de tolérance (le besoin d'augmenter les doses pour obtenir les mêmes effets), ou de syndrome d'abstinence en cas d'arrêt de la consommation (même si, le plus souvent, le sevrage du GHB ne nécessite pas d'hospitalisation).

Pour toutes ces raisons, la Food and drug administration (FDA) a classé le GHB comme drogue en 1989 et l'a retiré de la vente aux États-Unis; la France l'a quant à elle répertorié comme stupéfiant en 1999, et l'a également interdit à la vente publique. Son usage «récréatif», comme euphorisant, dopant – et évidemment comme facilitateur d'abus – est donc strictement illégal.

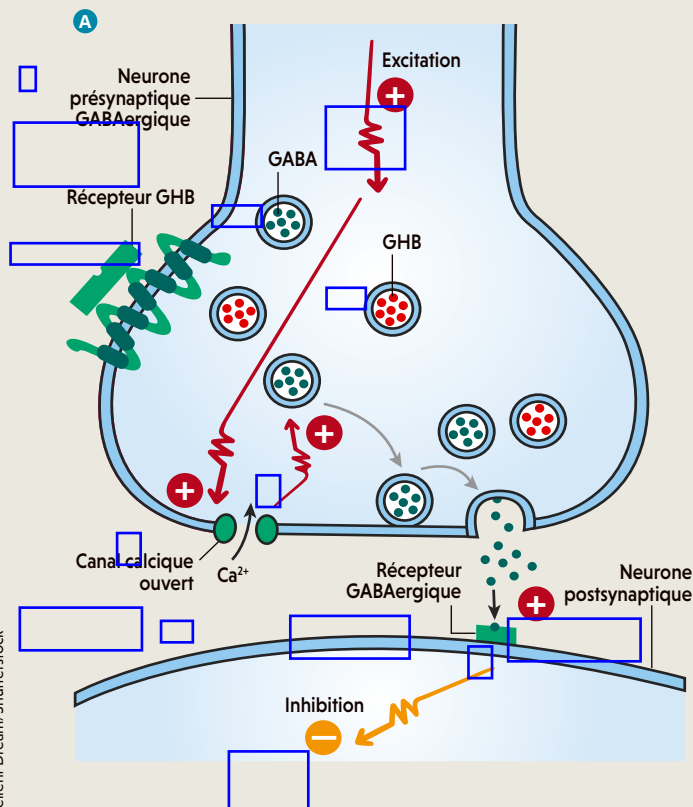
Reste son usage médical. Car le GHB tant décrié de nos jours est avant tout une molécule thérapeutique, ne serait-ce que pour induire une anesthésie lors d'opérations chirurgicales, fonction pour laquelle il a d'ailleurs été utilisé la première fois quand on l'a synthétisé. Et aujourd'hui, la substance est aussi un traitement contre la narcolepsie, le syndrome de

sevrage alcoolique, la fibromyalgie... Alors comment faire la part des choses?

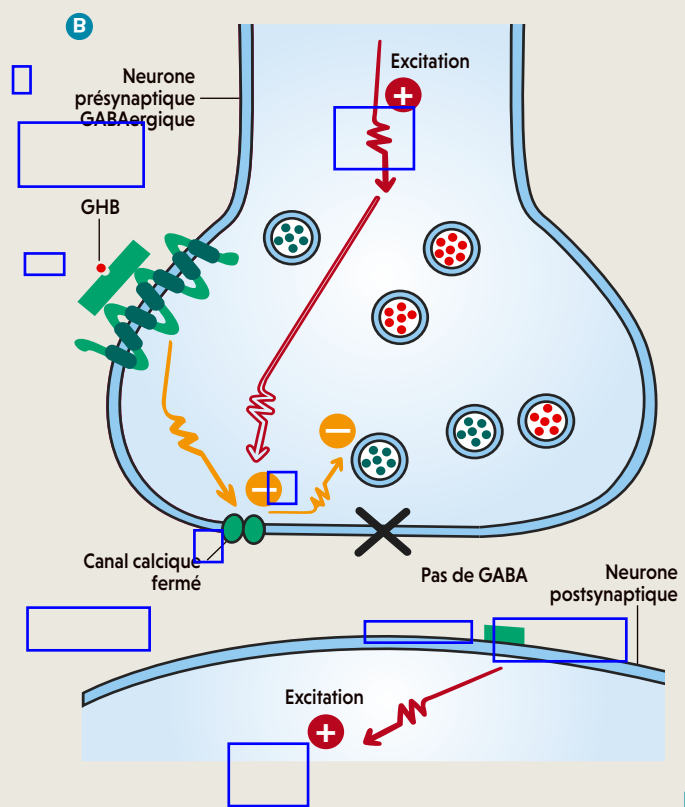
En 2011, dans sa thèse de sciences pharmaceutiques intitulée *L'acide gamma-hydroxybutyrique, intérêts thérapeutiques et usages détournés*, Damien Vignaud a fait le point sur le sujet, en détaillant les effets thérapeutiques bénéfiques du GHB tout en montrant que sa consommation récréative présente toujours une toxicité, à la fois aiguë (à court terme) et chronique (à long terme), en fonction de la dose, de la durée d'utilisation et de son association avec d'autres substances.

UN PROBLÈME DE SANTÉ PUBLIQUE...

En effet, la dangerosité du GHB provient très souvent du fait qu'il est consommé avec d'autres substances toxiques, en particulier l'alcool, qui potentialise ses effets. Les principaux signes d'une absorption de GHB varient d'un individu à l'autre, mais en général, à partir



Les récepteurs du GHB sont présents sur différents types de neurones dans le cerveau: ceux sécrétant le neurotransmetteur GABA, qui a une action inhibitrice (voir A), et ceux libérant soit du glutamate, soit de la dopamine, qui ont un effet excitateur. Quoi qu'il en soit, le GHB agit de la même façon. D'abord, il se fixe sur son récepteur GHB dit «à sept domaines transmembranaires», ce qui provoque une fermeture des canaux calciques de la membrane du neurone présynaptique. De sorte que l'activité de ce neurone diminue et les vésicules de neurotransmetteurs (voir B,



ici contenant du GABA) n'atteignent plus la synapse. Il en résulte une excitation du neurone postsynaptique par manque de GABA. Pour des neurones présynaptiques libérant du glutamate ou de la dopamine, on obtient également une diminution de la sécrétion de ces neurotransmetteurs, donc une inhibition de l'activité du neurone postsynaptique (le glutamate et la dopamine étant des neurotransmetteurs excitateurs).

Ainsi, en grande quantité, et surtout mélangé à d'autres substances, le GHB provoque souvent des malaises importants; en France, aux États-Unis, en Grande-Bretagne, en Australie, etc., on recense chez les jeunes de plus en plus de comas associés à des crises épileptiques du fait de l'usage illicite du GHB. Bien que la délivrance de cette molécule soit la même que celle des autres stupéfiants, à savoir par prescription sur ordonnances sécurisées et nominatives, il reste relativement facile de s'en procurer par les circuits parallèles et sur Internet. Résultat: sa mauvaise utilisation et sa consommation à des fins récréatives sont de plus en plus fréquentes et en font un véritable problème de santé publique, à l'origine d'un nombre croissant d'admissions aux urgences.

D'où vient le GHB? Comment agit-il? C'est en 1960 que le chirurgien et neurobiologiste français Henri Laborit synthétise le GHB. Initialement, il cherchait une molécule capable de reproduire les effets inhibiteurs du GABA, un important neuromédiateur du cerveau, et qui puisse être administrée par voie sanguine. En effet, il existe dans le cerveau deux types de neurotransmetteurs ou molécules de communication entre neurones. Les premiers comprennent les agents excitateurs, comme la dopamine et le glutamate, qui excitent les neurones où ils se fixent en dépolarisant leur membrane; les seconds regroupent les neurotransmetteurs inhibiteurs, le principal étant le GABA, qui repolarisent (ou hyperpolarisent) la membrane des neurones et diminuent leur activité électrique ainsi que la sécrétion de neurotransmetteurs à la synapse (l'espace de communication entre neurones).



**Le GHB est efficace
contre tous les
symptômes
de la narcolepsie:
il réduit le temps
de sommeil diurne,
les hallucinations,
les épisodes de sommeil
et de perte de tonus
musculaire survenant
brutalement**

LA MOLÉCULE DU SOMMEIL

Grâce à diverses expériences, Laborit révèle alors que le GHB présente une activité hypnogène – il endort – chez le rat et le chien, puis chez l'homme. Le chercheur note que « l'action hypnogène du produit, après un temps d'action variable suivant la dose et la durée de perfusion, disparaît brusquement, et que le sujet redevenu conscient en quelques secondes se lève et marche comme au réveil d'un sommeil normal ». De plus, cette activité hypnogène du GHB est accompagnée d'un accroissement du sommeil paradoxal désynchronisé, où se déroulent les rêves, l'une des phases du sommeil qui survient périodiquement après la période de sommeil à ondes lentes.

Dès sa première publication sur le GHB, le neuroscientifique préconise donc l'utilisation de

la substance en anesthésie et réanimation: à partir de 1964, le GHB est régulièrement prescrit comme agent inducteur intraveineux de l'anesthésie, notamment chez les enfants. D'autant que, selon Laborit, le GHB potentialise les effets anesthésiques d'autres molécules utilisées lors des opérations chirurgicales. D'ailleurs, le GHB sera longtemps la substance de référence lors des accouchements nécessitant une anesthésie, notamment par césarienne, mais ne l'est plus aujourd'hui depuis l'arrivée de la péridurale. Enfin, du fait de son mécanisme d'action neuronale consistant en une repolarisation de la membrane et une diminution de l'activité électrique des neurones, Laborit propose d'utiliser le GHB pour traiter certains troubles neurologiques avec contractures et des formes d'épilepsie, ainsi que des maladies psychiatriques, comme les grands syndromes d'agitation (mais avec une efficacité modérée). Toutefois, à l'époque, la molécule n'est pas totalement acceptée du fait de ses rares effets secondaires, en particulier des formes d'absences liées à des crises épileptiques temporaires.

Mais, depuis, le GHB a réveillé l'intérêt des chercheurs et des médecins. Notamment parce que des études ultérieures détaillant le mode de fonctionnement du GHB dans le cerveau (voir l'encadré page 80) ont montré que c'est en agissant sur ses propres récepteurs ou sur les récepteurs GABA-B, au niveau du thalamus notamment, que le GHB facilite le sommeil et est utile en anesthésie... Et aussi pour d'autres pathologies.

SOIGNER LES NARCOLEPTIQUES

En premier lieu, pour le traitement de la narcolepsie. Il s'agit d'une pathologie neurologique résultant de la perte, sans doute d'origine auto-immune, des neurones synthétisant les deux hypocretines A et B (ou orexines 1 et 2), des neuropeptides qui stimulent l'appétit et l'état d'éveil et qui sont synthétisés par des noyaux de l'hypothalamus. Les patients souffrent d'un temps de sommeil diurne excessif (EDS, pour *Excessive daytime sleepiness*), d'hallucinations, d'épisodes de sommeil et de catalepsie intervenant brutalement, d'un sommeil nocturne perturbé et d'une paralysie au cours du sommeil. La catalepsie est une perte brutale du tonus musculaire, généralement déclenchée par une émotion forte, la surprise ou le rire, mais n'intervient pas toujours au cours d'un épisode de narcolepsie.

Le traitement habituel de cette maladie repose sur des stimulants psychomoteurs et des antidépresseurs, qui apportent un soulagement aux patients, mais qui présentent des effets secondaires importants et peuvent provoquer une tolérance (et une dépendance). D'où l'intérêt du GHB avec ses effets bien connus sur l'augmentation de la phase de sommeil à ondes lentes et sur la facilitation du sommeil

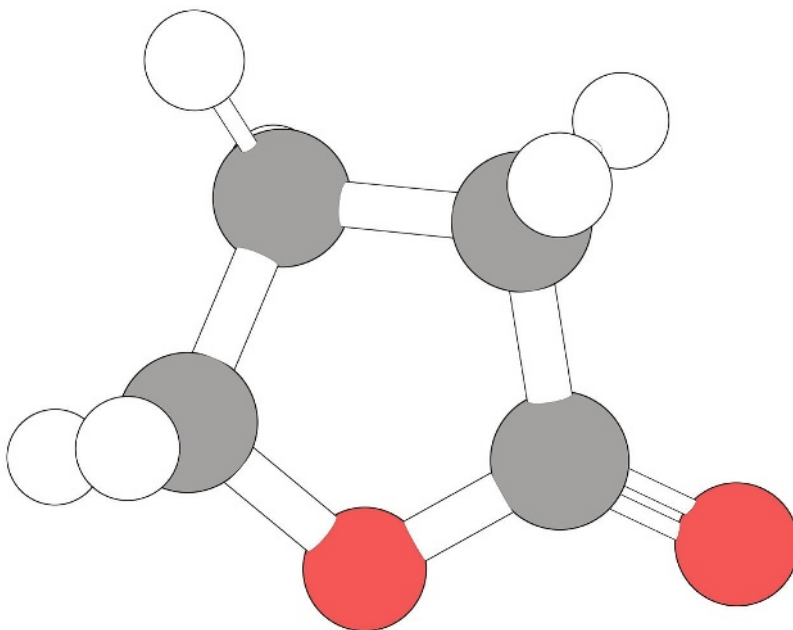
paradoxal; de plus, c'est la seule molécule autorisée aux États-Unis et en Europe pour le traitement des EDS et de la catalepsie.

Le GHB est efficace contre tous les symptômes de la narcolepsie, mais on peut aussi y associer le modafinil, qui n'est actif que sur les EDS. Comme le GHB est rapidement absorbé et éliminé, le patient se doit d'en prendre deux fois par nuit; on utilise généralement des doses de 4,5 grammes d'oxybate de sodium, la forme commerciale du sel de sodium du GHB. Les effets secondaires du GHB sont modérés et il est très bien toléré quand il est pris conformément aux recommandations. Cela fait maintenant trente ans que l'on traite les narcoleptiques de cette façon, avec de très bons résultats.

ET LES ALCOOLIQUES...

Le GHB est aussi efficace contre le syndrome d'abstinence alcoolique, qui résulte des conséquences, sur les récepteurs cérébraux, d'une consommation d'alcool à long terme. En effet, l'alcool est un bloquant des récepteurs NMDA du glutamate, ce qui provoque une augmentation des effets inhibiteurs du GABA sur les neurones et donc une diminution du tonus excitateur du système nerveux central. Mais quand on ne boit plus d'alcool, ces systèmes glutamatergiques sont hyperactivés, et on observe aussi une diminution des niveaux d'activité à la fois du GABA et de la sensibilité des récepteurs GABA. Conséquence: les récepteurs GABA étant moins réceptifs, des concentrations cérébrales d'alcool plus élevées deviennent nécessaires pour obtenir le même degré d'inhibition cérébrale. C'est de ce processus que résulte la tolérance – puis la dépendance – à l'alcool...

Le GHB, ou acide gamma-hydroxybutyrique, est un analogue du principal neurotransmetteur inhibiteur du cerveau, le GABA. Cette substance, euphorisante et sédatrice, est utilisée en anesthésie, mais aussi pour le traitement de diverses pathologies.



Par ailleurs, l'apparition d'hallucinations résultant de l'abus d'alcool est attribuée à l'augmentation des concentrations en dopamine cérébrale, un neurotransmetteur très important dans le syndrome de dépendance alcoolique.

Or le GHB présente une activité semblable à celle de l'alcool: il diminue la libération de GABA par les neurones GABAergiques du fait de l'activation des récepteurs GHB présynaptiques, dont on a montré qu'ils sont spécifiques du GHB et font donc de ce dernier un véritable neurotransmetteur endogène (voir l'encadré page 80). De plus, le GHB stimule les récepteurs GABA-B dans le circuit reliant le cortex au système limbique, comprenant le thalamus et le striatum, ce qui provoque une augmentation de la libération de dopamine. Et comme le GHB est rapidement éliminé et n'engendre pas de tolérance (contrairement à l'alcool), ses actions permettent au système nerveux central de retrouver un certain équilibre, indispensable pour se remettre du syndrome d'abstinence alcoolique.

On a aussi étudié l'intérêt du GHB pour le sevrage aux opiacées, comme la morphine, la cocaïne ou l'héroïne. Des études cliniques italiennes et américaines ont montré que le GHB remplace efficacement la méthadone comme traitement de substitution. Dans l'étude italienne, effectuée en double aveugle (ni les patients ni les expérimentateurs ne savaient qui recevait le GHB ou un placebo), le GHB était donné à raison de 25 milligrammes par kilogramme de poids du sujet. À cette posologie, il supprimait la quasi-totalité des symptômes de manque chez des héroïnomanes.

Dans l'étude américaine, également réalisée en double aveugle, le GHB, prescrit dosé à 1,75 gramme par jour, était associé à de la naltrexone, un autre traitement de substitution, à 50 milligrammes par jour. Résultat: les patients traités au GHB ont bien diminué leur consommation d'héroïne, ainsi que celle d'autres substances stupéfiantes non opioïdes, et ont mieux suivi leur traitement à la naltrexone. Toutefois, le trop petit nombre d'études réalisées sur ce sujet ne permet pas encore de valider complètement l'efficacité du GHB pour cette indication.

POUR SOULAGER LA FIBROMYALGIE

Le GHB serait également un traitement de choix contre la fibromyalgie. Cette pathologie chronique se caractérise par des douleurs diffuses, fort insupportables, et concerne 0,5% à 5% de la population adulte dans le monde. Son origine est méconnue mais on suppose qu'il s'agit d'un syndrome «nociplastique», c'est-à-dire une affection résultant d'une perturbation de la perception de la douleur dans le cerveau liée à sa neuroplasticité (le fait que

Des études cliniques semblent montrer que le GHB présente aussi un intérêt dans le sevrage aux opiacés

les neurones se réorganisent et créent de nouvelles connexions). Outre la douleur, les autres symptômes sont fatigue, troubles du sommeil et raideurs matinales.

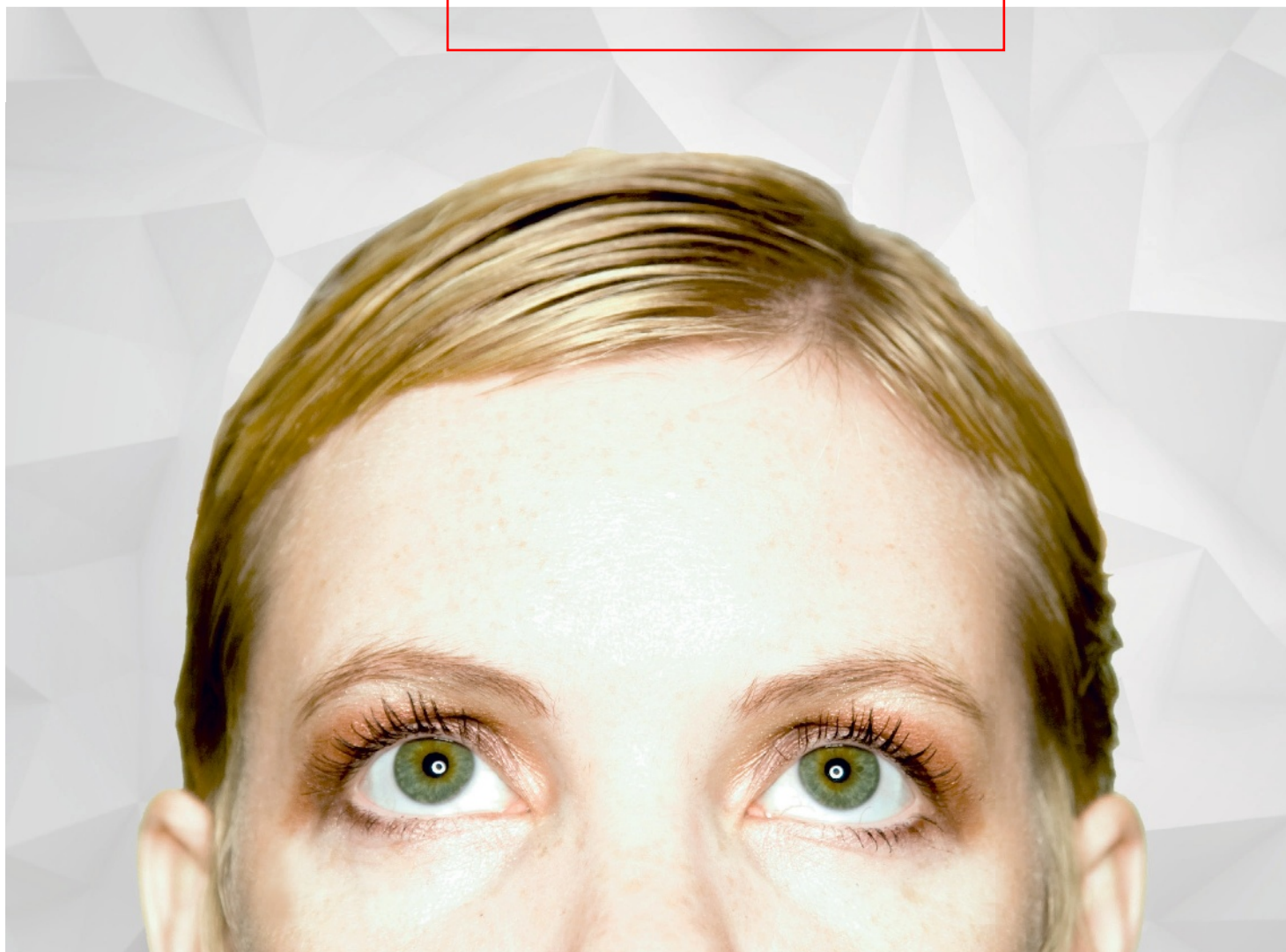
Une étude récente a montré que l'oxybate de sodium, administré la nuit en plusieurs prises, serait efficace dans le traitement de la fibromyalgie: il diminue la douleur et la fatigue des patients et améliore leur quotidien. Pendant 14 semaines, 548 adultes atteints de fibromyalgie, répartis en 3 groupes, ont reçu soit 4,5 grammes de GHB par nuit, soit 6 grammes, soit un placebo. Ainsi, seuls ceux ayant consommé le GHB ont vu leurs symptômes s'améliorer, et ce d'autant plus que la quantité de GHB était élevée. Ces premiers résultats représentent une voie de recherche intéressante dans le cadre de cette pathologie mal connue, pour laquelle les alternatives thérapeutiques sont aujourd'hui peu nombreuses, voire inexistantes. Mais dans l'état actuel de la réglementation, l'oxybate de sodium n'est pas encore autorisé pour le traitement de la fibromyalgie sur le territoire européen. Des études complémentaires sont encore nécessaires.

Le GHB aurait aussi un rôle préventif dans la maladie d'Alzheimer. En effet, des études préliminaires réalisées chez l'animal ont montré qu'en agissant sur le système GABAergique, le GHB favorise l'expression de gènes qui diminuent la neuro-inflammation et protègent donc les neurones. Ces arguments ont plaidé en faveur de l'utilisation du GHB pour la prévention du développement de la maladie d'Alzheimer et des études cliniques sont en cours chez des patients à risque face à cette pathologie.

Malgré sa mauvaise réputation de «drogue du violateur» et le danger que son usage récréatif représente, il est fort probable que l'on découvre, dans les années à venir, d'autres applications médicales du GHB, qui n'est rien d'autre qu'un analogue du principal neurotransmetteur inhibiteur du cerveau! Il mériterait donc d'être mieux reconnu et davantage étudié pour ses bénéfices cliniques. ■

BIBLIOGRAPHIE

- M. Maitre et al., **A proposed preventive role for gamma-hydroxybutyrate (Xyrem(R)) in Alzheimer's disease**, *Alzheimer's Res. Ther.*, 2016.
- F. P. Busardò et al., **Clinical applications of sodium oxybate (GHB) : From narcolepsy to alcohol withdrawal syndrome**, *Eur. Rev. Med. Pharmacol. Sci.*, 2015.
- D. Vignaud, **L'acide gamma-hydroxybutyrique, intérêts thérapeutiques et usages détournés**, Thèse de pharmacie, hal-017 39 086, 2011.
- I. J. Russell et al., **Sodium oxybate relieves pain and improves function in fibromyalgia syndrome : A randomized, double-blind, placebo controlled, multicenter clinical trial**, *Arthritis Rheum.*, 2009.
- L. Gallimberti et al., **Clinical efficacy of gamma-hydroxybutyric acid in treatment of opiate withdrawal**, *Neuropsychopharmacology*, 1993.
- H. Laborit et al., **Généralités concernant l'étude expérimentale et l'emploi clinique du γ -hydroxybutyrate de Na⁺**, *Agressologie* 1960.



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

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

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

Partenaires

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
der Wissenschaft

nature

Pour la Science

R

ENDEZ-VOUS

P.86 Art & science

P.88 Idées de physique

P.92 Chroniques de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

P.98 À picorer

L'AUTEUR



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

UN APPEL D'ÈRE... NOUVELLE

À travers le projet «Aérocène», présenté avec d'autres de ses œuvres au domaine des Étangs, en Charente, l'artiste argentin Tomás Saraceno invite à changer d'ère et à quitter l'Anthropocène pour s'envoler, littéralement.

En ces temps d'urgence climatique et de menaces sur la biodiversité, la grande affaire de l'artiste argentin Tomás Saraceno est de reconnecter les multiples présences au monde, de resserrer des liens distendus voire coupés entre humains et autres animaux, entre inerte et animé, entre ciel et terre... La plupart de ses œuvres s'inscrivent dans cette quête de relations durables et équilibrées. On peut s'en rendre compte en visitant l'exposition «Du sol au Soleil», qui se tient au domaine des Étangs, à Massignac, en Charente, un lieu où justement le ciel et la terre se sont rencontrés, violemment, lorsque la météorite de Rochechouart, un astéroïde de 1,5 kilomètre de diamètre, s'est écrasée à 10 kilomètres de là, il y a 207 millions d'années, modifiant irrémédiablement paysage et sous-sol.

Dans la Laiterie du lieu, vingt et une œuvres sont présentées, dans une sorte de rétrospective des dernières années, sous

le commissariat de Rebecca Lamarche-Vadel, qui avait mis en scène la carte blanche de l'artiste au palais de Tokyo, à Paris, en 2018. Et l'on retrouve par exemple des toiles d'araignées, un leitmotiv de Tomás Saraceno dans sa quête d'une communication interespèces.

Dans une salle, une œuvre intrigue. Une grande toile noire un peu chiffonnée s'étale de tout son long au sortir d'une sorte de sac équipé d'instruments techniques. C'est un «sac à dos *Aérocène*». L'idée de ce qui est présenté comme une sculpture ? Offrir à qui veut l'occasion de s'envoler sans recourir à la moindre énergie fossile, ni hélium, ni hydrogène, ni batterie ! La toile en question est celle d'un ballon aérosolaire qui, par la seule force de l'écart de température entre deux masses d'air, à l'intérieur et à l'extérieur de l'enveloppe, permet d'emporter un humain au-dessus du sol : 2 °C de différence suffisent. Entièrement en *open source*, les utilisateurs

sont invités à s'approprier le dispositif, à l'améliorer, à le tester...

Une communauté internationale s'est constituée autour du projet *Aérocène*, regroupant artistes, géographes, philosophes, scientifiques et autres explorateurs. Et l'on compte aujourd'hui plus d'une centaine de vols estampillés *Aérocène*. L'un des derniers, détaillé au domaine des Étangs, a été particulièrement exceptionnel (voir la photographie ci-dessus). Il a eu lieu le 25 janvier 2020 au-dessus du désert de sel Salinas Grandes, dans la province de Jujuy, dans le Nord-Ouest de l'Argentine, à 3000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Son origine est plutôt iconoclaste : le groupe de K-pop BTS et son leader Dae-hyung Lee ont organisé «Connect BTS», une exposition mondiale afin de «relier les fans et les non-fans à travers l'art et la musique». Tomás Saraceno, à Buenos Aires, a été de l'aventure avec l'opération *Aerocene Pacha*.





Le vol libre d'un ballon aérosolaire au-dessus d'un désert de sel argentin, sans énergie. Une nouvelle façon de penser les liens entre humanité et environnement.

Reprenant les principes de base du concept, un ballon a été conçu sur place avec l'aide de communautés locales de la région (Tres Pozos, Pozo Colorado...) avec l'ambition de faire résonner leurs revendications quant aux abus liés à l'extraction du lithium sur leurs terres, une activité particulièrement polluante et surtout gourmande en eau: deux millions de litres sont nécessaires pour obtenir une tonne de cet élément chimique au cœur de la transition énergétique et indispensable aux batteries. L'agriculture et le mode de vie des peuples indigènes sont menacés par l'essor de cette «révolution verte». Ainsi, sur la toile de l'aéronef était inscrit: «L'eau et la vie ont plus de valeur que le lithium.» Avant le décollage, une cérémonie réunissant Argentins et Coréens a placé le ballon sous la protection de Pachamama, la Terre Mère, la déesse de la Terre nourricière des peuples Andins.

La divinité a sans doute entendu ces invocations, car le vol s'est déroulé au mieux et a même battu de nombreux records, validés officiellement par des représentants de la Fédération aéronautique internationale présents sur place, dont le plus long vol en ballon sans recours à une quelconque énergie. La pilote, Leticia Noemi Marqués a parcouru d'une traite 667,85 mètres en 16 minutes et s'est élevée à 272,1 mètres d'altitude.

Selon Tomás Saraceno, *Aerocene Pacha* offre un exemple de technologies, indépendantes de tout extractivisme, mises au service d'une cause sociale tout en provoquant des émotions. Plus encore, le projet *Aerocene* dans son ensemble, avec son message simple et poétique de se laisser porter par les courants aériens au gré des conditions climatiques, invite à repenser nos relations avec l'environnement et à renoncer à vouloir l'assujettir. Et c'est cet appel à remplacer l'ère de

l'Anthropocène par celle de l'«Aérocène», à refaire de l'espace un commun partagé, qui est donné à voir aux visiteurs du domaine des Étangs. En guise d'apothéose, rendez-vous leur est donné en avril 2022 pour l'inauguration de *Du sol au Soleil*, car le titre de l'exposition est aussi le nom de l'œuvre permanente et monumentale qui sera installée à ce moment. Cette structure aérienne, à la fois nuage et toile d'araignée, est destinée une fois encore à relier le ciel et la terre. ■

« Du sol au Soleil », de Tomás Saraceno, jusqu'au 24 avril 2022, au domaine des Étangs, 16310 Massignac. domainedesetangs.com/fr/actualites/

L'auteur a publié:



Pollock, Turner, Van Gogh, Vermeer et la science... (Belin, 2018)

LES AUTEURS



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

UN BON POINT POUR LE TÉLESCOPE

Le télescope spatial «James-Webb» a rejoint un point particulier du système solaire, un point dit «de Lagrange». En quoi consiste ce type de point et pourquoi est-ce une bonne idée d'y placer un satellite?

Le 25 décembre 2021, une fusée Ariane 5 s'est envolée depuis Kourou, en Guyane, avec à son bord le télescope spatial *James-Webb* (JWST). Celui-ci a atteint sa destination trente jours plus tard à quelque 1,5 million de kilomètres de la Terre, dans une direction opposée à celle du Soleil. Là, il orbite désormais autour d'un point de l'espace qui tourne autour du Soleil au même rythme que la Terre. Le plus étonnant est qu'en ce point particulier, on ne trouve... rien! Comment est-ce possible? Orbiter autour de rien? La réponse est à chercher dans les travaux du mathématicien et physicien français Joseph Louis Lagrange. Au XVIII^e siècle, il a montré qu'il existe pour le système Terre-Soleil cinq points de ce type. Découvrons

l'origine physique de ces «points de Lagrange» et leurs avantages pour l'astronomie et l'exploration spatiale.

DE DEUX À TROIS CORPS

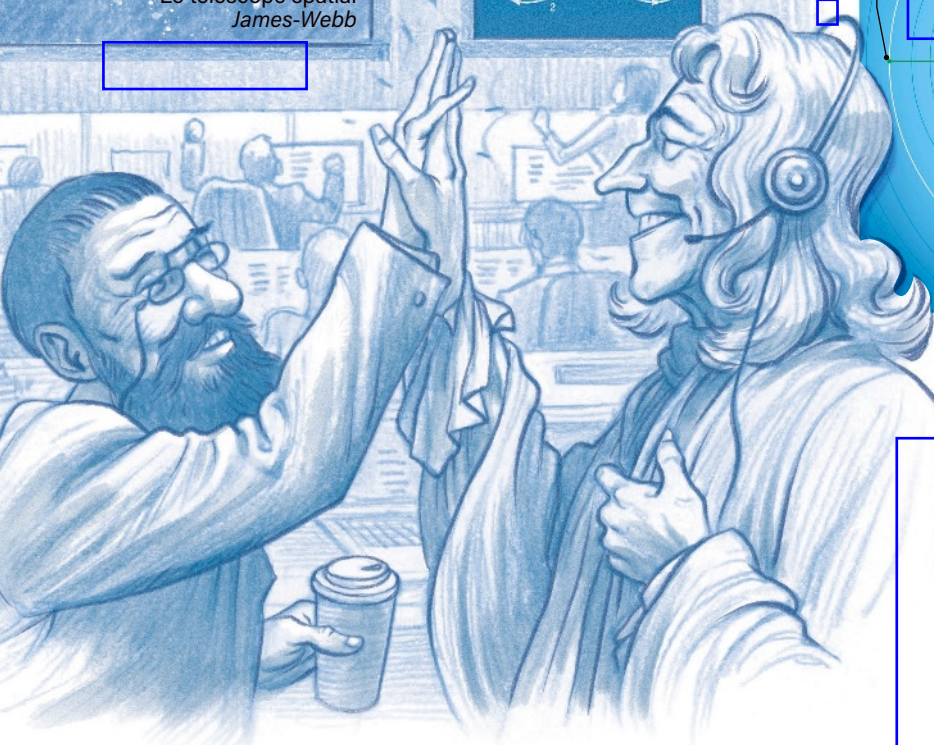
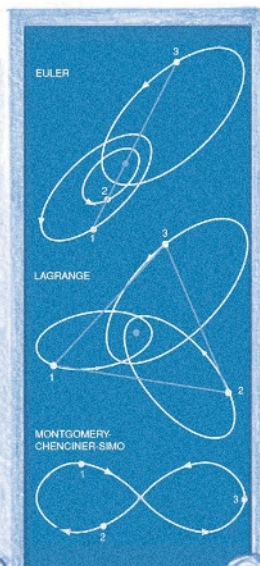
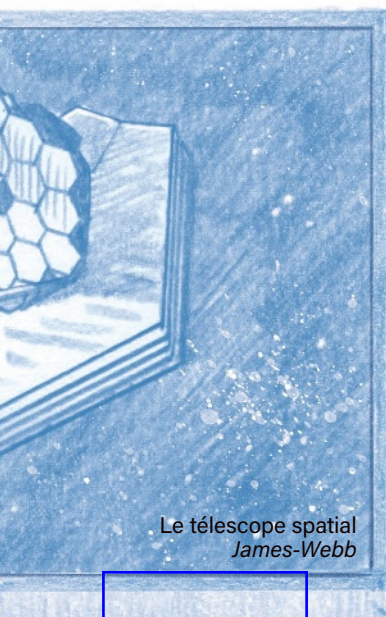
Le mouvement de deux corps massifs en interaction gravitationnelle est particulièrement simple et élégant. Les trajectoires sont des cercles, des ellipses, des paraboles ou des hyperboles, soit, en termes mathématiques, des coniques. Qu'en est-il avec trois corps? Newton s'était posé la question en réfléchissant à l'effet du Soleil sur la rotation de la Lune autour de la Terre, mais comme l'a bien compris le mathématicien Henri Poincaré deux cents ans plus tard, le passage de deux à trois masses change tout: les trajectoires peuvent être incroyablement variées et

compliquées et sont de nature chaotique! Nonobstant de nouveaux résultats régulièrement publiés, on peut considérer que ce «problème à trois corps» ne sera jamais complètement résolu en pratique.

En tout bon physicien, il est urgent de simplifier: qu'advient-il lorsqu'une des trois masses est assez petite par rapport à celle des deux autres pour rendre son effet négligeable sur leur mouvement? On peut dès lors déterminer d'abord la trajectoire des deux objets les plus massifs (une conique), puis étudier le mouvement du troisième. C'est en s'intéressant à cette situation, fréquente en mécanique céleste, que Lagrange découvrit ses fameux points.

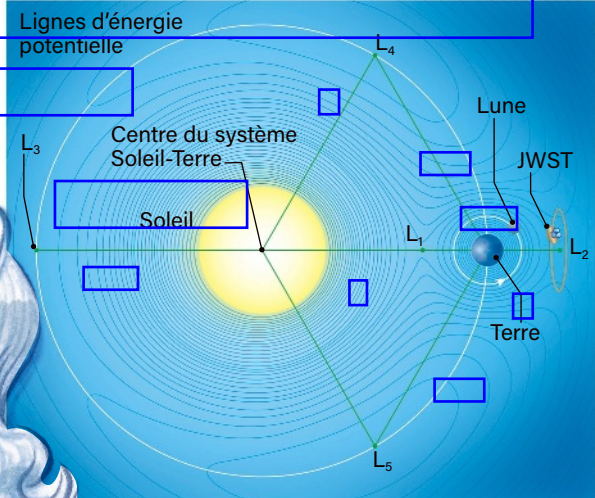
Prenons le cas du Soleil, de la Terre et d'un satellite comme le JWST. La Terre a





CINQ POINTS, C'EST TOUT

Dans le système Soleil-Terre, les points de Lagrange sont répartis le long du plan de l'écliptique. L_1 , L_2 (celui rejoint par le JWST) et L_3 sont alignés le long de l'axe Terre-Soleil. Les deux premiers sont à quelque 1,5 million de kilomètres de notre planète et sont utilisés pour des missions spatiales. Le troisième est le symétrique de la Terre par rapport au Soleil. L_4 et L_5 sont les sommets des triangles équilatéraux ayant pour côté le segment Terre-Soleil. Le « paysage » de l'énergie potentielle (en fond) montre que chaque point de Lagrange correspond à des extrema.



Joseph Louis Lagrange, Henri Poincaré et Isaac Newton se féliciteraient du lancement du télescope spatial James-Webb (JWST), l'engin ayant ensuite rejoint le voisinage de l'un des points dits « de Lagrange ». En ces points, en présence de deux corps en orbite circulaire, comme le Soleil et la Terre, un troisième de masse négligeable, resterait à peu près immobile par rapport aux deux autres. Ces points constituent des solutions particulières du problème à trois corps parmi bien d'autres : le tableau montre d'autres solutions trouvées par Leonhard Euler (en haut), Lagrange encore (au centre) et, plus récemment, en 2000, par Alain Chenciner et Richard Montgomery (en bas).

une orbite quasi circulaire autour du centre de masse du système Terre-Soleil, ce centre, compte tenu du rapport des deux masses, étant situé à l'intérieur du Soleil, légèrement décalé du centre de l'étoile. Considérons maintenant un référentiel dont l'origine est ce centre de masse et dont les axes tournent à la même vitesse que la Terre, c'est-à-dire le référentiel où Soleil et Terre sont immobiles. Lagrange a montré qu'il existe dans ce référentiel cinq positions particulières telles que si on y place un objet, ce dernier restera immobile. Cela signifie qu'en pratique ces objets tournent autour du centre de masse du système Terre-Soleil selon une trajectoire circulaire avec la même vitesse angulaire que la Terre. En ces points, la somme des deux forces gravitationnelles que subit

l'objet de la part du Soleil et de la Terre est exactement compensée par la force centrifuge qui tend à l'éloigner du centre de masse Terre-Soleil.

Afin de mieux comprendre les propriétés de ces points, notamment ce qui se passe à leurs voisinages, la représentation de l'énergie potentielle du satellite, somme des énergies gravitationnelle et centrifuge, en fonction de sa position est utile. Les points de Lagrange sont des points d'équilibre dans ce référentiel, des lieux où ce potentiel présente un extremum, ce qui correspond à une force totale nulle. Hélas, aucun de ces extrema n'est une « cuvette » d'énergie potentielle (voir la figure ci-dessus, à droite), et tous sont des « cols » ou des « sommets » : cela signifie que l'équilibre en ces points

ne devrait pas être stable ; à la moindre perturbation, le satellite devrait s'éloigner indéfiniment.

C'est sans compter avec la force de Coriolis, cette force d'inertie qui dépend de la vitesse et qui est responsable du sens de circulation des alizés sur la Terre ou de la rotation du pendule de Foucault. Les physiciens ont montré qu'elle rendait stable les équilibres aux points L_4 et L_5 à condition que la masse de la planète soit inférieure à 3,8% de la masse du Soleil, ce qui est le cas de toutes celles du Système solaire.

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



Ainsi, en ces points, la présence prolongée d'objets célestes est parfaitement possible. Dans le cas du système Soleil-Terre, l'astéroïde 2010 TK₇ a été repéré au point L₄ en 2010 et, tout dernièrement, le 2020 XL₅ au point L₅. Peut-être est-ce dû aux perturbations engendrées par les autres planètes? Ce point se situe en effet à 150 millions de kilomètres la Terre, et le champ gravitationnel de Jupiter y est supérieur. A *contrario*, on a découvert dès 1906, mais cent trente ans après l'étude de Lagrange, une accumulation d'astéroïdes autour des points L₄ et L₅ du système Soleil-Jupiter, la plus massive des planètes: appelés «troyens», ils forment des nuages un peu étalés le long de l'orbite de Jupiter et, vus de cette planète, ils semblent tourner autour des points de Lagrange selon des trajectoires très allongées, conformément aux prédictions de l'analyse de stabilité.

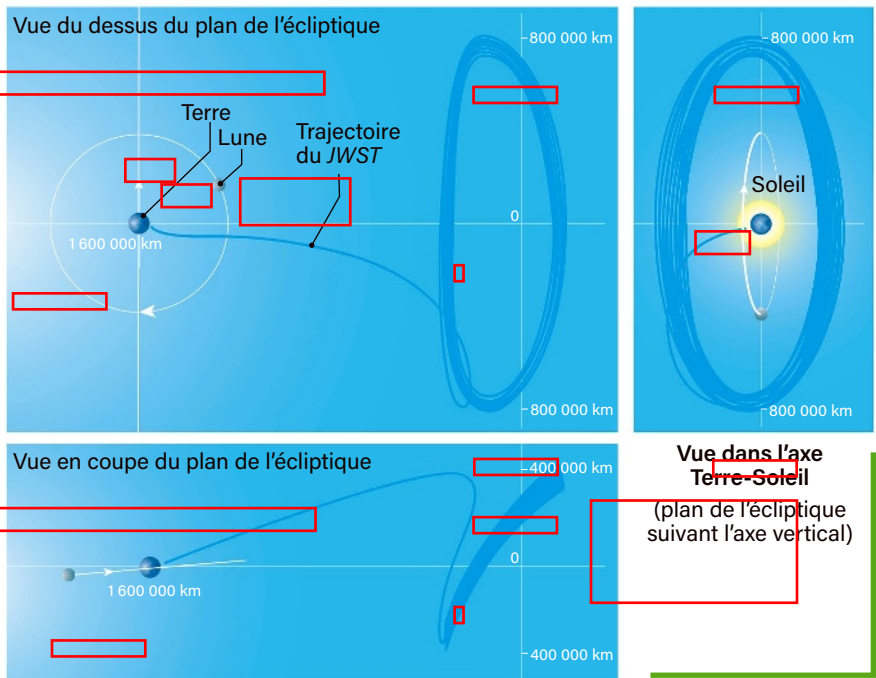
DES POINTS BIEN UTILES

Que vient donc faire le JWST près de L₂? Il rejoint la longue liste des engins spatiaux déjà placés en cet endroit (les satellites WMAP, *Herschel*, *Planck* et *Gaia*, qui y est toujours), faisant fi de son instabilité. On peut invoquer plusieurs raisons: d'abord ces points ne sont pas très éloignés de la Terre; ensuite, en raison justement de cette instabilité, on est sûr de ne pas y trouver un corps céleste susceptible de perturber la mission; enfin, le voisinage de L₂ reste une zone où le bilan résiduel des forces est faible, et il y est donc beaucoup plus facile de corriger ou de changer de trajectoire en actionnant les propulseurs que dans une zone avec un champ de forces plus élevé. Cette dernière propriété est d'ailleurs au cœur de la conception du réseau de transport interplanétaire, un ensemble de trajectoires gravitationnelles à travers le Système solaire qui nécessitent peu d'énergie pour être parcourues, les corrections se faisant justement au voisinage des points de Lagrange associés aux différents couples Soleil-Planète. Si la sobriété énergétique est de mise dans de tels transits, la contrepartie est une durée de voyage considérablement allongée.

Pour en revenir aux points de Lagrange, L₁ possède les mêmes propriétés que L₂ mais est plus adapté à l'observation du Soleil, comme c'est le cas avec le satellite *Soho*, plutôt que celle de l'espace profond. Il y a enfin une raison plus profonde à l'utilisation des points de Lagrange: depuis Poincaré, on sait qu'il existe en effet des familles de trajectoires

TOURNER AUTOUR DU POINT

Le JWST ne va pas simplement se positionner au point de Lagrange L₂, mais plutôt se mettre en orbite autour de celui-ci. Ces schémas montrent différentes vues de la trajectoire de transit et de six mois d'orbite de l'engin, où il se déplacera à des vitesses de l'ordre de 250 mètres par seconde. Le télescope spatial s'éloignera jusqu'à 832 000 kilomètres de L₂ et sera toujours exposé à la lumière du Soleil.



quasi-périodiques, pas nécessairement dans le plan de l'écliptique et parfois quasi fermées (on parle d'orbites de halo) à proximité de ces points, y compris les instables L₁ et L₂. Pour un satellite placé sur une telle orbite, le coût pour l'y maintenir malgré l'instabilité intrinsèque de l'orbite et d'éventuelles autres perturbations (dans le cas du JWST, par exemple, l'écran solaire qui le protège subit de plein fouet la pression de radiation de la lumière de notre étoile) est très limité. Pour le JWST, ce coût équivaut à booster chaque année sa vitesse de 2,5 mètres par seconde. L'orbite choisie (voir la figure ci-dessus) est à bonne distance de L₂: elle s'en éloigne de 250 000 à 832 000 kilomètres. Grâce à son inclinaison par rapport à l'écliptique, jamais le télescope ne se trouvera dans l'ombre de la Terre ou de la Lune: de quoi maintenir en permanence la communication vers la Terre et éviter des variations d'éclairement à même de perturber le délicat équilibre thermique de l'instrument. L₂ est si pratique que *Gaia* et le JWST seront rejoints bientôt par *Euclid* et *Nancy-Grace-Roman*, deux autres télescopes spatiaux! ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Montgomery, **Le problème des trois corps rebondit**, *Pour la Science*, n° 520, 2020.

Z. Musielak et B. Quarles, **The three-body problem**, *Reports on Progress in Physics*, 2014.

G. Collange, **Introduction au problème à trois corps et dynamique linéarisée autour des points de Lagrange**, note technique CCT Mécanique orbitale N° 7, CNES, 2006.

Le site du JWST :
www.jwst.nasa.gov/

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT!**



N° 114 (févr. 22)
réf. DO114



N° 113 (nov 21)
réf. DO113



N° 112 (août 21)
réf. DO112



N° 111 (mai 21)
réf. DO111



N° 110 (fév. 21)
réf. DO110



N° 109 (nov. 20)
réf. DO109



N° 108 (sept. 20)
réf. DO108



N° 107 (mai 20)
réf. DO107



N° 106 (févr. 20)
réf. DO106



N° 105 (nov. 19)
réf. DO105



N° 104 (juil. 19)
réf. DO104



N° 103 (avr. 19)
réf. DO103

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

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

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

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

1^{re} réf. 01 x 10,40 € = 10,40 €
 2^e réf. x 10,40 € = €
 3^e réf. x 10,40 € = €
 4^e réf. x 10,40 € = €
 5^e réf. x 10,40 € = €
 6^e réf. x 10,40 € = €

TOTAL À RÉGLER €

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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal Ville :

Téléphone

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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



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

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>. Les informations que nous collectons dans ce bon de commande 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.

L'AUTEUR



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

SUR LA PISTE DE L'ORIGINE DES REINS

Les systèmes excréteurs des animaux sont-ils aussi différents qu'il y paraît? Une enquête à l'échelle moléculaire s'imposait...

Tout semble distinguer les phoronidiens des vertébrés. Ces petits animaux marins en forme de ver coiffés d'une couronne de tentacules vivent nichés dans le sol, protégés dans un tube de chitine que leur peau sécrète, se nourrissant du plancton et des détritiques piégés dans leurs tentacules. D'ailleurs, dans l'arbre du vivant, les phoronidiens sont particulièrement éloignés des vertébrés: les bilatériens, les animaux à symétrie bilatérale, qui rassemblent la plupart des animaux connus, présentent deux grandes familles que les toutes premières étapes du développement embryonnaire distinguent, les protostomiens et les deutérostomiens, et les phoronidiens font partie des premiers, tandis que les vertébrés appartiennent aux seconds. Pourtant, phoronidiens et vertébrés ont un point commun, qu'ils partagent avec nombre d'autres bilatériens: un système

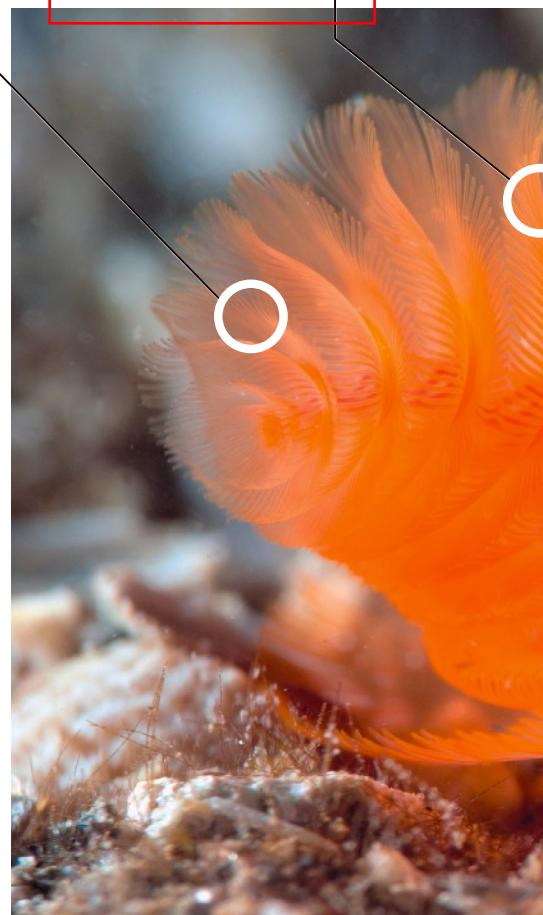
d'ultrafiltration qui leur permet de détoxifier l'organisme – une sorte de rein miniature, en somme. Certes, d'une branche du vivant à l'autre, ce système présente des différences morphologiques considérables. Néanmoins, dès les années 1940, des zoologistes se sont demandé si les organes excréteurs n'auraient pas, malgré leur diversité, une origine commune. Les études anatomiques n'ont pas suffi pour répondre, mais récemment, l'analyse moléculaire des systèmes excréteurs des animaux a levé le voile sur cette énigme.

DIS-MOI COMMENT TU FILTRES...

La plupart des protostomiens et des deutérostomiens présentent des organes excréteurs spécialisés. Chez les phoronidiens et nombre d'autres protostomiens comme les annélides et les mollusques, ce sont des néphridies, sortes d'entonnoirs filtreurs reliés à l'extérieur de l'organisme par un canal qui s'ouvre sur un pore. Chez les insectes, il s'agit des «tubes de Malpighi», et chez les nématodes, des «cellules de Rénette». Les vertébrés ont quant à eux des reins.

L'animal vit dans un long tube rigide de quelques millimètres de diamètre planté dans le sable.

On le rencontre dans les mers des zones tropicales et tempérées chaudes, notamment sur les côtes espagnoles, dans des sols meubles jusqu'à 30 mètres de profondeur.



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



Phoronidien doré
(*Phoronopsis californica*)

Taille : 2 à 6 cm
(partie émergée)
Jusqu'à 45 cm
(partie enfouie)

Cette douce couronne
hélicoïdale de quelque
2 000 tentacules – nommée
« lophophore » – entoure
la bouche de l'animal.
Orientée vers le courant,
elle capte les particules
alimentaires en suspension
grâce à des cils qui les
acheminent jusqu'à l'orifice.

EN CHIFFRES

1 MILLION

Un rein humain compte
environ 1 million de néphrons,
ses unités de base.

120

Chaque néphron présente
une surface de contact
importante avec des capillaires
sanguins et filtre les différentes
substances contenues dans
le sang. Le débit de filtration
de l'ensemble des néphrons
est de 120 millilitres par minute.

180

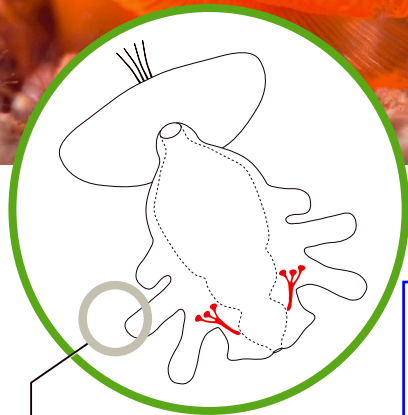
Chez l'humain, la filtration rénale
produit environ 180 litres
d'urine primaire par jour
(pour 1,5 litre d'urine définitive).

glucose ou les acides aminés). Dans ce cas, le fluide corporel (le sang chez les vertébrés, par exemple) traverse un filtre, dont il ressort une urine primaire. Ce filtre est lui aussi formé de cellules, mais cette fois, le liquide passe entre elles et non à travers.

Or les physiologistes se sont aperçus que ces filtres partageaient certaines caractéristiques – l'ultrastructure des cellules, par exemple –, ce qui suggérerait une origine évolutive commune de l'ultrafiltration. Ils ont émis deux hypothèses principales : soit tous les organes excréteurs ultrafiltrants étaient homologues, et les différences anatomiques dépendaient seulement de la taille de l'organisme ; soit la néphridie la plus simple (appelée « protonéphridie ») représentait l'organe ancestral et avait été remplacée plusieurs fois de façon indépendante par une métanéphridie, plus complexe. Impossible, cependant, d'aller plus loin. Certes, les néphrons, les unités de base des reins, ressemblaient à des néphridies, mais leur seule étude anatomique ne suffisait pas à statuer sur une éventuelle origine commune.

En pareil cas, l'accès aux données moléculaires débloque souvent la situation. Cependant, on connaissait peu de choses sur le développement de ces organes excréteurs, à l'exception de celui

Dans la seconde moitié du ^{xx}e siècle, des physiologistes ont étudié ces différents organes à la recherche de similarités. Ils ont ainsi découvert deux types de fonctionnement fort différents. Certains, comme les tubes de Malpighi et les cellules de Rénette, sont sécréteurs. Chez les insectes, l'urine primaire est produite par un transport actif du fluide corporel à travers les cellules de l'organe, suivi d'une réabsorption d'eau dans le tube digestif. D'autres, comme les reins des vertébrés ou les néphridies des phoronidiens, fonctionnent suivant le principe d'une ultrafiltration, suivie de sécrétions (des déchets comme l'urée) et de réabsorptions (de « bonnes » molécules comme le



Les larves transparentes
des phoronidiens présentent tout d'abord
des **protonéphridies**, puis, à la dernière
métamorphose (ici celle de *Phoronopsis*
harmeri), des **métanéphridies** (en rouge).
La différence de pression entre
le fluide dans lequel baigne la néphridie
et son intérieur assure la circulation
du liquide et sa filtration à travers la paroi.

du rein des vertébrés, exploré il y a une quinzaine d'années. C'est ainsi qu'en 2011, Peter Reddien, de l'institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, et ses collègues se sont intéressés à un système simple, celui de la régénération des protonéphridies chez une planaire, un ver plat (plathelminthe) classé dans les protostomiens, avec l'idée suivante. Puisque des gènes semblables sont utilisés chez nombre d'animaux pour le développement d'organes similaires comme les yeux, les muscles, le cœur, pourquoi n'en serait-il pas de même pour les organes excréteurs ?

De fait, l'équipe découvre que certains gènes régulateurs de la transcription (la première étape de l'expression des gènes) intervenant dans le développement du rein de vertébré (*eya*, *six1/2*, *pou3*, *sall*, *osr*...) sont également exprimés pendant la régénération des protonéphridies de la planaire. Ainsi, des gènes homologues, c'est-à-dire descendant d'un ancêtre commun, paraissent gouverner le développement d'organes excréteurs chez des animaux très éloignés sur le plan évolutif.

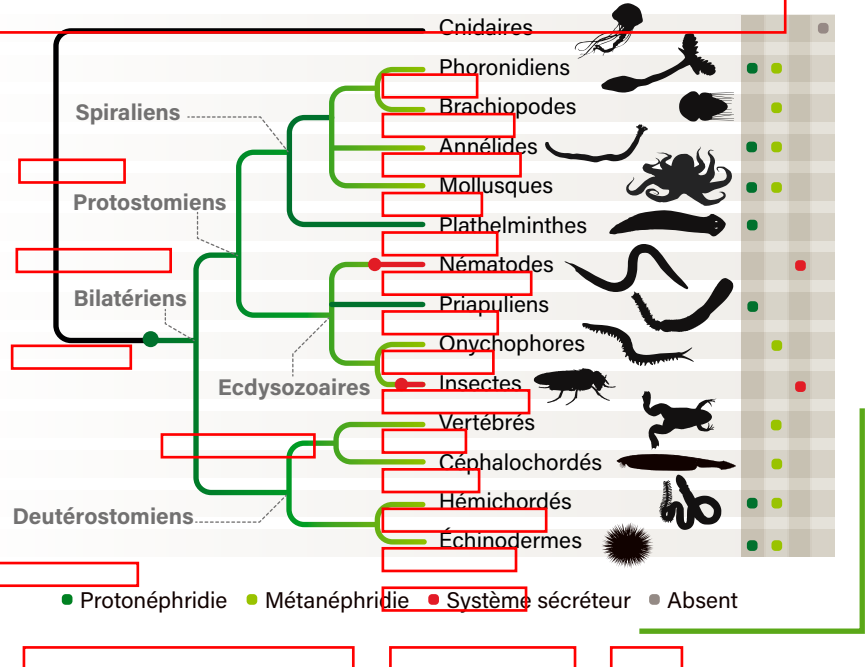
Peut-on généraliser un tel résultat ? Pour le savoir, Andreas Hejnal, de l'université de Bergen, en Norvège, a récemment réuni une équipe internationale afin d'explorer ces homologies moléculaires chez l'ensemble des animaux bilatériens. Pour limiter le travail, il s'est focalisé sur l'expression des gènes régulateurs de transcription *eya*, *six1/2*, *pou3*, *sall*, *hb* et *osr* mis en évidence lors de l'étude du rein des vertébrés. Il a prioritairement pioché les organismes dans les deux grands taxons des protostomiens, les spiraliens et les ecdysozoaires (les animaux à mue), puis il a complété l'étude en se tournant vers les deutérostomiens non vertébrés (voir l'encadré ci-dessus).

UN ARSENAL MOLÉCULAIRE COMMUN

Résultat : tous les gènes étudiés s'expriment chez les animaux choisis, hormis quelques exceptions qui s'expliquent facilement par des pertes secondaires. Ainsi, tout comme pour l'œil, le cœur, les muscles, une même boîte à outils moléculaires préside au développement des organes excréteurs ultrafiltrants. Pour enfoncer le clou, Andreas Hejnal a également recherché l'expression de quelques gènes (*nephrin*, *kirrel*, *zot*) codant des protéines de structure des parties filtrantes des reins. De même, ces gènes s'expriment chez tous les animaux étudiés, avec

L'ULTRAFILTRATION A LA COTE CHEZ LES ANIMAUX

Hormis certaines branches comme les insectes et les nématodes, munis d'un système sécréteur, les animaux bilatériens présentent des organes excréteurs fondés sur le principe de l'ultrafiltration, qu'il s'agisse de formes simples (protonéphridies) ou complexes (métanéphridies). En 2021, l'équipe d'Andreas Hejnal a recherché si des gènes clés du développement des reins des vertébrés intervenaient dans les autres branches des animaux bilatériens. En menant l'enquête sur des larves des membres de grands taxons des protostomiens (un phoronidien, un brachiopode et un annélide pour les spiraliens, un priapulien et un onychophore pour les ecdysozoaires), et sur un hémichordé pour les deutérostomiens, elle a montré que c'était bien le cas.



quelques exceptions qui, elles aussi, s'expliquent par des pertes secondaires. Tout cela conforte les diverses homologies proposées par les anatomistes et les physiologistes. En d'autres termes, protonéphridies et métanéphridies semblent bien avoir une origine commune : l'ancêtre commun de tous les bilatériens – protostomiens et deutérostomiens – présentait très probablement déjà un organe excréteur, dont les protonéphridies et métanéphridies actuelles sont des variations. Il est difficile, en revanche, de trancher entre les deux hypothèses des physiologistes. Néanmoins, les pertes secondaires plaident plutôt pour des origines indépendantes des métanéphridies.

Et qu'en est-il des insectes ? Les phylogénies sont d'une grande clarté : l'ancêtre commun des arthropodes, dont ils font partie, était pourvu de néphridies. Il y a donc eu remplacement de celles-ci par les tubes de Malpighi, et il en est de même pour les nématodes avec les cellules de Rénette. Des adaptations au milieu terrestre ? ■

BIBLIOGRAPHIE

- L. Gasiorowski et al., **Molecular evidence for a single origin of ultrafiltration-based excretory organs**, *Curr. Biol.*, 2021.
- M. L. Scimone et al., **A regulatory program for excretory system regeneration in the planarians**, *Development*, 2011.
- G. R. Dressler, **Advances in early kidney specification, development and patterning**, *Development*, 2009.
- E. E. Ruppert et P. R. Smith, **The functional organization of filtration nephridia**, *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.*, 1988.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À

Pour la Science

3 FORMULES
AU CHOIXFORMULE
PAPIERFORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIEFORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

79€

Au lieu de 114,40€

99€

Au lieu de 174,40€

29%

de réduction*

31%

de réduction*

43%

de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

PAG22STD



**OUI, je m'abonne
pour 1 an à**

Pour la Science

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,80€

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

79€

Au lieu de 114,40€

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

99€

Au lieu de 174,40€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

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

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

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques.
Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement
de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine
uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site
boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter
séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

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

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret : 311 797 393 000 23 - APE 5814 Z

L'AUTEUR

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

COQUILLES CONGELÉES, COQUILLES ALTÉRÉES

La qualité de ces perles de la gastronomie
se dégrade quand on les congèle.

La coquille Saint-Jacques est au centre de l'attention: dans les controverses franco-britanniques sur la pêche, mais aussi dans les explorations scientifiques récentes de son goût. Parmi ces dernières, l'une porte sur la question de la congélation: des coquilles congelées valent-elles des coquilles fraîches? La congélation sert à conserver les coquilles entre le lieu de pêche et les points de vente. Leur nuit-elle? À l'université de Morioka, au Japon, Chunhong Yuan et ses collègues ont testé la congélation à -60°C , avec une transition de 25 minutes aux températures auxquelles se forment des cristaux de glace (entre -1 et -5°C).

Les tests sensoriels au bout de moins d'un jour de congélation ont été sans appel: la quasi-totalité des jurés reconnaissaient en aveugle des coquilles qui avaient été congelées. Et cette reconnaissance se faisait sur la consistance: l'examen au microscope a montré que les myofibrilles des muscles, composées de segments répétés d'unités contractiles essentiellement protéiques apparaissaient plus courtes dans les tissus qui avaient été congelés. La formation de glace avait endommagé ces structures biologiques, faisant perdre de la consistance. Les chercheurs ont constaté sans l'expliquer que l'acidité diminuait avec la durée de congélation. Plus ennuyeux, pour des durées de congélation plus longues, des enzymes produisaient des composés odorants (notamment des alcools à huit atomes de carbone) grâce auxquels les dégustateurs différenciaient les coquilles fraîches et de celles congelées, au point qu'ils jugeaient ces dernières inacceptables pour des sashimis.

Les coquilles Saint-Jacques s'apprécient pleinement lorsqu'elles sont fraîches.

Pour étudier l'évolution de la saveur, encore faut-il savoir ce qui la compose! À ce propos, les chercheurs de Chunhong Yuan ne connaissaient pas l'étude de l'équipe de Sebastian Dirndorfer, à l'université technique de Munich, la «seconde exploration scientifique récente» du goût de la coquille. Les Saint-Jacques sont réputées «sucrées», mais ces chimistes, utilisant des techniques de fractionnement couplées à des tests sensoriels, n'ont pas pu déceler de sucres responsables de cette sensation. En revanche, ils ont établi que la saveur caractéristique du mollusque est principalement due à 27 composés: des acides aminés contribuent à la saveur «douce», d'autres molécules sont responsables de la sensation de «bouillon de poulet» (acide glutamique, acide succinique, nucléotides), des ions (sodium, chlorure, potassium, phosphate) ont aussi des effets (salés, amers, etc.).

Toutefois, comme les dégustateurs parvenaient à distinguer le goût des coquilles fraîches de celui de solutions préparées avec ces composés, les chimistes ont traqué les substances manquantes. Ils ont découvert l'importance sensorielle de composés azotés, de la famille des «opines» ou des ammonium quaternaires (un atome d'azote avec quatre groupes). Il reste à suivre ces composés en cours de congélation. ■



COQUILLES SAINT-JACQUES (NON CONGELÉES), AU LARD, SAUCE KIENTZHEIM

- 1 Détacher le muscle des coquilles en glissant la lame d'un couteau contre la partie plane de la coquille fraîche. Les parer, les laver à l'eau claire et les réserver sur un torchon.
- 2 Dans un four préchauffé à 180°C , étendre de minces tranches de lard sur une plaque, et les faire griller jusqu'à ce qu'elles soient bien croustillantes (environ 20 minutes).
- 3 Pendant ce temps, préparer un beurre noisette en faisant fondre, dans une petite casserole, un morceau de beurre jusqu'à ce qu'une légère coloration brune apparaisse. Arrêter la cuisson aussitôt.
- 4 Pour la sauce Kientzheim, battre un jaune d'œuf dans une terrine, avec le jus d'un citron, beaucoup de poivre et du sel. Puis, quand la main supporte de rester sur le flanc de la casserole de beurre noisette, verser ce dernier goutte-à-goutte dans la terrine, en fouettant comme pour monter une mayonnaise.
- 5 Enfin, faire délicatement revenir les coquilles dans une grosse noix de beurre, jusqu'à ce qu'elles perdent leur translucidité. Les servir chaudes, couvertes du lard croustillant, et entourées de sauce Kientzheim.

ABONNEZ-VOUS À

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

Pour la
Science

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+
HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

29 %
de réduction *

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

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

PAG22STD

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

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

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)

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €. En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>.

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

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

4 / **MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB**

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

p.24

20 %

On estime à 20 % la part de la forêt amazonienne déboisée actuellement. On a longtemps pensé que le « point de bascule » rendant sa destruction irréversible était de 40 %. Mais en prenant en compte les effets du changement climatique et des phénomènes externes, comme la répétition des incendies, la balance serait de l'ordre de... 20 %!

p.40

1 NANOMÈTRE

En 2019, une équipe de chimistes a réussi à actionner un engrenage constitué de deux roues de 1 nanomètre de diamètre, chacune dotée de six dents.

p.20

Selon Grothendieck, il est important, pour les scientifiques, de retrouver l'état d'esprit de l'enfance, car c'est le moment où l'on est le plus créatif, l'imagination n'étant pas bridée.

JEAN-PIERRE BOURGUIGNON mathématicien

p.92

NÉPHRON

Le néphron est l'unité structurale et fonctionnelle du rein. Il filtre les substances contenues dans le sang grâce à une grande surface de contact avec les capillaires sanguins. Un rein humain compte environ 1 million de néphrons, de quoi filtrer près de 180 litres par jour.

p.52

ÉVÉNEMENT MIYAKE

En 2012, la physicienne japonaise Fusa Miyake a découvert qu'un gigantesque orage géomagnétique, déclenché par une puissante éruption solaire, est survenu en l'an 775. Depuis, ces superéruptions, dont on a retrouvé des traces à plusieurs moments de l'histoire de la Terre, portent son nom. Un tel événement pourrait fortement endommager les satellites et les réseaux de télécommunication sur Terre.

p.88

L₂

Le point de Lagrange L₂ est un point d'équilibre gravitationnel dans le système Soleil-Terre. Suivant l'axe défini par ces deux corps, il se situe à 1,6 million de kilomètres au-delà de la Terre. Les astronomes y ont envoyé plusieurs télescopes spatiaux : WMAP, Herschel, Planck, Gaia et le dernier arrivé, en janvier 2022, James-Webb.

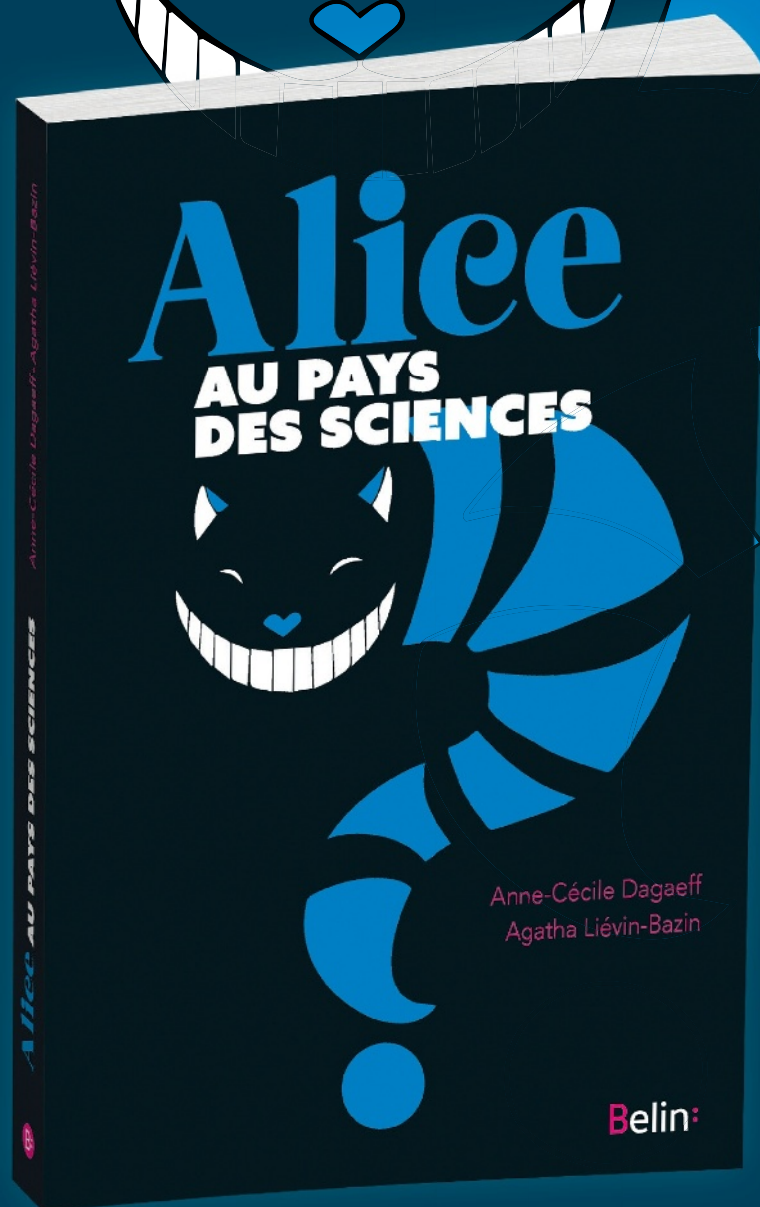
p.78

GABA

Comme la dopamine et le glutamate, cette molécule (l'acide gamma-hydroxybutyrique) est un messager entre les neurones – un neurotransmetteur. Mais alors que les deux premiers excitent les neurones, le GABA est le principal inhibiteur de ces cellules : il « éteint » les neurones en réduisant leur activité électrique.

LE CONTE

LE PLUS FASCINANT
DE VOTRE ENFANCE,
ÉCLAIRÉ PAR LA SCIENCE !



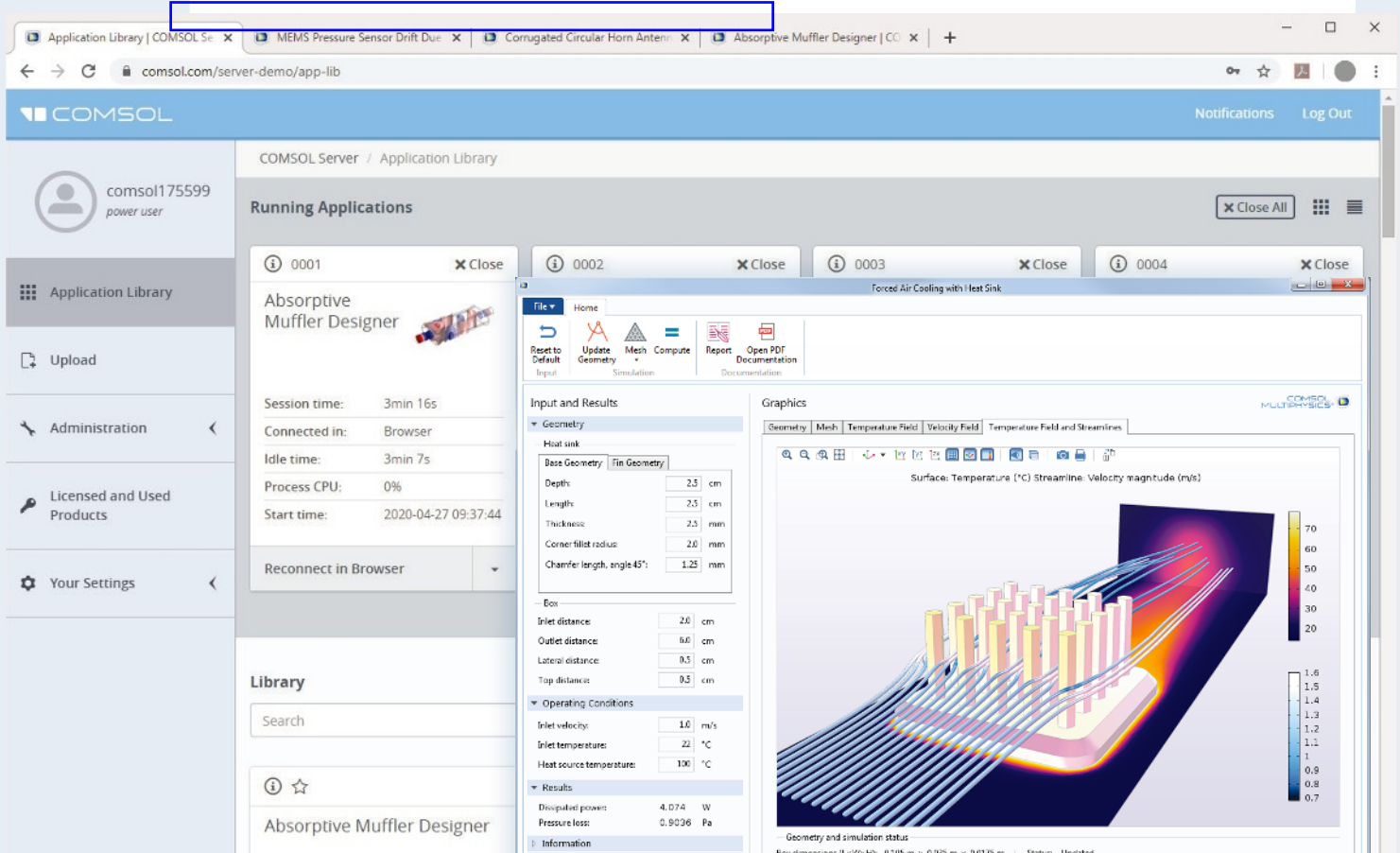
Belin:

ÉTUDE DE CAS

Accélérez et améliorez le développement de vos produits.

Les ingénieurs et les chercheurs de l'industrie accélèrent le développement de produits en créant des applications de simulation numérique et en les déployant au sein de leurs organisations. COMSOL Multiphysics® vous permet de créer des applications spécialisées et COMSOL Server™ et COMSOL Compiler™ vous aident à les distribuer aux bons collaborateurs et au bon moment dans votre cycle de développement de produits.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/product-development



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.