POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

L 13256 - 514 H - F: 6,90 € - RD

AOÛT 2020
N° 514

ÉCONOMIE
CALCULER AU MIEUX LA TAXE CARBONE

MATHÉMATIQUES
L'UNIVERS DES TRIPLETS PYTHAGORICIENS

ARCHÉOLOGIE
L'ENFANT AU SOMPTUEUX COLLIER DE BA'JA

LA VOIE LACTÉE SE DÉVOILE

Comment des collisions continuent de façonner notre galaxie

TULLBERGIA
L'ARTHROPODE QUI A SURVÉCU À 30 GLACIATIONS

BEL : 7,6 € - CAN : 11,6 CAD - DOM/S : 7,7 € - Réunion : A : 7,7 € - ESP : 7,6 € - GR : 7,6 € - ITA : 7,6 € - LUX : 7,6 € - MAR : 94 MAD - TOM : 1040 XPF - PORT. CONT. : 7,6 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 9,1 TND

Diplômes d'Université de l'Observatoire de Paris

	EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS	LUMIERES SUR L'UNIVERS
Niveau	Licence 1	Licence 1 à Master 1
Suivi	Formation en présentiel ou à distance Cours magistraux filmés et retransmis en direct	Formation en ligne Tutorat personnel et individualisé Cours thématiques avec de nombreux exercices
Objectifs	Acquérir un panorama des connaissances actuelles en astronomie et astrophysique auprès d'astronomes professionnels	Acquérir des bases solides en astrophysique à travers les parcours thématiques proposés Se spécialiser grâce aux exercices suivis et corrigés à distance par un astronome professionnel
Contenu	Cours et TD (Mécanique Céleste, Ondes et Instruments, Soleil, Cosmologie, Galaxies etc.) Stage pratique d'une semaine à l'Observatoire de Meudon (optionnel et sous conditions) Stage d'observation à l'Observatoire de Haute Provence (optionnel et sous conditions)	Des parcours thématiques adaptés à tous : • Des étoiles aux planètes (L1-L2) • Cosmologie et Galaxies (L2) • Mécanique céleste (L3) • Sciences planétaires (L3) • Fondamentaux pour l'astrophysique (L3) • Fenêtres sur L'Univers (M1) • Instrumentation (M1) Plusieurs centaines d'exercices corrigés individuellement
Pages Web	http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/	http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/
Contact	contact.duecu@obspm.fr	contact.dulu@obspm.fr

Dates limites d'inscription
3 septembre 2020
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

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

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

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

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Maud Bruguière, Pauline Colinet, Denis Duboule, Alexis Duchesne, Bruno Faivre, Ian Hogg, Paul Indelicato, Julien Masbou, Fabrice Mottez, Jérôme Novak, Philip Supply, Martino Trassinelli, Caroline Vanhoove

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: https://boutique.pourlascience.fr
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél. 03 67 07 98 17
Adresse postale:
Next2C – Service abonnements Pour La Science
26 BD Président Wilson
CS 40032670 85 Strasbourg cedex
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; Stéphanie Troyard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassort:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmuth
President: Dean Sanderson
Executive vice president: Michael Florek

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

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

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

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

INTROSPECTIONS GALACTIQUES

Ceux qui ont la chance, de plus en plus exceptionnelle, de se trouver dans un endroit dépourvu de pollution lumineuse ont la possibilité de contempler des ciels nocturnes profonds et abondamment constellés. Et pour peu qu'ils aient une idée réaliste de la nature des points lumineux criblant la voûte céleste et de leurs colossales distances, le spectacle invite à la méditation sur l'immensité du cosmos… et sur notre insignifiance.

La vue d'un beau ciel nocturne fait ressortir un autre élément spectaculaire: cette large traînée blanchâtre qu'est la Voie lactée et qui correspond à la galaxie où nous nous trouvons. Comme des myriades d'autres galaxies, elle contient quelques centaines de milliards d'étoiles. Mais à quoi ressemble-t-elle vue de l'extérieur, loin et hors de son plan? Et quelle position occupons-nous dans ce gigantesque édifice?

Malgré les difficultés liées au fait que nous la voyons de l'intérieur et par la tranche, on savait que la Voie lactée est de la famille des galaxies spirales: une sorte de disque qui présente des bras lumineux partant de la région centrale et courbés en spirale, où naissent un grand nombre d'étoiles. Combien de bras? Avec une «barre» centrale ou non? Jusque récemment, le flou régnait sur ces questions et bien d'autres.

De grands programmes d'observation, impliquant des réseaux de radiotélescopes et le satellite *Gaia*, de l'Agence spatiale européenne, qui a cartographié en trois dimensions près de deux milliards d'étoiles, ont dernièrement abouti à un portrait beaucoup plus précis de notre galaxie (*voir pages 20 à 33*). *Gaia* a même fait de l'archéologie galactique en fournissant des indices sur le passé lointain de la Voie lactée et ses collisions avec d'autres galaxies – dont l'une est peut-être à l'origine du Système solaire… Comme quoi, en l'absence de regard extérieur, les efforts d'introspection peuvent être étonnamment fructueux! ■

SOMMAIRE

N° 514 /
Août 2020

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Des neurones Q pour hiberner
- GW190814, un signal doublement atypique
- Un nouvel atome exotique à la loupe
- Un immense centre cérémoniel maya
- Une goutte en lévitation sur un fluide
- Dichromatisme chez le canari
- Un noyau pas si magique
- Pseudo-embryons en laboratoire

P. 14
LES LIVRES DU MOIS

P. 16
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Les prophètes du web
Gilles Dowek

P. 18
QUESTIONS DE CONFIANCE
Des masques aux usages dévoyés
Virginie Tournay

GRANDS FORMATS

P. 38
ARCHÉOLOGIE
L'ENFANT AU COLLIER DE BA'JA
Marion Benz

Il y a 9000 ans, les habitants d'un village néolithique à Ba'ja, en Jordanie, ont enterré un enfant orné d'un collier de 2600 perles dans une tombe soigneusement édifiée. Que révèle ce traitement spectaculaire?

P. 56
ÉCOLOGIE
LES SOLS AUX BONS SOINS DES COLLEMBOLES
Jérôme Cortet

Tout petits arthropodes souvent méconnus, les collemboles abondent dans les sols et contribuent à la qualité de ces derniers. Ces animaux ont ainsi acquis une place privilégiée en écologie théorique et appliquée.

P. 46
ÉCONOMIE
COMMENT CALCULER LA TAXE CARBONE?
Gilbert E. Metcalf

La lutte contre le changement climatique est un point important de la campagne présidentielle américaine. L'un des enjeux est d'établir une taxe pratique qui fera baisser les émissions de dioxyde de carbone. Reste à trouver le juste prix..

P. 64
BIOLOGIE
TULLBERGIA, SURVIVANT DE L'EXTRÊME
Douglas Fox

Une espèce de collembole, minuscule animal apparenté aux insectes, a survécu à plus de trente périodes glaciaires dans les terres les plus rudes de l'Antarctique. Comment expliquer cette prouesse?

POUR LA SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION

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

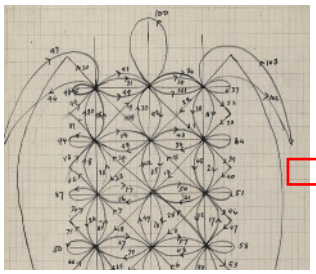
- **Notre sélection d'articles**
- **Des offres préférentielles**
- **Nos autres magazines en kiosque**

Inscrivez-vous www.pourlascience.fr

En couverture:
© Ron Miller (Voie Lactée)
© Igor Siwanowicz (Tullbergia)

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

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



P. 72
HISTOIRE DES SCIENCES

DES ETHNOLOGUES AU PAYS DES MATHÉMATIQUES
Eric Vandendriessche et Céline Petit

Dès la fin du XIXe siècle, les anthropologues se sont intéressés à l'art de compter dans les sociétés non occidentales. Mais il a fallu plusieurs décennies pour que mathématiciens et anthropologues étudient les pratiques mathématiques de ces sociétés.

CAHIER PARTENAIRE
PAGES I À III (APRÈS P. 34)

Accident nucléaire
Comment contenir le cœur fondu d'un réacteur?

Parrainé par
IRSN

À LA UNE

ASTROPHYSIQUE

P. 20
COMBIEN DE BRAS POUR LA VOIE LACTÉE?
Mark J. Reid et Xing-Wu Zheng

La structure de notre galaxie ne nous est pas bien connue. Mais à l'aide de radiotélescopes, les astronomes viennent d'en brosser un portrait plus précis, où se dessinent mieux les bras spiraux et la position du Système solaire.

P. 30
« LE SYSTÈME SOLAIRE EST PEUT-ÊTRE NÉ D'UNE COLLISION GALACTIQUE »
Entretien avec Carine Babusiaux

Le satellite *Gaia* livre de nombreuses informations sur la Voie lactée, sa structure, l'histoire de sa formation... et celle du Système solaire. Carine Babusiaux nous présente les résultats les plus récents de cette mission.

RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL

DANS LES ARCANES DES TRIPLETS PYTHAGORICIENS
Jean-Paul Delahaye

La géométrie des triangles rectangles a entraîné l'arithmétique des triplets pythagoriciens, connus depuis au moins deux millénaires. Ces triplets suscitent de nombreuses questions, qui ne sont pas toutes résolues.

P. 86
ART & SCIENCE
Une météorite dans l'œil
Loïc Mangin

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
En route vers Mars! Mais quelle route?
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
Le plus vieux parasite du monde
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Beurre et huile, oc et oïl réconciliés
Hervé This

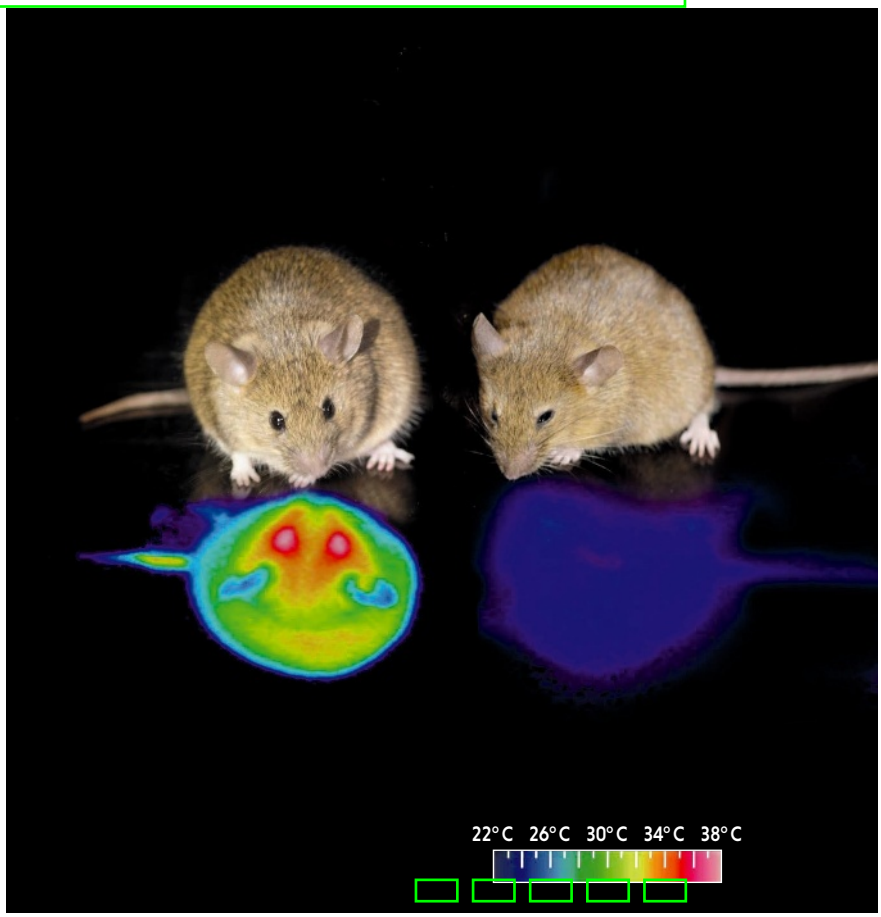
P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

P. 6 *Échos des labos*
P. 14 *Livres du mois*
P. 16 *Homo sapiens informaticus*
P. 18 *Questions de confiance*

NEUROSCIENCES

DES NEURONES Q POUR HIBERNER



Une souris témoin *(à gauche)* à côté d'une souris placée dans un état de torpeur. Chacune est associée à son image infrarouge qui indique sa température corporelle. Comme pour les animaux qui hibernent, la souris à droite a une température inférieure de près de 10 °C à la normale.

Deux équipes ont identifié une population de neurones qui, une fois activés, suffisent à plonger des souris en hypothermie profonde, une forme d'hibernation.

Des personnes se réveillent et sortent de caissons vitrés après plusieurs années de voyage spatial, ou quelques mois de confinement imposé… Pure science-fiction? Peut-être plus pour très longtemps, si l'on en croit la découverte récente de deux équipes indépendantes, celle de Takeshi Sakurai, de l'université de Tsukuba, au Japon, et celle de Michael Greenberg, de la faculté de médecine de Harvard, à Boston: elles ont montré qu'il est possible de plonger certains mammifères dans un état de torpeur proche de l'hibernation, en activant une population de neurones, les neurones Q.

La température corporelle des mammifères est stable, car rigoureusement contrôlée, et oscille un peu autour d'une valeur fixe. Cependant, dans des conditions difficiles d'approvisionnement en nourriture, certaines espèces hibernent: l'animal s'endort et sa température corporelle chute de 5 à 10 °C, voire davantage, ce qui limite les dépenses d'énergie. On pense évidemment à l'ours, mais c'est aussi le cas de la souris: cet animal entre parfois dans un état de torpeur qui dure en général moins de 24 heures. Dans cet état, sa température corporelle chute, son métabolisme diminue, ses rythmes cardiaque et respiratoire ralentissent.

Les chercheurs japonais et américains ont utilisé cette capacité des souris à «hiberner» sur de courtes périodes de temps afin de comprendre les mécanismes fins de la régulation thermique chez les mammifères. En effet, jusque-là, on savait seulement qu'une région cérébrale précise, le noyau préoptique médian de l'hypothalamus, était impliquée dans ce phénomène.

L'équipe japonaise a d'abord identifié chez des souris une population de neurones excitateurs de cette région, qui expriment un peptide, l'amide pyroglutamyle RF, ou QRFP. Par différentes techniques, les chercheurs ont activé ces

© Université de Tsukuba

neurones dits «Q» chez les souris : ces dernières se sont mises dans un état de torpeur, avec une température corporelle de 23-24 °C. Les animaux se réveillaient ensuite en bonne santé, sans aucun signe de dommages cellulaires et tissulaires, et avec un comportement parfaitement normal, même après un sommeil de deux jours. En outre, une autre population de neurones de l'hypothalamus continuait à réguler leur température corporelle (devenue basse), afin que les souris puissent encore s'adapter aux conditions extérieures au moment de leur courte hibernation.

L'équipe américaine a privé des souris de nourriture pendant plus de 24 heures afin qu'elles entrent en hibernation, puis elle a identifié les neurones impliqués dans la diminution de la température corporelle. Bien entendu, les neurones Q en faisaient partie. Et quand les chercheurs les ont activés, ils ont également provoqué un état de torpeur chez les rongeurs, malgré la présence de nourriture.

Ces neurones existent également chez les rats qui, pourtant, n'hibernent jamais. En stimulant ces cellules, l'équipe japonaise a provoqué chez ces animaux un état de torpeur artificielle similaire à celui des souris. Les deux équipes ont également caractérisé avec davantage de précision l'ensemble des neurones du circuit de thermorégulation de la région préoptique médiane de l'hypothalamus, et montré que les neurones Q sont bien ceux qui induisent une hypothermie profonde, mais qu'ils ne sont «mobilisés» que chez certaines espèces de mammifères.

L'idée d'une hypothermie thérapeutique se profile toutefois. Les scientifiques rappellent en effet que ces neurones Q et le circuit de régulation thermique corporelle se ressemblent chez tous les mammifères et sont par conséquent certainement présents chez l'homme. Mais il reste à le vérifier… et à être en mesure de les activer. Une forme d'«hibernation artificielle thérapeutique», de courte durée, où le métabolisme diminue considérablement, serait utile pour limiter les dégâts cellulaires ou tissulaires après un accident cardiaque ou un accident vasculaire cérébral. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

T. M. Takahashi *et al.*, *Nature*, en ligne le 11 juin 2020 ; S. Hrvatin *et al.*, *ibidem*

ASTROPHYSIQUE

GW190814, un signal doublement atypique

Le 14 août 2019, les détecteurs d'ondes gravitationnelles Ligo et Virgo ont repéré la fusion d'un système binaire hors norme. Astrid Lamberts, chargée de recherche à l'observatoire de la Côte d'Azur et membre de l'équipe Virgo, nous présente les caractéristiques de l'événement GW190814.

Propos recueillis par SEAN BAILLY

ASTRID LAMBERTS
chercheuse à l'observatoire de la Côte d'Azur, à Nice

En quoi consiste l'événement GW190814 ?

Il s'agit d'un système de deux objets compacts qui ont fusionné en émettant des ondes gravitationnelles. Les deux détecteurs *Ligo*, aux États-Unis, et celui de *Virgo*, en Italie, ont enregistré le signal correspondant à cette coalescence le 14 août 2019. L'analyse montre que le système binaire se composait d'un trou noir de 23 masses solaires et d'un second objet, de nature inconnue, de 2,6 masses solaires. Leur fusion a donné naissance à un trou noir de 25 masses solaires.

Cette coalescence est-elle atypique ?

D'abord, la différence de masse entre les deux objets est très grande, dans un rapport proche de 9. Le seul autre événement asymétrique que nous avions observé, GW190412, avait un rapport de masses juste inférieur à 4. L'intérêt des systèmes asymétriques est que leur signal est plus riche : nous pouvons en extraire beaucoup plus d'informations sur les caractéristiques du système binaire. Nous avons, par exemple, une très bonne précision sur la masse du plus petit objet de la fusion.

Pourquoi cette masse est-elle si intéressante ?

Lorsqu'une étoile massive arrive en fin de vie, son cœur s'effondre et forme un trou noir, ou une étoile à neutrons pour des astres un peu moins massifs. Jusqu'à présent, les astronomes avaient constaté que les étoiles à neutrons les plus massives ne dépassaient jamais 2,5 masses solaires et les trous noirs les plus légers étaient toujours au-dessus de 5 masses solaires. On observe donc une discontinuité, un *gap*, dans les masses de ces objets astrophysiques. Ce gap est-il le résultat d'un biais observationnel qui reste à identifier ou est-il bien réel ? Certains modèles qui décrivent l'explosion des étoiles massives reproduisent ce gap, mais l'objet de GW190814 à 2,6 masses solaires bouscule cette idée. Il reste à comprendre comment cet objet s'est formé et quelle est sa nature.

Sait-on expliquer l'origine de ce système binaire asymétrique ?

Quand on examine les modèles, il est très difficile de produire des systèmes binaires asymétriques qui fusionnent en un temps raisonnable, c'est-à-dire inférieur à l'âge de l'Univers, ou avec une probabilité de réalisation non négligeable. Mais GW190814 et GW190412 suggèrent que les systèmes asymétriques sont loin d'être rares. Il reste à élucider le mécanisme de leur formation.

Un scénario part d'un amas globulaire comportant de nombreux astres, où l'on va avoir pas mal d'échanges dynamiques et des captures successives. On pense que c'est ainsi que des trous noirs atteignent plusieurs dizaines de masses solaires. Cependant, dans un tel amas, les corps les plus massifs tendent à se regrouper au centre et les petits se retrouvent en périphérie. Il est donc très peu probable qu'un système binaire asymétrique se forme.

Une solution est d'imaginer un milieu avec beaucoup d'effets dynamiques et une grande quantité de gaz. Ce dernier freine les mouvements des corps légers, ce qui augmente les chances de former des systèmes binaires asymétriques. Certains théoriciens suggèrent que le disque d'accrétion d'un trou noir supermassif dans des noyaux actifs de galaxies fournirait un tel environnement.

Nous en saurons plus dans les années à venir. Pendant sa troisième campagne de prise de données, d'avril 2019 à mars 2020, la collaboration *Ligo-Virgo* a identifié 56 signaux de coalescences potentielles. Ils nous aideront à déterminer par quels canaux les systèmes binaires se forment, et quel mécanisme permet d'expliquer des cas particuliers tel que celui de GW190814. ■

R. Abbott *et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, vol. 896(2), L44, 2020

PHYSIQUE DES PARTICULES

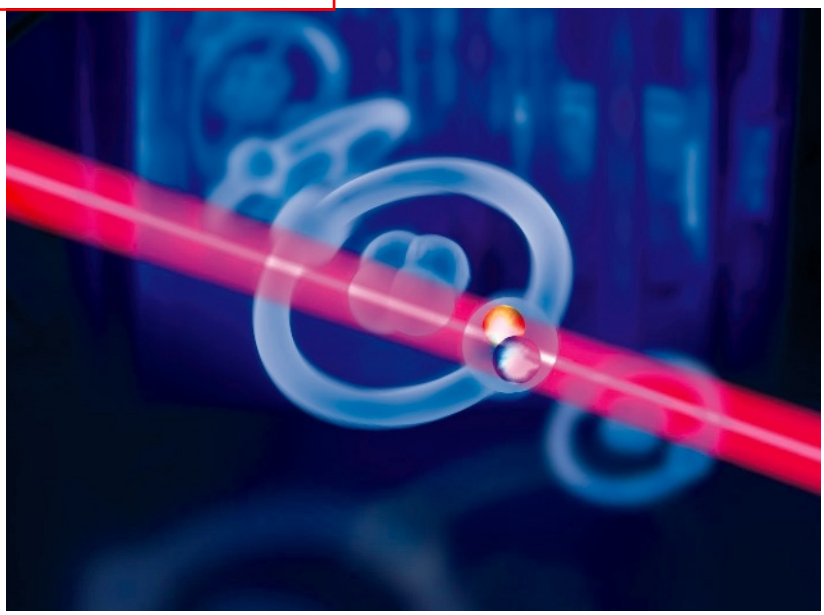
UN NOUVEL ATOME EXOTIQUE À LA LOUPE

Un atome d'hélium où un pion, particule instable, remplace l'un des deux électrons : cet assemblage hybride a été produit en laboratoire et mesuré avec précision.

Prenez un atome ordinaire avec son noyau entouré d'un cortège d'électrons, retirez l'un de ces derniers et remplacez-le par une autre particule de même charge électrique, tels un muon, un antiproton ou encore un pion. Vous obtenez un atome « exotique ». L'intérêt ? Ce système permet de mesurer avec précision différentes grandeurs physiques fondamentales comme la masse des particules. L'idée n'est pas nouvelle et est utilisée depuis des dizaines d'années. Mais Masaki Hori, de l'institut Max-Planck d'optique quantique, à Garching, en Allemagne, et ses collègues l'ont mise en œuvre sur un système très difficile à produire : un atome d'hélium où un pion remplace un électron.

Le pion appartient à la famille des mésons, particules composites constituées d'un quark et d'un antiquark. Les pions négatifs ont une durée de vie de 26 nanosecondes (26×10^{-9} seconde). Il faut donc *a priori* former l'hélium pionique en remplaçant un électron par un pion et réaliser les mesures en un temps inférieur à cette durée de vie extrêmement brève. Mais la situation est en fait encore plus délicate. Lorsque le pion se trouve à proximité d'un noyau atomique, il interagit très vite avec celui-ci et provoque sa fission. La durée de vie du pion est alors réduite à quelques picosecondes (10^{-12} seconde) !

L'équipe de Garching a résolu cette difficulté en dirigeant leur faisceau de pions vers une cible d'hélium liquide refroidi à une température de 2 kelvins. Si 98 % des pions réagissent instantanément avec les noyaux du milieu et sont détruits, les 2 % restants sont captés par un atome d'hélium : un électron est éjecté et l'électron restant, plus proche du noyau que le pion, fait écran entre les deux. La durée de vie de ces états, dits « de Rydberg », est suffisante pour réaliser une mesure. Pour ce faire, les chercheurs induisent, grâce à un laser, une transition entre l'état de Rydberg et un autre niveau atomique ayant une durée de vie plus courte. Lorsque cette transition s'opère, l'électron restant est éjecté et la probabilité d'interaction du pion avec le noyau devient très grande. Ce dernier se scinde alors en un proton, un neutron et un noyau de deutérium.



Vue d'artiste de l'atome d'hélium pionique excité par un faisceau laser.

0,84 femtomètre

C'EST LA TAILLE DU PROTON MESURÉE GRÂCE À UN ATOME EXOTIQUE, L'HYDROGÈNE MUONIQUE. LE MUON A LES MÊMES CARACTÉRISTIQUES QUE L'ÉLECTRON, MAIS IL EST 200 FOIS PLUS LOURD.

Sur une expérience d'environ 100 heures, 300 événements correspondant à la formation d'hélium pionique, soit à peine trois par heure, ont été détectés. Les chercheurs ont réussi, en ajustant progressivement la fréquence de la lumière laser, à déterminer la fréquence de résonance correspondant à l'énergie exacte de la transition entre les deux niveaux d'énergie. Cette énergie est liée à des grandeurs fondamentales comme la « constante de structure fine » et la masse du pion, qu'il serait alors possible d'évaluer.

Il reste cependant un obstacle à surmonter avant de pouvoir déterminer la masse du pion. Dans l'hélium liquide, les atomes exotiques subissent des collisions qui créent une incertitude sur la valeur de la fréquence de résonance. Afin de réduire cette incertitude, Masaki Hori et ses collègues comptent renouveler leur expérience avec différentes densités d'hélium liquide. ■

S. B.

M. Hori *et al.*, *Nature*, vol. 581, pp. 37-40, 2020

© Thorsten Naeser, Dennis Luck, MPQ

EN BREF

UN CERCLE DE PUITS À STONEHENGE

Petit à petit, l'immensité du paysage sacré de Stonehenge se révèle : à 3 kilomètres au nord-est du célèbre site, une enceinte de terre de 500 mètres de diamètre a elle aussi 4 500 ans : les Durrington Walls. Or voilà qu'une équipe de l'université de Bradford a découvert 20 puits de 5 mètres de profondeur et de 10 mètres de diamètre dessinant un vaste cercle de 864 mètres de rayon centré sur les Durrington Walls, ce qui donne à cette structure une très grande ampleur.

Internet Archaeology, https://doi.org/10.11141/ia.55.4

UNE PLANÈTE GÉANTE, MAIS NUE

David Armstrong, de l'université de Warwick, et ses collègues viennent de mettre en évidence, à 730 années-lumière de nous, une exoplanète 40 fois plus massive que la Terre et notée TOI 849 b. Elle décrit son orbite en seulement 18 heures, très près de son étoile. Ce serait soit une planète géante gazeuse comparable à Neptune ayant perdu son atmosphère d'hydrogène et d'hélium, soit une planète de ce type dont la formation s'est interrompue.

Nature, 2 juillet 2020

CHIENS DE TRAÎNEAU ET LOUPS SIBÉRIENS

Il y a 8 000 ans, les ancêtres des Inuits ont commencé à se répandre de la Sibérie au Groenland. Et leurs chiens ? Mikkel-Holger Sinding, de l'université de Copenhague, et son équipe ont comparé les gènes de dix chiens de traîneaux groenlandais à ceux d'un chien de traîneau de 9 500 ans et d'un loup de 33 000 ans, tous deux sibériens. Il en ressort que les chiens de traîneau actuels ont hérité de gènes de loups sibériens anciens, mais pas de ceux de loups américains. Les premiers chiens de traîneau seraient donc sibériens.

Science, 26 juin 2020

© Takeshi Inomata (en haut) ; J. C. Semuto Ngabonziza et al., Nature communications, vol. 11, 2917, 2020. CC-by-SA 4.0 (en bas)

ARCHÉOLOGIE

UN IMMENSE CENTRE CÉRÉMONIEL MAYA

Dans l'État mexicain du Tabasco, l'équipe de Takeshi Inomata, de l'université d'Arizona, a découvert ce qui pourrait être la plus grande structure maya préhispanique. Les chercheurs l'ont mise en évidence, ainsi que 21 autres terrassements similaires, en cartographiant précisément la forme du sol à partir de données acquises par lidar aéroporté. Les céramiques et outils d'obsidienne retrouvés sur place ont des affinités avec ceux des Mayas des Basses-Terres, qui vivaient à l'est.

Toutes ces structures datent d'entre 1000 et 800 avant notre ère, période de transition des habitants des futures Basses-Terres mayas depuis un mode de vie de chasseurs-cueilleurs vers un mode de vie paysan et sédentaire fondé sur la culture du maïs. Elles reproduisent toujours le même motif: une pyramide fait face à une plateforme rectangulaire située à l'est, dont elle est séparée par un long plateau rectangulaire – une place publique? – orienté nord-sud et délimité par de petits monticules. Pendant les solstices, les coins orientaux du plateau oriental permettent de viser depuis le haut de la pyramide les lever et coucher du soleil; les archéologues voient donc dans les 21 terrassements des centres cérémoniels, où les premiers Mayas célébraient des fêtes religieuses saisonnières.

Malgré son immensité, la structure du centre cérémoniel d'Aguada Fénix, au Mexique, est difficilement reconnaissable dans le paysage moderne. On distingue à peine une plateforme au premier plan.

Situé sur le lieu-dit d'Aguada Fénix, le plateau du plus grand de ces centres cérémoniels mesure 1413 × 399 mètres et s'élève de 10 à 15 mètres au-dessus des environs; face à sa pyramide occidentale, se trouve une plateforme orientale large de 401 mètres. Les chercheurs ont estimé que le terrassement de ces structures a mobilisé 3,2 à 4,3 millions de mètres cubes de terre… soit le travail d'une équipe de 1000 personnes pendant 27 à 35 ans… ■

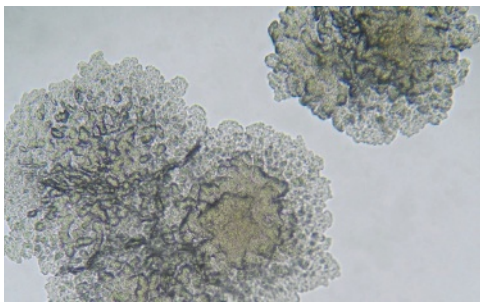
FRANÇOIS SAVATIER

T. Inomata *et al.*, *Nature*, vol. 582, pp. 530-533, 2020 ; P. A. McAnany, *ibidem*, pp. 490-492

MICROBIOLOGIE

UNE ANCIENNE LIGNÉE DE TUBERCULOSE

Face à la tuberculose, la maladie infectieuse la plus meurtrière au monde, les chercheurs espèrent que la reconstitution des étapes évolutives du bacille impliqué, *Mycobacterium tuberculosis*, permettra de mettre le doigt sur des processus physiologiques et métaboliques critiques pour la virulence. Ceux-ci seront autant de cibles potentielles pour des traitements ou des vaccins. Ce bacille dériverait d'un ancêtre qui n'était pas aussi virulent et qui ressemblait à des bactéries cousines, *Mycobacterium canettii*, cantonnées géographiquement à la corne de l'Afrique. Jean Claude Semuto Ngabonziza, du centre biomédical du Rwanda, et ses collègues ont identifié en Afrique de l'Est deux souches exceptionnelles de tuberculose, appartenant à



Culture de bactéries *Mycobacterium tuberculosis* de la souche trouvée au Rwanda.

une lignée située, d'un point de vue évolutif, entre *M. canettii* et les autres lignées de *M. tuberculosis*. Ils ont identifié des gènes présents dans ces souches ancestrales et absents chez les autres, dont l'un est impliqué dans la synthèse de la vitamine B12. ■

NOËLLE GUILLON

J. C. Semuto Ngabonziza *et al.*, *Nature Communications*, vol. 11, article 2917, 2020

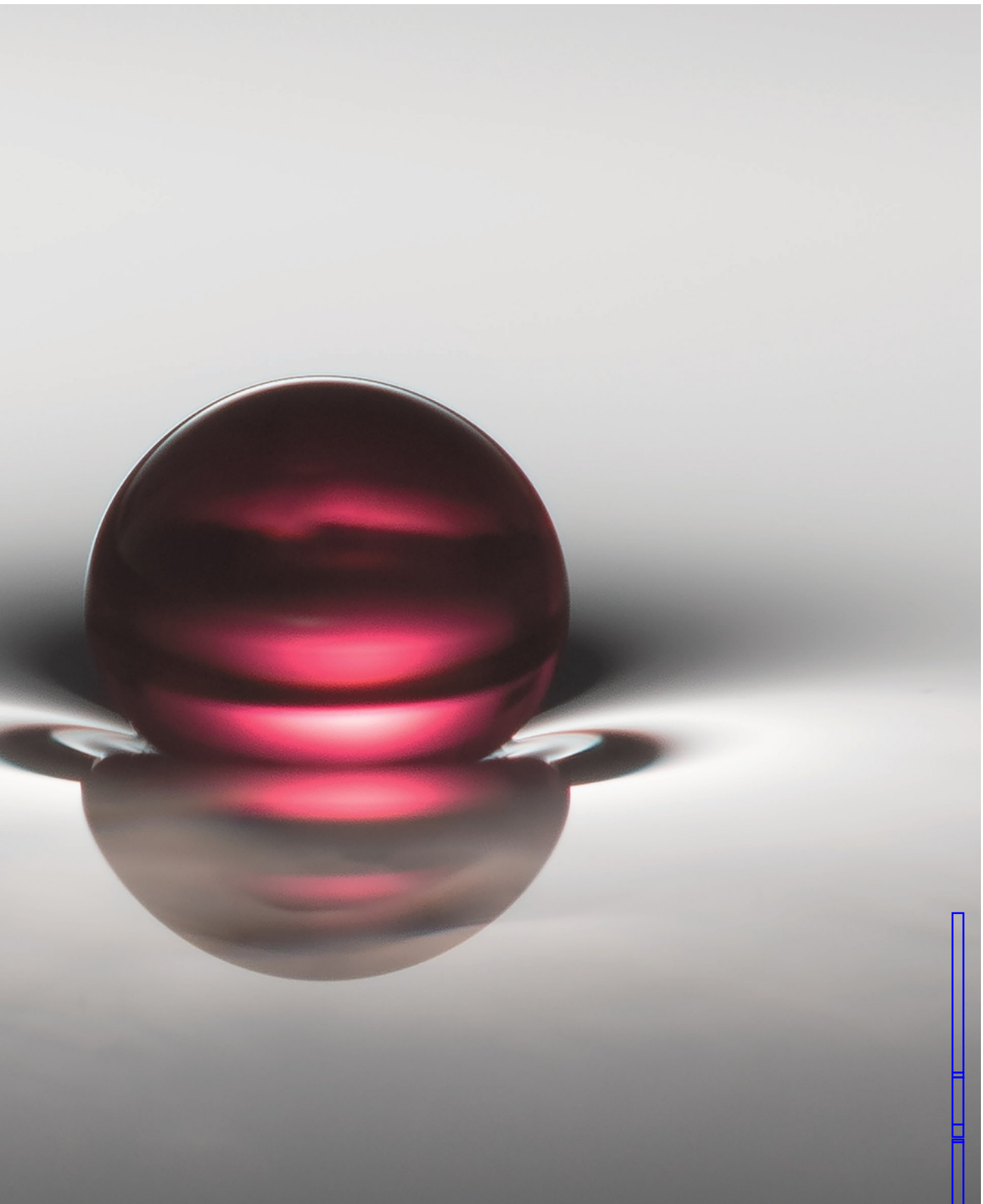
UNE GOUTTE EN LÉVITATION SUR UN FLUIDE

Quand une goutte d'eau tombe sur une poêle chauffée à un peu plus de 100 °C, elle s'évapore en quelques secondes. Mais si on chauffe la poêle jusqu'à environ 200 °C, la goutte s'agite dans tous les sens sur la surface et mettra jusqu'à une minute pour s'évaporer. En réalité, la goutte lévite : en se vaporisant progressivement, l'eau forme une couche de vapeur sous la goutte, couche sur laquelle elle flotte. Ce phénomène est connu sous le nom d'« effet Leidenfrost ». Il est possible de réaliser ce phénomène avec une goutte sur un bain liquide (*ci-contre, une goutte d'éthanol incluant un colorant rouge sur de l'huile de silicone*). Benjamin Sobac, de l'université libre de Bruxelles, et ses collègues ont analysé les mouvements de convection qui se mettent en place dans le bain chaud.

Les physiciens ont constaté que sous la goutte, l'effet Leidenfrost entraîne au sein du bain la formation d'un vortex de convection toroïdal et d'axe vertical. Ils ont identifié trois mécanismes entrant en jeu : la force d'entraînement de la vapeur qui se forme sous la goutte et s'échappe vers l'extérieur (elle entraîne le fluide du centre vers l'extérieur), la poussée d'Archimède (la vaporisation de la goutte induisant un transfert de chaleur du bain vers la goutte, le liquide du bain est localement plus froid sous la goutte ; étant donc plus dense, il se déplace vers le bas) et l'effet Marangoni (la variation de la température locale à la surface du liquide fait varier la tension superficielle qui tend à ramener le liquide vers le centre). Selon les propriétés de la goutte (densité, volatilité, etc.), les mécanismes dominants diffèrent et le vortex tourne dans un sens ou dans l'autre. ■

S. B.

B. Sobac *et al.*, *Physical Review Fluids*, vol. 5, article 062701, 2020



© Florence Cavagnon, https://www.instagram.com/florencecavagnon/

ÉVOLUTION

DICHROMATISME CHEZ LE CANARI

Chez les oiseaux, les mâles sont souvent plus colorés que les femelles. On parle de dichromatisme sexuel. Pour Darwin, cette différence de plumage s'expliquait par l'action des femelles qui, durant des générations, avaient choisi de s'accoupler avec les mâles arborant les plus vives parures. Ces derniers seraient ainsi devenus au cours du temps, par sélection sexuelle, de plus en plus colorés. Or récemment, des chercheurs ont suggéré que le dichromatisme sexuel des oiseaux résulterait plutôt d'une perte de couleur chez les femelles. Ce plumage, permettant un meilleur camouflage, serait le produit de la sélection naturelle. Alors sélection sexuelle ou sélection naturelle ? Małgorzata Gazda, de l'université de Porto, et ses collègues apportent un nouvel élément à ce débat.

Les chercheurs ont identifié le gène *BCO2* comme l'origine du dichromatisme sexuel chez les canaris mosaïques. Ce gène code une protéine qui intervient dans la dégradation des caroténoïdes, des pigments issus de l'alimentation. La production de protéines BCO2 est inversement proportionnelle à la quantité des pigments présents dans les plumes du canari mosaïque, la protéine étant très concentrée dans les plumes blanches, et peu présente dans les plumes jaunes et rouges. Reste à comprendre comment la différence sexuelle s'est opérée, mais il faudrait pour cela connaître l'état ancestral de *BCO2* chez ces oiseaux.

L'étude montre toutefois qu'il existe vraisemblablement d'autres gènes à l'origine du dichromatisme sexuel parmi les oiseaux. Il n'est donc pas exclu que, selon les espèces, différents scénarios évolutifs soient à l'origine du dichromatisme sexuel. ■

© R. J. Lopes

Canaris mosaïques, femelle *(à gauche)* et mâle.

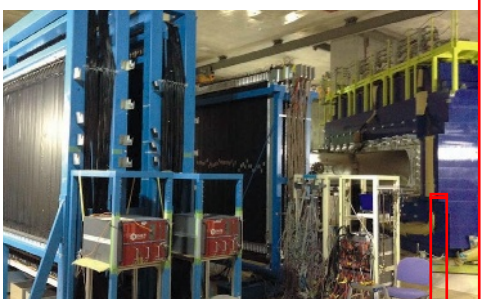
CORALINE MADEC

M. A. Gazda *et al.*, *Science*, vol. 368, pp 1270-1274, 2020

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

UN NOYAU PAS SI MAGIQUE

Quand on modélise le noyau atomique par des couches occupées par les protons d'une part et les neutrons d'autre part, on s'attend à un gain de stabilité pour des noyaux présentant 2, 8, 20, 28, 50… protons (ou neutrons) : on parle de « noyaux magiques ». Celui de l'oxygène 28 est très instable du fait d'un excès de neutrons : il se désintègre en moins de 10^{-22} seconde et son étude en laboratoire est un vrai défi. Mais avec 8 protons et 20 neutrons, ce noyau présente-t-il malgré tout un caractère doublement magique ? Pour le savoir, Olivier Sorlin, du Ganil (Grand accélérateur national d'ions lourds, à Caen), et ses collègues, au sein d'une équipe internationale, ont étudié le fluor 28 qui a une structure proche de l'oxygène 28 et qui devrait partager certaines de ses propriétés. Leurs mesures indirectes ont permis de sonder la structure en neutrons du noyau de fluor 28 (l'occupation des couches) et de conclure qu'elle n'était pas compatible avec un caractère magique pour l'oxygène 28. ■



© Collaboration Samurai

Lors de la désintégration du fluor 28, un neutron est émis. Il est détecté grâce à quatre murs de détecteurs verticaux *(les éléments bleus à gauche)*.

S. B.

A. Revel *et al.*, *Physical Review Letters*, vol. 124, article 152502, 2020

EN BREF

UN CONDENSAT SUR L'ISS

Un condensat de Bose-Einstein est un gaz d'atomes à une température proche du zéro absolu, où les atomes se retrouvent dans le même état quantique et exhibent des comportements collectifs particuliers. La réalisation et la mesure d'un tel système reposent sur une procédure subtile qui utilise des lasers et des champs magnétiques. La pesanteur est cependant un facteur perturbateur et limitant. Pour contourner ce problème, David Aveline, de Caltech, aux États-Unis, et ses collègues ont conçu un dispositif monté à bord de l'ISS, la Station spatiale internationale, dans lequel ils ont produit un condensat d'atomes de rubidium et l'ont maintenu pendant près d'une seconde.

Nature, 11 juin 2020

MOSAÏQUES SOUS VIGNE

En 1922, une *villa rustica* a été en partie fouillée à Negrar di Valpolicella, dans le nord de l'Italie. Puis elle est tombée dans l'oubli. Récemment, l'archéologue Gianni De Zuccato, chargé de localiser la villa et de la protéger, a dû la rechercher en creusant des tranchées. Et, sous une vigne, il vient de retrouver de magnifiques mosaïques en parfait état ! La partie résidentielle de la villa est donc à présent localisée et des bouts de murs indiquent où le péristyle et les bâtiments secondaires pourraient se trouver.

© Sap Società archeologica

ASTROPHYSIQUE

LES MAGNÉTARS, SOURCES DES FRB ?

Découverts en 2007, les sursauts radio rapides (ou FRB, pour *fast radio bursts*) sont des flashs très intenses de rayonnement de grande longueur d'onde et d'une durée de l'ordre de la milliseconde. Jusqu'à présent, seuls des FRB extragalactiques avaient été observés. Quelle est leur origine ?

Les magnétars (étoiles à neutrons présentant un champ magnétique intense) étaient une des hypothèses envisagées. Or avec les radiotélescopes *Chime*, au Canada, et *Stare2*, aux États-Unis, deux équipes viennent de montrer qu'un magnétar dans la Voie lactée, noté SGR 1935 + 2154, a émis un FRB. Celui-ci était cependant moins énergétique que tous les événements extragalactiques connus. Un autre mécanisme est-il en jeu ? ■

LUCAS GIERCZAK

Collaboration CHIME/FRB, https://arxiv.org/abs/2005.10324 ;
C. D. Bochenek *et al.*, https://arxiv.org/abs/2005.10828

CHIMIE

UNE ÉPONGE DÉPOLLUANTE

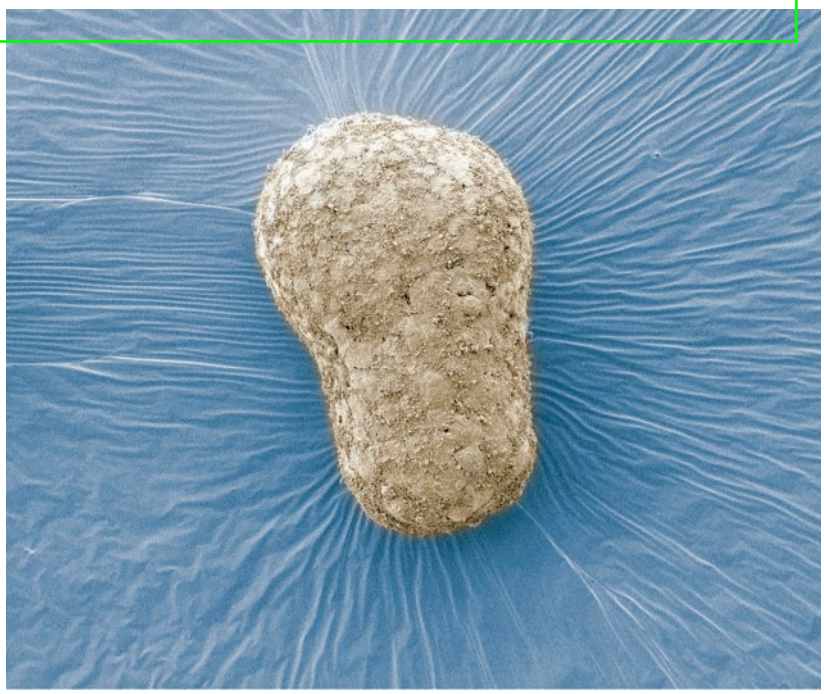
La persistance de certains pesticides, antibiotiques ou résidus industriels dans les eaux usées est un problème écologique majeur. Chimiquement stables et toxiques même en très faibles concentrations, ces composés organiques polluants sont très difficiles à éliminer. Une piste consiste à les oxyder totalement en les transformant en produits moins toxiques. Ces réactions nécessitent l'utilisation de peroxymonosulfate (PMS), un composé peu onéreux et non polluant déjà utilisé comme alternative à l'eau de Javel dans le traitement de l'eau. Mais il faut associer des catalyseurs souvent métalliques. Et comment éviter que ces derniers ne soient, eux-mêmes, une source de pollution ? Lingli Zhu et ses collègues, de l'université des sciences et technologies de la Chine de l'Est, à Shanghai, proposent d'utiliser des éponges synthétiques sur lesquelles on fixe le catalyseur, du sulfure de molybdène. ■

MARTIN TIANO

L. Zhu *et al.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, en ligne le 9 mai 2020

BIOLOGIE CELLULAIRE

PSEUDO-EMBRYONS EN LABORATOIRE



Un gastruloïde observé en fausses couleurs au microscope électronique à balayage.

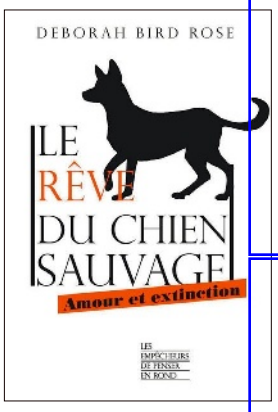
© Naomi Moris

Le développement embryonnaire est un processus complexe et réglé comme une horloge. La gastrulation est une étape importante ; c'est le moment à partir duquel la masse de cellules résultant de la fécondation commence à se différencier. Elle donne lieu à plusieurs tissus qui présentent les caractéristiques des parties du corps qu'ils deviendront : les muscles, le cœur ou encore le système nerveux. C'est durant ce processus que l'embryon commence à s'organiser dans l'espace, avec l'apparition d'un axe antéropostérieur. Si l'on connaît cette étape grâce à l'étude d'animaux modèles, elle n'a jamais été observée directement chez l'humain, notamment pour des raisons éthiques, puisque de nombreux pays interdisent l'étude en laboratoire d'embryons humains de plus de 14 jours (date de début de la gastrulation). Naomi Moris, à l'université de Cambridge, et ses collègues ont mis au point une solution qui devrait permettre d'étudier l'étape de la gastrulation chez l'humain en utilisant des « pseudo-embryons ».

En partant d'une colonie compacte de seulement 400 cellules souches dont ils ont accéléré chimiquement la différenciation, les chercheurs ont observé la formation d'agrégats tridimensionnels de cellules s'organisant selon un axe antéropostérieur. Mieux, ces structures, nommées gastruloïdes, présentent des caractéristiques clés d'un embryon de 21 jours après seulement 72 heures de croissance. En revanche, ce ne sont que des pseudo-embryons non viables : elles arrêtent leur développement au bout de quatre jours. Une analyse génétique de ces gastruloïdes a révélé que les cellules qui les constituent auraient fini par former les muscles du torse et du cœur, mais pas de système nerveux ou de cerveau. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

N. Moris *et al.*, *Nature*, vol. 582, pp. 410-415, 2020



HISTOIRE DES SCIENCES

TERRA INCOGNITA
Alain Corbin
Albin Michel, 2020
288 pages, 21,90 euros

«C'est pourquoi j'ai conçu ce petit livre comme un plaidoyer en faveur d'une histoire de l'ignorance.» Connu pour sa contribution majeure à l'histoire des sensibilités, l'auteur met ici en lumière de quelle façon la méconnaissance de notre planète et de son fonctionnement influençait profondément les pensées et les émotions de nos ancêtres.

Il a disposé son étude en trois actes. Dans le premier, il décrit comment le tremblement de terre de Lisbonne de 1755 marqua durablement les esprits du XVIIIe siècle. Il expose ensuite le lent recul des ignorances dans la première moitié du XIXe siècle, moment où l'étude des glaciers, des volcans, des nuages et d'autres phénomènes conduit à un début d'explication. Finalement, à partir de 1860, le recul de l'ignorance devient notable. La pose des câbles transocéaniques favorise la connaissance des abysses, la météorologie permet d'établir une dynamique de l'atmosphère, la naissante sismologie apporte une compréhension du volcanisme, la conquête des pôles commence...

L'un des grands intérêts de ce livre, et ce n'est pas le moindre, est de relier la diffusion des connaissances – qui ne sont finalement que des ignorances corrigées plus tard – à la diffusion du savoir par la littérature et l'art. Si, comme le romantisme l'illustrera, l'ignorance exacerbe l'imagination, son recul s'illustre aussi dans l'œuvre d'un Jules Verne, parfaitement documentée sur le savoir de son temps (l'atmosphère, les abysses, les pôles, etc.). Tout cela donne très envie de relire nos classiques d'un œil nouveau. La curiosité ainsi aiguisée pourra s'alimenter avec la bibliographie citée, accessible à tous, pour offrir une histoire élargie des champs abordés ici et nourrir ce plaidoyer tout à fait convaincant d'une histoire de l'ignorance géophysique.

DANIELLE FAUQUE
GHDSO, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY

SCIENCE ET SOCIÉTÉ

DÉTOURNEMENT DE SCIENCE
Jean-Marie Vigoureux
Écosociété, 2020
216 pages, 16 euros

C'est là un livre courageux sur la science. Il arrive au bon moment, à l'époque du réchauffement climatique, de la pollution, de la chute de la biodiversité et de bien d'autres menaces. La nouvelle et cruciale question que cet ouvrage pose est: les sciences ont-elles trahi nos attentes en s'alliant à l'industrie, à la finance et au libéralisme dérégulé? Voltaire, Condorcet, Comte, Berthelot, Curie et bien d'autres «apôtres» des Lumières avaient fait de la méthode scientifique le modèle de la société future. Jusqu'à récemment, «science» était synonyme de «progrès», un mot qui n'a pas de connotation négative. Son objectif était nécessairement l'amélioration du monde et rares étaient ceux qui en doutaient tant les avancées étaient grandes. Mais un nombre croissant de «mécréants» se demandent si, associée à la technologie et à la marchandisation, la science n'est pas en train de détruire la planète et de mettre en danger l'espèce humaine... Ils confondent souvent connaissance et technique, idéal et profit, mais comment leur en vouloir?

L'auteur est un professeur de physique émérite de l'université de Bourgogne-Franche-Comté qui a déjà signé quatre ouvrages de vulgarisation de la physique. Ici, il élargit sa réflexion au rôle de la science dans la société. Après s'être présenté et avoir défini son objectif, il retrace dans la première moitié du livre ce qu'il a nommé les «trois siècles de quête du bonheur». Dans la deuxième partie, il décrit «la marchandisation de la science». Dans la troisième, il fait l'éloge de la science telle qu'elle était avant sa dérive actuelle, puis il conclut: ne faut-il pas remettre la science au service de l'homme au lieu de subir son développement aveugle et dangereux?

PIERRE JOUVENTIN
ÉTHOLOGUE, DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS

ETHNOGRAPHIE

LE RÊVE DU CHIEN SAUVAGE
Deborah Bird Rose

La Découverte, 2020
224 pages, 18 euros

Pour réapprendre la nécessité de l'amour, qualité souvent dévolue aux seuls humains, Deborah Bird Rose s'est rapprochée des non-humains, en l'occurrence les chiens sauvages d'Australie. Bien plus, elle s'est immergée dans les communautés aborigènes, tout autant menacées d'extinction que les dingos de son étude. Le sous-titre paradoxal du livre «amour et extinction» précise l'intention de l'auteur sans en dévoiler la substantifique moelle. Cet ouvrage bien dans l'air du temps résulte d'une longue carrière à essayer de comprendre les relations entre humains et non-humains, tout en prenant en compte les dangers qui menacent les canidés sauvages d'Australie. En effet, le dingo – le plus grand prédateur terrestre d'Australie – est exterminé comme autrefois les loups en France.

C'est cet apprentissage de vie que l'anthropologue occidentale conte ici, mais elle est décédée avant d'assister à la tragédie flamboyante des derniers mois de 2019 et de la mort en masse des animaux locaux qui s'est ensuivie.

Elle a cherché à rendre compte des concepts totémiques, mâtinés d'animisme, des habitants du bush. Selon cette ontologie, tous les êtres vivants ont des apparences et une intériorité comparables. Il devrait donc être possible de communiquer, mais les humains ont perdu cette capacité que les dingos cherchent à leur rappeler par leurs chants de lamentation. «Quand les dingos sont entre eux dans le bush, ils marchent et parlent comme des humains. En revanche, quand les humains sont proches, ils reprennent la forme et le langage des chiens.» «Et si les voix des morts s'adressaient à nous?» L'autrice n'aura pu voir la traduction de son livre en français, mais gageons qu'elle connaisse aujourd'hui un amour éternel avec les dingos disparus trop tôt.

STÉPHEN ROSTAIN
ARCHÉOLOGUE, UNIVERSITÉ PARIS I, CNRS

SANTÉ PUBLIQUE

LA FRANCE MALADE DU MÉDICAMENT
Bernard Bégaud

L'Observatoire, 2020
192 pages, 18 euros

Que les laboratoires pharmaceutiques soient sans scrupule pour augmenter leurs profits n'étonne pas. S'il est sévère à leur égard, ce livre, antérieur à la pandémie de Covid-19, l'est beaucoup plus pour les autorités françaises, dont l'incapacité à résister aux laboratoires effraie.

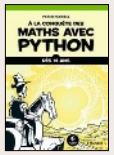
Revenant sur cinq affaires (Mediator, Lévothyrox, etc.), l'auteur, professeur de pharmacologie à l'université de Bordeaux au sein de l'équipe de pharmaco-épidémiologie dédiée au médicament et à la santé des populations et, entre autres, ancien directeur du département hospitalo-universitaire de pharmacologie de Bordeaux, estime que la France bat tous les records s'agissant du nombre de scandales liés au médicament. Les médecins français sont parmi les moins bien formés d'Europe à la prescription rationnelle des médicaments, ce qui multiplie les traitements inutiles ou trop longs (anxiolytiques, somnifères, statines...), d'autant plus lucratifs pour les laboratoires qu'ils peuvent induire des effets secondaires et leur sillage de traitements supplémentaires. L'auteur évalue à 10 milliards d'euros le gaspillage annuel ainsi provoqué. Mais lorsqu'il a suggéré au ministère de la Santé d'introduire dans l'enseignement une formation à la prescription, il s'est vu reprocher son manque de réalisme: sa proposition supposait de prendre une décision en commun avec le ministère de l'Enseignement supérieur!

C'est que l'administration française raisonne «en silo»: les services n'ont pas de vision globale. Chacun n'a d'yeux que pour son propre budget. L'éparpillement des responsabilités complique les prises de décision, et le lobbying des laboratoires se déploie sans obstacles sérieux.

Le profane que je suis sort de la lecture de ce livre défavorablement impressionné. Reste à savoir comment améliorer la situation.

DIDIER NORDON
ESSAYISTE ET MATHÉMATICIEN ÉMÉRITE

ET AUSSI



GALILÉE À LA PLAGE
Arnaud Cassan

Dunod, 2020
240 pages, 15,90 euros

Pour écrire ce livre, l'auteur nous a imaginés sur un transat, à la plage, essayant d'observer le ciel à l'œil nu, comme Galilée, puis à la «lunette», toujours comme lui. Des digressions placées dans des encadrés agrémentent un parcours qui nous fait passer de l'observation du ciel depuis la Terre, aux astres les plus visibles, au Système solaire, à la Voie lactée et au cosmos. Galilée, mais aussi de nombreux penseurs de l'Univers, nous charment par leurs pensées pionnières en leurs époques. Le tout *via* le style agréable et clair de l'auteur.

UN NATURALISTE FRANÇAIS CHEZ LES HELVÈTES
Thierry Malvesy

Favre, 2020
180 pages, 16 euros

Entre le 15 juillet et le 2 août 1860, Charles Louis Contejean se rendit en train de Montbéliard au fin fond du Valais, en Suisse, et même en Italie proche. Ce cofondateur de la Société d'émulation de Montbeliard était un grand botaniste, mais aussi un géologue, un climatologue, un linguiste, voire un ethnographe qui dessinait les coiffures féminines... Bref, un naturaliste complet dont l'infatigable et incessante activité d'observation fait de ce carnet de voyage un petit régal et un modèle de ce qu'était l'esprit scientifique à l'ancienne.

À LA CONQUÊTE DES MATHS AVEC PYTHON
Peter Farrell

Eyrolles, 2020
336 pages, 24,90 euros

Fonctionnant sur la plupart des plateformes informatiques, le langage de programmation Python est très apprécié par les pédagogues pour sa lisibilité, de sorte que beaucoup de scientifiques en herbe font avec lui leurs premières expériences de calcul. L'auteur met à profit nombre de thèmes mathématiques afin d'amener lycéens et enseignants désireux de s'approprier Python, ce langage interprété qui favorise la programmation orientée objet, à se familiariser avec les principaux concepts de la programmation et à les manipuler.

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

LES PROPHÈTES DU WEB

En temps de crise, « Je vous l'avais bien dit ! » est souvent asséné à qui veut l'entendre. Signe d'un génie ignoré ou juste un effet statistique ?

De nombreuses vidéos sur Youtube prédisent l'évolution future de la pandémie de Covid-19. Statistiquement, certaines auront vu juste.

Nous avons tous vu au moins l'une de ces vidéos troublantes, devenues virales depuis le début de la pandémie de Covid-19, qui nous montrent qu'il y a cinq ou dix ans, certains la prophétisaient déjà. Avant de déclarer ces prophètes grands sorciers du web, il est peut-être utile de se souvenir d'un résultat élémentaire de la théorie des probabilités : un événement peu probable finit presque sûrement par se produire, si les situations considérées sont assez nombreuses.

Les moteurs de recherche permettent d'illustrer ce résultat de manière frappante. Prenez deux mots qui n'ont aucun rapport entre eux, par exemple « Covid-19 » et « néolithique », et ouvrez une page web au hasard. Il est très peu probable que ces deux mots y apparaissent l'un et l'autre. Mais formulez une requête à un moteur de recherche et vous verrez que, parmi les milliards de pages que compte le web, il s'en trouve quelques-unes où ce miracle s'est produit. Ainsi, une telle requête sur Qwant, le jour où j'ai écrit cette chronique, m'a orienté vers un article de Jean Zammit, sur les nouvelles maladies du néolithique, publié dans… *Pour la Science* en 2006 ! La page web contenait quatre occurrences du mot « Covid-19 », dans un cartouche, ajouté automatiquement et *a posteriori*, indiquant quels étaient les articles les plus partagés ce jour-là sur le site du magazine.

> **Il y a tellement de gens qui disent n'importe quoi que certains finissent statistiquement par avoir raison**

À la fin du XX^e siècle, un défi consistait à trouver une paire de mots qui n'apparaissaient ensemble dans aucune page web, mais, avec la croissance du web, c'est devenu une mission impossible. En particulier, les publicités, insérées dans des pages sans aucun rapport, et les catalogues des bibliothèques excellent dans ces rapprochements improbables.

Un peu de calcul de probabilité nous montre que, si nous répétons n fois, de manière indépendante, une épreuve qui a une probabilité p de donner un résultat positif, la probabilité qu'au moins l'une de ces épreuves donne un résultat positif est $1-(1-p)^n$. Par exemple, si, un jour qui n'est pas un 29 février, vous assistez à un concert, la probabilité que vous fêtiez votre anniversaire ce même jour est très faible : 0,00274. Mais si 1000 personnes assistent à ce concert, la probabilité qu'au moins l'une d'elles fête son anniversaire ce jour-là vaut 0,936.

Comme il y a plus de 5 milliards de vidéos sur Youtube, si nous faisons l'hypothèse que 0,001 % d'entre elles, soit 50 000, prophétisent une catastrophe et qu'il y a 10000 scénarios de catastrophe possibles (un incendie en Indonésie, un tremblement de terre au Pérou, un hiver rigoureux au Canada, une pandémie virale…) et que l'une de ces 10000 catastrophes se produit, il y a une probabilité $1-(1-1/10000)^{50000}=0{,}993$ qu'elle ait été prophétisée sur Youtube.

De même, chaque jour, des dizaines de personnes prédisent une hausse du prix du pétrole, une baisse du prix du pétrole, un krach boursier, etc. Et quand un tel événement se produit, il y en a toujours au moins une pour déclarer : « Je vous l'avais bien dit ! »

Jadis, les exégètes de Nostradamus excellaient à trouver, dans son œuvre, une prophétie qui semblait, *a posteriori*, annoncer un événement advenu. Il semble que les moteurs de recherche aient désormais automatisé cette tâche.

Dans une société comme la nôtre, où l'information abonde, nous ne devons pas toujours faire confiance à ceux dont les prévisions passées sont avérées, car il y a tellement de gens qui disent n'importe quoi que certains finissent statistiquement par avoir raison. Mais nous devons surtout nous interroger sur la démarche qui les a menés à faire ces prévisions, c'est-à-dire nous demander comment ils savent ce qu'ils savent. ■

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

© Shutterstock.com/metamorworks

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET

15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE

Crédit photo : © Christophe Abramowitz

france inter

INTERVENEZ

ABONNEZ-VOUS AU PODCAST DE L'ÉMISSION

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

DES MASQUES AUX USAGES DÉVOYÉS

Les masques de protection sont souvent mal utilisés, contestés ou détournés. Le résultat d'une perception brouillée des risques sanitaires et des décisions administratives.

Masque FFP2 (pour *filtrant facial piece*), chirurgical, grand public dit « alternatif », en tissu artisanal, à usage unique, lavable... La rue est aujourd'hui un laboratoire social où les codes sanitaires du gouvernement soumettent à rude épreuve les comportements quotidiens. Officiellement, le respect des gestes barrières constitue l'injonction qui domine la généralisation de cette protection faciale. S'y conformer n'est pourtant pas le nerf de la confiance collective.

Depuis le déconfinement, les dévoiements de l'usage des masques sont nombreux sans que cela ne suscite de fortes réprobations. Réutilisés à de multiples reprises, les masques chirurgicaux sont rarement changés deux fois par jour comme il est préconisé. S'il doit couvrir le nez, la bouche et le menton, on le voit fréquemment accroché autour du cou de personnes téléphonant, voire fumant une cigarette... Aussi, la décontraction de la population concernant sa propre protection contraste avec la façon dont elle percevait les risques il y a peu. Début mai, seuls 21 % des Français n'éprouvaient pas de peur associée à l'épidémie de Covid-19, selon l'enquête du Cevipof sur les attitudes face à la pandémie.

Comprendre cette contradiction apparente suppose de prêter attention à l'application concrète des normes sanitaires. Face à la pénurie d'équipements de protection durant l'état d'urgence sanitaire, le Conseil d'État a été saisi par plusieurs dizaines de requêtes en référé-liberté émanant de professionnels de santé, d'avocats, de détenus, d'associations de défense des droits humains, de la magistrature, de victimes ou de précaires. Ces procédures d'urgence ont pour objet de dénoncer les atteintes graves et illégales à une liberté fondamentale émanant de l'administration.

> **Libertés et port du masque : l'expertise juridique est pointue et technique**

Le nombre anormalement élevé de ces recours témoigne de la difficulté pratique à établir la démarcation entre le droit à la santé des citoyens et les libertés fondamentales. Dans chaque jugement, l'impératif du masque est discuté à l'aune des risques de contamination selon la quantité, la taille des gouttelettes de toux de personnes infectées, les soins opérés sur les voies respiratoires, la vitesse de propagation du virus au regard de la densité carcérale, la durée de rétention des personnes testées positives...

À partir d'un état des connaissances scientifiques, ces professionnels du droit évaluent les risques sanitaires. Ils ont ainsi rappelé au maire de Sceaux, souhaitant rendre obligatoire le port du masque dans l'espace public que celui-ci ne pouvait pas être imposé en l'absence de circonstances particulières. La délimitation de nos libertés individuelles passe ainsi par une expertise juridique pointue, dont la technicité peut apparaître brutale aux yeux des citoyens et des élus locaux. Dès lors, la perception collective, tant de l'aléa biologique que de la légitimité du pouvoir de l'autorité en question, est brouillée.

À cette difficulté d'appréciation des risques d'exposition sur le terrain s'ajoute le florilège des masques exotiques « qui font mieux que rien », depuis le bandana négligemment posé en foulard ou noué à l'arrière du crâne en gangster, à celui en peau de python et d'iguane, proposé par un artisan en Floride, destiné à lutter contre ces reptiles envahissants de la région. À visée esthétique ou militante, le masque acquiert au cours du déconfinement des significations allant bien au-delà du seul impératif sanitaire pour lequel il a été généralisé.

Dans cette polyphonie sociale où le danger ne fait pas consensus, le porter relève autant de la prévention que d'un rituel collectif au sein duquel chacun tente de trouver sa place en se singularisant dans ce nouveau formalisme. ■

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

POUR LA SCIENCE

Vous êtes un fidèle lecteur de *Pour la Science* et vous êtes concerné par la vie de votre magazine ?

Qu'il s'agisse de choisir la prochaine couverture du magazine, de débattre des thématiques abordées ou de construire un nouveau format de revue, votre point de vue nous est précieux et nous permet de répondre au mieux à vos attentes. C'est en maintenant le lien avec vous que nous souhaitons avancer.

Pour cela, nous souhaitons constituer un **Club de lecteurs**. Pour y participer, il s'agirait dans un premier temps de nous faire part de votre désir de contribuer à ce projet et de nous en dire plus sur vous.

Pour plus de détails et pour répondre au formulaire d'inscription, merci de vous connecter à l'adresse suivante :

pourlascience.fr/statics/club-lecteurs

Nous avons besoin de votre avis !

En vous remerciant pour votre fidélité et pour le temps accordé,

L'équipe de *Pour la Science*

L'ESSENTIEL

> La structure de la Voie lactée, notamment le nombre de ses bras spiraux, est encore mal connue.

> De récents programmes d'observation, tels que *Bessel* dans le domaine radio, ont permis de dresser la carte de la Galaxie la plus précise à ce jour.

> La Voie lactée présenterait une barre centrale, quatre bras spiraux principaux et des segments de bras plus petits, comme celui où se trouve le Soleil.

LES AUTEURS

MARK J. REID
astronome à l'observatoire d'astrophysique Smithsonian, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, aux États-Unis

XING-WU ZHENG
professeur d'astronomie à l'université Nanjing, en Chine

Il nous est impossible d'avoir une vue d'ensemble de la Voie lactée. Des observations nous donnent néanmoins une idée de sa structure, illustrée par cette représentation d'artiste, qui montre une barre centrale très lumineuse et quatre bras spiraux principaux.

© Ron Miller

Combien de bras pour la Voie lactée ?

La structure de notre galaxie ne nous est pas bien connue. Mais à l'aide de radiotélescopes, les astronomes viennent d'en brosser un portrait plus précis, où se dessinent mieux les bras spiraux et la position du Système solaire.

Bravant les océans et les continents sauvages, les explorateurs du passé partaient à l'aventure, dressant au passage une carte des contrées qu'ils découvraient. Depuis cinquante ans, des explorateurs d'un nouveau genre se sont intéressés à une nouvelle *terra incognita* : l'espace. Ils ont envoyé des sondes pour étudier les planètes et les autres corps du Système solaire.

Nous commençons à avoir une bonne vision de ce voisinage proche. Cependant, celui plus étendu de la Voie lactée reste encore assez flou. La raison est simple : nous ne pouvons pas y aller pour y jeter un coup d'œil. L'idée d'expédier une machine sur un voyage de plusieurs millions d'années pour sortir de la Galaxie afin de l'observer dans son ensemble est complètement irréaliste. De fait, la Voie lactée cache bien des mystères que les astrophysiciens ont du mal à percer. Par exemple, de combien de bras spiraux la Galaxie est-elle dotée ? Où se trouve précisément le Système solaire dans cet ensemble ?

Grâce à de récents projets astronomiques, nous commençons à cartographier ce voisinage de l'intérieur. Avec les données collectées, nous construisons une image de plus en plus nette de la structure galactique. Cette entreprise d'envergure a impliqué plusieurs télescopes optiques et radio. Nous avons eu la chance d'obtenir près de cinq mille heures d'observation sur le réseau de radiotélescopes *VLBA* (*Very Long Baseline Array*). Nos premiers résultats précisent déjà la physionomie générale de la Voie lactée. Mais en plus d'avoir une meilleure idée de son aspect, nous commençons aussi à mieux comprendre pourquoi les galaxies comparables à la nôtre présentent des motifs spiraux et comment ceux-ci se forment.

L'étude des galaxies spirales prend sa source au début des années 1800. William Parsons, troisième comte de Rosse, en Irlande, a fait construire un télescope de 183 centimètres de diamètre, un géant pour l'époque, d'ailleurs surnommé le *Léviathan de Parsonstown*. Grâce à cet instrument, il a observé et dessiné ce que nous savons aujourd'hui être la galaxie du Tourbillon (M51). Ces travaux ont mis en évidence une des caractéristiques les plus singulières de M51, son tracé en spirale.

À cette époque, les savants n'avaient aucune indication sur la distance à laquelle se trouvait cet objet (ni les autres « nébuleuses » similaires) ni même sur les dimensions de la Voie lactée. Il était alors impossible de dire si le Tourbillon était une petite structure dans notre Galaxie ou un objet très grand et très lointain. Les débats sur la nature des nébuleuses se sont poursuivis pendant près d'un

siècle. Au début des années 1920, Edwin Hubble a définitivement tranché la question. En utilisant une technique développée par l'astronome Henrietta Leavitt pour mesurer les distances de certaines étoiles, il a montré que le Tourbillon et les autres galaxies se trouvaient loin au-delà de la Voie lactée. Cette découverte a aussi mis fin à l'idée que la Voie lactée englobait la totalité de l'Univers.

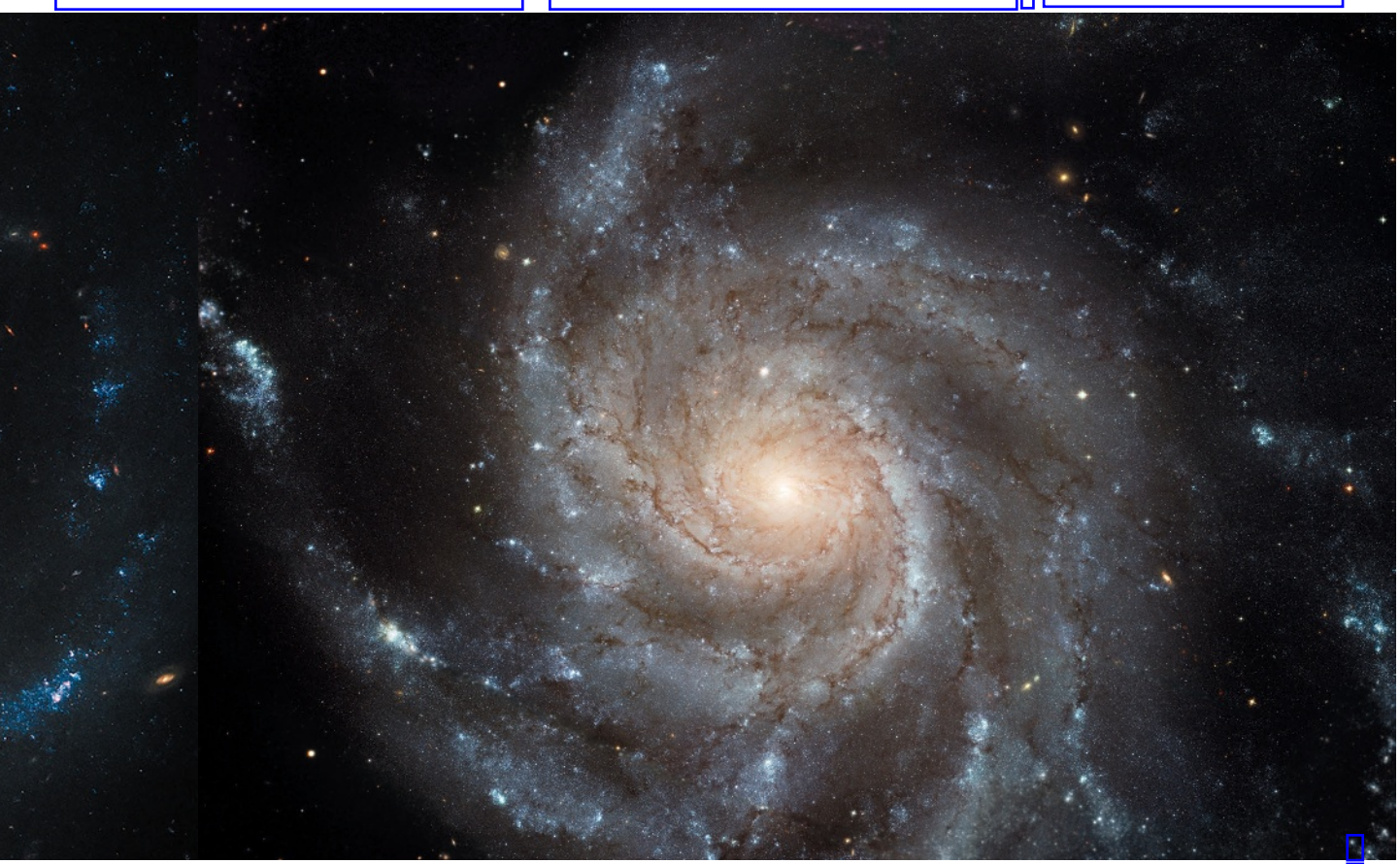
Quand on observe les galaxies lointaines, on distingue trois grandes catégories: les spirales, les elliptiques et les irrégulières. Les astronomes ont assez vite établi que nous vivons dans une galaxie spirale (en analysant les mouvements du gaz dans le disque galactique, la vaste région en forme de galette qui constitue la partie principale de la Voie lactée). Mais quel est son aspect précisément? Toutes les galaxies spirales ne sont pas identiques, comme l'illustrent les galaxies spirales voisines NGC 1300 et Messier 101, ou M101 (*voir les photos ci-dessous*).

La première, NGC 1300, présente une structure allongée et brillante dans sa zone centrale, que l'on nomme une barre, et deux bras bleutés spiraux qui démarrent aux extrémités de la barre et se courbent progressivement vers l'extérieur. À l'inverse de NGC 1300, la galaxie M101, dite aussi «du Moulinet», est dépourvue d'une barre centrale brillante, mais a davantage de bras spiraux.

On observe des barres dans la plupart des galaxies spirales et on pense que ces structures ont pour origine des instabilités gravitationnelles dans la partie la plus dense du disque galactique. Ensuite, le mouvement d'entraînement dû à la rotation de la barre donne naissance aux bras spiraux. D'autres mécanismes sont également proposés pour expliquer les bras: des instabilités gravitationnelles dues à d'importantes concentrations de masse dans le disque ou à des galaxies voisines. Les bras spiraux tendent à briller avec une lumière bleue; celle-ci est émise par de gigantesques pouponnières de gaz où se forment en grand nombre des étoiles massives.

QUEL GENRE DE SPIRALE?

Les astronomes ont longtemps pensé que la Voie lactée partageait des caractéristiques de ces deux galaxies. Elle aurait une barre comme NGC 1300 et plusieurs bras à l'image de M101. Mais au-delà de ces grandes caractéristiques, les chercheurs sont loin d'être unanimes sur les attributs de notre Galaxie. Des observations dans l'infrarouge du télescope spatial *Spitzer*, réalisées il y a plus de dix ans, suggéraient que la Galaxie ne possédait que deux bras. Mais des analyses portant sur les émissions radio de nuages de gaz interstellaires contenant de l'hydrogène neutre et du monoxyde de carbone, >

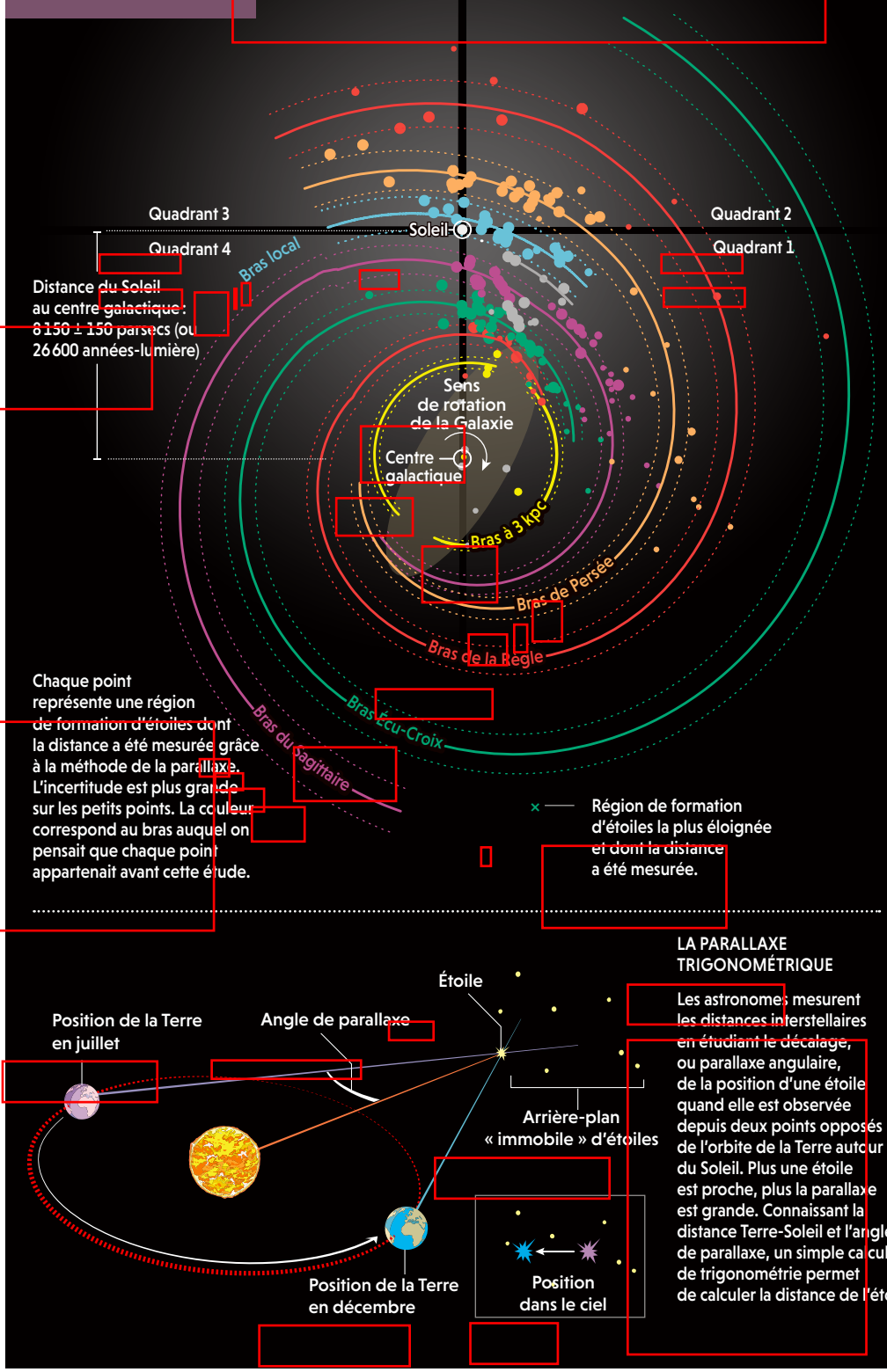


La Voie lactée est une galaxie spirale, mais quelle est sa structure précise? La galaxie NGC 1300 *(à gauche)* est constituée d'une magnifique barre centrale, de 100 000 années-lumière de longueur, et de deux bras spiraux. La galaxie M101 est dépourvue de barre, mais présente quatre bras spiraux. La Voie lactée partagerait des attributs de ces deux exemples.

© Nasa, ESA

UN TOURBILLON D'ÉTOILES

À partir des mesures de distances collectées durant des milliers d'heures d'observation *(ci-dessous)*, les chercheurs ont construit cette image de la Voie lactée *(à droite)*. Les données mettent en évidence quatre bras spiraux s'enroulant autour d'une barre centrale d'étoiles. À l'intersection de quatre quadrants qui subdivisent la Galaxie, le Soleil réalise un tour de la Galaxie en 212 millions d'années. Il se trouve près d'un fragment de bras spiral *(en bleu)*. De futures observations menées depuis l'hémisphère Sud de la Terre permettront de réaliser des mesures dans le quatrième quadrant.



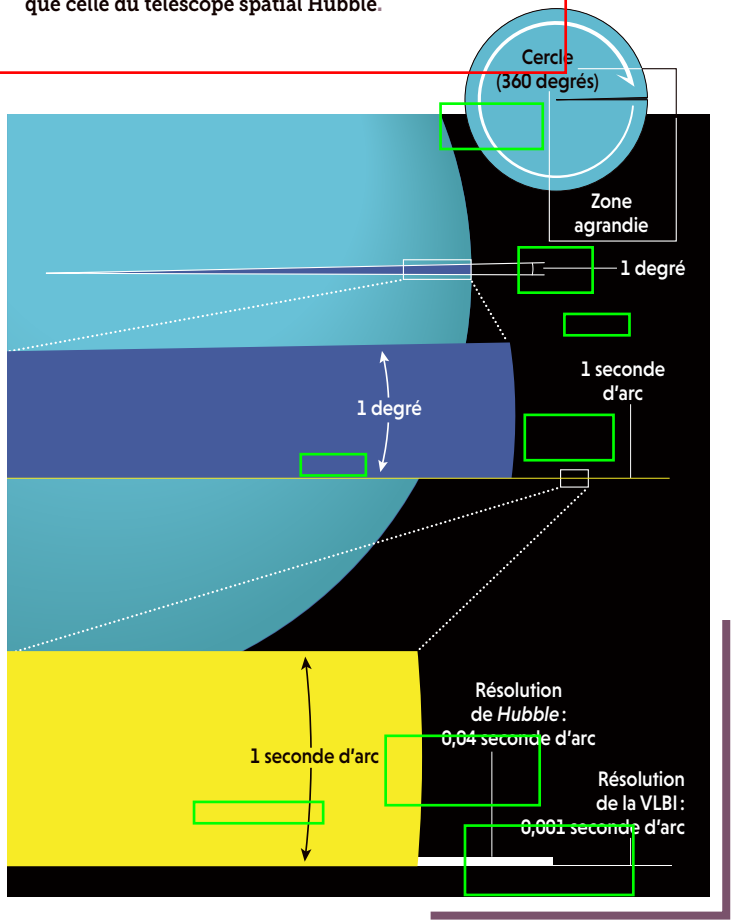
LA PARALLAXE TRIGONOMÉTRIQUE

Les astronomes mesurent les distances interstellaires en étudiant le décalage, ou parallaxe angulaire, de la position d'une étoile quand elle est observée depuis deux points opposés de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Plus une étoile est proche, plus la parallaxe est grande. Connaissant la distance Terre-Soleil et l'angle de parallaxe, un simple calcul de trigonométrie permet de calculer la distance de l'étoile.

© Elena Hartley (diagramme de la parallaxe) ; Xing-Wu Zheng et M. J. Reid, projet BeSSeL, université Nanjing, centre d'astrophysique Smithsonian, Harvard (schéma de la Voie lactée et illustration)

UN ŒIL DE LYNX TOURNÉ VERS LE CIEL

Pour mesurer la minuscule parallaxe d'étoiles très lointaines, se trouvant de l'autre côté de la Galaxie, les télescopes doivent avoir une résolution angulaire extrême. Cela n'est possible qu'en combinant les observations simultanées de plusieurs radiotélescopes à travers la planète. Cette illustration montre la performance de la technique VLBI (interférométrie à très longue base), dont la résolution est quarante fois meilleure que celle du télescope spatial Hubble.



> surtout présents dans les bras spiraux, laissaient penser que la Voie lactée avait quatre bras. Autre interrogation, les astronomes discutaient de la place du Soleil par rapport au centre de la Galaxie et à quelle distance il se trouve du plan du disque galactique.

Les premiers indices de l'existence de bras galactiques remontent à près de soixante-dix ans. Dans les années 1950, l'Américain William Morgan et ses collègues ont mesuré la distance d'environ 900 étoiles bleues et lumineuses. En positionnant ces astres sur une carte, ils ont fait apparaître trois segments de bras spiraux : le bras du Sagittaire, le bras local (ou bras d'Orion) et le bras de Persée. Peu après, Morgan et son équipe ont confirmé ce résultat en utilisant cette fois les émissions électromagnétiques de nuages d'hydrogène neutre (une raie d'émission caractéristique à la longueur d'onde de 21 centimètres). Quand le gaz est en mouvement par rapport à la Terre, la longueur d'onde enregistrée se décale à cause de l'effet Doppler (vers des longueurs d'onde plus courtes si le gaz se rapproche ou plus grandes s'il s'éloigne). Les chercheurs ont ainsi mesuré la vitesse du gaz dans la Galaxie, fournissant des indices sur sa distribution.

Pour cartographier la Voie lactée, les astronomes utilisent un système de coordonnées adaptées ayant pour origine le Soleil : par analogie avec la longitude et la latitude sur Terre, on définit la longitude galactique (l) et la latitude galactique (b). La longitude galactique vaut zéro dans la direction du centre galactique et augmente suivant le plan de la Voie lactée tel qu'on le voit depuis l'hémisphère nord. La latitude galactique dénote l'angle par rapport au plan de la Galaxie.

En traçant des graphiques représentant la vitesse du gaz (hydrogène neutre, mais aussi monoxyde de carbone) en fonction de la longitude, Morgan et ses collègues ont obtenu des arcs continus. Ces derniers pouvaient être interprétés comme des bras spiraux. Cette approche, cependant, est confrontée à de nombreuses difficultés (ambiguïtés sur les distances et incertitudes assez élevées) qui ne permettent pas de préciser avec assurance la structure spirale de la Galaxie.

Pour observer les objets de la Galaxie, les astronomes sont confrontés à un obstacle : la présence de grandes quantités de poussières dans le milieu interstellaire. Ces poussières absorbent une part non négligeable de la lumière qui se propage dans la Voie lactée. Dès lors, dans à peu près toutes les directions où nous regardons, notre vue ne porte pas très loin dans le disque galactique. La taille de la Voie lactée présente un second obstacle. La lumière émise par des astres se trouvant de l'autre côté de la Galaxie met plus de 50 000 ans à nous parvenir. Du fait de ces distances, il est très difficile de déterminer quelles étoiles sont proches et lesquelles sont vraiment lointaines.

UNE GALAXIE POUSSIÉREUSE

Ces dernières années, de nouveaux télescopes spatiaux sensibles à la lumière visible et des radiotélescopes au sol sont entrés en fonction. Ils fournissent de nombreuses informations sur les questions qui nous intéressent. Par exemple, la mission *Gaia*, lancée en 2013, a pour objectif de mesurer avec précision la distance de plus de un milliard d'étoiles dans la Galaxie. Ces données révolutionneront certainement nos connaissances sur les différentes populations stellaires présentes dans la Voie lactée. Mais parce que cet observatoire

© Elena Hartley

spatial travaille dans la gamme optique, dont la lumière est absorbée par la poussière interstellaire, *Gaia* ne peut pas sonder facilement des bras galactiques lointains. Par chance, ces nuages de particules sont transparents pour les ondes radio. Ce qui fait de ces dernières un bon outil pour explorer l'intégralité du disque et en cartographier la structure.

Actuellement, il existe deux grands projets de cartographie de la Voie lactée qui utilisent la même technique d'astronomie radio : l'interférométrie à très longue base ou VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*). Le programme *Vera* (*VLBI exploration of radio astrometry*) implique quatre radiotélescopes japonais répartis sur tout l'archipel. *Bessel* (*Bar and Spiral Structure Legacy*) s'appuie sur les dix radiotélescopes du *VLBA* (distribués de Hawaii aux îles Vierges américaines dans les Caraïbes). Les télescopes de ces deux dispositifs sont séparés par des distances comparables au diamètre de la Terre. Dès lors, ces réseaux atteignent une résolution angulaire qui surpasse celle de n'importe quel autre télescope actuel, quelles que soient les longueurs d'onde considérées.

La mise en place technique de la VLBI est délicate. Les radiotélescopes du réseau doivent effectuer leurs observations simultanément et synchroniser les données recueillies grâce aux meilleures horloges atomiques. Les chercheurs centralisent ensuite ces informations sur un ordinateur qui doit calculer des corrélations croisées de tous les signaux. Après une phase de calibration importante, le résultat est une image numérique de ce que l'on pourrait voir si nos yeux étaient séparés l'un de l'autre par une distance supérieure à 12 000 kilomètres (le diamètre terrestre). On atteint ainsi une résolution angulaire incroyable, meilleure que 0,001 seconde d'arc (il y a 3 600 secondes d'arc dans 1 degré et l'ensemble de la sphère céleste fait 360 degrés). Par comparaison, l'œil humain est capable de distinguer des éléments séparés au mieux de 40 secondes d'arc, et le télescope spatial Hubble présente une résolution de 0,04 seconde d'arc.

Grâce à la technique VLBI et la précision angulaire associée, nous calculons la distance d'étoiles lointaines en utilisant la méthode de la parallaxe. Cela consiste à observer un objet depuis deux positions différentes et à mesurer le déplacement apparent par rapport à un arrière-plan très lointain et considéré comme fixe. On peut reproduire cet effet avec son pouce, bras tendu, que l'on examine alternativement avec l'œil gauche puis l'œil droit. Nos yeux étant séparés de quelques centimètres, le pouce semble bouger d'un angle, la parallaxe, d'environ six degrés quand on ferme un œil puis l'autre. Si l'on connaît la distance qui sépare les deux points d'observation et que l'on mesure la parallaxe, on peut calculer la distance. Plus un objet est lointain, plus la parallaxe est faible, d'où la nécessité de faire appel à la VLBI pour les grandes distances au sein de la Voie lactée.

DES MASERS INTERSTELLAIRES

Pour cartographier les bras spiraux de la Galaxie, nous nous sommes intéressés à un type particulier d'étoiles jeunes et massives. Ces astres, à courte durée de vie, sont souvent associés aux régions des bras où la formation d'étoiles est intense. Par ailleurs, ils ont une température si élevée qu'ils ionisent le gaz environnant : ce dernier brille alors de la lumière bleue si caractéristique des bras spiraux que nous observons dans les galaxies lointaines. Mais de notre point de vue, plongés dans la Voie lactée, cette lumière bleue et ces étoiles sont difficiles à voir directement à cause de la poussière interstellaire.

La solution se trouve en périphérie de ces régions fortement ionisées : les molécules d'eau et de méthanol y sont excitées par la lumière de l'étoile et constituent alors de puissantes sources d'émission radio. Il s'agit en fait d'un phénomène naturel de « maser » dont le rayonnement est peu atténué par la poussière galactique. Le maser est l'équivalent en radio des lasers dans le domaine optique. Dans le contexte astrophysique, les émissions maser proviennent de nuages de gaz aussi vastes que le Système solaire et d'une masse comparable à Jupiter. Sur une image radio du ciel, ces régions forment des « points » très brillants, auxquels il est possible d'appliquer la méthode de la parallaxe pour déterminer leur distance.

Avec les projets *Bessel* et *Vera*, les astronomes ont calculé (à partir des masers et de la parallaxe) la distance de près de 200 jeunes étoiles chaudes à travers la Voie lactée. Ces résultats nous donnent un assez bon aperçu d'environ un tiers de la Galaxie et mettent en évidence la présence de quatre bras principaux. >

La Voie lactée serait dotée d'une barre centrale et de quatre bras spiraux

> La carte montre également que le Soleil est très proche d'une cinquième structure, le bras local, qui semble être un fragment isolé de bras spiral. Ce fragment est aussi nommé l'« éperon d'Orion », ou « éperon local ». On pensait, comme le suggère ce nom, que cette structure mineure était une sorte de ramification annexe d'un bras spiral, comme on en voit dans d'autres galaxies. Cette interprétation pourrait être erronée. Dans nos données, ce fragment ressemble plutôt à un segment orphelin d'un bras qui s'enroule sur moins d'un quart de la Voie lactée.

Malgré sa longueur réduite et son statut secondaire, ce tronçon de bras hébergerait une activité de formation d'étoiles massives comparable à celle du bras de Persée voisin. D'ailleurs, certains astronomes pensent que le bras de Persée est l'un des deux bras principaux de la Galaxie (l'autre étant le « bras Écu-Croix », aussi nommé « bras du Centaure »). Nous constatons cependant que la formation d'étoiles massives y diminue fortement alors que le bras se replie vers le centre de la Galaxie. Le bras de Persée n'apparaîtrait donc probablement pas aussi important pour un observateur extérieur.

En utilisant la position des étoiles massives et en modélisant leur mouvement, nous avons estimé certaines caractéristiques de la Voie lactée. Le Soleil se trouve à 8150 parsecs (environ 26600 années-lumière) du centre galactique, avec une incertitude de plus ou moins 150 parsecs. Cette valeur est inférieure à celle de 8500 parsecs officiellement recommandée depuis des décennies par l'Union astronomique internationale. Nous avons aussi déterminé que le Système solaire se déplace à une vitesse de 236 kilomètres par seconde sur son orbite, soit près de huit fois celle de la Terre autour du Soleil. À partir de ces données, on peut déduire que le Soleil effectue un tour de la Galaxie en 212 millions d'années.

UNE FORME DE CHIPS

Si l'on ne considère pas la barre centrale, la partie interne du disque de poussière galactique (entre l'orbite du Soleil et le centre galactique) est très mince et quasiment plate. Ce résultat est connu depuis longtemps ; en revanche, la position du Soleil par rapport à ce plan était davantage débattue. Récemment, le consensus chez les astronomes était que le Système solaire était situé à 25 parsecs (82 années-lumière) au-dessus du plan. Nous obtenons une valeur un peu différente. En ajustant le plan galactique grâce à la position des étoiles massives, nous concluons que le Soleil se trouve seulement 6 parsecs (20 années-lumière) au-dessus du plan, une différence qui reste à élucider mais qui confirme que nous sommes situés très près du plan galactique.

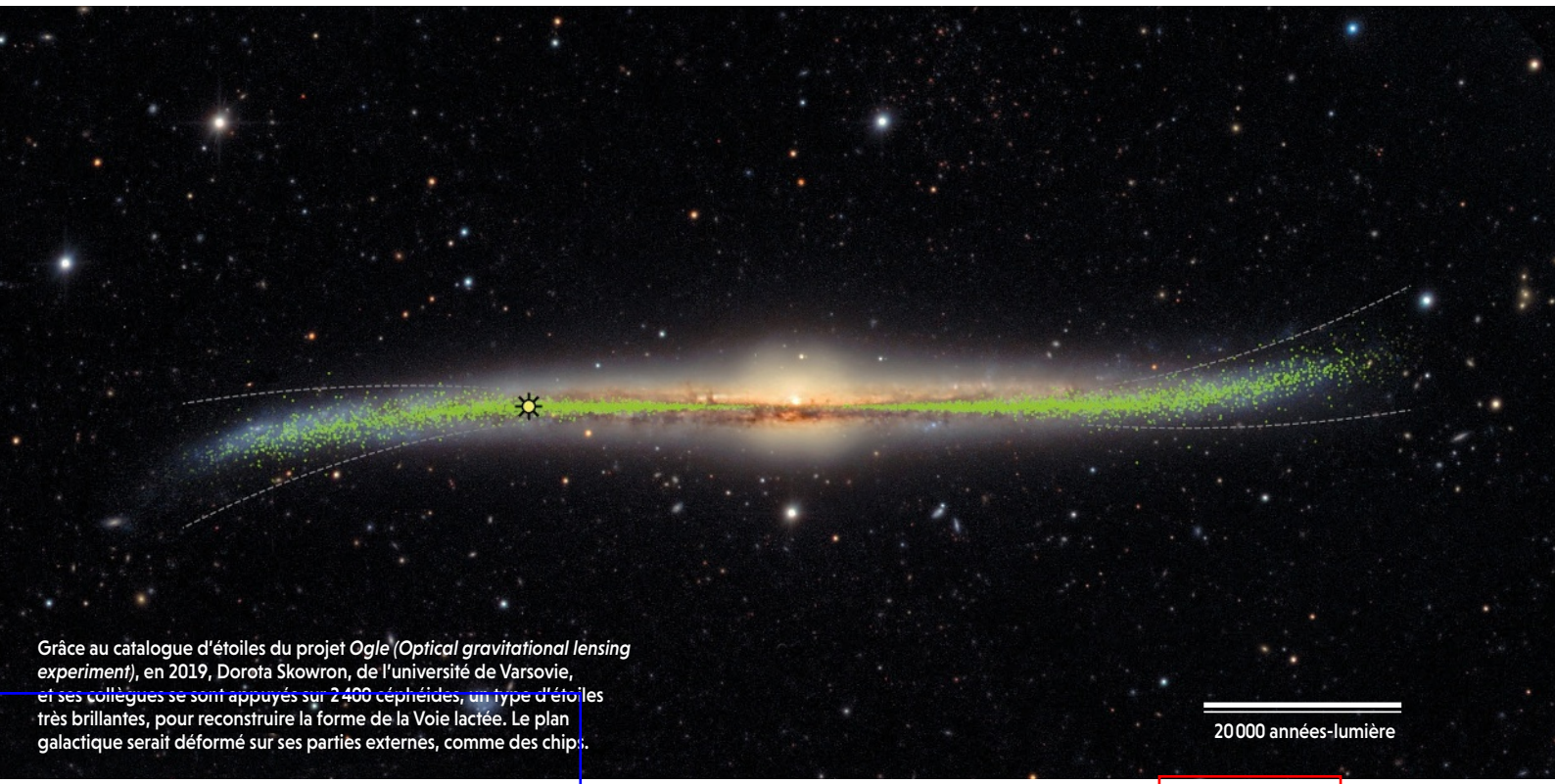
Depuis quelques années, les astronomes ont découvert que le disque de poussière n'est pas parfaitement plan et prend une forme de chips. De nombreuses expériences ont confirmé cette observation (*voir, par exemple, la figure page ci-contre*). Nous confirmons aussi ce résultat avec nos étoiles massives, ce qui renforce la pertinence de notre méthode d'observation.

Pour se repérer facilement dans la Galaxie, les astronomes ont divisé la Voie lactée en quadrants, qui se rejoignent au niveau du Soleil. Nous avons tracé les bras dans trois des quatre quadrants. Pour compléter notre carte, nous aurions besoin d'observations menées depuis l'hémisphère Sud de la Terre. Un tel projet est en préparation ; il fera appel à des télescopes en Australie et en Nouvelle-Zélande.

En attendant, nous pouvons extrapoler dans le quatrième quadrant les bras que nous avons déjà identifiés, en nous appuyant également sur d'autres informations comme les émissions de l'hydrogène neutre ou du monoxyde de carbone. On retrouve ainsi les quatre bras qui avaient été postulés précédemment : le bras de la Règle (ou bras du Cygne), le bras Écu-Croix, le bras du Sagittaire et le bras de Persée. Il nous faut cependant être prudents, car nous n'avons qu'une seule mesure de pouponnière d'étoiles à grande distance du centre galactique. La position de cette région, sa vitesse (obtenue grâce au monoxyde de carbone) nous donne assez de confiance sur la validité de notre extrapolation et notre façon de connecter les bras dans ce quatrième quadrant. Mais d'autres mesures seront nécessaires pour consolider ce résultat.

Nous avons donc maintenant une vision plus claire de notre voisinage cosmique. Il semble que la Voie lactée soit une galaxie spirale à quatre bras, avec une barre centrale lumineuse et relativement symétrique. Le Soleil se situerait sur le plan galactique assez loin du centre. En plus des bras qui s'enroulent quasiment sur un tour complet, la Galaxie présente au moins un autre segment de bras (le

Le Soleil serait situé à environ 26600 années-lumière du centre galactique



Grâce au catalogue d'étoiles du projet *Ogle (Optical gravitational lensing experiment)*, en 2019, Dorota Skowron, de l'université de Varsovie, et ses collègues se sont appuyés sur 2 400 céphéides, un type d'étoiles très brillantes, pour reconstruire la forme de la Voie lactée. Le plan galactique serait déformé sur ses parties externes, comme des chips.

© J. Skowron/OGLE/Observatoire d'astronomie de l'université de Varsovie

bras local) et en a sûrement d'autres. Ces caractéristiques sont finalement assez banales pour une telle galaxie, sans être pour autant la norme. Environ deux galaxies spirales sur trois sont dotées d'une barre centrale ; en ce sens, la Voie lactée appartient à la majorité. En revanche, ses quatre bras clairement définis et très symétriques constituent une structure plus exceptionnelle, car la plupart des galaxies spirales ont moins de bras ou ont une organisation moins régulière et nette.

Néanmoins, de nombreuses questions sur l'aspect de la Voie lactée en particulier et des galaxies spirales en général restent en suspens. Les astronomes s'interrogent notamment sur les mécanismes qui mènent à la formation des bras spiraux. Deux théories s'opposent. Selon l'une, des instabilités gravitationnelles à l'échelle de la galaxie créent des motifs d'ondes spirales à longue durée de vie. Selon l'autre, des instabilités à petite échelle s'étirent et s'amplifient au cours du temps pour former des segments de bras qui ensuite se combinent pour donner des bras entiers. Dans le premier scénario, les bras spiraux perdurent des milliards d'années, alors que dans le second, les bras persistent peu, mais sont régulièrement remplacés par d'autres.

Une autre énigme concerne l'âge de la Voie lactée. On pense qu'une galaxie se construit en plusieurs milliards d'années grâce à une multitude de coalescences successives de petites protogalaxies qui se sont formées plus tôt dans l'histoire de l'Univers. La Voie lactée a probablement atteint le rang de grande galaxie il y a 5 milliards d'années. Mais son aspect était certainement très différent à l'époque, car des collisions ultérieures avec d'autres galaxies ont sûrement réarrangé sa structure spirale.

EN ATTENTE DE LA FUTURE GÉNÉRATION DE RADIOTÉLESCOPES

Pour améliorer notre connaissance de la Voie lactée, d'autres observations au moyen de la future génération de radiotélescopes utilisant la technique de VLBI seront nécessaires. Parmi ces projets qui s'étendent à l'échelle de continents, notons *SKA* (*Square Kilometer Array*), dont la première phase en Afrique du Sud sera opérationnelle vers 2024. Une deuxième phase est en préparation avec des radiotélescopes en Australie. Un autre projet est également à l'étude en Amérique du Nord. En augmentant la surface de collecte du rayonnement par rapport à celle des réseaux actuels, nous serons en mesure d'observer des sources radio de la Voie lactée plus faibles et donc plus lointaines. À terme, nous espérons cartographier avec précision notre galaxie et, peut-être, mettre à l'épreuve les deux théories sur les mécanismes de formation des bras spiraux. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. J. Reid *et al.*, **Trigonometric parallaxes of high-mass star forming regions : Our view of the Milky Way**, *Astrophysical Journal*, vol. 885(2), article 131, 2019.

A. Sanna *et al.*, **Mapping spiral structure on the far side of the Milky Way**, *Science*, vol. 358, pp. 227-230, 2017.

K. Johnston, **Les fossiles de la Voie lactée**, *Pour la Science*, n° 453, juillet 2015.

T. M. Dame *et al.*, **The Milky Way in molecular clouds : a new complete CO survey**, *Astrophysical Journal*, vol. 547(2), pp. 792-813, 2001.

W. W. Morgan *et al.*, **Studies in galactic structure. I. A preliminary determination of the space distribution of the blue giants**, *Astrophysical Journal*, vol. 118, pp. 318-322, 1953.

CARINE BABUSIAUX
est astronome à l'institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble. Elle est spécialiste de la structure, de la formation et de l'évolution de la Voie lactée. Elle est membre de la collaboration *Gaia*.

Le Système solaire est peut-être né d'une collision galactique

Le satellite Gaia livre de nombreuses informations sur la Voie lactée, sa structure, l'histoire de sa formation… et celle du Système solaire. Carine Babusiaux nous présente les résultats les plus récents de cette mission.

En quoi consiste la mission *Gaia* ?

Il s'agit d'une mission spatiale de l'Agence spatiale européenne dont l'objectif principal est un relevé astrométrique de près de 2 milliards d'étoiles dans la Voie lactée (qui en compte quelques centaines de milliards). Elle prend le relais du satellite *Hipparcos*, qui avait rassemblé un catalogue de 120 000 étoiles il y a vingt-cinq ans ! Le satellite *Gaia* a été lancé en 2013 et réalise des mesures de distance, position et vitesse des astres. Ces relevés sont complétés avec des données spectrophotométriques et spectroscopiques. L'idée est d'établir un catalogue public que les chercheurs utilisent ensuite pour étudier différents aspects de la Galaxie. La troisième version du catalogue sortira en deux temps, cette année et l'année prochaine. La mission nominale devait durer cinq ans, mais comme le satellite avait assez de gaz de propulsion en réserve, le programme continue grâce à une extension de mission.

Comment sont réalisées les différentes mesures ?

Le satellite utilise la méthode de la parallaxe pour calculer la distance d'une étoile. Quand on regarde depuis deux positions différentes un objet en avant-plan d'un fond considéré comme fixe, l'objet semble se décaler. L'angle correspondant est nommé la parallaxe. Si l'on connaît la distance entre les deux points d'observation et que l'on mesure précisément la parallaxe, un simple calcul de trigonométrie permet de déterminer la distance de l'objet et donc sa position dans l'espace. Pour *Gaia*, on mesure la parallaxe en utilisant le fait que la Terre tourne autour du Soleil pour avoir deux positions éloignées sur son orbite.

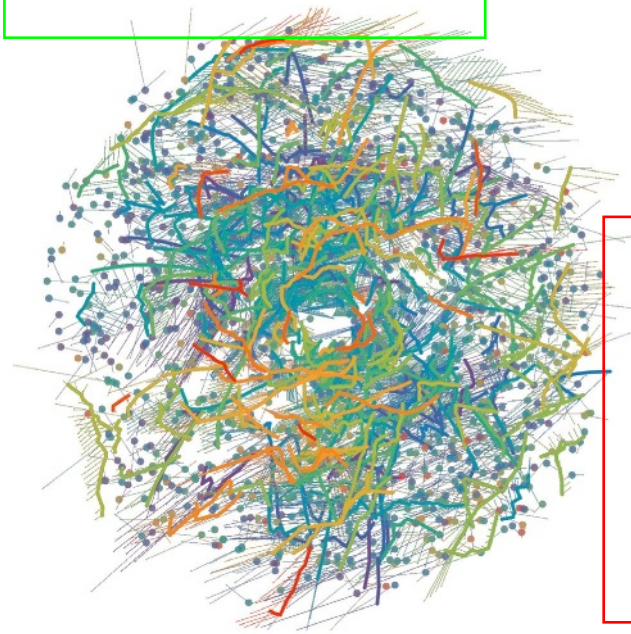
Quand on calcule plusieurs fois la position d'une étoile au cours du temps, on voit son déplacement dû à sa vitesse propre dans le plan du ciel. Par ailleurs, pour accéder à la vitesse des étoiles les plus brillantes dans la direction de la ligne de visée, on utilise une technique spectroscopique. On décompose la lumière de l'étoile en fonction de la longueur d'onde et on regarde certaines raies caractéristiques, par exemple celles du calcium. À cause de l'effet Doppler, ces raies se décalent d'autant plus vers le bleu que l'étoile se rapproche vite de nous (ou vers le rouge si l'astre s'éloigne). Avec toutes ces données, on a la position et la vitesse des étoiles en trois dimensions, ce qui permet d'établir une carte très précise de la Voie lactée.

Gaia embarque aussi un instrument spectrophotométrique qui analyse toutes les sources observées. Il est utilisé pour déterminer les paramètres physiques des astres (classification, luminosité, température, métallicité, etc.).

Ces observations nous renseignent-elles sur la structure globale de la Voie lactée ?

Elles fournissent des informations très riches sur la forme du plan galactique, le halo qui l'entoure, les bras spiraux en son sein, etc. Mais les mesures sont loin d'être simples. Les instruments de *Gaia* fonctionnent dans la gamme optique, une lumière qui est en grande partie absorbée par la poussière du milieu interstellaire. Ainsi, la portée de nos observations est en général limitée dans les régions très riches en poussière, comme dans le cas des bras spiraux de la Galaxie. Néanmoins, cette poussière n'est pas distribuée de façon homogène, alors dans certaines directions nous pouvons voir assez loin. On peut par exemple observer des étoiles céphéides (parmi les plus brillantes) de l'autre côté de la Voie lactée.

Nous profitons de ce phénomène d'extinction de la lumière pour établir des cartes de la distribution de la poussière. D'une certaine façon, cela permet de cartographier en négatif les bras spiraux ! Nous avons ainsi constaté que la poussière des bras n'est pas distribuée de façon continue ; elle est fragmentaire, avec des bulles où l'extinction de la lumière est faible. Nous obtenons donc une vision de bras plus morcelés que ne le suggèrent certains modèles à structures régulières.

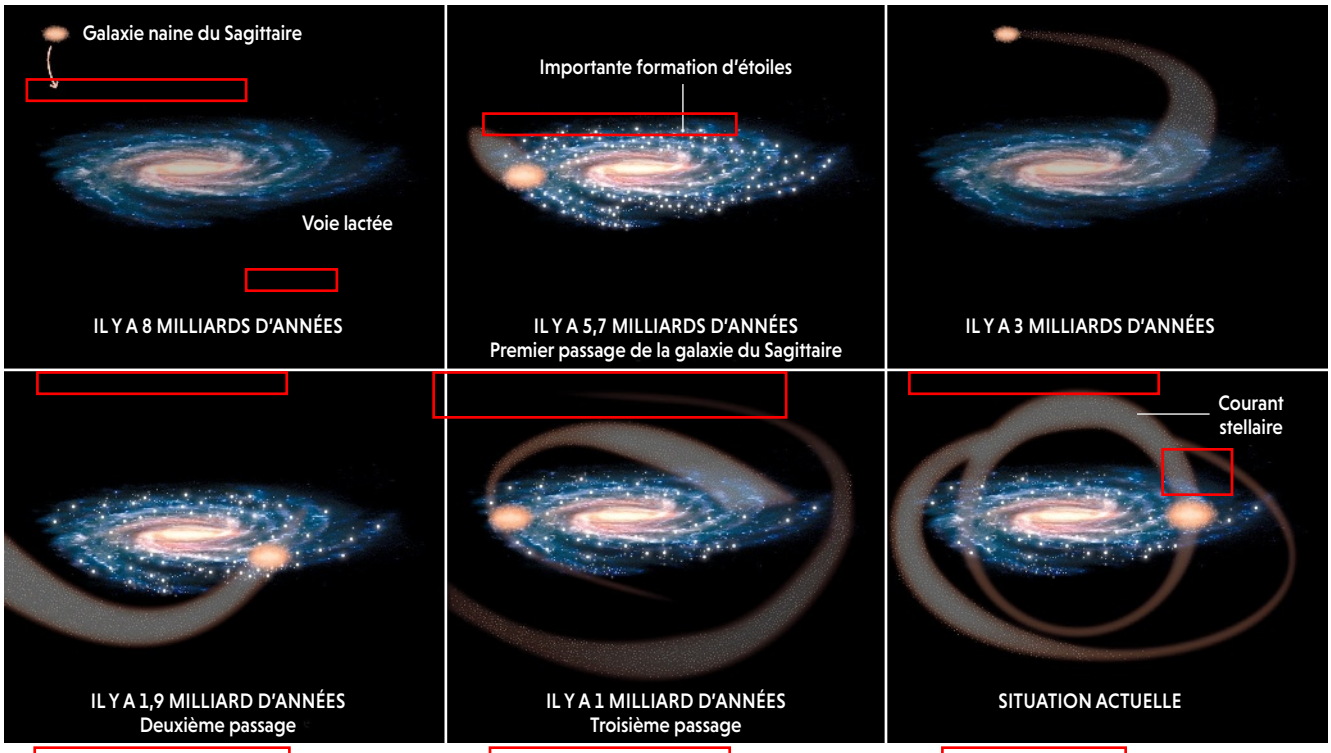


© M. Kounkel et K. Covey (2019)

Ce diagramme montre les amas d'étoiles *(points)* et les astres ayant un mouvement commun *(lignes épaisses)* dans un rayon de 3 000 années-lumière autour du Soleil. Chaque couleur correspond à une famille d'étoiles nées à la même époque. Les lignes fines indiquent les déplacements des astres dans les cinq millions d'années à venir, d'après les données de *Gaia*.

La mission *Gaia* apporte-t-elle aussi des informations sur la barre centrale de la Voie lactée ?

Cette barre a été découverte dans les années 1960 grâce à l'étude de la cinématique des gaz dans la région centrale. D'autres approches ultérieures ont confirmé sa présence. Dans de nombreuses observations, on a même des indices d'une double barre : il y aurait une barre épaisse qui serait orientée à un angle de 10 à 20° par rapport à l'axe défini par le Soleil et le centre galactique ; une seconde barre, plus fine, serait à un angle plus important. Certains modèles reproduisent de telles configurations, mais c'est une >



La fusion de la Voie lactée et de la galaxie naine du Sagittaire est en cours et s'accompagne de plusieurs collisions violentes qui ont déclenché d'intenses formations d'étoiles. Les données de *Gaia* permettent de reconstituer cette histoire ancienne.

> région très poussiéreuse, où les données sont difficiles à obtenir avec précision.

Gaia permet d'observer uniquement les étoiles les plus brillantes à cette interface de la barre et des bras spiraux, mais elle peut contraindre indirectement les modèles qui décrivent la structure globale de la Galaxie. La barre centrale et les bras spiraux laissent leur signature dans la cinématique de l'ensemble du disque. Dès lors, en cartographiant avec précision les étoiles dans le voisinage du Soleil, *Gaia* fournit des données que les modèles doivent reproduire.

Et qu'en est-il du bras local ?

Le Soleil est situé dans une structure particulière, le bras local, dont la nature n'est pas encore certaine. Des astronomes font l'hypothèse qu'il s'agit d'un bras mineur, d'une ramification d'un bras spiral ou encore d'un tronçon d'un bras court. En reconstruisant précisément la structure tridimensionnelle du bras local, *Gaia* devrait permettre de répondre à cette question d'ici à quelques années.

Toujours dans le bras local, les données de *Gaia* ont permis de clarifier la nature de l'anneau de Gould. Les étoiles jeunes dans notre voisinage proche semblaient former une sorte d'anneau dont le Système solaire était proche du centre. En janvier 2020, João Alves, de l'université de Vienne et de l'institut Radcliffe, à l'université Harvard, aux États-Unis, et ses collègues ont montré à partir des distances de ces étoiles (calculées grâce à *Gaia*) qu'il s'agit en réalité d'un nuage de gaz dans le bras local contenant ces étoiles jeunes et dont la forme ondulée du nuage (on parle de «vague de Radcliffe») donnerait l'impression, vue en coupe, de former un anneau. L'origine de cette structure reste inconnue, mais elle a probablement à voir avec le passé perturbé de la Voie lactée.

Justement, comment la mission *Gaia* permet-elle de reconstruire certains aspects de cette histoire ?

Les étoiles naissent par groupes, petits ou grands, dans des nuages de gaz et de poussière que l'on nomme des pouponnières. On parle de «flambées d'étoiles». Dès lors, ces astres ont à peu près le même âge, la même composition chimique et le même mouvement dans la Voie lactée, au moins dans leur jeunesse. Ces étoiles se dispersent au cours du temps et il est alors plus difficile d'associer des astres à un groupe donné. Mais les astronomes ont développé diverses techniques pour extraire ces informations qui sont autant d'éléments pour reconstruire certains événements de l'histoire de la Voie lactée. On étudie les groupements spatiaux en trois dimensions pour trouver les étoiles qui sont nées ensembles et qui sont encore groupées sous forme d'amas. Pour trouver des groupes d'étoiles nées ensemble mais en train de se disloquer dans la galaxie, on regarde également leur vitesse qui reste commune pendant plus longtemps. Quant aux étoiles séparées depuis si longtemps qu'elles se fondent dans la cinématique galactique globale, on peut encore retrouver leur origine commune grâce à leur composition chimique. On parle d'archéologie galactique.

© ESA

Que peut-on apprendre grâce à l'archéologie galactique ?

La composition chimique précise par exemple les conditions dans lesquelles les étoiles d'un même amas sont nées, si le processus a été rapide ou lent, ancien ou récent, etc. Par exemple, quand deux galaxies entrent en collision, cela perturbe le gaz interstellaire et crée des surdensités locales avec l'émergence de pouponnières d'étoiles. Lors d'un tel épisode, on assiste à une formation d'étoiles plus intense, à une perturbation de la cinématique des étoiles présentes initialement et à l'apparition d'une nouvelle population d'étoiles avec une cinématique et une composition chimique atypiques par rapport aux étoiles *in situ*.

En 2018, avec l'équipe d'Amina Helmi, de l'université de Groningue, aux Pays-Bas, nous avons identifié dans le catalogue de *Gaia* un groupe d'étoiles, assez proche du Soleil, dont la composition était différente et surtout qui tournait autour du centre galactique en sens inverse. Grâce à des simulations, nous avons conclu que ces étoiles étaient le résultat d'une collision de la Voie lactée avec une autre galaxie, que nous avons nommée Gaia-Enceladus. Un événement qui a eu lieu il y a 10 milliards d'années. Ces simulations ont permis d'estimer que, à l'époque, la Voie lactée était seulement quatre fois plus massive que la galaxie qu'elle a engloutie. Cette collision a eu une influence majeure sur la structure de la Voie lactée. Aujourd'hui, elle n'aurait pas eu le même impact, car la différence de masse aurait été beaucoup plus grande.

Qu'en est-il de la galaxie naine du Sagittaire ?

Le catalogue de *Gaia* révèle que la Voie lactée a connu bien d'autres collisions. Une rencontre particulièrement intéressante est celle, toujours en cours, avec la galaxie naine du Sagittaire. Découverte en 1994 par Rodrigo Ibata, de l'observatoire de Strasbourg, cette galaxie naine se trouve actuellement proche du plan galactique à l'opposé du Soleil, ce qui rend son observation très difficile. À cause des forces de marée de la Voie lactée, la galaxie du Sagittaire se « déchire » et laisse sur son passage un « courant stellaire », un long ruban d'étoiles. L'étude de sa trajectoire montre que la galaxie aurait percuté le plan galactique trois fois.

En 2018, une équipe autour de Teresa Antoja, de l'Institut des sciences du cosmos, à Barcelone, a étudié le mouvement d'un million d'étoiles proches du Soleil dans le catalogue de *Gaia*, avec une attention particulière pour leur vitesse dans la direction perpendiculaire au plan galactique. La cinématique obtenue était très surprenante, pas du tout ce qui était attendu. Les simulations ont suggéré que leur mouvement est compatible avec le dernier passage de la galaxie du Sagittaire au-dessus du centre de la Voie lactée, il y a environ 500 millions d'années.

La mission Gaia fait de l'archéologie galactique

Ces passages déstabilisent-ils la Voie lactée ?

Depuis la fin des années 1950, les astronomes ont constaté que le disque galactique n'est pas plat mais a une forme de chips. L'origine de cette forme a fait l'objet de nombreuses hypothèses : influence du champ magnétique intergalactique, des galaxies voisines, etc. Avec les données de *Gaia*, Eloisa Poggio, de l'observatoire d'astrophysique de Turin, et ses collègues ont montré que cette déformation n'est pas statique : elle présente un mouvement de précession, qui réalise un tour en 700 millions d'années (la période de révolution du Soleil autour du centre galactique est d'environ 220 millions d'années). La vitesse de précession est malgré tout plus rapide qu'attendu dans les différents scénarios envisagés. Sa source est donc probablement un événement récent ou en cours, et assez important comme une collision avec une autre galaxie. Certains chercheurs pensent que la galaxie naine du Sagittaire est la source de cette perturbation, mais d'autres avancent qu'elle est trop petite pour avoir un impact aussi important.

Une conclusion de ces travaux est que la Voie lactée n'est pas un système à l'équilibre. Or les modèles sont souvent construits avec l'hypothèse que la Galaxie est à l'équilibre.

Ces perturbations peuvent-elles avoir eu une influence sur l'origine du Système solaire ?

Avec les données du catalogue de *Gaia* sur les étoiles dans le voisinage du Soleil, Tomas Ruiz-Lara, de l'institut d'astrophysique des Canaries, en Espagne, et ses collègues ont étudié la distribution statistique des âges des astres et ont constaté des flambées d'étoiles à 5,7 milliards, 1,9 milliard et 1 milliard d'années. Ils ont comparé ces observations avec des modèles des passages de la galaxie du Sagittaire. Ils observent une concordance : chaque passage correspond à une flambée. En particulier, le Soleil s'est formé à l'époque du premier passage il y a près de 5 milliards d'années. Les chercheurs se demandent donc si cette collision galactique n'est pas à l'origine du Système solaire. Une piste à confirmer, qui montre que la Voie lactée est loin de nous avoir révélé tous ses secrets. ■

Propos recueillis par Sean Bailly

BIBLIOGRAPHIE

T. Ruiz-Lara *et al.*, **The recurrent impact of the Sagittarius dwarf on the star formation history of the Milky Way**, *Nature Astronomy*, en ligne, 25 mai 2020.

E. Poggio *et al.*, **Evidence of a dynamically evolving Galactic warp**, *Nature Astronomy*, vol. 4, pp. 590-596, 2020.

A. Helmi *et al.*, **The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk**, *Nature*, vol. 563, pp. 85-88, 2018.

T. Antoja *et al.*, **A dynamically young and perturbed Milky Way disk**, *Nature*, vol. 561, pp. 360-362, 2018.

K. Johnston, **Les fossiles de la Voie lactée**, *Pour la Science*, n° 453, juillet 2015.

UN

NE MEURT JAMAIS.

EN TRIANT VOS JOURNAUX, MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES, PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS DURABLE. PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE SUR TRIERCESTDONNER.FR

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Boris Raba, Severe Accidents Research Department, Alexandrov NITI, Russie

Accident nucléaire

Comment contenir le cœur fondu d'un réacteur ?

CONTEXTE

> Les accidents de centrales nucléaires les plus graves sont ceux qui conduisent à la fusion du cœur du réacteur. Dans ces situations extrêmes, il faut éviter au maximum les rejets radioactifs dans l'environnement. Aujourd'hui, la stratégie à mettre en œuvre pour y parvenir est élaborée dès la conception de l'installation. L'une des approches consiste à stabiliser le cœur fondu à l'intérieur même de la cuve. Un projet européen coordonné par l'IRSN depuis 2015 a étudié dans quelles conditions et pour quels réacteurs cette stratégie est adaptée.

Cahier partenaire
réalisé avec
IRSN
www.irsn.fr

En cas d'accident grave dans une centrale nucléaire, le mélange hautement radioactif de combustible et de matériaux fondus peut percer la cuve en acier du réacteur. Des modélisations fines de l'évolution thermochimique de ce mélange et des analyses de la résistance mécanique de la cuve évaluent les conditions à respecter pour l'éviter.

Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima Daiichi, l'histoire a montré la réalité du risque d'un accident grave dans une centrale nucléaire. Si pour les premières générations de réacteurs ce risque n'avait pas été anticipé, il est aujourd'hui pris en compte dès la conception de l'installation. Ainsi, tout concept de nouveau réacteur de troisième génération s'accompagne d'une stratégie pour limiter les conséquences d'un accident grave. Mais qu'est-ce qu'un accident grave ?

Lorsqu'une anomalie significative est détectée dans une centrale nucléaire (eau trop chaude, fuite, surpression, etc.), le système d'arrêt automatique du réacteur se déclenche et interrompt la réaction nucléaire. Mais au cœur du réacteur, les produits radioactifs issus de la fission du combustible continuent à se désintégrer en produisant de la chaleur. Pour éviter la surchauffe qui conduirait à la fusion du combustible, des systèmes de refroidissement de secours par injection d'eau prennent le relais. Jusque-là, la situation est sous contrôle. Mais si ces systèmes dysfonctionnent comme à Fukushima Daiichi à cause du séisme et du tsunami, la température monte, le combustible et les structures métalliques internes se dégradent et fondent. Il se forme alors dans la cuve en acier du réacteur un « bain de corium » – mélange de combustible, de gaines métalliques qui l'enveloppent et de débris de structures fondus – qui dépasse les 2 500 degrés Celsius. Ce bain risque de percer la cuve en la faisant fondre. Tout doit être fait pour stabiliser ce corium et l'empêcher de dégrader l'enceinte de confinement, ultime barrière avant les rejets dans l'environnement. >

> Il existe deux types de stratégie pour y arriver : soit laisser le corium traverser la cuve pour l'étaler sur une surface prévue à cet effet dans l'enceinte du réacteur et le noyer d'eau pour le refroidir, c'est par exemple la stratégie adoptée pour l'EPR*; soit retenir le corium au fond de la cuve en injectant de l'eau autour de cette cuve pour en refroidir la paroi externe et éviter qu'elle ne se perce. Cette stratégie – connue sous le sigle IVR pour *in-vessel retention* – suscite actuellement beaucoup d'attention. Elle est en effet envisagée pour les nouveaux réacteurs de 1 000 mégawatts ou plus, en construction ou en voie de l'être, de conception américaine (AP1000), chinoise (HPR1000 et CAP1400) ou coréenne (APR1400).

UN CONCEPT DÉVELOPPÉ EN 1989

Le concept n'est pas nouveau. Proposée pour la première fois en 1989 pour équiper les réacteurs VVER-440 de deuxième génération de la centrale nucléaire de Loviisa, en Finlande, la stratégie IVR a été approuvée par l'autorité de sûreté nucléaire finlandaise en 1995. Elle a ensuite été étendue à d'autres réacteurs de ce type en Europe, comme ceux des centrales de Bohunice et de Mochovce, en Slovaquie, de Dukovany, en République tchèque, et de Paks, en Hongrie.

Le principe est assez simple : il consiste à remplir immédiatement d'eau froide le puits qui contient la cuve pour extraire la chaleur du bain de corium à travers la paroi de la cuve et empêcher celle-ci de fondre *(voir l'infographie ci-dessous)*.

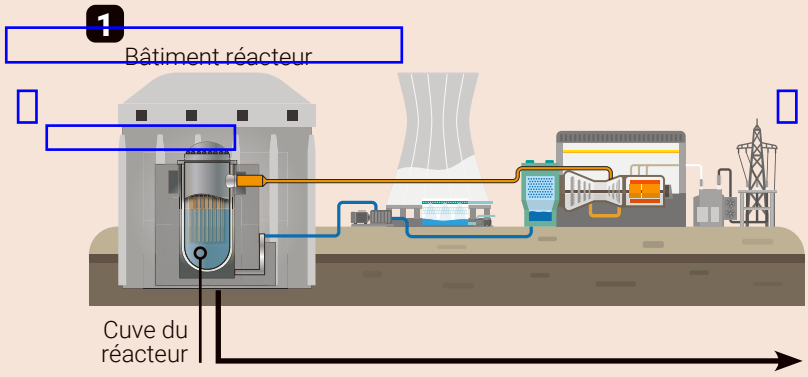
Pour que la stratégie IVR fonctionne, il faut impérativement qu'en tout point de la paroi, le flux de chaleur de la cuve chauffée par le corium vers l'eau de refroidissement n'atteigne jamais la valeur appelée « flux de chaleur critique local » (CHF)*. Car si elle est atteinte, la cuve se perce localement par fusion en quelques minutes. Démontrer que cette condition est respectée avec une marge de sûreté* suffisante exige donc de connaître précisément les flux de chaleur qui sont directement liés à l'évolution dynamique du bain de corium. Or les phénomènes physiques à l'œuvre au sein de la cuve sont complexes. À plus de 2 500 degrés Celsius au sein de la cuve et refroidi *via* les parois par l'eau de refroidissement, le corium est le siège de mouvements de convection et de turbulences. Cette dynamique dépend aussi de la composition chimique de l'ensemble des éléments en fusion dans la cuve, principalement un mélange d'oxyde d'uranium et de métaux fondus, dont de l'acier, qui ne sont pas miscibles et s'organisent en couches distinctes. Tous ces paramètres, en particulier la quantité d'acier, jouent sur les flux de chaleur.

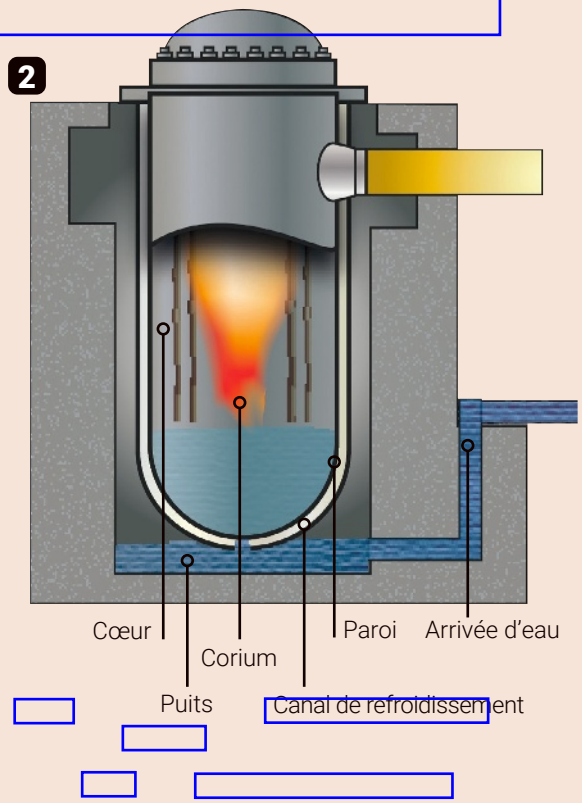
L'évaluation de la marge de sûreté associée à un réacteur dans le cas d'un accident reposait jusque-là sur des approches probabilistes fondées sur des configurations de corium stabilisé. Ce principe convenait pour les réacteurs de 440 mégawatts comme celui de Loviisa. Mais pour des réacteurs, plus puissants, ou avec des conceptions moins favorables (comme une moindre masse d'acier dans le fond de cuve ou une moindre quantité d'eau disponible au moment de l'accident grave), cette méthodologie n'est pas adaptée. « *Des recherches fondamentales supplémentaires ainsi qu'une révision de la méthodologie étaient nécessaires pour évaluer de manière pertinente les marges de sûreté* », explique Florian Fichot, physicien à l'IRSN.

C'est de cette nécessité qu'est né le projet IVMR* mené par l'IRSN dans le cadre des projets Horizon2020 financés par l'Europe. Piloté par Florian Fichot et Laure Carénini, physicienne et modélisatrice à l'IRSN, le projet a débuté en juin 2015 avec 23 partenaires européens, rejoints par d'autres organismes internationaux (chinois, russe, coréen, ukrainien, japonais) en 2018. L'objectif était d'améliorer les méthodes et outils d'analyse d'évaluation du risque de rupture de la cuve pour des réacteurs de 1 000 mégawatts ou plus.

Parmi les enjeux principaux, figurait une meilleure quantification des flux thermiques et de la résistance mécanique de la cuve. Les différentes équipes du projet IVMR ont ainsi développé de nouveaux modèles capables de décrire

LA RÉTENTION EN CUVE





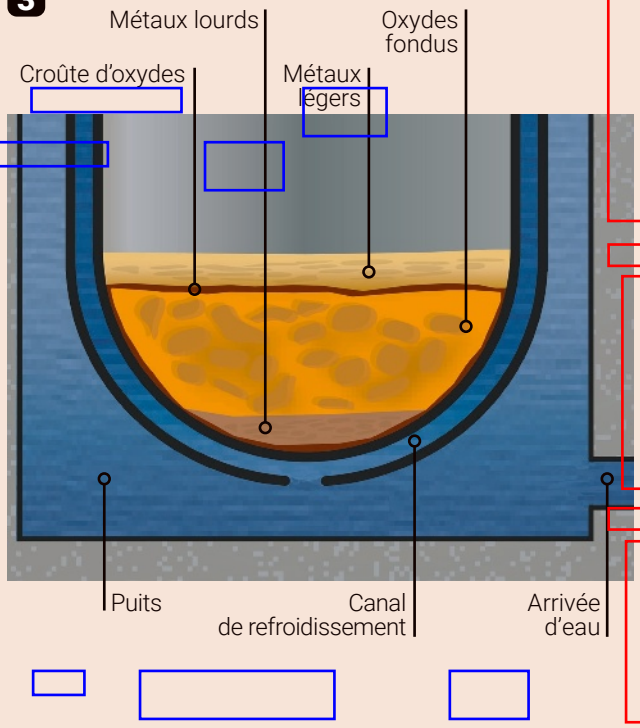
Dans une centrale nucléaire, le cœur du réacteur composé du combustible dont on extrait l'énergie de fission se trouve dans une cuve remplie d'eau 1. Si en cas d'accident le cœur se met à fondre en un bain de corium 2, la rétention en cuve consiste à injecter de l'eau dans le puits pour refroidir la cuve. L'objectif est d'extraire la chaleur dégagée par le corium qui se stratifie en couches d'oxydes d'uranium et de métaux pour le maintenir au fond de la cuve en évitant de la percer 3.

l'évolution thermochimique et dynamique des fluides du bain, notamment en simulant les mouvements de convection dans les différentes couches. « *Il y a une vingtaine d'années, au moment de la conception de l'AP1000, les moyens de calcul numérique n'étaient pas suffisants pour aborder ces questions, mais aujourd'hui on peut appréhender ces phénomènes* », précise Florian Fichot.
Intégrés au logiciel de simulation des accidents graves de l'IRSN (Astec), ces nouveaux outils ont permis de réaliser des études de sensibilité. Chaque réacteur ayant ses spécificités, il est en effet indispensable d'envisager le plus de cas possible, tant en termes de scénario accidentel qu'en termes de composition chimique et de quantité d'acier dans la cuve.

PROCESSUS CRUCIAL DE STRATIFICATION

L'ensemble de ces études montrent le rôle crucial du processus de stratification, c'est-à-dire de la séparation en couches distinctes des phases composées d'oxydes de celles composées de métaux. L'évolution de cette stratification au cours des premières heures de l'accident – et les états transitoires par lesquelles elle passe – est particulièrement déterminante pour savoir si le flux de chaleur est trop élevé et où il risque de percer la cuve. Une stratification transitoire en trois couches est possible : une partie du métal fondu se répartit au-dessus de la couche d'oxyde et l'autre au-dessous. Ce qui modifie le profil de température et peut conduire à des situations critiques liées à un effet de focalisation de flux thermiques sur la paroi de la cuve. Les calculs indiquent que la couche métallique supérieure peut concentrer le flux de chaleur maximal : elle reçoit en effet 50 % de la puissance thermique dégagée par le corium qu'elle transmet par convection vers les parois. Plus cette couche est mince, pour des masses d'acier faibles, plus le flux, « focalisé » au niveau du contact, est élevé. On peut ainsi atteindre ou dépasser un flux thermique de 2 mégawatts par mètre carré là où la couche métallique se réduit à 10 centimètres d'épaisseur. Ces effets dits « de concentration de flux », en particulier lors des phases transitoires, peuvent engendrer des situations critiques et dangereuses, capables de faire fondre localement et rapidement la paroi de la cuve. Toute évaluation de la marge de sûreté doit en tenir compte. L'épaisseur minimale de la paroi atteinte est donc un paramètre clé à évaluer. C'est ce qui a été fait lors d'un exercice commun de simulation d'un scénario d'accident de référence : six équipes partenaires, utilisant chacune son logiciel, ont déterminé cette épaisseur minimale pour un réacteur de 1 000 mégawatts ayant une paroi de cuve de 15 centimètres au départ. L'ensemble des résultats la situe entre 3 et 7 centimètres avec une dispersion de ± 40 %. Ce scénario de référence, choisi parce que déjà simulé pour le réacteur américain AP1000, n'est toutefois pas le plus critique. Des configurations plus pénalisantes tant en termes de réacteur que de scénarios ont été simulées avec le logiciel Astec. Elles montrent que la situation la plus critique conduit à un flux thermique maximal de 2 mégawatts par mètre carré et à une épaisseur de cuve minimale d'environ 2 centimètres.
Se pose alors la question de la résistance mécanique de la cuve, non seulement pendant l'accident mais aussi à long terme. Selon les premières analyses réalisées dans ce sens – essentiellement des travaux numériques sur les lois de comportement de l'acier à différentes températures et sous différentes contraintes, même en cas de surpression de 20 bars, soit 10 fois celle considérée comme la plus probable – la paroi réduite localement à 2 centimètres pourrait suffire à retenir 100 tonnes de corium.
Que nous enseigne le projet IVMR, achevé en 2019, plus globalement sur la sûreté du dispositif de rétention en cuve pour les réacteurs de 1 000 mégawatts et plus ? Selon cette approche, une marge de sûreté équivalente à celle des réacteurs de deuxième génération pour lesquels la stratégie IVR a été adoptée *a posteriori* et certifiée dans plusieurs pays d'Europe (VVER-440) pourrait être atteinte. À condition de respecter certains éléments de conception, c'est-à-dire de disposer d'au moins 50 tonnes d'acier dans le fond de cuve et de systèmes de circulation d'eau capables de retarder de 6 à 12 heures la fusion du cœur. Sans cela, la marge de sûreté serait nettement réduite donc discutable, voire insuffisante. ■

3



NOTES

> À partir d'une certaine valeur du flux thermique, appelée « flux de chaleur critique » (CHF), se produisent des phénomènes thermohydrauliques qui provoquent une baisse brutale de l'efficacité du transfert de chaleur.

> IVMR : In-vessel melt retention

> La marge de sûreté est donnée par le rapport entre l'épaisseur minimale de cuve atteinte et l'épaisseur à partir de laquelle la cuve rompt sous le chargement le plus probable (1 à 2 bars de surpression).

> La troisième génération désigne les réacteurs conçus à partir des années 1990.

RÉFÉRENCES

> Projet IVMR : https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Organisation/Programmes/projet_ivmr/Pages/Projet-IVMR.aspx

> Main outcomes from the IVR code benchmark performed in the IVMR project, L. Carénini *et al*, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 146 (october 2020), 107612.

> Modelling issues related to molten pool behaviour in case of In-Vessel Retention strategy, L. Carénini, F. Fichot, N. Seignour, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 118, p. 363–374, 2018.

L'ESSENTIEL

> Il y a 9 000 ans, près de Pétra, en Jordanie, une fillette d'environ 8 ans a été enterrée avec, sur elle, un collier de près de 2 600 perles.

> La richesse de la tombe pourrait faire croire que l'enfant était de haut rang social.

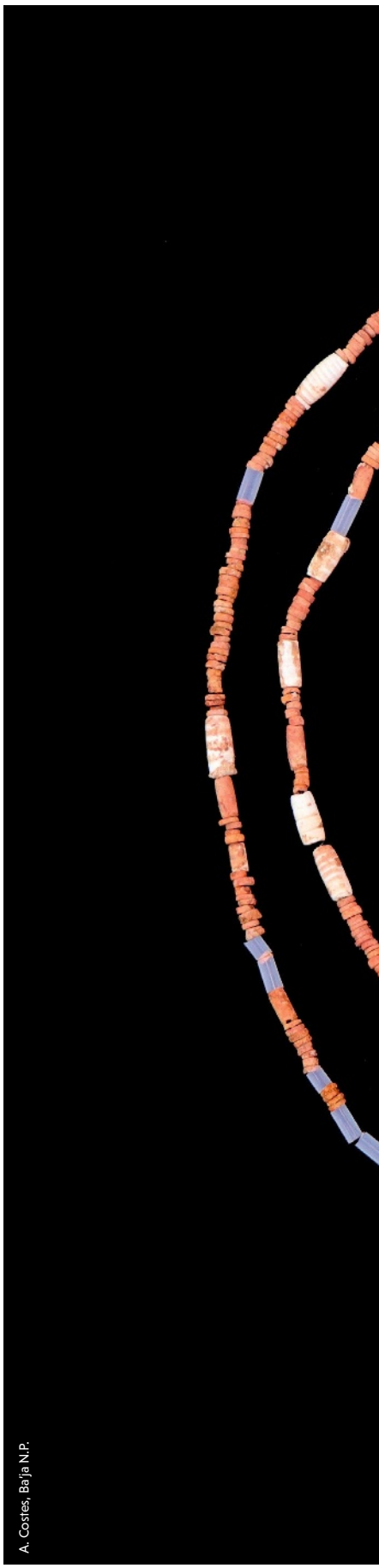
> Cette conclusion est contredite par le fait que, dans les villages de cette époque néolithique du Moyen-Orient, seuls des enfants recevaient un tel traitement funéraire.

L'AUTRICE

MARION BENZ
archéologue à l'institut d'archéologie du Proche-Orient ancien de l'université libre de Berlin

L'enfant au collier de Ba'ja

Il y a 9 000 ans, les habitants d'un village néolithique à Ba'ja, en Jordanie, ont enterré un enfant orné d'un somptueux collier de 2 600 perles dans une tombe soigneusement édifiée. Que révèle ce traitement spectaculaire ?

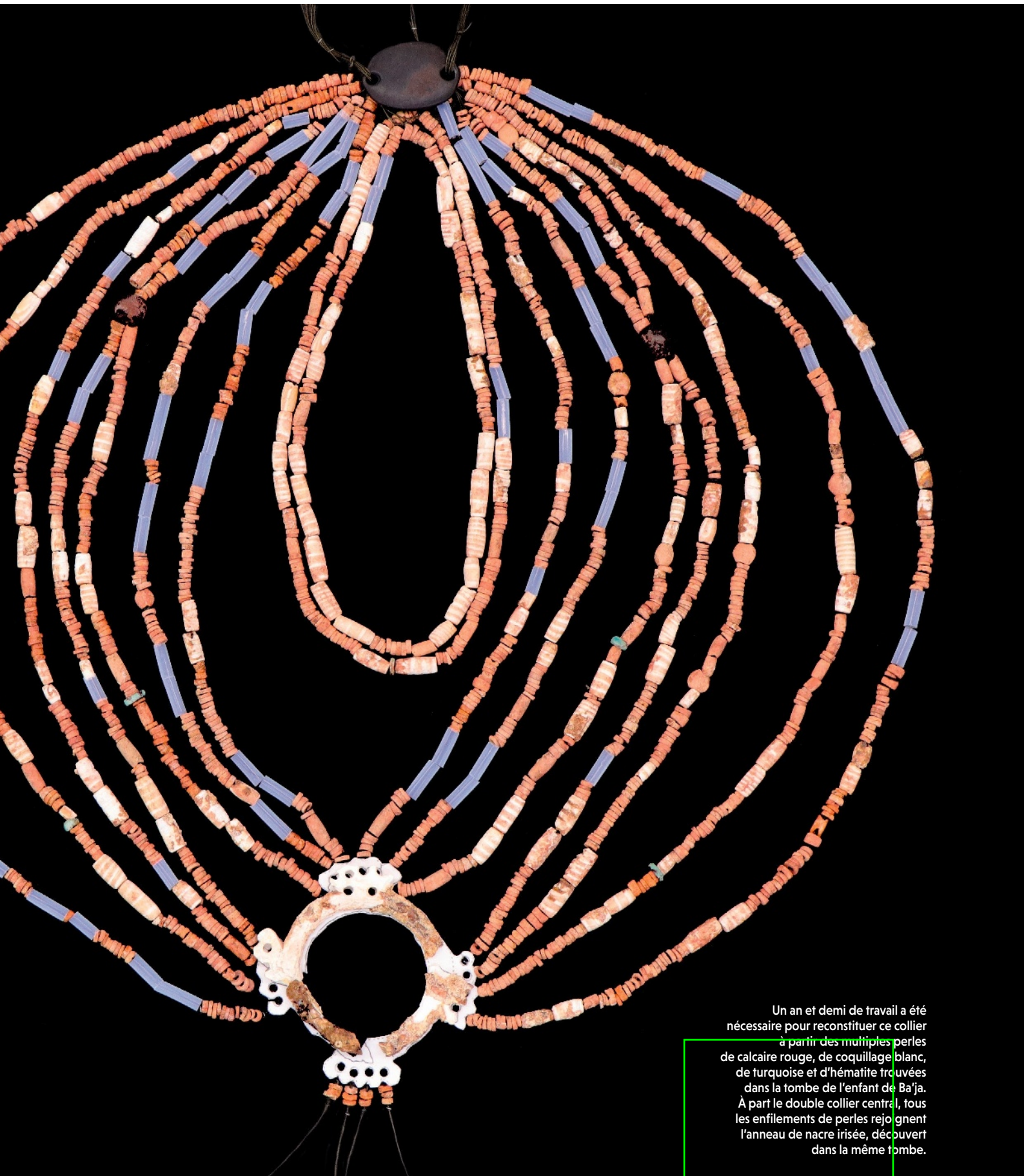


A. Costes, Ba'ja N.P.

Il est midi. La découverte d'une tombe extraordinaire a transformé le premier jour de fouille de Hala Alarashi en une épreuve d'endurance. La force du soleil rend le travail en montagne quasiment impossible. Depuis un bon moment déjà, les ouvriers et la plupart des archéologues sont partis se réfugier à l'ombre pour faire la sieste. Mais pas tous : le contenu de la tombe est trop précieux pour que les spécialistes puissent s'autoriser une pause. La sueur au front, Hala dégage minutieusement une minuscule perle du sable. Puis elle réfléchit à la façon de photographier l'étape de la fouille à laquelle l'équipe est parvenue. Avant de prendre son cliché, elle tente d'éloigner les mouches des ossements délicats de l'enfant inhumé il y a neuf mille ans… En vain : les insectes disputent la moindre part d'ombre aux humains.

Hala Alarashi est une archéologue du Cepam (Culture et environnement, Préhistoire, Antiquité et Moyen Âge), un laboratoire de l'université de Nice-Sophia-Antipolis. Elle est venue renforcer l'équipe d'archéologues étudiant le village néolithique de Ba'ja, dans le sud de la Jordanie. Cette équipe est codirigée par Hans-Georg Gebel, Christoph Purschwitz et moi-même, tous de l'université libre de Berlin.

Sur les indications de Manfred Lindner, spécialiste allemand de la ville nabatéenne de Pétra, Hans-Georg Gebel a découvert Ba'ja en 1984 et, depuis, y a mené plusieurs campagnes de fouilles. D'une superficie d'environ 1,5 hectare, le village >



Un an et demi de travail a été nécessaire pour reconstituer ce collier à partir des multiples perles de calcaire rouge, de coquillage blanc, de turquoise et d'hématite trouvées dans la tombe de l'enfant de Ba'ja. À part le double collier central, tous les enfilements de perles rejoignent l'anneau de nacre irisée, découvert dans la même tombe.

> est perché sur un plateau flanqué de montagnes et entouré de gorges atteignant 70 mètres de profondeur. Avant d'y parvenir, il faut franchir des éboulis et des parois rocheuses. Certains passages ne sont pas praticables sans échelle ou corde. Eau, nourriture, pelles, truelles, brouettes…: tout le matériel nécessaire à une fouille doit être apporté à dos d'homme. Mais le site est si intéressant que, avec l'accord du service jordanien des antiquités, nous y avons tout de même lancé un nouveau projet de recherche de trois ans.

Quand, pendant l'été 2018, l'équipe est tombée sur un coffre de pierre – une «ciste» (selon le terme utilisé en archéologie) –, Hans-Georg Gebel n'était guère surpris car, deux ans plus tôt, son équipe avait déjà trouvé une tombe d'adulte similaire. «Nous nous attendions à la présence de tombes dans cette maison, explique-t-il, car les habitants du village enterraient en règle générale leurs défunts dans des sépultures aménagées sous les sols de leurs maisons. Toutefois, la plupart des défunts étaient enterrés dans des tombes collectives où, de temps en temps seulement, nous découvrions quelques perles au milieu des amas d'os. Personne ne s'attendait donc au mobilier de la tombe de cet enfant!» De fait, c'est bien l'une des tombes d'enfant les plus élaborées du début du Néolithique que les archéologues ont découverte contre le mur oriental d'une maison de Ba'ja.

Ses anciens habitants l'ont construite en ménageant, dans une sorte de «granito» – un mélange de graviers et de calcaire – qui recouvre le sol et dans le sédiment dur sous-jacent, un trou de 1,30 mètre par 1 mètre et profond d'environ 40 centimètres. À l'ouest et au sud de la fosse, ils ont érigé deux petits murs en pierres sèches. Après avoir dressé une dalle contre le mur sud et une autre contre la paroi nord de ce trou, ils ont fermé le caveau ainsi formé à l'aide d'une grande dalle. Ils ont ensuite recouvert le tout de plusieurs couches de morceaux plats de grès blanc brillant, qu'ils avaient préparés en fracturant des dalles juste avant l'enterrement. Ils ont enfin déposé sur l'ensemble une couche

C'est l'une des tombes d'enfant les plus élaborées du début du Néolithique

© H.-G. K. Gebel, Ba'ja N.P.

de plâtre blanc, comme s'ils voulaient sceller la tombe pour l'éternité. De fait, pendant neuf mille ans, personne ne l'avait rouverte…

Le matin où Hala Alarashi est arrivée sur le chantier, cette structure était encore pleine de sable. Nous avons passé la matinée à la fouiller minutieusement au pinceau, couche après couche. « Nous craignions qu'il ne s'agisse que d'un monument funéraire sans défunt, c'est-à-dire d'un "cénotaphe", se rappelle Hala. Nous allions abandonner quand les premières perles et fragments d'os colorés en rouge ont émergé ».

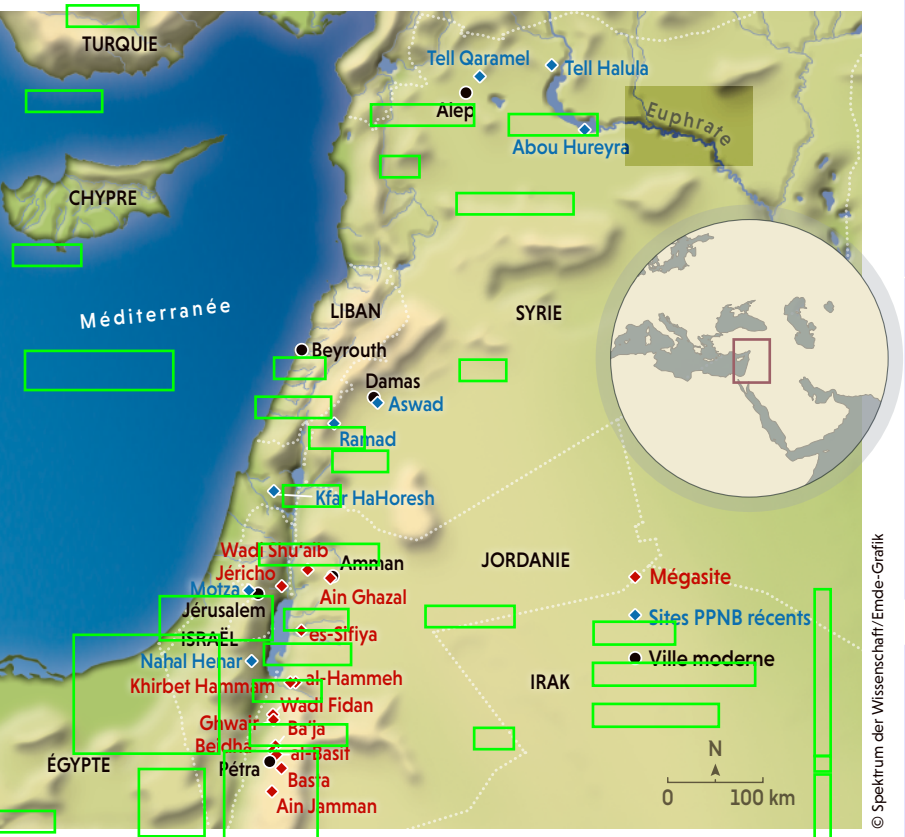
Le corps de l'enfant – qui, d'après la gracilité de sa mâchoire et de son squelette, serait une fillette d'environ 8 ans – avait été placé dans la cavité en position accroupie, le dos contre la dalle nord, et les cuisses dirigées vers le sud. Les os étaient colorés d'un pigment rouge foncé, probablement de l'ocre, dont un grand morceau était placé devant les jambes du défunt. Quant aux perles, rien au début n'annonçait leur nombre. « Nous avons commencé par les numéroter une à une, puis il y en a eu des centaines, puis des milliers et au bout de sept jours de travail, nous en avions près de 2600, se rappelle Hala. Vers la fin, nous avons prélevé les perles par groupes entiers, même si nous avons tout de même dessiné chacune d'elle sur nos croquis. » La découverte d'un anneau de nacre, servant à accrocher de multiples enfilements de perles, nous a renseigné sur l'emploi des perles : elles faisaient partie d'un grand collier. Mais que faire de tant de matériel ?

Grâce à nos partenaires jordaniens de l'université du Yarmouk, à Irbid, et au service jordanien des Antiquités, nous avons eu la permission d'emprunter pour une année les perles et l'anneau de nacre afin de faire reconstituer le collier. Et, grâce à divers soutiens (ceux de la fondation Franz et Eva Rutzen, de la DFG – la Fondation allemande pour la recherche – et de l'association scientifique Ex Oriente fondée par des chercheurs de l'université libre de Berlin, dont Hans-Georg Gebel), nous avons pu financer rapidement la recherche sur le collier, de sorte que Hala Alarashi et, dans le cadre de son projet de master, Alice Costes, de l'Académie des Beaux-Arts de Stuttgart, ont pu commencer à le reconstituer méticuleusement.

Alice et Hala ont nettoyé puis décrit les 2586 perles mises au jour. Celles qui étaient trop fragiles – près d'un tiers – sont restées à Stuttgart afin de les préserver. Alice a restauré l'anneau de nacre, qui servait à distribuer les enfilements de perles à partir de la poitrine de l'enfant sur laquelle il reposait. Trente ans plus tôt, l'équipe de Hans-Georg Gebel avait déjà découvert un tel anneau à Basta, un village néolithique contemporain de Ba'ja distant de quelque 25 kilomètres au sud-est, ce qui >

UNE PETITE FILLE MORTE DE CAUSE INCONNUE

La mandibule et les dents de l'enfant au collier suggèrent qu'il s'agirait d'une fillette âgée d'environ 8 ans. La détermination du sexe sera plus certaine si les généticiens de l'institut Max-Planck de science de l'histoire humaine, à Iéna, en Allemagne, parviennent à extraire de l'ADN de l'os pétreux (partie de l'os temporal, dont la forte épaisseur favorise la préservation de l'ADN). Julia Gesky, l'anthropologue de l'équipe, a étudié de près ces os au sein du laboratoire de l'Institut archéologique allemand à Berlin, mais sans déceler, jusqu'à présent, de signes de maladie ou de blessure. Au Néolithique, les maladies infantiles tuaient sans doute beaucoup. En l'absence de traitement, même une otite ou un rhume peuvent être fatals, rappelle Julia Gesky ; et, en hiver et au printemps, les nuits dans la région de Pétra sont souvent glaciales.



© Spektrum der Wissenschaft/Emde-Grafik

Le site de Ba'ja *(à gauche)* ne couvre guère plus de 1,5 hectare, mais il s'agit quand même de ce que les archéologues nomment un « mégasite », c'est-à-dire un gros village néolithique, d'une emprise pouvant aller jusqu'à 15 hectares, où vivaient ensemble des centaines, voire des milliers de gens et leurs animaux. Nombre de mégasites datant du Néolithique précéramique B récent, abandonnés au cours du VII[e] millénaire avant notre ère, ont été découverts dans la région de Pétra, en Jordanie *(carte ci-contre)*.

> suggère que les habitants des deux villages échangeaient souvent. « Les anneaux de ce genre que nous avons trouvés jusqu'à présent étaient tous associés à des enfants », précise Christoph Purschwitz.

Les millénaires passés dans le sol avaient fortement fragilisé l'anneau : sa nacre était devenue si friable qu'Alice a d'abord dû la renforcer avec précaution. « Nous avons été obligées de laisser en place quelques-uns des dépôts de calcaire car, en les retirant, nous aurions endommagé la surface de la nacre », témoigne Andrea Fischer, qui a supervisé le travail d'Alice Costes à l'Académie des Beaux-Arts.

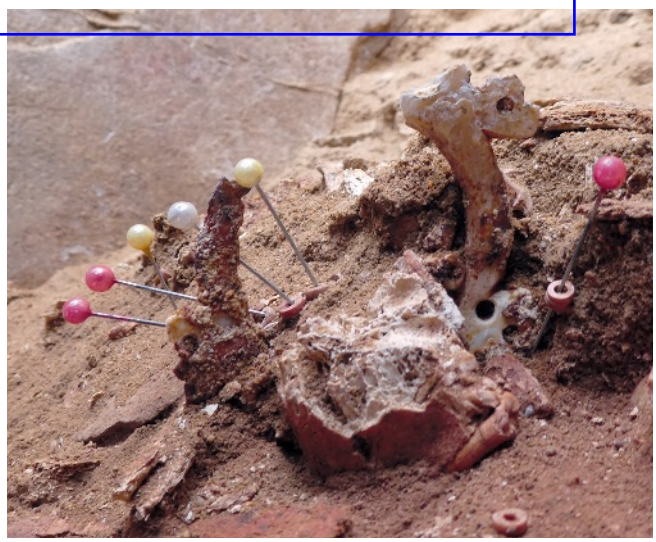
Hala, elle, a étudié les perles au Cepam, en s'interrogeant sur leur fabrication et sur leur usage avant l'inhumation de l'enfant. Ses recherches ne sont pas encore achevées, mais une chose est déjà certaine : le collier n'était pas porté au quotidien par l'enfant. Il était en effet bien trop encombrant et lourd. Pour autant, l'usure de nombreuses perles prouve qu'elles ont été longtemps portées avant de servir de parure à l'enfant de la tombe. « Nous savons déjà que des perles en pierre semi-précieuse ont été recyclées pour un usage funéraire », explique Hala – une réutilisation qui souligne la valeur de base de ces pièces.

Au bout d'une année et demie de travail, nous avons enfin pu contempler le résultat de la restauration, et nous nous sommes dit que tous ces efforts en valaient la peine ! Le collier est aujourd'hui mis à l'abri dans le coffre-fort du laboratoire de restauration de l'Académie à Stuttgart, en attendant son retour en Jordanie pour une exposition. Il est très précieux : c'est la première fois qu'un bijou aussi spectaculaire et d'une époque aussi reculée a pu être restitué dans toute son authenticité.

DES INDICES SUR LA STRUCTURATION SOCIALE

Pour les archéologues, ce collier est bien plus qu'un trésor, car il fournit des indices sur la structuration sociale déjà sensible au Néolithique précéramique B récent. Entre archéologues, il est courant de désigner cette période qui s'étend de 7500 à 6900 avant notre ère par son sigle anglais LPPNB (pour *late pre-pottery Neolithic B*). C'est en effet au Proche-Orient qu'est né le mode de vie néolithique, qui s'est ensuite répandu en Europe à partir de 6500 avant notre ère. Toutefois, au Levant, les Natoufiens, des chasseurs-cueilleurs de l'Épipaléolithique – la période séparant le Paléolithique du Néolithique – ne sont pas passés directement d'une subsistance par la prédation à une subsistance reposant sur la production.

Ainsi, lorsque le Néolithique commence, le loup a depuis longtemps été domestiqué et les



Ci-contre à gauche, la tombe telle qu'elle s'est d'abord présentée aux archéologues, sans que les perles du collier de l'enfant – une petite fille probablement, d'après la gracilité de sa mâchoire – ne soient apparentes. Les os étaient colorés en rouge et un grand morceau d'ocre avait été placé devant les jambes de l'enfant. Plus tard, l'anneau de nacre est apparu parmi les os du haut du corps, et a posé un difficile problème de prélèvement en raison de sa fragilité *(ci-dessous)*.

© M. Benz, Baja N.P. (à gauche) ; H. Alarashi, Ba'ja N.P. (à droite)

Les poignards en silex découverts dans trois tombes à Ba'ja avaient certainement beaucoup de valeur. D'une qualité supérieure, leur silex n'est pas d'origine locale. Seuls des artisans possédant un grand savoir-faire ont pu les façonner. Des artisans de Ba'ja ou d'un autre mégasite des environs de Pétra ? Mystère : pour l'instant, les fouilles de Ba'ja n'ont livré aucun déchet de taille pouvant leur correspondre.

premiers villages permanents existent déjà depuis l'Épipaléolithique, mais la poterie est inconnue. Pendant la première période du Néolithique, le PPNA (pour *pre-pottery Neolithic A*, de 9600 à 8700 avant notre ère), les habitants du Croissant fertile – Levant, sud de l'Anatolie, Zagros et Mésopotamie – restent essentiellement des chasseurs-cueilleurs, qui pratiquent déjà une forme de cueillette aménagée de céréales et de légumineuses.

Puis, pendant la période PPNB (pour *pre-pottery Neolithic B*) qui suit, ils apprennent à maîtriser de mieux en mieux la culture céréalière (orge, engrain, blé, seigle…) et celle d'autres plantes (fèves, pois chiches, lentilles, pois, lin…) et, par ailleurs, l'élevage de moutons et de chèvres ainsi que, dans certaines régions, de porcs et de bovins. Particulièrement robustes et frugales, les chèvres ont clairement aidé les humains à s'installer aussi dans des endroits semi-arides, tel celui de Ba'ja.

Il importe de souligner que c'est dans les premiers villages agricoles que les humains ont pu, pour la première fois, accumuler des stocks de denrées et des objets, car ils pouvaient commencer à produire au-delà de leurs propres besoins. C'est donc à l'époque des premiers villages néolithiques qu'apparaissent des phénomènes dont l'absence semble aujourd'hui inconcevable dans nos sociétés : la propriété et le fait de se définir socialement par elle. Les troupeaux sont devenus des stocks vivants qui, très vite, ont contribué au prestige de leurs propriétaires. Les produits d'origine exotique ont acquis une valeur d'échange considérable mais, de façon étonnante, on n'hésitait pas à détruire nombre d'objets, voire l'équipement entier d'une maison.

Période d'accomplissement du mode de vie néolithique, le PPNB a forcément été aussi une période d'évolution sociale, au cours de laquelle on constate une ségrégation plus nette entre groupes et, au sein des groupes, une multiplication des rôles sociaux qui va de pair avec l'intensification des échanges culturels et économiques. Le cas de l'enfant au collier est significatif à cet égard et il traduit peut-être l'existence de statuts sociaux.

Il est clair en effet que les funérailles de l'enfant au collier ont revêtu une grande importance au sein de sa société. Le temps et les efforts considérables nécessaires à la fabrication de son collier et à l'édification de sa tombe l'illustrent.

UN RITUEL FUNÉRAIRE PROBABLEMENT SPECTACULAIRE

Par ailleurs, il semble que les morceaux de dalles recouvrant la dalle de couverture de la tombe, parce qu'ils s'emboîtent parfaitement, ont été cassés au cours de ce qui constituait probablement une phase spectaculaire du rituel funéraire. Du mortier a aussi été étalé entre les dalles afin de tout fixer avant que la tombe ne soit scellée par la couche de chaux blanche mentionnée plus haut. Notre équipe a aussi retrouvé des couches de cendres tout près de la plupart des tombes fouillées jusqu'à présent, ce qui suggère que le feu jouait aussi un rôle dans le rituel. En fin de compte, force est de réaliser que l'inhumation de l'enfant a impliqué non seulement un mobilier funéraire de haute valeur, mais aussi un rituel funéraire élaboré, ce qui signale l'importance du défunt.

L'époque des premiers villages néolithiques a aussi été celle d'une évolution sociale

Cette importance semble contredire l'idée répandue que les premières cultures paysannes auraient été plutôt égalitaires. Nombre de >

© H.-G.K. Gebel, Ba'ja N.P.

> chercheurs croient en cette égalité, car plusieurs indices vont dans ce sens : les maisons néolithiques ne varient guère et les grands bâtiments découverts peuvent être interprétés comme des équipements collectifs. À Ba'ja, les tombes collectives, dans lesquelles tous les défunts semblent avoir reçu le même traitement funéraire, vont dans le même sens.

Pour autant, pendant notre projet, l'évidence que des différences sociales existaient entre les habitants des premiers villages paysans s'est imposée. Notre équipe a par exemple constaté qu'il existe des différences entre sépultures d'adultes, et qu'une partie de leur mobilier funéraire, notamment les poignards en silex élaborés découverts à Ba'ja (*voir la photo page 43*) et à Basta, implique que des artisans spécialisés, ayant des années d'expérience, travaillaient dans les villages du PPNB récent.

DES RÉSEAUX D'ÉCHANGE AU LONG COURS

Certains de ces artisans ont fabriqué les perles du collier de l'enfant et l'ont composé. Les études menées sur les matières premières à l'institut géologique et minier du Bade-Wurtemberg, à Fribourg-en-Brisgau, ont montré qu'en plus de coquillages, les perles étaient façonnées à partir de pierre turquoise, d'hématite et de calcaire ferrugineux. Des perles en malachite, en pierre chrysocolle, en amazonite et en cornaline ont aussi été trouvées dans d'autres zones du village.

La turquoise était vraisemblablement échangée à plus de 200 kilomètres de Ba'ja, dans le Sinaï, et toutes les autres pierres, vertes parce que riches en cuivre, provenaient probablement du Wadi Faynan tout proche, tandis que les coquillages venaient de la mer Rouge. Dans certaines autres tombes de Ba'ja, on a trouvé des cauris, des patelles et des cônes (conidae). Toutes ces origines et les silex de provenance lointaine signent l'existence, dans les sociétés du PPNB récent, de spécialistes de l'extraction des matières premières, de « colporteurs » qui allaient les échanger au loin contre quelque valeur (d'autres matières premières ?) et d'artisans capables de travailler habilement ces matériaux très divers. Ce sont là autant de preuves de la multiplication des rôles sociaux au PPNB récent.

L'existence de ces nombreux rôles sociaux et l'importance manifeste de l'enfant au collier et d'autres suffisent-elles à prouver l'existence d'une hiérarchie au sein de ces sociétés d'il y a neuf millénaires ? Pas vraiment car, outre le statut social, bien d'autres raisons pourraient aussi expliquer les différences constatées entre défunts. Celles-ci peuvent par exemple être dues aux talents particuliers de certains individus, aux possessions diverses qu'avaient les défunts au moment de leur décès ou au fait que d'aucuns avaient peut-être, de leur vivant, un meilleur accès à certains produits ou à certaines matières premières.

UN ENFANT DE HAUT RANG ?

Même si la richesse étonnante de la tombe de l'enfant au collier invite à conférer à ce défunt un haut rang social, on ne peut pas parvenir à cette conclusion. En effet, dans toute la région, la plupart des bijoux utilisés comme mobilier funéraire au Néolithique précéramique B récent ont été découverts dans des tombes d'enfant. Un phénomène étrange que Hans-Georg Gebel avait déjà constaté à Basta dans les années 1980 et que Miquel Molist, de l'université de Barcelone, et son équipe ont également remarqué dans leurs fouilles des années 1990 et 2000 du tell Halula, un site contemporain situé sur le moyen Euphrate, dans l'actuelle Syrie. Ainsi, le caractère extraordinaire des funérailles de l'enfant au collier pourrait avoir d'autres motivations que le rang social, mais elles nous échappent.

La plupart des bijoux funéraires ont été découverts dans des tombes d'enfant

Ces motivations sont d'autant plus énigmatiques que l'intense vie sociale qui a rendu possible la richesse de la tombe de l'enfant au collier a vite disparu : quelques siècles plus tard, le village fut abandonné à jamais, comme d'ailleurs, au cours du VII[e] millénaire avant notre ère, de nombreux villages de taille importante. Un phénomène qu'explique probablement avant tout une crise sociale et écologique.

Les habitants des grands villages vivaient alors dans une promiscuité jamais expérimentée auparavant par l'humanité et en contact constant avec leurs animaux, ce qui a probablement multiplié les risques de conflits, mais aussi de maladies dues aux animaux, les « zoonoses ». Bref, le traitement funéraire insigne dont ont bénéficié l'enfant au collier de Ba'ja et d'autres enfants du Néolithique précéramique B récent reste une caractéristique singulière, mais inexpliquée, de cette époque de complexification sociale rapide. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Benz *et al.*, **Burying power : New insights into incipient leadership in the Late Pre-Pottery Neolithic from an outstanding burial at Ba'ja, southern Jordan**, *Plos One*, vol. 14(8), e0221171, 2019.

H.-G. K. Gebel *et al.*, **Household and death, 2 : Preliminary results of the 12th season (2018) at late PPNB Ba'ja, southern Jordan**, *Neo-Lithics*, vol. 19, pp. 20-45, 2019.

C. Purschwitz, **Die lithische Ökonomie von Feuerstein im Frühneolithikum der Größeren Petra Region**, *Studies in Early Near Eastern Production, Subsistence, and Environment*, vol. 19, Ex oriente, Berlin, 2017.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Next2C – Service abonnements Pour La Science
26 BD Président Wilson CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr

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

PAG20STD

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 %
DPV4E90

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

6,50€ PAR MOIS -31 %
PPV6E50

☐ 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 %
IPV8E20

2 / Mes coordonnées

Nom : .....
Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
E-mail : ..... @ .....
(indispensable pour la formule intégrale)

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte
Nom : ..... Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Désignation du compte à débiter
BIC (Identification internationale de la banque) |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
IBAN |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte
Nom : .....
Adresse : .....
Code postal |_|_|_|_|_| Ville : .....

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

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

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

L'ESSENTIEL

> Les économistes s'accordent sur le fait que taxer le carbone est le moyen le plus efficace de réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO_2). Mais d'un pays à l'autre, les taxes adoptées varient énormément.

> La clé est de calculer le coût social du carbone. Cela nécessite de tenir compte des revenus des générations suivantes, d'évaluer les dommages causés par les émissions de CO_2 et le risque de catastrophes.

> En s'appuyant sur ces considérations, les modèles fournissent une base que les décideurs politiques modulent en fonction de choix sociétaux concernant notamment les générations futures ou les objectifs de réduction réelle des émissions.

L'AUTEUR

GILBERT E. METCALF
professeur d'économie à l'université Tufts, aux États-Unis, spécialisé dans l'économie du climat. Il est chercheur associé au National Bureau of Economic Research, un organisme privé américain à but non lucratif

Comment calculer la taxe carbone ?

La lutte contre le changement climatique est un point important de la campagne présidentielle américaine. L'un des enjeux est d'établir une taxe pratique qui fera baisser les émissions de dioxyde de carbone. Reste à trouver le juste prix...

Demandez à n'importe quel économiste comment nous devrions réagir au changement climatique, il vous répondra que la stratégie la plus efficace consiste à donner un prix aux émissions de gaz à effet de serre, idéalement par le biais d'une taxe sur le carbone ou « taxe carbone ». Cela reflète un principe économique de base : les déchets produits par toute activité constituent un coût qui doit être payé. Nous payons pour jeter nos ordures ou assainir nos eaux usées, il est donc normal de payer aussi pour le dioxyde de carbone (CO_2) que nous produisons à partir d'activités telles que l'utilisation de combustibles fossiles.

Une autre possibilité est de mettre en place un programme de plafonnement et d'échange, comme l'ont fait les pays européens pour les centrales électriques et l'industrie. Le système de plafonnement et d'échange fixe chaque année un plafond global aux émissions de gaz à effet de serre, et les entreprises assujetties doivent ensemble rester en dessous de cette limite. Celles dont les coûts de réduction des émissions sont faibles ont intérêt à réduire leurs émissions et vendre des quotas (ou permis d'émissions) aux entreprises dont les coûts de réduction sont plus élevés, lesquelles continuent d'émettre. Cependant, les prix des systèmes de plafonnement et d'échange se sont révélés volatils et, par conséquent, ces systèmes nécessitent une surveillance rigoureuse pour éviter les problèmes.

Pourquoi un pays comme les États-Unis se préoccuperait-il de ces questions, lui qui s'en est toujours tenu éloigné ? Les raisons sont multiples. Notamment, une taxe carbone apporte une plus grande clarté sur le prix des émissions, que le monde des affaires apprécie. Et les États-Unis disposent déjà d'un système bien développé de collecte des taxes, qui fonctionne bien pour la collecte des droits d'accise >

© Katie Edwards

> (impôts indirects sur la vente et l'utilisation de certains produits) sur de nombreux combustibles fossiles. Il serait donc simple d'introduire une taxe carbone.

Pour de telles raisons, des économistes comme Gregory Mankiw, président du conseil économique de la Maison Blanche sous le mandat de George W. Bush, ont fortement soutenu l'idée d'une taxe carbone. Le Climate Leadership Council, une coalition américaine rassemblant d'anciens membres du gouvernement, des intellectuels et des dirigeants d'entreprises, a publié en 2019 une déclaration soutenant qu'« une taxe carbone offre le levier le plus rentable pour réduire les émissions de carbone à l'échelle et à la vitesse nécessaires ». À ce jour, 3589 économistes ont signé cette déclaration, dont les trois anciens présidents de la banque centrale américaine, 27 lauréats du prix Nobel et 15 anciens présidents du conseil économique de la Maison Blanche. La manière dont les États-Unis abordent le changement climatique est devenue un sujet majeur de la campagne présidentielle et le Congrès compte huit projets de loi visant à évaluer le prix de la pollution aux émissions de CO_2 des États-Unis, dont l'un est soutenu par 81 membres de la Chambre des représentants.

Néanmoins, l'adoption d'une taxe carbone sera une décision politique lourde de conséquences. Si une fenêtre s'ouvre, climatologues, économistes et politiciens doivent être prêts, car ils devront réussir du premier coup. Et justifier le taux choisi pour cette taxe.

Sa détermination semble simple : fixer la taxe par tonne de CO_2 émis de telle façon qu'elle soit égale aux dommages causés par son rejet. Mais comment évaluer ces dommages ?

LES DOMMAGES CAUSÉS PAR LES ÉMISSIONS

De façon générale, les économistes calculent les dommages climatiques à l'aide de modèles d'évaluation intégrée (MEI), des modèles informatiques qui captent les rétroactions entre l'économie et le climat. Ils utilisent une série d'équations qui caractérisent l'économie mondiale, la circulation dans le monde des émissions de CO_2 liées à l'activité économique et les dommages associés à l'augmentation de la température de l'atmosphère et de la surface des océans. Les MEI sont si importants qu'en 2018, le prix Nobel d'économie a été décerné à l'économiste William Nordhaus, de l'université Yale, pour ses travaux pionniers dans le domaine.

Les MEI tels que le modèle intégré dynamique du climat et de l'économie (DICE) de William Nordhaus sont devenus influents dans l'analyse politique. L'administration Obama en a utilisé trois, dont le modèle DICE, pour déterminer une valeur monétaire des émissions de CO_2 que le gouvernement américain devrait utiliser dans les analyses coûts-avantages des nouvelles réglementations proposées, notamment le renforcement en 2011 des normes de consommation de carburant automobile.

Les modèles semblent fournir une réponse sur la façon de fixer le bon taux de taxe carbone. Mais l'estimation des dommages dépend de notre aptitude à cerner plusieurs suppositions très incertaines. Trois défis se distinguent. Le premier consiste à mettre en balance les revenus actuels et ceux des générations futures ; pour cela, il faut établir un « taux d'actualisation », un chiffre également important pour de nombreuses décisions politiques, comme la fixation des cotisations pour la sécurité sociale ou le financement de grands projets d'infrastructure. Le deuxième défi est de mesurer les dommages causés par nos émissions de CO_2. Le troisième consiste à déterminer

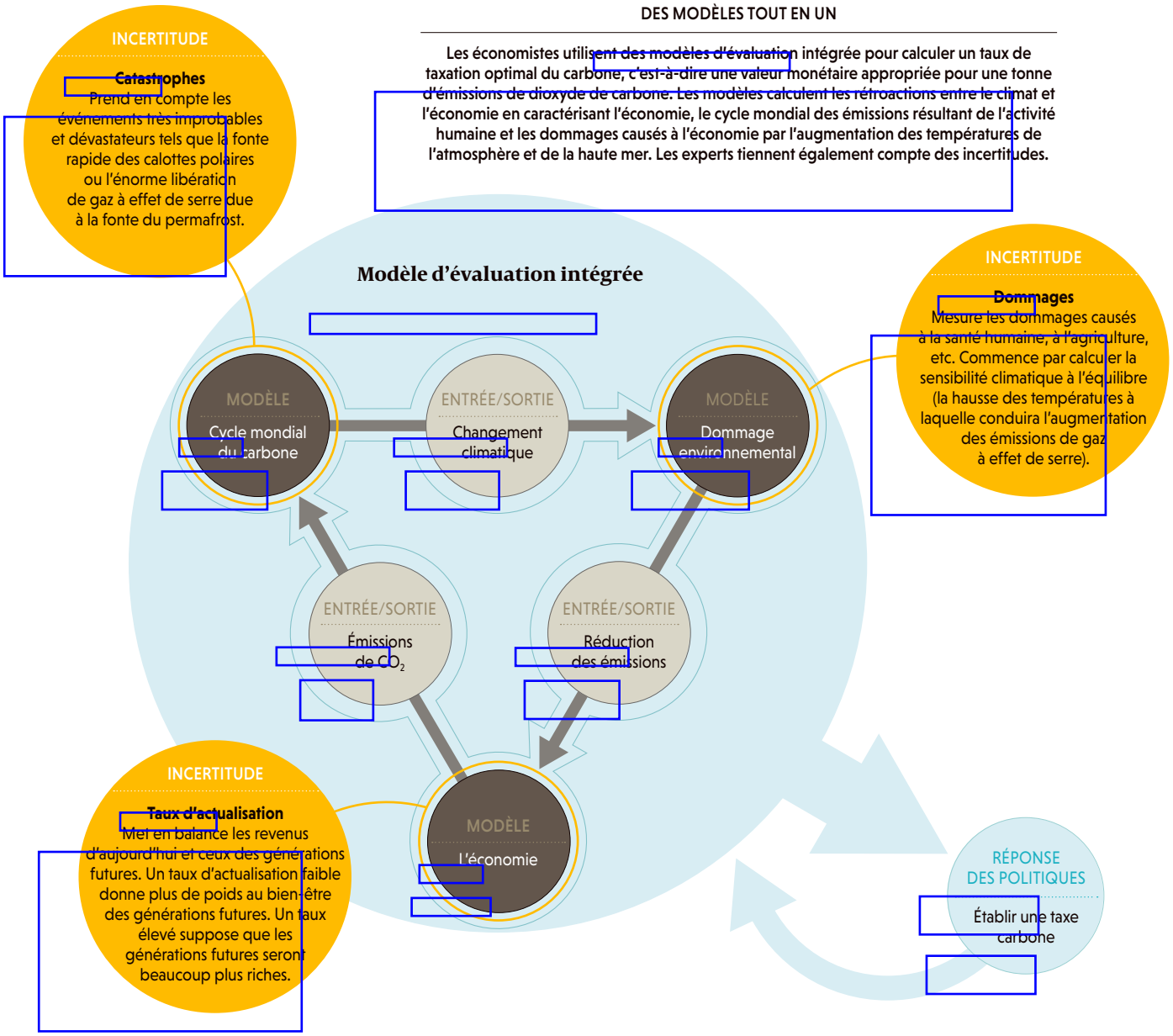
La combustion d'une tonne de charbon ayant 55 % de carbone produit 2 tonnes de CO_2

comment prendre en compte l'éventualité d'événements peu probables et très dommageables – les catastrophes climatiques.

Les estimations du taux optimal pour la taxe carbone varient considérablement selon la manière dont on traite ces facteurs. Aussi, bien que les MEI fournissent un point de départ solide pour définir une taxe carbone américaine, ils ne s'accordent pas sur le « bon » chiffre. De plus, il ne faut pas négliger les pressions sociétales et politiques (*voir l'encadré page 52*). Ces influences peuvent être énormes : quinze pays européens ont déjà fixé des taxes carbone, lesquelles s'étalent de 2 à 91 euros, hormis quelques valeurs à moins de 1 euro et une à 109 euros (*voir l'encadré page 51*).

LE COÛT SOCIAL DU CARBONE

L'idée d'utiliser une taxe afin de payer pour les dommages sociaux causés remonte à plus de 100 ans. Dès le début du XX^{e} siècle, l'économiste britannique Arthur Pigou, de l'université de Cambridge, soutenait déjà que si la pollution engendre un coût (dommage) pour quelqu'un et si le pollueur ne paye pas pour ce coût, alors le gouvernement devrait imposer



sur l'activité polluante une taxe égale aux dommages causés.

La combustion d'une tonne de charbon contenant 55 % de carbone, par exemple, produit environ 2 tonnes de CO_2 en combinant les atomes de carbone avec l'oxygène de l'air. Si les dommages causés par chaque tonne de CO_2 s'élevaient à 50 euros, par exemple, la prescription de Pigou serait de prélever une taxe de 100 euros par tonne de charbon. De cette façon, le coût du charbon inclurait le coût de sa combustion pour la société ou « coût social du carbone » (CSC). Mais pour estimer ce coût, il faut un modèle. C'est là qu'est intervenu William Nordhaus.

William Nordhaus a publié son premier article sur le modèle DICE en 1992. Il estimait qu'en 2015, le CSC serait de 4,54 dollars par tonne de CO_2. Autour de 2015, à l'aide d'une version révisée du modèle, il a porté son estimation à 31 dollars. En supposant une politique optimale, il a estimé que le CSC passerait à un peu plus de 100 dollars par tonne d'ici à 2050 et à 265 dollars d'ici à 2100 (tous ces chiffres sont en dollars de 2010).

Ces estimations se situent dans la moyenne des principaux MEI. Les chiffres de ces modèles semblent solides, mais l'économiste Robert Pindyck, de l'institut de technologie du Massachusetts, soutient que les MEI sont inutiles, car entourés de trop d'incertitudes. Son point de vue est extrême, mais nous devons prendre au sérieux les questions que lui et d'autres ont soulevées. Examinons les trois éléments clés sur lesquels reposent ces modèles : la détermination du taux >

© Jen Christiansen

> d'actualisation, l'évaluation des dommages liés aux émissions et la prise en compte des catastrophes potentielles.

ACTUALISER LES TAUX POUR LES GÉNÉRATIONS FUTURES

Toute décision impliquant des coûts et des avantages séparés dans le temps nécessite un taux d'actualisation. Considérez un actif qui vous rapportera 1000 euros dans dix ans. Combien vaut cet actif aujourd'hui ? Supposons que vous puissiez placer de l'argent sur un compte qui rapporte 3 % d'intérêts par an. Avec la capitalisation, 744 euros investis aujourd'hui donneraient 1 000 euros dans dix ans. En d'autres termes, la valeur de 1 000 euros dans dix ans est de 744 euros aujourd'hui. Plus précisément, la « valeur actuelle » correspondant à 1 000 euros dans 10 ans est de 744 euros lorsque le taux d'actualisation est de 3 %.

Lorsque les gouvernements doivent choisir un taux d'actualisation, ils utilisent parfois le rendement que les gens attendent des investissements sur le marché. Le Bureau américain de la gestion et du budget, par exemple, recommande généralement un taux d'actualisation de 7 % pour l'évaluation des réglementations gouvernementales, car il s'agit du rendement approximatif des investissements réalisés dans le secteur privé ces dernières années.

Pour les projets de longue durée, cependant, la différence entre des actualisations de 7 % et 3 % est énorme. Avec un taux d'actualisation de 7 %, la valeur actuelle de un million d'euros dans 250 ans est de 4,5 centimes, alors qu'avec un taux de 3 %, elle est de 618 euros. En d'autres termes, plus le taux d'actualisation est élevé, moins nous devrions dépenser aujourd'hui pour réduire les émissions futures.

Cependant, si une actualisation de 7 % semble raisonnable pour les projets gouvernementaux qui durent de cinq à quinze ans, elle ne l'est plus pour les actions liées au climat, où les bénéfices de l'investissement d'aujourd'hui pourraient durer 200 ans ou plus. Or, comme les gens ne font généralement pas d'investissements sur 200 ans, il n'existe pas de taux de marché pertinents à prendre en compte. Cela est vrai même pour les investissements des gouvernements dans les infrastructures. La plupart de ces projets, comme le canal Érié (construit au début du XIXe siècle pour relier les grands lacs américains et l'océan Atlantique), ont une durée de vie utile de 50 à 100 ans avant de devoir être reconstruits – ou sont abandonnés en raison de l'innovation (le canal a été supplanté par des chemins de fer, puis des autoroutes).

Puisque les taux du marché ne sont pas un bon guide, qu'en est-il de la théorie ? Selon l'économiste Frank Ramsey, contemporain de Pigou, le taux d'actualisation pour des durées longues devrait tenir compte de deux

© Katie Edwards

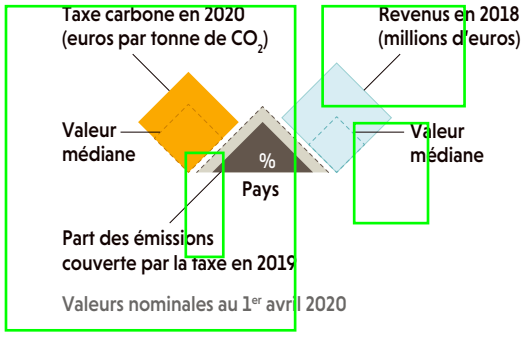
considérations. La première reflète une décision éthique sur la manière de traiter les différentes générations. Elle tend vers un faible taux d'actualisation, au motif que nous ne devrions pas traiter les générations futures différemment des nôtres. La deuxième s'appuie sur l'évolution des revenus au fil du temps : plus les générations futures sont riches par rapport à la nôtre, moins nous devrions nous sentir obligés d'engager des dépenses maintenant pour améliorer leur situation. On tend dans ce cas vers un taux d'actualisation élevé.

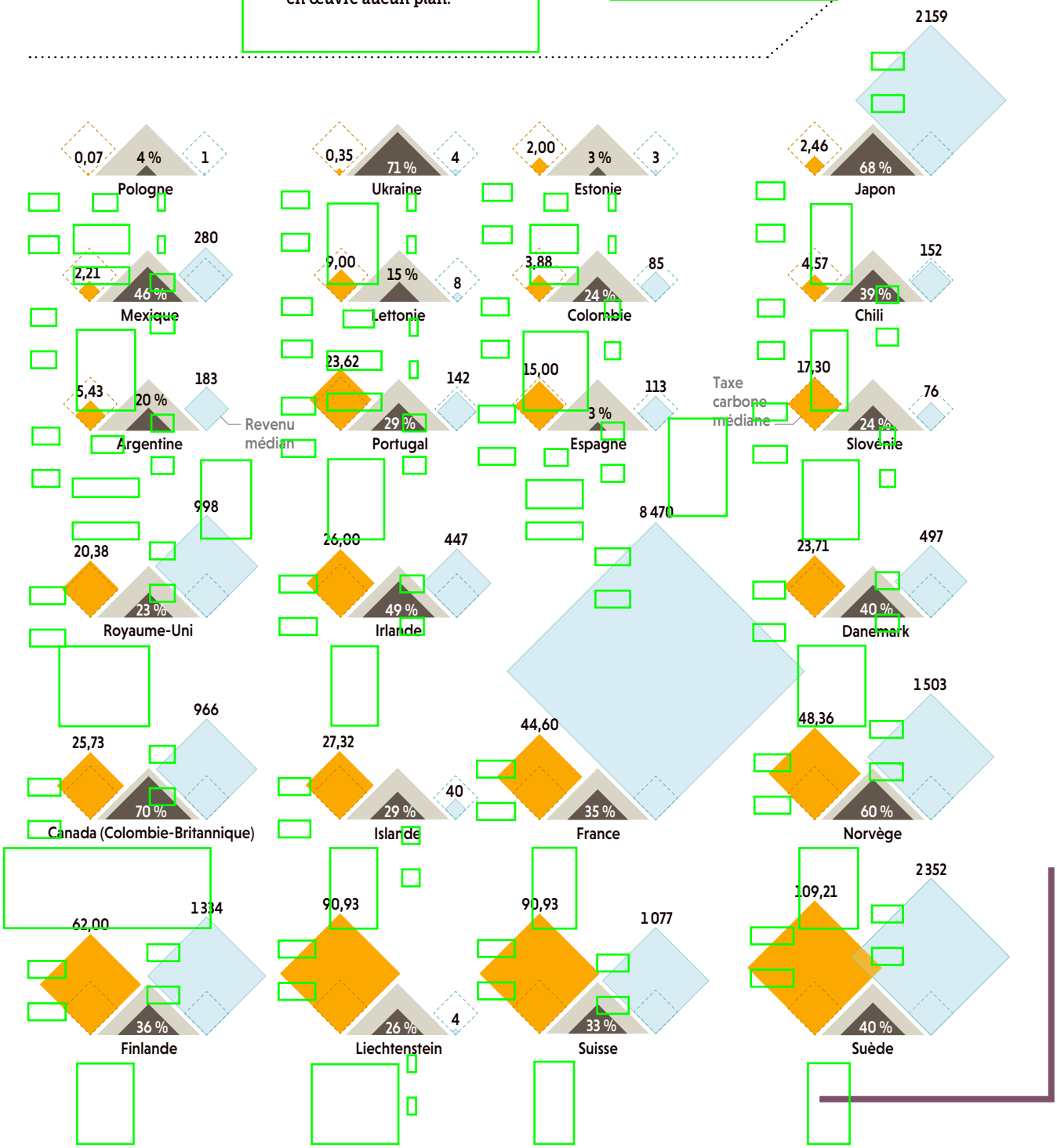
En 2006, l'économiste Nicholas Stern a rédigé une étude sur le changement climatique pour le gouvernement britannique en tenant compte de ces deux facteurs. Son « rapport Stern » a conclu que le bon taux d'actualisation pour la politique climatique était de 1,4 %. À ce taux, un million d'euros dans 250 ans valent aujourd'hui près de 31 000 euros, soit bien plus que les 618 euros calculés avec un taux d'actualisation de 3 %. S'appuyant sur ses calculs, Nicholas Stern a conclu que si l'on n'agissait pas, les retombées économiques du changement climatique à l'horizon 2050 seraient cinq fois plus élevées que le coût de la stabilisation des émissions de gaz à effet de serre. Le rapport Stern a eu une grande influence dans le monde entier pour faire prendre conscience de la nécessité d'une réduction rapide et massive des émissions.

Concrètement, comment concilier des approches menant à des taux d'actualisation élevés et faibles ? Une solution est de faire diminuer le taux d'actualisation au fil du temps. Si l'incertitude sur les revenus futurs s'accroît à >

UN PATCHWORK DE TAXES CARBONE

Vingt-cinq pays ont promulgué des taxes carbone, dont les taux varient largement, de 0,07 euro (par tonne de CO_2) en Pologne à 109,21 euros en Suède *(ici seuls 23 sont représentés)*. Les pays n'appliquent la taxe qu'à une portion de leurs émissions totales, et plusieurs ne taxent que les émissions provenant de certains types de combustibles fossiles. Les pressions politiques expliquent ces disparités. Les principaux modèles suggèrent une taxe de 40 à 47 dollars (36 à 42 euros) aux États-Unis, mais le pays n'a mis en œuvre aucun plan.





© Sonja Kuijpers, Studio Terp; sources : World Bank Group, I4CE

UNE PART SOCIALE NON NÉGLIGEABLE

Non seulement la Suède a la plus forte taxation du carbone, mais elle a aussi remplacé le charbon par le bois comme énergie de chauffage grâce aux abondantes forêts sur son territoire.

Gilbert Metcalf propose une analyse rigoureuse de la manière dont la combinaison d'une bonne mathématique et de choix politiques structurants permettrait de réduire les émissions de CO_2. Elle est fondée sur les enseignements de la théorie économique de l'environnement et appelle à l'introduction d'un prix du carbone. Ce faisant, elle penche résolument en faveur d'une taxe carbone puisqu'elle pointe l'instabilité structurelle des marchés de quotas de CO_2. L'exposé est complet et débouche sur des recommandations claires pour des politiques fondées essentiellement sur la taxe carbone comme solution au problème climatique. Il témoigne cependant, sur son chemin, de trois points aveugles.

Tout d'abord, Gilbert Metcalf se réfère à l'analyse coûts-avantages des problèmes environnementaux. Celle-ci met en quelque sorte l'économiste « au poste de commande » puisque c'est lui qui détermine, à travers le coût social du carbone (CSC), la bonne politique et le bon niveau de la taxe conduisant à l'équilibre entre les coûts de l'action et celui des dommages évités.

Mais dans la plupart de leurs travaux, les économistes ont renoncé à l'impossible évaluation monétaire des dommages du changement climatique. Dans cette perspective, l'économiste joue un rôle plus modeste, puisque l'objectif climatique est donné par une décision politique, informée par les sciences de la nature. Et ce n'est qu'à partir de cette décision que l'on introduit un prix du carbone. Ce fut le cas avec l'objectif de limiter le changement climatique à 2 °C, adopté par l'Europe en 1996, ou plus récemment, dans les suites de l'Accord de Paris, avec celui de la neutralité carbone en 2050. Pour ces objectifs, donnés de manière exogène, le rôle de l'économiste devient simplement d'identifier les solutions de moindre coût. On ne parle plus alors de CSC, mais, comme on l'a fait en France, de « valeur tutélaire du carbone » ou de « valeur de l'action climatique » permettant d'atteindre un objectif donné.

Le deuxième point renvoie aux difficultés rencontrées avec les modèles existants pour explorer des futurs supposant de profondes transformations de la société et des systèmes techniques. Longtemps, les études économiques informant les politiques climatiques ont adopté une approche de « changement incrémental » : on projetait une trajectoire de référence, sans politique, puis on introduisait un « signal » sous la forme d'un prix du carbone croissant qui infléchissait la trajectoire initiale, jusqu'à atteindre l'objectif désiré.

Mais depuis l'Accord de Paris, puis le rapport du Giec sur les conséquences d'un réchauffement de 1,5 °C, la perspective a changé. En effet, le point focal à 2050 des politiques climatiques est devenu, dans de nombreux pays (dont la France) et en Europe, la neutralité carbone : l'équilibre entre les émissions résiduelles de gaz à effet de serre et la captation du carbone, par l'action de l'homme, dans les forêts, les sols et le sous-sol. Très ambitieux, cet objectif est aussi très difficile à simuler avec les modèles existants. Cela à moins d'introduire une valeur croissante du carbone qui, au-delà d'un certain horizon, devient peu réaliste. C'est ce qui s'est produit dans les exercices modélisés de la commission Quinet 2, en 2018.

> **On a vu la violence des réactions en France durant l'hiver 2018**

Enfin et surtout, fonder une politique climatique sur la seule introduction d'une taxe n'est pas sans poser des problèmes majeurs d'acceptabilité sociale. On a vu durant l'hiver 2018 en France la violence des réactions déclenchées par la perspective d'une augmentation de la composante carbone (préexistante) dans le prix de l'essence. C'est donc une politique à mettre en œuvre avec précaution. L'analyse comparative de trois pays aux expériences très différentes en matière de taxation du carbone – la Suède, le Canada et la France – est de ce point de vue très instructive. Elle révèle cinq sujets critiques qui montrent que la taxation du carbone n'est pas une solution aussi simple dans la réalité que dans les manuels d'économie de l'environnement.

Le premier est sans doute celui de la confiance des citoyens dans la capacité des gouvernements à bien gérer la fiscalité et ses recettes : cette confiance fut grande en Suède, alors qu'elle est très limitée en France, et qu'au Canada, les interactions des régions avec l'État fédéral rendent le problème très complexe.

Le deuxième est qu'on ne peut séparer les taxes carbone des autres dimensions des politiques énergétiques : là encore, la Suède a bénéficié de conditions particulières avec une infrastructure de chauffage urbain préexistante qui a permis le remplacement facile et rapide du charbon par le bois, abondant dans ce pays.

Le troisième renvoie à la question des exemptions et de la protection des industries, leitmotiv des lobbys industriels : elle a constitué un point de blocage dans certaines provinces du Canada, et en France lors de la première tentative d'introduction d'une taxe carbone en 2009 ; en Suède, des exemptions ont bien été accordées aux industriels dans un premier temps, mais elles ont aujourd'hui disparu.

Le quatrième porte sur l'utilisation des recettes de la fiscalité carbone. En théorie, les revenus des taxes ne doivent pas être préaffectés, l'État devant garder les mains libres pour une bonne gestion de ses recettes. Dans la pratique, il est apparu – en France, mais pas en Suède – que la transparence dans l'utilisation des recettes à des fins environnementales et sociales constituait une condition de l'acceptabilité.

Le cinquième est relatif au niveau très élevé de taxation qui serait requis pour les nouveaux objectifs de neutralité carbone, si la taxe était le seul levier utilisé pour changer les comportements de consommation ou d'investissement. Dans bien des secteurs (bâtiment, véhicules, production d'électricité), l'introduction de normes de performance bien appliquées permettrait d'atteindre les objectifs désirés tout en limitant l'intensité du signal-prix nécessaire, donc le niveau de la taxe.

On le voit, les conditions nationales ou sectorielles spécifiques doivent être attentivement prises en compte dans toute mobilisation de la taxation du carbone.

PATRICK CRIQUI
Laboratoire d'économie appliquée de Grenoble

P. Criqui *et al.*, Carbon taxation: A tale of three countries, *Sustainability*, vol. 11(22), 6280, 2019.

© Shutterstock.com/trabantos

> mesure que l'on avance dans le temps, par exemple, il faut un facteur de précaution. Martin Weitzman, économiste à l'université Harvard, suggérait d'utiliser un taux d'actualisation de 4% à court terme, puis de 1% pour un avenir lointain (76 à 300 ans), avec une baisse progressive entre les deux.

Finalement, les économistes n'ont pas d'indications claires sur le «meilleur» taux d'actualisation, en partie à cause des choix éthiques qui s'imposent d'une génération à l'autre. En revanche, ils ont montré que de petites modifications du taux d'actualisation suffisent à entraîner de grandes modifications du CSC – un facteur important dans l'établissement d'une taxe carbone.

ÉVALUER LES DOMMAGES DUS AUX ÉMISSIONS DE CO_2

La deuxième incertitude à laquelle on est confronté quand on veut fixer un prix pour le carbone concerne l'évaluation des dommages que les émissions de CO_2 vont imposer à l'économie. Dans le modèle DICE de William Nordhaus, en gros, les dommages sont une fonction du carré de l'augmentation de la température. Cette approche est une approximation des impacts complexes du réchauffement, comme la baisse de la productivité agricole, l'augmentation du taux de mortalité due à la chaleur et aux maladies, la perte de biodiversité, les risques géopolitiques tels que les migrations humaines dues à la sécheresse, etc.

Comme d'autres modélisateurs de MEI, William Nordhaus a fondé sa fonction de dommage sur une analyse de la littérature existante. C'est une bonne nouvelle, car les scientifiques ont fait de grands progrès dans la mesure des dommages causés par le changement climatique. Toutefois, personne ne peut saisir toutes les retombées possibles. Pour compenser, William Nordhaus a augmenté ses estimations d'un quart. Sa fonction aboutit à des dommages mondiaux s'élevant à 8,5% du revenu global pour une augmentation de la température planétaire de 6 °C. À titre comparatif, le produit intérieur brut des États-Unis a chuté de plus de 25% pendant la Grande Dépression de 1929 à 1933.

Les scientifiques ont un moyen de quantifier la probabilité d'une forte augmentation de la température. En 1896, le chimiste suédois Svante Arrhenius a utilisé une série de mesures détaillées pour estimer qu'un doublement de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère réchaufferait la Terre de 4 °C. Cette relation, connue aujourd'hui sous le nom de «sensibilité climatique à l'équilibre», s'est révélée remarquablement durable. Malheureusement, peu de progrès ont été réalisés pour réduire l'incertitude qui l'entoure. Le dernier rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) indique qu'«il est probable que la sensibilité climatique à l'équilibre se situe entre 1,5 et 4,5 °C, extrêmement improbable que celle-ci soit inférieure à 1 °C et très improbable que celle-ci soit supérieure à 6 °C». Mais entre 1,5 °C et 4,5 °C, la variation des dommages est énorme. Les modélisateurs de MEI prennent en compte ce type d'incertitude en lançant des milliers de fois leurs modèles tout en faisant varier les paramètres clés. Ils fournissent ensuite des estimations flanquées de limites supérieures et inférieures, afin de donner aux décideurs politiques une idée de l'incertitude entourant les valeurs du CSC.

Ce n'est pas entièrement satisfaisant. Weitzman a déclaré qu'il y a une probabilité inquiétante que la sensibilité du climat à l'équilibre soit supérieure à 4,5 °C. On entre alors dans le domaine des conséquences extrêmes.

LE PRIX DES CATASTROPHES

Weitzman a cité une longue litanie d'«inconnues connues» susceptibles de conduire à des catastrophes, comme la montée rapide du niveau de la mer due à la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique occidental ou à des changements importants de trajectoire des circulations océaniques. Il a également évoqué les «inconnues inconnues» telles que des rétroactions climatiques incontrôlées encore non identifiées. Par exemple, tout le permafrost pourrait fondre à cause du réchauffement et libérer d'énormes quantités de CO_2 et de méthane, lesquelles provoqueraient à leur tour un emballement du réchauffement. Ce n'est pas un simple discours académique. L'entreprise d'investissement JPMorgan Chase a récemment publié un rapport mettant en garde ses clients: «Nous ne pouvons exclure des scénarios catastrophiques où la vie humaine telle que nous la connaissons serait menacée.»

Sur un graphique, une distribution normale de la densité de probabilité d'une hausse de température ressemblerait à une courbe en cloche dont le sommet correspondrait à la hausse de >

Une élévation de la température de 6 °C coûterait 8,5% du revenu mondial

> température la plus probable, tandis que de part et d'autre, les valeurs éloignées du sommet seraient très peu probables. Cependant, à mesure que nos connaissances s'améliorent sur la façon dont le climat réagit à nos émissions, cette distribution se révèle beaucoup moins symétrique : la probabilité d'une très forte hausse de température diminue plus lentement que dans une distribution normale. Cela crée un problème fondamental pour les MEI, que Weitzman a appelé le « théorème sinistre » : la société devrait accepter de payer une somme infinie pour éviter des événements peu probables parce que les dommages attendus seraient infinis. C'est difficilement concevable.

Weitzman ne savait pas trop quoi faire de son théorème. Il proposa que les chercheurs se concentrent davantage sur la compréhension des événements catastrophiques, afin de réduire l'incertitude sur leur probabilité et leurs conséquences. Ces connaissances aident à mieux éclairer les choix politiques visant à répondre à ces catastrophes éventuelles.

COMMENT PROCÉDER, CONCRÈTEMENT ?

Mais en attendant, les États doivent déterminer le coût social du carbone et le taux de la taxe carbone malgré toutes ces incertitudes. La seule chose dont nous sommes sûrs, c'est que le CSC doit être supérieur à zéro : tout polluant a un coût. Il est encourageant de voir une plus grande collaboration entre les économistes et les scientifiques, car cela réduira ces incertitudes.

Pour les décideurs politiques, les MEI fournissent un point de départ pour établir un calendrier des taux de taxation du carbone des prochaines décennies. Par exemple, les trois modèles que le gouvernement américain a utilisés en 2016 pour analyser les réglementations potentielles ont donné une fourchette d'estimations pour le CSC en 2020. En supposant un taux d'actualisation de 3 %, le modèle DICE de William Nordhaus a suggéré une taxe moyenne de 47 dollars (42 euros) par tonne de CO_2 en 2020. Les estimations moyennes des deux autres modèles étaient de 23 et 84 dollars (20 et 75 euros).

Le taux de William Nordhaus est très proche des 40 dollars (36 euros) par tonne de CO_2 suggéré par le Climate Leadership Council. Il est aussi proche du taux moyen initial des sept premiers projets de loi sur la taxe carbone déposés au Congrès américain. Dans le scénario de base du Climate Leadership Council, le taux augmenterait de 5 % chaque année, ce qui conduirait à une taxe de 65 dollars (58 euros) en 2030 et de 173 dollars (154 euros) en 2050. Un modèle économique de l'université Stanford et de l'organisation américaine indépendante Resources for the Future suggère que ce scénario entraînerait une réduction immédiate des émissions de 18 %,

En ralentissant les émissions, on réduit le risque de catastrophe climatique

et de 50 % d'ici à 2035 par rapport à une économie américaine sans taxe carbone. Le pays serait ainsi en bonne voie pour devenir décarboné d'ici au milieu du siècle.

La taxe produirait également beaucoup de recettes pour le gouvernement fédéral. Une étude du département américain du Trésor a estimé qu'une taxe carbone de cette ampleur permettrait de récolter plus de 1500 milliards de dollars au cours de la prochaine décennie, après avoir pris en compte les pertes liées à la réduction de l'activité économique et les recettes de la taxe. Un argument fiscal qui pourrait plaire aux décideurs du Congrès, lesquels auront besoin de fonds pour combler un déficit budgétaire en hausse. Ces recettes pourraient aussi servir à financer une partie des infrastructures décarbonées préconisées dans

Quand, au bord du Grand Canyon, on contemple la vue, le risque de tomber à cause d'une rafale soudaine de vent n'est pas négligeable, mais en reculant d'un pas, on réduit ce risque. Pour l'auteur, la taxe carbone vue comme une assurance contre les catastrophes fonctionne selon le même principe : elle n'élimine pas le risque d'une catastrophe, mais le réduit en contribuant au ralentissement des émissions de CO_2.

© Shutterstock.com/hlazg

le Green New Deal (nouveau pacte vert) américain. Une telle approche met l'accent sur le rôle d'instrument fiscal de la taxe carbone, plutôt qu'environnemental. Le gouvernement pourrait aussi restituer les recettes de la taxe carbone aux ménages par le biais d'un « dividende carbone », comme l'a proposé le Climate Leadership Council.

Une autre stratégie consisterait à se concentrer sur la réduction des émissions et non les recettes potentielles. Après tout, la taxation du CO_2 ne garantira pas réellement une réduction donnée des émissions, même si l'augmentation de leur coût les fera certainement baisser. Des économistes, par exemple, ont fait tourner un modèle simulant l'économie américaine, lequel indique qu'une taxe de 43 dollars (38 euros) par tonne de CO_2 à partir de 2019 aurait suffi pour que les États-Unis atteignent l'objectif de l'Accord de Paris d'une réduction des émissions de 28% d'ici à 2025.

On pourrait aussi voir la taxe carbone comme une simple assurance contre les catastrophes. La taxe n'éliminerait pas le risque, mais contribuerait à le réduire. On pourrait appeler cette interprétation « effet Grand Canyon » : si je regarde la vue depuis le bord du Grand Canyon, il y a un risque qu'une rafale soudaine de vent me fasse perdre l'équilibre et tomber de la falaise. En reculant d'un pas, je réduis ce risque. En ralentissant la cadence des émissions, nous réduisons le risque d'un événement climatique catastrophique.

UN THERMOSTAT POLITIQUE ?

Une approche hybride consisterait à fixer une taxe carbone et à réévaluer périodiquement son taux en fonction des progrès réalisés par les États-Unis en matière de réduction des émissions. Mais cette réévaluation est problématique. La mise en place d'une taxe carbone sera déjà un combat politique pour le Congrès. Il n'aura probablement pas envie de rouvrir périodiquement le débat pour réviser et ajuster les barèmes de taxation. Cependant, on peut contourner ce problème en incluant un « thermostat politique » dans la législation initiale. Par exemple, la législation pourrait inclure des objectifs explicites de réduction des émissions sur dix et vingt ans et un processus d'ajustement automatique des taux de taxation si le pays n'est pas en voie d'atteindre ces objectifs. Un certain nombre de propositions de taxe carbone américaine utilisent cette approche.

Si les États-Unis s'orientent vers une taxe carbone, ils vont devoir tenir compte d'importantes questions lors de sa conception : que faire des recettes de la taxe ? Et pour les travailleurs des secteurs de l'économie fortement carbonés ? Comment encourager la captation du carbone et son piégeage ? Faut-il taxer le CO_2 émis lors de la fabrication des produits importés ? Faut-il réaliser un compromis politique en assouplissant certaines réglementations environnementales en échange d'une taxe carbone ?

Des politiques supplémentaires seront aussi nécessaires. Il pourrait être difficile de taxer certaines sources de gaz à effet de serre et plus rentable de les réglementer. Les émissions de méthane provenant des gisements de pétrole et de gaz en sont un exemple. Il est irréaliste d'essayer de les mesurer et de les taxer ; il est plus efficace d'exiger des technologies qui réduisent les fuites. Plus fondamentalement, il faudra augmenter le budget de la recherche et du développement afin d'inventer et de mettre sur le marché des technologies énergétiques décarbonées abordables, voire des techniques rentables de captation et de stockage du carbone.

Il n'en reste pas moins qu'il est essentiel de donner dès maintenant un prix à nos émissions, et ce pour une raison simple : 2019 a été la deuxième année la plus chaude jamais enregistrée dans le monde, et les cinq dernières années ont été les plus chaudes des 140 dernières. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. E. Metcalf, **Paying for Pollution : Why a Carbon Tax Is Good for America**, Oxford University Press, 2019.

G. E. Metcalf, **On the economics of a carbon tax for the United States**, *Brookings Papers on Economic Activity*, printemps 2019.

W. D. Nordhaus, **Revisiting the social cost of carbon**, *PNAS*, vol. 144(7), pp. 1518-1523, 2017.

L'ESSENTIEL

> Les collemboles sont un groupe de petits arthropodes apparentés aux insectes et aux crustacés, qui comprend plus de 9 000 espèces dans le monde.

> Très nombreux dans les sols, ils contribuent à la décomposition et au recyclage de la matière organique, ainsi qu'à la fertilité des terres agricoles.

> Ils constituent un modèle commode et utile pour tester certaines idées en écologie théorique.

> On les utilise pour tester la toxicité de certains produits, et ils peuvent servir de bio-indicateurs de la qualité des sols.

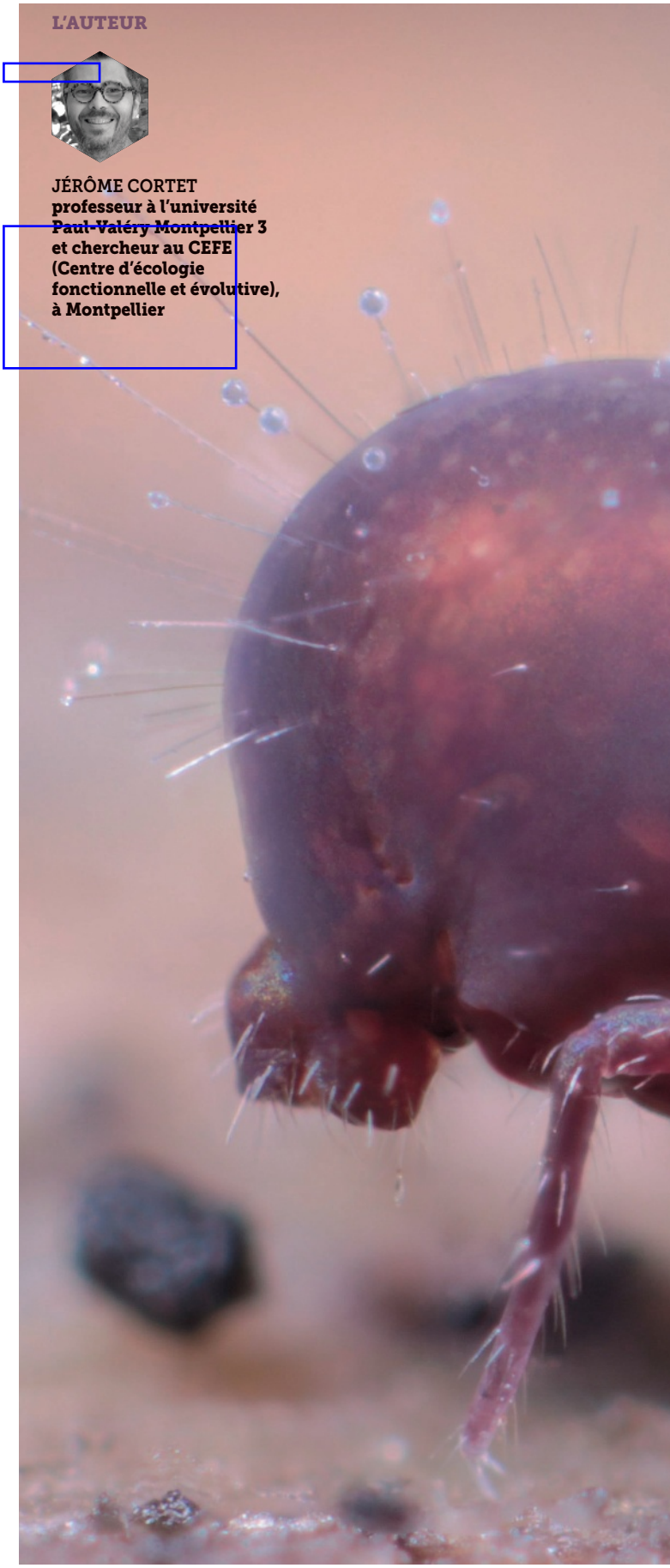
L'AUTEUR

JÉRÔME CORTET
professeur à l'université Paul-Valéry Montpellier 3 et chercheur au CEFE (Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive), à Montpellier

Tout petits arthropodes souvent méconnus, les collemboles abondent dans les sols et contribuent à la qualité de ces derniers. Ces animaux ont ainsi acquis une place privilégiée en écologie théorique et appliquée.

Les activités anthropiques menacent aujourd'hui particulièrement les sols. Aux pollutions directes causées par l'industrie, l'urbanisation et l'apport massif de déchets, s'ajoutent les effets délétères d'une agriculture intensive qui ne voit plus dans le sol qu'un simple support pour faire pousser des plantes. Les défis sont immenses : contamination par les pesticides et les métaux, perte de fertilité, érosion, mais aussi atteinte à la biodiversité.

Les sols sont en effet un réservoir énorme de biodiversité. Ainsi, à en croire l'*Atlas européen de la biodiversité des sols*, publié en 2010 sous l'égide de la Commission européenne, si la moitié des quelque 10 millions d'espèces animales et végétales estimées vivent dans les forêts tropicales, plusieurs centaines de milliers, voire millions d'espèces, vivent dans une simple poignée de sol. Même si ces estimations prennent en compte l'immense diversité microbienne (bactéries, champignons et archées), il est aujourd'hui temps de reconsidérer le sol et de prendre en compte sa biodiversité, non seulement pour ce qu'elle est, mais aussi pour ce qu'elle apporte en termes de services à l'humanité. >



© Andy Murray (CC BY-SA 2.0)

Les sols aux bons soins des collemboles

Cette femelle de l'espèce *Calvatomina rufescens* mesure environ 1 millimètre de long, taille typique de la plupart des collemboles.

> Les organismes vivant dans le sol assurent en effet nombre de fonctions essentielles. Ils décomposent et recyclent les matières organiques. Ils structurent aussi physiquement la terre en modifiant les agrégats (les « briques élémentaires » dont les sols sont constitués) et leur agencement, ce qui détermine la porosité du sol, dont dépend la circulation en son sein de l'eau et de l'air. Si les sols sont fertiles et peuvent servir de support aux cultures, c'est donc en grande partie grâce aux organismes qu'ils hébergent. La connaissance de cette biodiversité est ainsi un enjeu majeur pour l'étude de ces écosystèmes et le maintien des services qu'ils nous rendent.

Au sein de l'incroyable biodiversité des sols, un groupe d'organismes est particulièrement abondant : les collemboles. Ces petits animaux, qui dépassent rarement un ou deux millimètres de long, sont largement méconnus du grand public. Pourtant, les spécialistes les étudient depuis longtemps. Certains en ont fait un modèle d'étude privilégié pour la compréhension globale des systèmes écologiques, en raison de leur rôle majeur dans les réseaux trophiques (les chaînes alimentaires) et dans la décomposition des matières organiques. Par ailleurs, les collemboles sont sensibles aux variations physicochimiques et biologiques de leur environnement, sensibilité qui fait aussi de ces arthropodes de précieux outils pour nous aider à mieux gérer les sols.

Les collemboles (ici des individus des espèces *Sminthrides aquaticus*, en jaune clair, et *Podura aquatica*, en bleu) peuvent être très abondants. En France, en milieu forestier, on en compte de l'ordre de 10 000 individus par mètre carré.

DES ARTHROPODES HEXAPODES

De quel genre d'animaux s'agit-il ? Les collemboles sont des arthropodes, c'est-à-dire que leurs pattes sont articulées. Leurs trois paires de pattes sont portées chacune par un segment du thorax, comme les insectes ; mais, contrairement à ces derniers, ils n'ont pas d'ailes. Leur tête porte deux antennes, et leur abdomen est constitué de six segments (parfois fusionnés). Entre autres particularités, ils présentent – ce n'est pas le cas chez toutes les espèces – à l'extrémité de l'abdomen un diverticule en forme de fourche à deux dents, la « furca ». Cette furca est généralement repliée sous l'abdomen, mais elle peut se déployer brusquement, ce qui permet à l'animal d'effectuer des sauts assez impressionnants, jusqu'à plusieurs centimètres de hauteur selon l'espèce. C'est en raison de cette particularité que les Anglo-Saxons ont nommé *springtails* les collemboles, nom vernaculaire que l'on pourrait traduire par « queues sauteuses ».

Les collemboles ont également, sous le premier segment de l'abdomen, un autre diverticule, plus ou moins développé selon les espèces, nommé « collophore », un tube ventral qui peut chez certaines espèces se dévaginer considérablement. Grâce à ses sécrétions et aux échanges de fluides avec le milieu extérieur, cet organe permet à l'animal de réguler sa pression osmotique, c'est-à-dire de conserver l'eau à l'intérieur de son corps même si l'environnement extérieur est plus sec ou plus chargé en sels. Il lui permet aussi de se fixer à un support. C'est cet organe qui a inspiré au Britannique John Lubbock le nom donné à ce groupe en 1870 : « collembole » signifie projection (du grec *embolon*) qui se colle (du grec *kolla*). Malgré leur collophore, les collemboles restent très sensibles aux variations d'humidité et sont hygrophiles : ils peuvent respirer dans l'air, mais ont besoin d'un environnement humide.

Les scientifiques ont recensé à ce jour quelque 9 200 espèces de collemboles dans le monde (745 en France métropolitaine, plus de 2 200 en Europe), et bien d'autres sont sans doute à découvrir. C'est assez peu par rapport à d'autres groupes d'arthropodes (le plus grand groupe est celui des coléoptères – scarabées, carabes, coccinelles, lucanes… – qui compte plus de 370 000 espèces connues). Ces hexapodes présentent néanmoins une bonne variété de formes (arrondies ou allongées), de couleurs et de tailles (une fraction de millimètre à plusieurs millimètres, le plus petit connu mesurant 0,12 millimètre et le plus grand 17 millimètres).

© Mirko Graul / shutterstock.com

Quel rôle les collemboles jouent-ils dans l'écologie des sols ? Ces hexapodes font partie des décomposeurs et interviennent dans le recyclage des matières organiques, de façon plutôt indirecte. Ils consomment essentiellement champignons, bactéries, algues et pollens et exercent donc une régulation sur les populations microbiennes. En ingérant les microorganismes, ils contribuent également à diffuser leurs spores. Les boulettes fécales des collemboles, très riches en matières organiques et en mucus, favorisent également le développement microbien.

UN RÔLE MAJEUR DANS L'ÉCOSYSTÈME « SOLS »

En 1999, des chercheurs au Canada, John Klironomos et Peter Moutoglis, ont même démontré en laboratoire que la présence de collemboles favorise nettement la diffusion des champignons mycorhiziens. Les mycorhizes sont des champignons très importants pour la plupart des plantes vasculaires : en s'associant aux racines, ils fournissent aux plantes, en augmentant considérablement la surface d'échange, un meilleur apport en eau et en sels minéraux. L'action des collemboles ne se limite donc pas aux litières et à la décomposition des matières organiques, mais s'étend à la rhizosphère, c'est-à-dire à toute la zone du sol concernée par les racines des plantes. C'est pourquoi la fertilité des sols en dépend.

Ces animaux constituent un modèle d'étude très apprécié en écologie fonctionnelle

Par ailleurs, les collemboles constituent les proies de nombreux autres invertébrés (acariens prédateurs, pseudoscorpions, carabes, mille-pattes, araignées…), et se situent donc au cœur des réseaux trophiques des sols.

Depuis quelques années, ces petits hexapodes constituent un modèle d'étude particulièrement apprécié en écologie dite « fonctionnelle », c'est-à-dire le domaine de l'écologie qui porte sur les relations entre les communautés et le fonctionnement des écosystèmes, et qui s'intéresse aux capacités des organismes à agir ou réagir au sein de l'écosystème. Ces capacités sont liées aux « traits fonctionnels » des individus, notion qui s'est développée essentiellement depuis une vingtaine d'années et que des chercheurs en France ont largement contribué à définir.

Ainsi, pour les invertébrés du sol, avec Mickaël Hedde et Benjamin Pey, aujourd'hui chercheurs à l'Inrae et à l'École nationale supérieure d'agronomie de Toulouse, et plusieurs autres collègues, nous avons défini en 2014 ces « traits fonctionnels » comme toute caractéristique morphologique, physiologique, phénologique (c'est-à-dire liée à la périodicité et à la synchronisation de la reproduction des animaux) ou comportementale, mesurable à l'échelle des individus, sans référence à aucun autre type d'organisation, notamment taxonomique (en espèces, familles, ordres ou autres taxons). Cette définition reprenait celle de Cyril Violle, chercheur au CNRS à Montpellier travaillant sur les plantes, en y ajoutant le volet comportemental, propre aux animaux.

Comme les collemboles sont très abondants dans les sols et présentent des variations morphologiques et physiologiques très marquées et facilement identifiables (on en cite des exemples plus loin), ils offrent la possibilité soit d'évaluer l'effet sur leurs traits des « filtres » environnementaux, c'est-à-dire l'effet des paramètres physicochimiques et biologiques externes qui agissent sur les individus, soit de comprendre le rôle de ces individus dans la décomposition des matières organiques et autres processus. Dans le premier cas, on parlera souvent de « traits de réponse », et dans le second cas de « traits d'effets », même si cette distinction n'est pas toujours aisée.

Pour les collemboles, nous avons pour l'heure essentiellement travaillé sur les traits morphologiques, tels que la longueur du corps, la présence ou l'absence d'ocelles (yeux simples), la pigmentation, la présence ou l'absence de furca, mais également parfois sur des traits physiologiques et comportementaux, tels que leur capacité ou non à se reproduire par parthénogenèse (reproduction sans mâles) ou leurs préférences alimentaires.

À partir de mesures effectuées sur les individus ou de valeurs connues sur chaque espèce, on détermine une estimation globale de la valeur de chacun des traits au sein de la communauté observée. Ainsi, en fin de compte, plutôt que de considérer une communauté comprenant un ensemble d'espèces, on considère une communauté comportant un ensemble de traits, en ayant fait l'hypothèse que cette communauté de traits est liée à une fonction. Et de la même façon qu'on peut estimer la richesse spécifique (nombre d'espèces) d'une communauté, on peut également calculer une richesse fonctionnelle en prenant en compte un >

Les espaces ouverts favorisent les collemboles de grande taille, pigmentés…

ensemble de traits. Plus la communauté présente une importante diversité de traits, plus ses capacités fonctionnelles au sein de l'écosystème sont grandes, et donc plus cette richesse fonctionnelle est élevée.

L'application de ces considérations théoriques a notamment permis d'identifier plusieurs traits de réponse chez les collemboles. Par exemple, en collaboration avec Lucia Santorufo et d'autres chercheurs de l'université Federico II de Naples, nous avons montré en 2015 que dans des environnements urbains et périurbains de la ville de Naples, les écosystèmes les plus fréquemment perturbés favorisaient les individus à reproduction sexuée, c'est-à-dire incluant mâles et femelles, au détriment des individus à reproduction parthénogénétique. Il est en effet vraisemblable qu'une reproduction sexuée conduise à un plus grand brassage génétique et donc à de meilleures chances pour l'espèce de résister à une perturbation.

Globalement, l'usage du sol, c'est-à-dire l'occupation du sol par des forêts, cultures, prairies, jardins ou environnements urbains agit sur les communautés de traits. En compilant des résultats accumulés en France sur plus de 800 points de prélèvements depuis vingt ans, nous avons tout récemment montré, en collaboration avec des collègues de l'université de Lorraine, que les espaces ouverts (prairies, cultures…), au contraire des espaces fermés (forêts), favorisent les collemboles de grande taille (plusieurs millimètres) ayant des organes locomoteurs (furca et pattes) et sensoriels (ocelles et longues soies appelées «trichobothries») bien développés ainsi qu'une forte pigmentation.

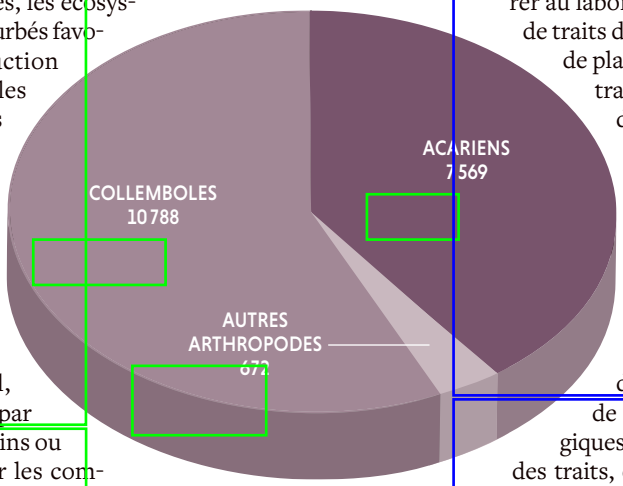
Ces résultats confirment une première étude publiée en 2014 et menée à l'échelle européenne par Sandrine Salmon, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et ses collègues. Par ailleurs, Corentin Abgrall, de l'université de Rouen, et plusieurs collègues ont montré en 2016, sur divers sols échantillonnés au niveau des berges de Seine, que les communautés de traits des plantes ont une influence sur les communautés de traits des collemboles. Par exemple, aux plantes montrant des capacités élevées de production de biomasse correspond un plus grand nombre de collemboles peu pigmentés. Ce qui se comprend: l'abondance en matières organiques profite aux espèces de collemboles vivant profondément dans le sol, lesquelles sont souvent blanchâtres, puisque la pigmentation ne joue aucun rôle adaptatif dans un milieu dépourvu de lumière.

De nombreuses études sont encore à mener pour mieux comprendre l'écologie fonctionnelle des collemboles. Par exemple, celles ayant explicitement abordé la question des traits d'effets sont restées peu nombreuses jusqu'ici. Mais les traits liés aux pièces buccales (présence ou non de plaques molaires broyeuses, longueur et forme des pièces buccales) et leurs effets sur les processus de décomposition sont actuellement en pleine exploration. Il apparaît aussi nécessaire de reprendre de nombreuses expériences menées à la fin du XX^{e} siècle, afin d'identifier et comparer au laboratoire les effets de différents types de traits de collemboles sur la décomposition de plantes selon les traits de celles-ci. Les traits d'interaction, qui interviennent dans les relations entre individus d'une même espèce ou entre individus d'espèces différentes, par exemple les organes liés à la communication chimique, sont également une voie à approfondir pour mieux comprendre la complexité des réseaux trophiques.

Quoi qu'il en soit, cette approche d'écologie fonctionnelle pose aussi de nombreuses questions méthodologiques sur la standardisation de la mesure des traits, et sur notre capacité à évaluer certains traits d'intérêt. C'est le cas des traits physiologiques et comportementaux, qui nécessitent une observation approfondie des espèces sur le terrain ou en laboratoire.

La question de la variabilité des traits au sein d'une même espèce se pose également. Ainsi, en compilant les valeurs indiquées dans les principales clés d'identification des collemboles disponibles au niveau européen, nous avons constaté en 2018 que, pour une espèce donnée, la longueur du corps des collemboles augmente avec la latitude et que cette variabilité peut modifier significativement les effets d'un filtre environnemental, par exemple un polluant.

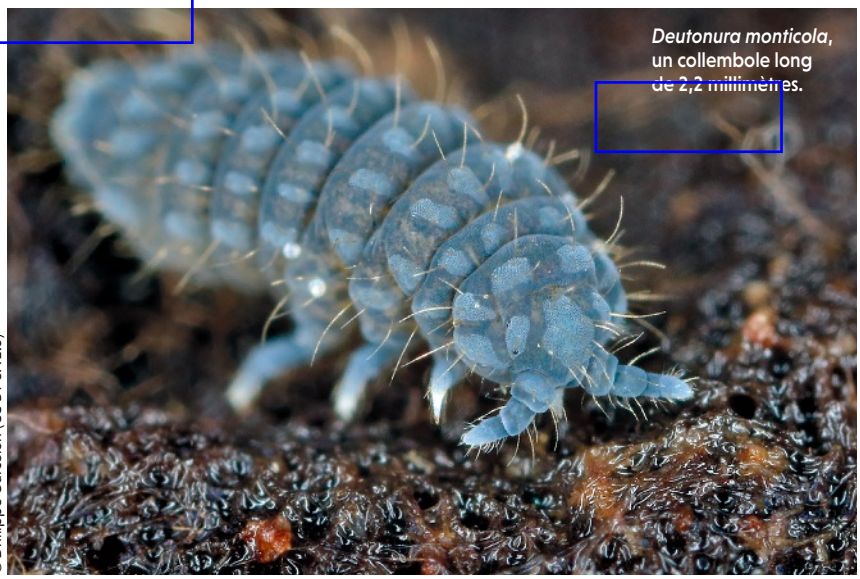
Enfin, plusieurs études publiées ces dernières années ont mis en avant une relation >



Dans les sols, les collemboles constituent le groupe le plus abondant, avant celui des acariens. Les autres arthropodes (protoures, diploures, petits insectes sous forme adulte ou larvaire, mille-pattes diplopodes et chilopodes, pseudoscorpions, araignées…) restent très minoritaires. C'est ce qu'illustre ce graphique des abondances, par mètre carré, des principaux groupes de microarthropodes dans 110 sols (8 sols forestiers, 52 sites en cultures et 47 en prairies) échantillonnés en Bretagne en 2006 et 2007 dans le cadre du programme *RMQS BioDiv Bretagne*.

UN GROUPE DE PLUS DE 9 000 ESPÈCES

Un petit *Entomobrya nicoleti (à gauche)* et un *Orchesella villosa (à droite)* bien plus grand.



Deutonura monticola, un collembole long de 2,2 millimètres.

© Dhilippe Garcelon (CC BY-SA 2.0)

Les collemboles se rencontrent partout sur la planète, à toutes les altitudes et latitudes, des pôles à l'équateur. Dans la plupart des sols, ce sont les arthropodes les plus abondants, avec plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'individus au mètre carré. De nombreuses espèces vivent également sur la neige ou à la surface de l'eau. Ce groupe zoologique existe depuis au moins 400 millions d'années. Déjà mentionnés par Linné, les collemboles ressemblent beaucoup à des insectes et ont longtemps été classés comme des insectes « aptérygotes », c'est-à-dire dépourvus d'ailes. Depuis plusieurs décennies, on les inclut parmi les hexapodes « entognathes » (c'est-à-dire dont les pièces buccales sont rentrées dans la tête), classe qui regroupe également les diploures et les protoures. Leurs cousins les plus proches ne seraient d'ailleurs pas forcément les insectes, mais plutôt les crustacés.

Sur la base de leur morphologie, puis de critères portant sur la disposition des soies sur le corps, les spécialistes ont établi une classification des quelque 9 200 espèces de collemboles connues à ce jour. Cette classification s'est stabilisée au tournant du XXIe siècle et a été affinée ces dernières années sur des bases moléculaires. Les collemboles sont aujourd'hui classés en quatre ordres regroupant au total quelque 33 familles. Les symphypléones (plus de 1 200 espèces) présentent un corps globuleux et certains de leurs segments abdominaux sont en partie fusionnés avec les segments thoraciques. Les arthropléones (ordres des poduromorphes et des entomobryomorphes) ont un corps allongé en forme de bâtonnet, où l'on distingue nettement le thorax de l'abdomen. Le quatrième ordre, les néelipléones, ne compte qu'une soixantaine d'espèces connues, d'allure similaire à celle des symphypléones

Individu du genre *Katianna* (espèce non déterminée) photographié en Tasmanie.

© Andy Murray (CC BY-SA 2.0)

Un *Isotoma viridis*.

© thalmacroguy / shutterstock.com

Un individu de l'espèce *Orchesella flavescens*.

© Ihor Hvozdetskyi / shutterstock.com

En haut à droite : © Entomobrya nicoleti *et* Orchesella villosa : Mick Talbot (CC BY-SA 2.0)

> entre traits et phylogénie, certains traits particuliers étant conservés au sein de certains groupes. Par exemple, la forme du corps (globulaire ou allongée) est directement corrélée à la phylogénie : tous les collemboles du groupe des symphypléones ont un corps arrondi, et tous les arthropléones ont un corps allongé. Le trait observé pourrait ainsi dans certains cas être simplement hérité, sans que l'on puisse établir un lien direct avec un filtre environnemental supposé ou une fonction. Il convient donc de bien identifier les traits d'intérêt qui permettent de répondre aux hypothèses formulées.

DES INDICATEURS DE LA QUALITÉ DES SOLS

Comme les collemboles sont abondants, qu'on les trouve à toutes altitudes et latitudes, et que leurs communautés réagissent aux contraintes environnementales selon des modalités que l'on commence à bien connaître, les scientifiques les envisagent depuis plusieurs années comme de très bons candidats pour évaluer la qualité biologique des sols ou pour suivre l'évolution de leur biodiversité. On se sert aussi couramment des collemboles en laboratoire pour tester la toxicité et l'innocuité des molécules pesticides nouvellement mises sur le marché sur les organismes non ciblés par celles-ci.

En France, des travaux impulsés par l'Ademe (l'Agence de la transition écologique), fondés sur des données relatives à 758 sites, nous ont permis de publier en 2017 des valeurs de référence pour, notamment, l'abondance en collemboles (nombre d'individus comptés par unité de surface) et la richesse en espèces (nombre de taxons par échantillon) des sols en fonction des principaux usages de ceux-ci. Les abondances se révèlent beaucoup plus faibles dans les espaces agricoles, notamment les sols cultivés et les vignes, qui comptent en moyenne 4000 à 6000 individus au mètre carré, que dans les milieux forestiers (10000 à 12000) ou même les espaces urbains (19000).

Les sols agricoles présentent en effet un certain nombre de caractéristiques particulièrement défavorables aux communautés de collemboles : perturbations fréquentes de l'habitat du fait du passage de la charrue qui retourne les couches superficielles du sol et des machines agricoles qui les tassent ; appauvrissement du sol par exportation des matières organiques, lesquelles sont à la base des chaînes trophiques auxquelles participent les collemboles ; faible diversité végétale, qui réduit les niches disponibles ; utilisation massive de pesticides, dont certains sont directement toxiques, et d'engrais chimiques minéraux qui modifient les propriétés du sol telles que le pH… Si l'on considère les

SUR LE WEB

Le site de référence de Frans Janssens :
https://www.collembola.org/

Le site de Philippe Garcelon :
https://collemboles.fr/

CYCLE DE VIE ET REPRODUCTION

Contrairement aux insectes, les collemboles ne présentent pas de stades larvaires ou de nymphes. Des œufs éclosent directement des individus ressemblant aux adultes, qui grandiront par mues successives. Les cycles de vie varient beaucoup selon les espèces et les environnements.
Par exemple, le petit *Sphaeridia pumilis* pourra accomplir un cycle complet (œuf à œuf) en huit jours seulement, tandis que d'autres espèces mettront plusieurs semaines.
La reproduction des collemboles est également variée ; certaines espèces semblent uniquement parthénogénétiques, tandis que d'autres présentent des mâles et des femelles, qui se distinguent parfois morphologiquement. On assiste même à des parades nuptiales complexes, où le mâle et la femelle s'accrochent l'un à l'autre par leurs antennes…

Un couple de *Stenacidia violacea* en parade nuptiale, les deux individus se tenant par les antennes.

© Andy Murray (CC BY-SA 2.0)

Sur cette photo d'un *Deuterosminthurus bicinctus*, on voit bien la furca, l'organe de saut, déployée. Au repos, la furca est repliée sous l'abdomen.

communautés de traits, les organismes vivant plutôt en surface et capables de recoloniser rapidement les milieux après une perturbation sont favorisés, au détriment de ceux, complètement inféodés aux sols et moins mobiles, qui vivent en profondeur.

Au contraire, les sols forestiers ne sont généralement pas travaillés et offrent donc aux organismes vivants des microhabitats stables; de plus, la plus grande partie des matières organiques produites par le milieu retourne au sol. Quant aux sols des milieux urbains, les situations observées sont très variables, selon par exemple qu'ils sont pollués ou non. Mais comme, globalement, les perturbations physiques sont moins récurrentes que pour les sols cultivés, on y trouve des niveaux d'abondance et de diversité parfois proches des espaces forestiers.

DES OUTILS POUR LES AGRICULTEURS ET LES GESTIONNAIRES D'ESPACES

Ces résultats restent à affiner, notamment afin de quantifier les effets précis des pratiques agricoles sur les communautés d'espèces et de traits des collemboles. On sait, à travers différents exemples, que les effets du labour sont délétères sur les communautés, mais on ne dispose pas encore de données en nombre suffisant pour estimer cela quantitativement. De telles données sont en cours d'acquisition notamment dans le programme *Agro-Eco-Sol*, financé par l'Ademe et coordonné par la société d'étude et de conseil agro-environnemental Auréa. Un échantillonnage systématique des sols du territoire français ou européen permettrait sans doute de compléter les connaissances et, à terme, de fournir aux agriculteurs, mais aussi aux gestionnaires d'espaces en général, des outils pour évaluer les effets de leurs pratiques sur la biodiversité des sols.

Par ailleurs, divers programmes de recherche incluent une réflexion sur la façon de rendre accessibles ces outils au plus grand nombre et de les mettre en œuvre en routine, par exemple dans le cadre de prestations, comme c'est aujourd'hui le cas pour les analyses physicochimiques des sols. Ainsi, la caractérisation des communautés du sol par l'ADN, et non plus par l'utilisation d'outils classiques d'observation au microscope, faciliterait l'accès à ce bio-indicateur que représentent les collemboles.

Des banques de gènes référencent déjà plusieurs dizaines d'espèces de ces hexapodes. Toute la difficulté porte sur la caractérisation adéquate de l'ADN contenu dans les sols, qui peut être plus ou moins altéré, et donc plus ou moins bien détecté. Il convient donc de calibrer au mieux les méthodes en fonction des types de sols et des types d'usages. On peut supposer que, pour les sols cultivés, les techniques seront très prochainement fiables, étant donné le faible nombre d'espèces observées (en France, une quarantaine d'espèces représentent plus de 90 % de l'abondance en collemboles dans ces milieux). Par ailleurs, l'approche par les traits qui, en théorie, s'affranchit de l'identification des espèces, est également une voie explorée.

Les collemboles apparaissent donc comme un objet d'étude particulièrement prometteur en écologie aussi bien fondamentale qu'appliquée. Mais les résultats acquis sur les sols grâce à ces petits animaux devront être mieux diffusés, tant vers le grand public que vers les gestionnaires, qui ignorent bien souvent jusqu'à leur existence. Un effort d'éducation à l'environnement et à la connaissance des sols est en effet indispensable si l'on veut mieux protéger cette ressource qui, comme bien d'autres, n'est pas inépuisable. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Cortet et M. Hedde, **La faune du sol pour évaluer l'impact des pratiques agricoles et la santé des sols,** *Techniques de l'ingénieur*, article ge1058, 2020

P. Lemanceau et M. Blouin (dir.), **Les sols au cœur de la zone critique,** vol. 6 (écologie), ISTE Éditions, 2018.

S. Joimel *et al.*, **Urban and industrial land-uses have a higher soil biological quality than expected from physico-chemical quality,** *Science of the Total Environment*, vol. 584-585, pp. 614-621, 2017.

J. Cortet et P. Lebeaux, **Planète collemboles, la vie secrète des sols,** Biotope, 2015.

S. Jeffery *et al.*, **Atlas européen de la biodiversité des sols,** Commission européenne - Bureau des publications de l'Union européenne, 2010.

S. P. Hopkin, **The Biology of the Springtails (Insecta : Collembola),** Oxford University Press, 1997.

L'ESSENTIEL

> Un minuscule hexapode, le collembole *Tullbergia mediantarctica*, vit sous les rochers des sommets des montagnes intérieures de l'Antarctique, où les conditions sont très rudes.

> *Tullbergia* semble avoir subsisté aux mêmes endroits pendant des millions d'années, en évitant à la fois les sols recouverts de glace et ceux riches en sels toxiques.

> Les séquences génétiques de *Tullbergia* et d'autres petits organismes de l'Antarctique aident à expliquer la survie de ces animaux et à éclairer l'histoire glaciaire du continent.

L'AUTEUR

DOUGLAS FOX
écrivain scientifique basé en Californie du Nord, aux États-Unis

Tullbergia, survivant de l'extrême

Le collembole *Tullbergia mediantarctica* mesure moins de 1,5 millimètre de long et vit sous des rochers dans certains endroits de l'Antarctique.

© Igor Siwanowicz

Une espèce de collembole, minuscule animal apparenté aux insectes, a survécu à plus de trente périodes glaciaires dans les terres les plus rudes de l'Antarctique. Comment expliquer cette prouesse ?

Ian Hogg et Byron Adams regardaient par les fenêtres de l'hélicoptère à bord duquel ils survolaient les pentes rocheuses des monts Transantarctiques, des sommets arides qui s'élèvent au-dessus de vastes calottes glaciaires à seulement 600 kilomètres du pôle Sud. Ils scrutaient de leurs yeux les corniches et les escarpements en dessous. Durant cette journée ensoleillée de janvier 2018, ils recherchaient des points de repère correspondant à ceux décrits dans les brèves notes laissées par un entomologiste décédé en 2012, Keith Wise. En 1964, celui-ci avait découvert dans ce paysage désolé un petit arthropode énigmatique, que personne n'avait revu depuis.

Les monts Transantarctiques s'étendent sur plus de 3000 kilomètres à travers le continent, du littoral au nord vers l'intérieur des terres au sud, coupant le continent en deux (*voir l'encadré page 69*). La chaîne montagneuse, large de 100 à 200 kilomètres, fait barrage et retient la vaste calotte glaciaire de l'Antarctique oriental, qui s'élève à 3000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les glaciers alimentés par cette calotte glaciaire s'écoulent à travers les ouvertures séparant les sommets montagneux et se déversent lentement dans l'Antarctique occidental, d'altitude plus basse. Les vents secs qui soufflent sur le plateau oriental maintiennent largement libres de glace les sommets eux-mêmes.

En hiver, les températures dans le sud de la chaîne Transantarctique plongent sous les −40 °C. Certains des sols de ces sommets n'ont pas reçu de quantités notables d'eau depuis des dizaines ou des centaines de milliers d'années. Ils ont de ce fait accumulé des sels caustiques, un peu comme à la surface de Mars. Pourtant, >

> malgré ces conditions sévères, une poignée de minuscules animaux vivent sur ces montagnes. Ian Hogg et Byron Adams y collectaient des échantillons depuis 2006 pour essayer de savoir quelles espèces vivent où. Mais l'espèce découverte en 1964, un hexapode nommé *Tullbergia mediantarctica*, leur avait jusqu'alors échappé.

L'endroit qu'ils exploraient était le mont Speed, qui s'élève à 1100 mètres d'altitude dans le sud de la Transantarctique, à 700 kilomètres de la côte. Ici, le glacier de Shackleton coule d'est en ouest à travers une brèche dans la montagne d'environ 10 kilomètres de large. Ian Hogg, biologiste à l'organisme gouvernemental Savoir polaire Canada, repéra un escarpement ressemblant à celui décrit dans les notes de l'entomologiste. L'hélicoptère se posa dessus, et les passagers descendirent sur une pente rocheuse aride parsemée de morceaux de granit jaunâtre. Ils se mirent à jeter un coup d'œil méthodique sous chaque rocher. En quelques minutes, ils trouvèrent leurs pâles bestioles – des dizaines d'hexapodes blancs plus petits que des graines de sésame.

DES MILIEUX DE VIE PARFOIS PLUS PETITS QU'UN TERRAIN DE BASKET

Les petites bestioles cheminaient lentement parmi les grains de sable, en s'orientant à l'aide de leurs antennes souples et charnues comme deux doigts tendus. Cependant, ces animaux sont extrêmement sensibles à la déshydratation et, dans la minute suivant leur exposition à l'air sec, ils se ratatinaient et mouraient. Au cours des jours suivants, Ian Hogg et Byron Adams ont découvert des *Tullbergia mediantarctica* sous les roches de quatre pentes différentes le long de l'extrémité inférieure du glacier de Shackleton. Ces milieux étaient parfois plus petits qu'un terrain de basket.

Tullbergia fait partie d'un groupe d'arthropodes, les collemboles, apparenté aux insectes. Peu de gens ont entendu parler de ces organismes dépourvus d'ailes, bien que le sol de votre jardin en abrite probablement des millions (*voir l'article de Jérôme Cortet dans ce numéro*). On trouve ces minuscules arthropodes partout dans le monde et quelques espèces vivent dans les rares terres non recouvertes de glace qui parsèment l'intérieur de l'Antarctique, endroits où la nourriture est rare, si ce n'est des bactéries ou des champignons microscopiques occasionnels.

Comment ces *Tullbergia* et d'autres collemboles se sont-ils retrouvés dans ces montagnes isolées, et comment ont-ils survécu à plusieurs dizaines de périodes glaciaires ? C'est là une énigme que les scientifiques aimeraient résoudre. Depuis l'expédition de 2018, Ian Hogg et Byron Adams, biologiste de l'université Brigham Young, aux États-Unis, ont réalisé des études génétiques sur le *Tullbergia* redécouvert, ainsi que sur une autre espèce de collembole trouvée lors de la même expédition.

Ces travaux, qui devraient être publiés dans le courant de l'année, jetteront un éclairage nouveau et surprenant sur l'histoire de ces espèces, qui pourrait à son tour réécrire l'histoire de la façon dont d'énormes calottes glaciaires ont alternativement apparu et disparu sur le continent au fil des millions d'années de glaciations. Des espèces telles que *Tullbergia* mettent également à l'épreuve nos idées sur les limites biologiques, en renforçant l'idée que même les environnements les plus inhospitaliers de la Terre abritent souvent une vie animale complexe.

IMMIGRANTS DE L'ÈRE GLACIAIRE

L'Antarctique est connu pour ses manchots et ses phoques, mais ces animaux ne vivent que sur ses côtes, grâce à un riche réseau alimentaire de phytoplancton, de poissons et de krill. Ces espèces emblématiques ne pourraient pas survivre à l'intérieur du continent, plus vaste que les États-Unis et le Mexique réunis, dont environ 98 % sont recouverts de glace.

Les chercheurs prélèvent des échantillons de sol *(ci-dessus à gauche)* contenant des *Tullbergia* sur les pentes d'éboulis du mont Speed *(à droite)*, le long du glacier de Shackleton en Antarctique.

© Byron Adam

Cependant, à partir de 1900, les scientifiques ont commencé à découvrir que des terrains libres de glace, à plusieurs kilomètres de la côte, sont habités par des animaux d'un autre genre : de minuscules collemboles, acariens, vers et insectes diptères de la famille des chironomes. Ces organismes ont besoin d'eau et vivent souvent sur des lichens ou des mousses poussant sur les pentes exposées au nord, où le soleil d'été, 24 heures sur 24, fait fondre la neige et humidifie le sol. Les scientifiques les ont progressivement trouvés dans des endroits plus froids et plus secs, plus loin à l'intérieur des terres.

En 1964, l'entomologiste néozélandais Keith Wise s'est rendu en avion au glacier de Shackleton pour voir s'il pouvait trouver des animaux dans l'un des endroits les plus isolés de l'intérieur du continent. Le 13 décembre, il skia sur le glacier plusieurs kilomètres depuis son campement jusqu'au pied du mont Speed. De la neige fondue coulait lentement et mouillait le sol. À cet endroit, Wise repéra deux espèces de collemboles : l'*Antarctophorus subpolaris* gris, qu'il avait déjà vu ailleurs, et le *Tullbergia* blanc fantomatique, à l'époque nouveau pour la science.

Dans les décennies qui ont suivi la découverte de Wise, les chercheurs ont tenté de reconstituer l'histoire de la région où *Tullbergia mediantarctica* a été trouvé. Les sédiments des fonds marins ont révélé que l'Antarctique avait connu 38 périodes glaciaires au cours des cinq derniers millions d'années. Lors de ces glaciations, ses glaciers se sont épaissis en s'étendant vers l'intérieur des terres et en recouvrant de nombreux versants montagneux de nos jours exposés. Les températures étaient inférieures de 5 à 10 °C à celles d'aujourd'hui. La plupart des chercheurs ont supposé que les glaciers en expansion avaient plus ou moins tout effacé, explique Steven Chown, écologue polaire à l'université Monash de Melbourne, en Australie.

Les scientifiques pensaient que lorsqu'une période glaciaire s'achevait, les glaciers s'amincissaient, en s'affaissant en aval et en exposant davantage les sommets, ce qui permettait à des espèces arrivant de Patagonie, de Nouvelle-Zélande ou d'Australie, portées par les courants marins ou par les pattes boueuses des oiseaux de mer, de se fixer à nouveau. Ces immigrants remplaceraient les espèces qui avaient été éliminées par l'avancée des glaciers. Selon ce scénario, lors de la période glaciaire suivante, les nouveaux venus disparaissaient également, pour être remplacés par une autre vague d'immigrants après le retrait des glaces. La plupart des experts supposaient que les espèces actuellement présentes en Antarctique ne pouvaient y être installées depuis plus de 20 000 ans environ.

DESCENDANTS DES PREMIERS HABITANTS DU CONTINENT

Puis, en 2005, la situation changea. Deux équipes différentes publièrent des études génétiques qui contredisaient cette vision répandue. Peter Convey, écologue du British Antarctic Survey, s'était associé à Giuliana Allegrucci, de l'université de Rome, et ses collègues pour comparer les séquences génétiques de diptères chironomes vivant en Antarctique et en Patagonie, l'extrémité de l'Amérique du Sud. En s'appuyant sur les différences entre certaines séquences d'ADN et sur les hypothèses de base sur le rythme auquel les séquences d'ADN subissent des changements aléatoires, ils ont estimé depuis combien de temps l'évolution avait séparé ces espèces. Peter Convey admet qu'il s'attendait à une séparation datant de quelques dizaines de milliers d'années. Mais ses calculs suggéraient qu'elles étaient séparées depuis 68 millions d'années ! Cela signifie que les chironomes de l'Antarctique n'étaient pas du tout des immigrants : au contraire, il s'agissait de descendants des premiers habitants du continent.

Il y a 68 millions d'années, l'Antarctique était recouvert de forêts luxuriantes, peuplé >

> de dinosaures et de mammifères primitifs. Il était encore rattaché à l'Amérique du Sud, formant le dernier vestige du supercontinent Gondwana, dont l'Afrique et l'Australie s'étaient déjà séparées. Ce n'est qu'après s'être détaché de l'Amérique du Sud, il y a environ 35 millions d'années, que l'Antarctique a plongé dans un grand froid qui a éliminé du continent la plupart des espèces.

UNE ORIGINE TRÈS ANCIENNE

Une deuxième étude réalisée en 2005 a mis en évidence que l'origine de certains collemboles antarctiques est très antérieure aux récentes périodes glaciaires. Ian Hogg et son ancien doctorant Mark Stevens, qui avaient travaillé ensemble à l'université de Waikato, en Nouvelle-Zélande, ont utilisé des séquences de gènes afin d'estimer, pour plusieurs espèces de collemboles antarctiques, quand celles-ci avaient divergé des espèces d'Australie, de Nouvelle-Zélande et de Patagonie. Leurs résultats ont montré que la séparation datait d'au moins 10 à 20 millions d'années.

Ces découvertes et d'autres similaires ont laissé de nombreux scientifiques perplexes. Comment ces minuscules organismes ont-ils pu traverser tant de périodes glaciaires ? Certains chercheurs ont avancé qu'ils auraient pu survivre dans de petites vallées isolées, les vallées sèches de McMurdo, dans la partie nord des montagnes Transantarctiques, à 850 kilomètres au nord de l'endroit où Ian Hogg et Byron Adams ont trouvé *Tullbergia*. Ces vallées sont étrangement restées libres de glace au cours des 12 derniers millions d'années. D'autres chercheurs ont émis l'hypothèse que durant les périodes glaciaires, les organismes en question ont trouvé refuge dans des points chauds géothermiques situés à proximité d'une poignée de volcans qui ponctuent le littoral du continent. Et qu'après avoir survécu à la période glaciaire dans ces zones côtières, ces espèces auraient gagné l'intérieur des terres et atteint des montagnes comme celles proches du glacier de Shackleton.

Mais ces idées n'ont pas résisté aux observations. Byron Adams explique qu'on ne retrouve pas *Tullbergia* ou les autres bestioles dans d'autres parties de l'Antarctique. « On ne les trouve pas à proximité des volcans, on ne les trouve pas sur les côtes », dit-il, ce qui contredit l'idée qu'ils ont vécu par le passé dans ces endroits reculés.

Entre 2006 et 2017, Ian Hogg a visité plus d'une dizaine d'endroits le long des monts Transantarctiques afin de collecter des spécimens vivants. Avec Byron Adams, qui a participé à certains de ces voyages, il a trouvé cinq espèces de collemboles, toutes connues auparavant. Mais ils n'ont pas découvert de *Tullbergia* avant l'exploration du mont Speed en 2018.

Après que Ian Hogg a ramené à son laboratoire des spécimens de *Tullbergia*, son équipe a commencé à analyser des séquences génétiques des collemboles. La doctorante Gemma Collins a séquencé un court fragment d'ADN de chaque individu, le gène mitochondrial codant la sous-unité 1 de la cytochrome C oxydase, dont la variabilité est un bon indicateur de l'histoire évolutive des espèces. Elle a passé des mois à comparer les séquences d'ADN de plus de 1100 individus trouvés à différents endroits le long de la chaîne Transantarctique (dont certains avaient été collectés des années auparavant). Ces comparaisons permettraient de déterminer quels animaux, le cas échéant, partagent une histoire commune. Elles révéleraient si des populations de différents endroits ont été isolées les unes des autres, peut-être par l'expansion des calottes glaciaires, ou si elles ont pu se déplacer vers de nouveaux territoires lorsque la glace était peu abondante.

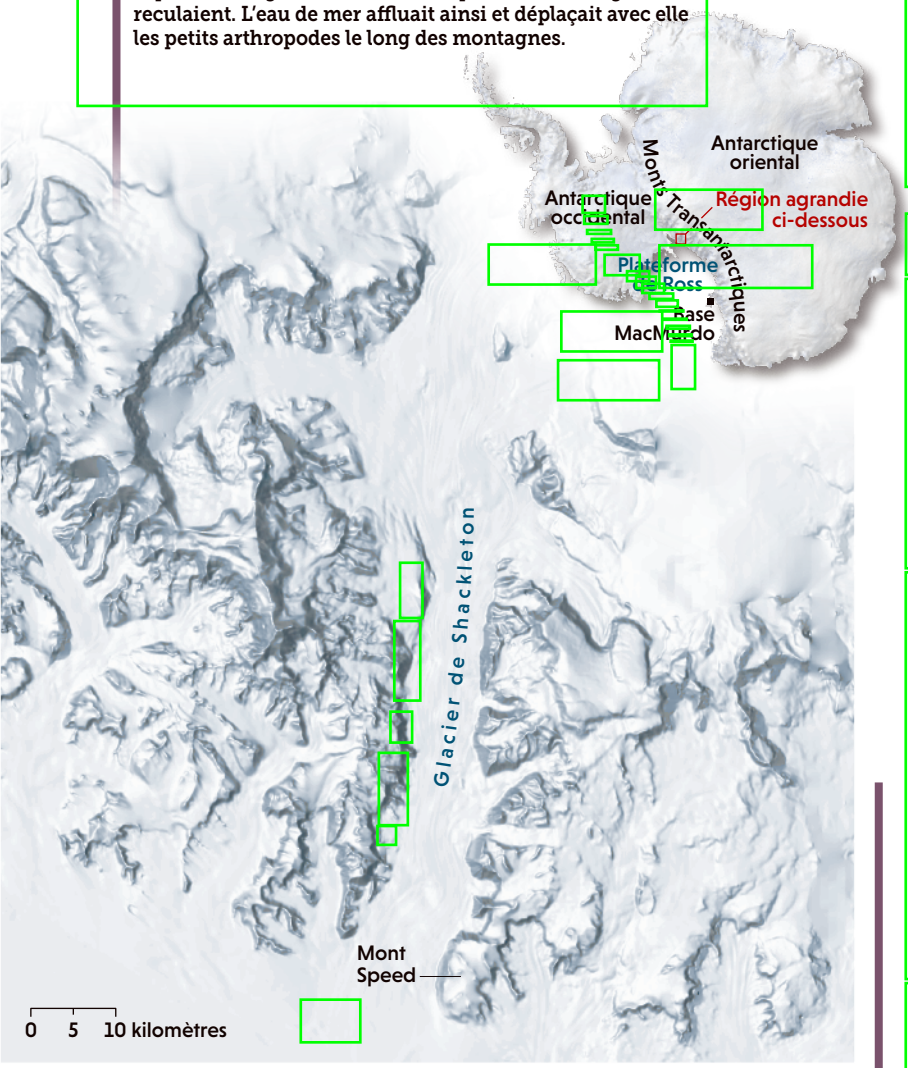
Lors des périodes les plus chaudes qui s'intercalaient entre les périodes glaciaires, la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental se serait amincie et aurait reculé. Et la plateforme glaciaire de Ross, qui flotte sur la mer en bordant la plupart des montagnes centrales et méridionales, a probablement disparu. Ces deux événements auraient permis à l'océan libre de s'avancer vers l'intérieur des terres le long de la chaîne montagneuse, mais en atteignant des altitudes moins élevées que ne l'avaient fait les calottes glaciaires. Ian Hogg spéculait que lors de ces épisodes chauds, les minuscules arthropodes s'étaient probablement déplacés et que différentes populations de la même espèce, auparavant isolées, s'étaient rencontrées et hybridées puisque de plus grandes étendues de terre étaient libres de glace. Les collemboles auraient pu se disperser en flottant sur l'eau. Selon Ian Hogg, ils s'installaient dans un nouvel habitat, puis parvenaient à s'y maintenir pendant 50000 ou 100000 ans, avant que les glaces recouvrent de nouveau la pente.

Mais les résultats obtenus pour *Tullbergia* et *Antarctophorus* suggèrent que même en période chaude, le mouvement de ces animaux était plus restreint qu'on ne le pensait. Deux populations auxquelles appartiennent des *Antarctophorus* collectés sur des crêtes exposées de part et d'autre du glacier de Shackleton semblent ne pas s'être hybridées depuis cinq millions d'années, bien qu'elles vivent à seulement 10 kilomètres l'une de l'autre, soit la largeur de la brèche que traverse le glacier. « C'est assez surprenant, commente Ian Hogg. Cinq millions d'années, c'est long. » Il semble que l'espèce n'ait pas du tout voyagé.

Pourtant, les indices géologiques montrent que lors d'une période particulièrement chaude, il y a trois à cinq millions d'années, la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental

DES HABITATS AU CŒUR DES GLACES

Les monts Transantarctiques séparent les vastes calottes glaciaires de l'Antarctique oriental et occidental, mais certains glaciers comme le Shackleton suintent d'est en ouest par des brèches séparant les sommets. Les chercheurs ont trouvé le collembole *Tullbergia mediantarctica* sur la pente du mont Speed faisant face au glacier *(en bas)*. Comment cette espèce s'est-elle retrouvée là ? Selon l'une des hypothèses, au cours des périodes chaudes, la plateforme glaciaire de Ross disparaissait et les glaciers reculaient. L'eau de mer affluait ainsi et déplaçait avec elle les petits arthropodes le long des montagnes.



s'est effondrée à plusieurs reprises. Des collemboles auraient pu se déplacer en flottant le long de la chaîne de montagnes lors de l'intrusion de l'océan, franchir les 10 kilomètres d'écart et s'y reproduire avec des collemboles génétiquement différents. Mais les populations d'*Antarctophorus* n'en avaient rien fait. Les résultats génétiques obtenus par le laboratoire de Ian Hogg ont également montré que des groupes d'*Antarctophorus* du glacier de Shackleton ne s'étaient pas croisés avec une autre population vivant 160 kilomètres plus au nord, le long des montagnes, depuis au moins huit millions d'années.

Ces résultats suggèrent que même lorsque la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental s'est effondrée, il restait encore suffisamment de glace dans les monts Transantarctiques pour empêcher les collemboles de se déplacer.

L'analyse des *Tullbergia* collectés autour du glacier de Shackleton a étonné encore plus les chercheurs : les séquences de gènes étaient pratiquement identiques sur les quatre sites. Cela pourrait signifier que tous ces collemboles descendent de quelques individus et qu'ils ne se sont jamais hybridés avec des populations extérieures.

QUAND LA TOXICITÉ SE FAIT SENTIR

Comment des *Tullbergia* ont-ils pu persister pendant des millions d'années, bloqués par la glace durant au moins 30 périodes glaciaires, sans se déplacer de plus de quelques kilomètres ou se reproduire avec des individus d'autres populations ? Cette question est d'autant plus intrigante que pendant une grande partie de cette période, ces animaux étaient piégés dans une zone étroite, cernée par la glace d'un côté et par un sel tout aussi mortel de l'autre.

En effet, lorsque Ian Hogg et Byron Adams ont effectué des vols en hélicoptère au-dessus du glacier de Shackleton, en 2018, ils ont souvent constaté une légère ligne de démarcation sur les flancs des montagnes : à quelques centaines de mètres au-dessus de la surface de la glace, la roche changeait de couleur, passant de plus claire au-dessous de la ligne à plus sombre au-dessus. Ces « lignes de démarcation » indiquent la hauteur à laquelle la glace s'est élevée au cours de la dernière période glaciaire – elles résultent de subtiles différences dans la façon dont les minéraux s'oxydent lorsqu'ils sont exposés à l'air plutôt que recouverts de glace.

Il est facile d'imaginer qu'à mesure que les glaciers s'épaississaient, les animaux migraient plus haut sur le flanc de la montagne, afin de rester au-dessus de la glace. Mais cette hypothèse pose un problème majeur : les parties supérieures des montagnes sont chargées en substances toxiques. Si l'on retourne un rocher au-dessus de la ligne de démarcation à Shackleton ou dans toute autre montagne de la chaîne Transantarctique, le sol en dessous est souvent recouvert d'une croûte de sel blanc. « Ce n'est pas du bon sel. Ce n'est pas du sel gemme de l'Himalaya », explique Byron Adams. « Mettez votre langue là-dessus et vous verrez. »

C'est du sel riche en nitrate (NO_3^-), toxique pour de nombreux organismes vivants. Il pleut en permanence du nitrate sur la Terre, celui-ci se formant par l'action du rayonnement ultraviolet sur les gaz atmosphériques. Dans la >

© Mapping Specialists

Blanc quand il est vivant, hérissé de petites soies, le collembole *Tullbergia mediantarctica* se dessèche rapidement et meurt lorsqu'il est exposé à l'air libre. Sur les restes de cet individu, coloré et fortement agrandi, l'exosquelette de la tête, dur, apparaît en rouge ; le reste de la cuticule, plus souple, est en vert.

> plupart des régions du monde, il ne s'accumule pas dans les sols, car les pluies le lessivent. Mais dans les endroits secs, comme sur les monts Transantarctiques, il peut s'accumuler au fil des millénaires jusqu'à atteindre des niveaux toxiques. Ces lieux d'altitude accumulent également du perchlorate (ClO_4^-), un oxydant utilisé dans les désinfectants et les propulseurs de fusée – et présent à la surface inhospitalière de la planète Mars, comme l'a découvert en 2008 la sonde *Phoenix*.

Les sels constituent un redoutable écueil pour les petits animaux, tels les collemboles, qui tentent d'échapper à la progression des glaciers : rester sur place signifie qu'ils seront enterrés sous la glace, tandis que remonter la pente mène à des milieux toxiques.

Bien sûr, Ian Hogg et Byron Adams n'ont trouvé que des collemboles vivant en dessous de la ligne de démarcation. Cependant, ces endroits ont vraisemblablement été recouverts par 100 mètres de glace ou plus au dernier maximum glaciaire, et il aurait été impossible pour des formes de vie aussi complexes de survivre dans la glace pendant des dizaines de milliers d'années. Alors, où sont allés ces hexapodes ?

L'HISTOIRE RÉÉCRITE

La survie de tout animal dépend de l'eau, et l'eau semble indiquer une explication à l'improbable résistance de *Tullbergia*.

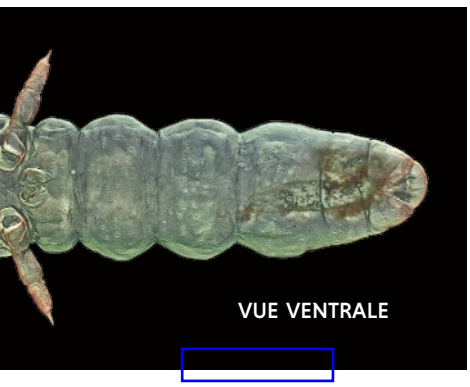
À 700 kilomètres au nord-ouest du glacier de Shackleton, les monts Transantarctiques émergent de l'intérieur du continent et commencent à longer le littoral. C'est là que se situent les vallées sèches de McMurdo. Malgré la sécheresse, plusieurs de ces vallées isolées abritent des lacs couverts de glace, alimentés par les eaux de fonte estivales. Ces lacs ne sont profonds que de quelques mètres, mais on observe dans le haut des parois de certaines vallées des lignes de rivages anciens de sable et de gravier. Ces lignes de rivages suggèrent que ces vallées ont contenu autrefois des centaines de mètres de hauteur d'eau, apportée par des ruisseaux dévalant les montagnes.

L'idée est cependant incomplète, car les vallées, étant ouvertes à leur extrémité du côté mer, n'ont rien pour retenir des eaux aussi profondes. Les scientifiques supposent donc qu'au cours d'une précédente période glaciaire, l'inlandsis de l'Antarctique occidental avait progressé de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord, s'approchant des montagnes et fermant l'embouchure des vallées, ce qui a ainsi rendu possible la formation de grands lacs. L'un d'entre eux, le lac glaciaire de Washburn, avait une profondeur d'au moins 300 mètres.

Dans les années 1990, Brenda Hall, géologue à l'université du Maine, aux États-Unis, a creusé dans les anciens sédiments situés en haut de la paroi de la vallée du lac de Washburn et a recueilli des morceaux de tapis d'algues qui y avaient poussé et qui étaient desséchés par le froid. Par datation au radiocarbone, la chercheuse a estimé que les algues – et donc le lac – dataient d'il y a 23 000 à 13 000 ans, à peu près au maximum de la dernière période glaciaire. Cette découverte a donné lieu à une curieuse controverse, selon Brenda Hall : on était conduit à penser que pendant la période glaciaire, « les glaciers fondaient probablement plus qu'ils ne le font actuellement ».

Les scientifiques se sont efforcés d'expliquer comment cela a pu se produire en dépit d'un climat plus froid. Selon l'une des théories, les océans environnants étaient plus largement recouverts de glace qu'ils ne le sont aujourd'hui – ce qui entraînait moins d'évaporation et donc moins de nuages, moins de chutes de neige et plus de rayonnement solaire atteignant les roches sombres des montagnes. Cela aurait provoqué une fonte plus importante en altitude. Cette fonte accrue se serait peut-être produite sur toute la longueur des montagnes, notamment là où l'on a découvert les *Tullbergia*.

Un phénomène étrange, que les scientifiques dénomment aujourd'hui « effet de serre à l'état solide », est étroitement lié à cette situation. La plupart des rayons du soleil qui frappent un glacier sont réfléchis par son extérieur enneigé. Mais dans les monts Transantarctiques, où des vents forts et secs évaporent lentement la neige et la glace, les glaciers ont souvent une glace profonde et relativement transparente exposée en surface. Le rayonnement solaire


VUE VENTRALE

VUE LATÉRALE

peut pénétrer sur une profondeur de l'ordre de un mètre dans cette glace, ce qui réchauffe celle-ci et la fait fondre de l'intérieur. Andrew Fountain, glaciologue à l'université d'État de Portland, aux États-Unis, a découvert que cela peut se produire à des températures atmosphériques descendant jusqu'à −10 °C.

Brenda Hall a été témoin de ce phénomène dans les montagnes du sud, jusqu'à 200 kilomètres au sud du glacier de Shackleton : « J'ai vu par des jours ensoleillés et clairs, raconte-t-elle, ces films d'eau qui descendent le long du front de la falaise de glace. »

DES HABITATS « BOUCLES D'OR »

Pour Ian Hogg et Byron Adams, ces mécanismes offrent des indices importants sur la façon dont *Tullbergia* et *Antarctophorus*, ainsi que de petits vers, acariens et autres animaux, ont pu survivre à des dizaines de périodes glaciaires le long des marges de glaciers tels que le Shackleton. Byron Adams surnomme ces milieux de vie les « habitats Boucles d'Or » – des cuvettes orientées au nord (vers le soleil) ayant juste la bonne configuration de roches sombres et de glace transparente. Cette glace aurait été bordée par une étroite bande habitable, peut-être large de quelques mètres seulement, où de petites et occasionnelles quantités d'eaux de fonte débarrassaient le sol de ses sels et grâce auxquelles les hexapodes s'hydrataient. À mesure qu'une période glaciaire s'installait et faisait remonter la glace sur les pentes, les *Tullbergia* auraient aussi remonté lentement la pente, peut-être juste de un mètre par an, s'ils avaient la chance de rencontrer des habitats Boucles d'Or en cours de route.

Ces explications semblent plausibles mais sont inachevées. Ian Hogg et Byron Adams, qui ne sont retournés ni l'un ni l'autre au glacier de Shackleton, doivent relier la génétique à une chronologie plus claire des va-et-vient de la glace de l'Antarctique. Ils doivent également voir si ce schéma se vérifie pour d'autres espèces. Avec leurs étudiants, ils essaient maintenant de séquencer l'ADN du même gène codant la cytochrome C oxydase chez une espèce d'acarien et une espèce de ver nématode qu'ils ont trouvées sur le glacier de Shackleton et en d'autres endroits des monts Transantarctiques du Sud. Ils espèrent que la comparaison des séquences génétiques permettra d'expliquer depuis combien de temps ces autres espèces vivent ici, comment elles se sont déplacées dans le passé et comment elles ont subsisté.

Ce qui est déjà apparent, c'est que certaines espèces ont survécu de justesse. Lors des retraits glaciaires, elles ont peut-être établi de nouveaux avant-postes sur les montagnes voisines. Mais à chaque nouvelle période glaciaire, la plupart des populations se sont éteintes. *Tullbergia* porte les cicatrices de cette histoire brutale dans son ADN. Le fait que chaque individu des environs du glacier de Shackleton porte des séquences génétiques pratiquement identiques suggère qu'à un moment donné dans le passé, seulement deux de ces collemboles ont réussi à survivre. Chaque représentant vivant aujourd'hui descend de ces géniteurs, qui ont peut-être eu la chance d'être emportés par une tempête de vent sur un habitat Boucles d'Or de la taille d'un terrain de basket. *Tullbergia mediantarctica* « a été extrêmement proche de l'extinction », affirme Byron Adams.

Bien sûr, des communautés entières de plantes et d'animaux ont disparu de l'Antarctique, faisant partie des vagues d'extinctions qui ont ponctué l'histoire de la Terre. Un Antarctique plus chaud et plus humide aiderait-il *Tullbergia* à rebondir ? Byron Adams était de retour dans les vallées sèches de McMurdo en janvier 2020. Le niveau des lacs monte, les sols secs deviennent plus humides et le nombre de petits animaux, tels certains vers nématodes qui vivent dans le sol, augmente. Dans le même temps, selon Byron Adams, les espèces qui ont survécu aux sols vraiment froids, secs et rudes diminuent en abondance, et leur aire de répartition se réduit. Les nouveaux arrivants évincent peut-être les plus anciens, qui s'accrochaient.

La question est de savoir si *Tullbergia* connaîtra un sort similaire. « Sur la base de ce que cette espèce a traversé dans le passé, je pense qu'elle s'en sortira plutôt bien, avance Byron Adams ; tant qu'elle ne sera pas en concurrence avec les espèces envahissantes… » ■

BIBLIOGRAPHIE

G. E. Collins, **The diversity and population genetic structure of Collembola (Springtails) in Namib and Antarctic desert environments,** thèse de doctorat, université de Waikato (Nouvelle-Zélande), 2019 (https://bit.ly/3bGnEdW).

G. E. Collins *et al.*, **Spatial and temporal scales matter when assessing the species and genetic diversity of Springtails (Collembola) in Antarctica,** *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 7, article 76, 2019.

T. Caruso *et al.*, **Nematodes in a polar desert reveal the relative role of biotic interactions in the coexistence of soil animals,** *Communications Biology*, vol. 2, article 63, 2019.

L'ESSENTIEL

> Numération, dessins géométriques, tatouages, vannerie, jeux de ficelle... Au XIXe siècle, ethnologues, missionnaires et voyageurs ont rapporté des témoignages de pratiques non occidentales qui, aujourd'hui, sont autant de sujets d'étude de l'ethnomathématique.

> Jusqu'au milieu du XXe siècle cependant, en raison de la prégnance de certaines théories, notamment évolutionnistes, ces pratiques ont été souvent appréhendées comme des formes de rationalité et de logique peu abouties ou distinctes de celles au cœur de la science occidentale.

> La parution de *La Pensée sauvage*, de Claude Lévi-Strauss, en 1962, a contribué significativement à la remise en cause de cette perspective.

> Plusieurs mathématiciens se sont ensuite intéressés à ces pratiques avec l'idée de mieux saisir la diversité des mathématiques.

LES AUTEURS

ERIC VANDENDRIESSCHE
ethnomathématicien au sein du laboratoire Science, philosophie, histoire (Sphere) du CNRS et de l'université de Paris

CÉLINE PETIT
ethnologue, rattachée au laboratoire Sphere

Des ethnologues au pays des mathématiques

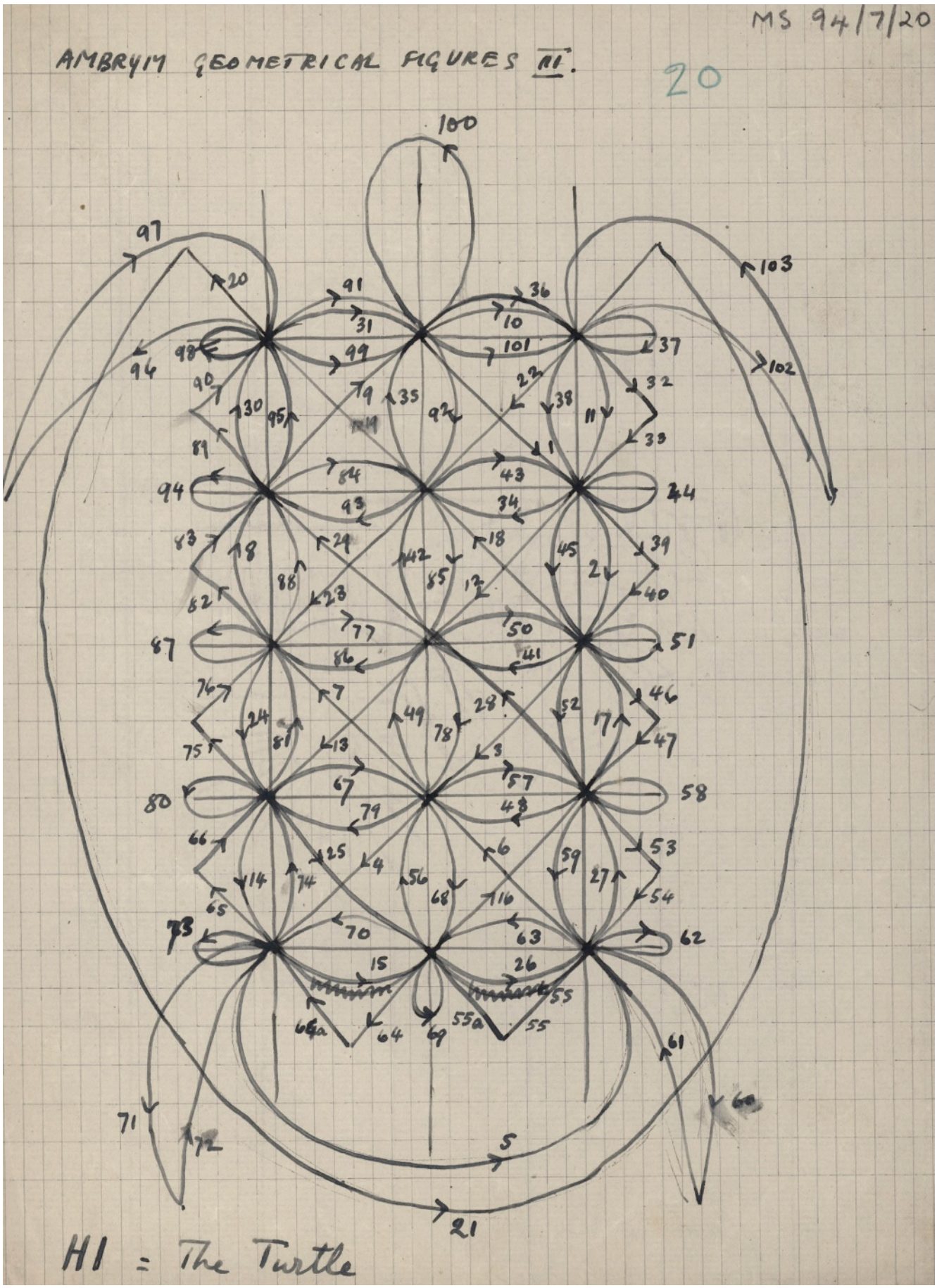
Dès la fin du XIXe siècle, les anthropologues se sont intéressés à l'art de compter dans les sociétés non occidentales. Mais il a fallu plusieurs décennies pour que mathématiciens et anthropologues étudient les pratiques mathématiques de ces sociétés.

En 1927, alors qu'il mène des recherches ethnographiques auprès des habitants des îles de Malekula et d'Ambrym, aux Nouvelles-Hébrides (actuel Vanuatu, dans le Pacifique sud), le jeune Bernard Deacon adresse à son directeur de thèse à l'université de Cambridge, l'anthropologue Alfred Haddon, une lettre où il souligne avoir observé la manifestation de «compétences en mathématiques» chez des membres de ces sociétés alors encore souvent perçues comme «primitives»:

Les hommes plus âgés m'ont expliqué le système [de parenté d'Ambrym] *avec une parfaite lucidité, je ne pourrais pas mieux l'expliquer moi-même. Il est parfaitement clair que les indigènes (du moins les plus intelligents d'entre eux) conçoivent ce système comme un système de relations qu'ils peuvent représenter par des diagrammes.* [...] *La façon dont ils pouvaient raisonner sur les relations à partir de leurs diagrammes était absolument comparable à un bon exposé scientifique donné dans une salle de conférence. J'ai également recueilli* [à Malekula] *certaines expressions de compétences mathématiques. Lorsque j'aurai rassemblé mes matériaux, j'espère être en mesure de prouver que les autochtones sont capables d'une pensée assez abstraite.*

Victime de complications du paludisme, Deacon décéda peu de temps après sur l'île de Malekula et n'eut pas l'occasion de développer son propos. Toutefois, ses notes ethnographiques nous indiquent que ces «expressions >

Ce croquis de tortue représente l'un des nombreux dessins sur le sable que le jeune anthropologue britannique Bernard Deacon recopia dans ses carnets de notes pendant son voyage dans l'archipel de l'actuel Vanuatu, dans le Pacifique sud (celui-ci sur l'île Ambrym), dans les années 1920. Ces dessins sont formés d'une ligne continue, que les nombres indiqués sur le schéma permettent de reproduire.



© RAI (MS 94/7/20)

> de compétences mathématiques » étaient liées à la pratique locale des *geometrical drawings* – dessins tracés en continu sur le sable. Quant à la structure des liens de parenté mentionnée dans cette lettre, elle sera comparée quelques décennies plus tard à celle d'un objet mathématique, le groupe diédral…

De fait, Deacon semble avoir été l'un des premiers anthropologues à suggérer une dimension mathématique propre à des activités pratiquées dans des sociétés de tradition orale. Il faudra toutefois attendre près d'un demi-siècle avant que n'émerge « l'ethnomathématique » en tant que champ de recherche consacré à l'étude des pratiques et des savoirs mathématiques manifestés dans la mise en œuvre de diverses activités, en dehors des seules institutions académiques ou scolaires.

Pourquoi anthropologues, mathématiciens et historiens des sciences ont-ils tant tardé à interroger plus avant la manifestation de « compétences mathématiques » dans des pratiques telles que les productions textiles, la navigation, la divination, les jeux, observées pourtant bien des années plus tôt – surtout à partir du XIXe siècle – dans des sociétés de tradition orale ? Les principaux facteurs explicatifs sont sans doute à rechercher dans les prémices mêmes d'une anthropologie des mathématiques et leur ancrage profond dans une perspective évolutionniste.

L'ART DE COMPTER CHEZ LES « PRIMITIFS »

Parmi les premiers ethnologues, qui se consacrèrent à l'étude des sociétés non occidentales, plusieurs se sont intéressés à des pratiques identifiées comme mathématiques, telles que le fait de compter, de calculer ou de mesurer. C'est ainsi que dès la fondation de l'anthropologie sociale et culturelle, au cours de la seconde moitié du XIXe siècle, l'étude de ces pratiques est venue étayer son projet : la comparaison des sociétés humaines.

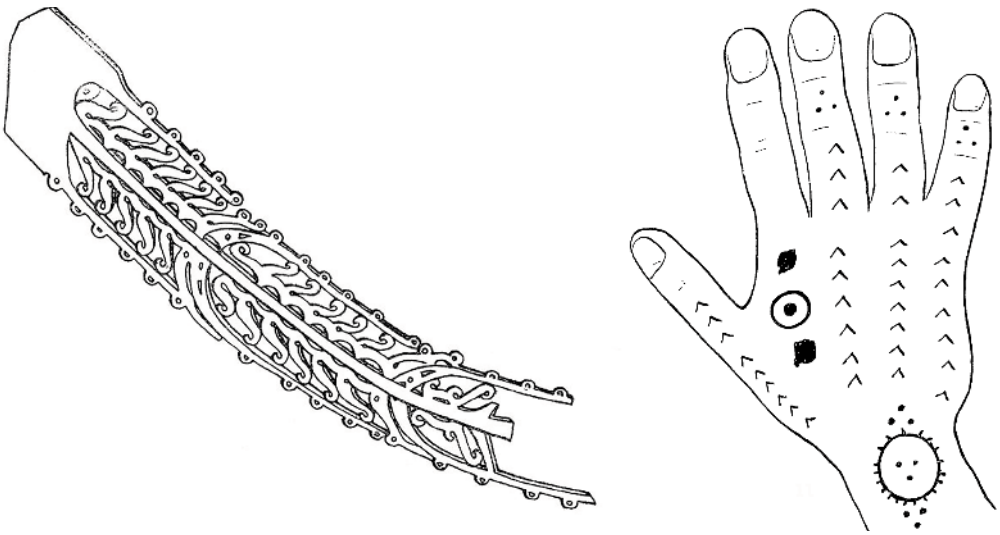
En effet, dans l'un de ses travaux ayant contribué à la constitution de ce champ disciplinaire, le Britannique Edward Tylor consacre un chapitre à « l'art de compter » dans diverses sociétés non occidentales. Son intérêt pour la comparaison des systèmes de numération s'inscrit dans une perspective théorique au cœur de son ouvrage *Primitive Culture. Researches into the Development of Mythology, Philosophy, Religion, Language, Art, and Custom* (1871), qui postule que les sociétés humaines évoluent de façon linéaire en passant par trois stades principaux de développement : la sauvagerie, la barbarie et la civilisation. Si Tylor entend mettre en perspective les façons de compter relevées dans des sociétés réputées « primitives », c'est avant tout avec l'idée que cette comparaison offre une illustration du schéma théorique de l'évolutionnisme, suggérant comment les systèmes numériques présents « à l'état rudimentaire dans les tribus sauvages » se sont développés au travers d'« inventions rationnelles », « jusqu'à devenir ceux que nous [Occidentaux] utilisons ».

Sur la base d'informations collectées par des ethnographes, missionnaires et voyageurs, celui qui devint en 1896 le premier professeur d'anthropologie de l'université d'Oxford opère ici une classification. Il distingue les sociétés où l'on nomme les grands nombres et en fait usage (en reconnaissant chez certaines, notamment celles des îles Tonga, dans l'océan Pacifique, et plusieurs groupes d'Afrique de l'Ouest, l'expression de compétences « exceptionnelles » dans les modes de comptage), et celles où prévalent des systèmes de numération à petits nombres, et qui ont parfois développé des méthodes gestuelles leur permettant de compter bien au-delà (*voir l'encadré ci-dessous*).

Dans les premières décennies du XXe siècle, la question des traits communs et des spécificités culturelles des systèmes de numération était souvent au cœur des travaux d'anthropologues s'intéressant aux pratiques mathématiques. Parmi les quelques études qui ont plus particulièrement préfiguré le développement d'une approche ethnomathématique, celle de l'anthropologue allemand Otto Raum sur les systèmes de numération caractéristiques de l'aire linguistique bantoue apparaît pionnière. Fils d'un missionnaire de la Leipzig Mission Society, Raum naquit à Mochi, près du mont Kilimandjaro, où il apprit dès son enfance la langue chaga (dialecte bantou). Avant de poursuivre des études

COMPTER JUSQU'À 5… ET AU-DELÀ

Il ne semble pas exister de sociétés sans nombre. Néanmoins, comme l'avait déjà noté l'anthropologue Edward Tylor au XIXe siècle, la complexité des systèmes numériques varie d'une société à l'autre. Ce phénomène est probablement le résultat d'un intérêt pour la quantification – ou de la nécessité de quantifier – variable d'un groupe social à l'autre. Certaines sociétés ont développé des systèmes numériques complexes pour se représenter le monde : la cosmogonie des Iqwaye, en Papouasie-Nouvelle-Guinée, est par exemple en relation directe avec un système de numération corporelle permettant la représentation de très grands nombres, ainsi que l'a montré l'anthropologue Jadran Mimica en 1988. D'autres sociétés de tradition orale utilisent quant à elles des systèmes de numération « à petits nombres », tels les Mundurukù, en Amazonie brésilienne, qui possèdent cinq noms de nombres (1 à 5). En 2004, le psychologue cognitiviste Stanislas Dehaene et ses collègues ont montré que si les Mundurukù ne comptent pas au-delà de 5, ils sont néanmoins capables de comparer, additionner et soustraire, de façon approchée, des quantités qui dépassent de loin leur lexique numérique.



Au tournant du XXe siècle, plusieurs anthropologues ont identifié des savoirs géométriques dans certaines pratiques des sociétés non occidentales, comme la réalisation des ornements des pirogues en Nouvelle-Guinée *(à gauche, le motif d'une proue observé par l'ethnographe britannique James Hornell en 1918 lors d'un voyage dans la baie Humboldt)*, ou celle de tatouages en Égypte *(à droite, un tatouage reproduit par le psychologue Charles Myers lors d'un voyage en 1902)*.

doctorales en anthropologie à l'université de Londres, il fut missionnaire et éducateur, de 1928 à 1934, à la Teachers Training School, à Marangu, dans le nord de l'actuelle Tanzanie.

C'est à cette époque qu'il étudia les usages des systèmes numériques vernaculaires, perceptibles dans des pratiques quotidiennes diverses comme la construction de huttes ou les transactions sur le marché, dans la perspective d'améliorer l'enseignement de l'arithmétique à destination des élèves locaux. Soulignant de façon novatrice l'eurocentrisme qui domine alors l'enseignement des mathématiques, son ouvrage *Arithmetic in Africa* (1938) fait valoir la nécessité de prendre en compte le « contexte culturel » et d'y prendre appui pour enseigner cette discipline.

DES ARTEFACTS GÉOMÉTRIQUES

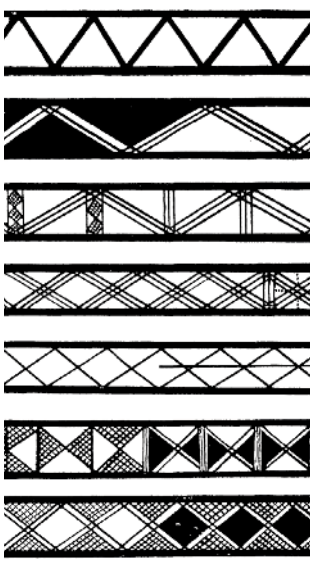
Si les anthropologues de la fin du XIXe et du début du XXe siècle se sont surtout intéressés aux systèmes de numération et aux modes de calcul, quelques-uns ont identifié certaines pratiques liées à la création d'artefacts – masques, vanneries, poteries, tatouages, ornements – comme impliquant des savoirs géométriques. Ils ont ainsi relevé la prédominance de motifs « géométriques » et de combinaisons de motifs – voire l'expression d'un « art géométrique ornemental élaboré » – dans différents artefacts de sociétés d'Afrique du Nord (vannerie et poterie kabyles, maroquinerie des Touaregs et des Haoussas), d'Amérique centrale (poterie costaricaine) ou de Mélanésie (ornements de pirogues en Nouvelle-Guinée).

Dans l'ensemble, cependant, peu d'ethnologues de l'époque se sont attachés à décrire les processus de création de ces artefacts et à en expliciter la dimension procédurale, susceptible de révéler des usages algorithmiques particuliers. Le travail de William Rivers et Alfred Haddon paraît à cet égard novateur, puisqu'ils proposèrent, en 1902, une méthodologie permettant d'enregistrer les étapes de construction des figures de ficelle, à partir de leur observation de cette pratique dans les îles du détroit de Torres, au sud de la Papouasie-Nouvelle-Guinée (*voir l'encadré page 76*).

Pour autant, ni Rivers ni Haddon ne semblent avoir établi un lien entre la réalisation de figures de ficelle et une activité d'ordre mathématique, ou du moins aucun d'eux ne l'a explicité sur un mode comparable à ce que Bernard Deacon a suggéré vingt-cinq ans plus tard à propos des dessins sur le sable.

À un autre niveau, et bien que cela apparaisse marginal, on décèle aussi dans quelques travaux de mathématiciens du XIXe siècle et du début du XXe les prémices d'une reconnaissance du caractère mathématique de diverses activités étudiées ou rapportées par des ethnologues. Par exemple, Rouse Ball, mathématicien de Cambridge, décrivit la réalisation des figures de ficelle comme un divertissement « mathématique » et lui consacra un chapitre de son livre *Mathematical Recreations and Essays* (1911).

Néanmoins, tant chez les mathématiciens que chez les anthropologues, l'identification d'aspects mathématiques dans les activités des sociétés « sans écriture » est restée tributaire d'une perspective évolutionniste, et ce jusqu'aux premières décennies du XXe siècle. On étudiait essentiellement les systèmes de numération recueillis dans ces sociétés comme des indices d'un stade archaïque de développement. L'analyse comparée qu'en fit le mathématicien >



Un autre exemple de savoirs géométriques : les motifs des poteries kabyles, tels ceux-ci, observés à l'aube du XXe siècle.

© JSTOR, J. Hornell, The Journal of the Polynesian Society, vol. 32, n°2(126), pp. 70-78, 1923 (en haut, à gauche) ; © JSTOR, C. S. Myers, The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, vol. 32, pp. 248-262, 1902 (en bas)
© JSTOR, J. L. Myres, The Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland, vol. 32, pp. 268-282, 1902

> américain Levi Conant dans son ouvrage *The Number Concept* (1896) en témoigne: arguant que dans ces sociétés, les nombres sont nommés à l'aide de termes se référant à des parties du corps et donc ancrés dans une réalité «concrète», il affirma que ces systèmes relevaient de proto-mathématiques dénuées d'abstraction.

LA PENSÉE PRÉLOGIQUE

Ces idées ont constitué un obstacle majeur à l'identification de savoirs mathématiques dans ces sociétés non occidentales. Parallèlement, et jusqu'au milieu du XXe siècle, la théorie de la «pensée prélogique» du philosophe et sociologue Lucien Lévy-Bruhl a aussi considérablement influencé les débats sur les formes de pensée ou de logique des peuples «sans écriture».

Titulaire de la chaire d'histoire de la philosophie moderne de la Sorbonne et futur cofondateur, avec Marcel Mauss et Paul Rivet, de l'institut d'ethnologie de l'université de Paris, Lucien Lévy-Bruhl a présenté sa théorie dans deux ouvrages publiés en 1910 et 1922. Cette théorie fait valoir que ceux dont la pensée apparaît régie par un «principe de participation», selon lequel un être peut être à la fois lui-même et autre chose, ont une moindre capacité «à abstraire et à généraliser». Pour Lévy-Bruhl, cette pensée est «prélogique» au sens où «elle ne s'astreint pas à s'abstenir de la contradiction».

Si les sociologues et anthropologues, notamment Émile Durkheim, Marcel Mauss et Bronisław Malinowski, ont très tôt critiqué cette théorie, son influence a été durable sur les historiens et philosophes des sciences. De fait, divers travaux visant à comparer l'émergence de «la science» d'une civilisation à une autre l'ont invoquée. En 1937, l'historien Abel Rey, par exemple, a fait valoir la prégnance d'une mentalité prélogique en Chine pour arguer du manque d'abstraction et de précision caractérisant – selon lui – la science chinoise; par contraste, la science occidentale résultait à ses yeux du développement d'une pensée logique et rationnelle, en rupture avec le prélogisme primitif. Ces approches inspirées des travaux de Lévy-Bruhl ont sans doute contribué à entretenir un certain désintérêt de la majorité des mathématiciens de l'époque pour les sociétés non occidentales.

À partir de la seconde moitié du XXe siècle cependant, les anthropologues ont commencé à s'intéresser d'une tout autre manière à la

UNE BIOLOGIE DES JEUX DE FICELLE

En 1888, Alfred Haddon, alors professeur de zoologie au Royal College of Science de Dublin, partit étudier la structure et la faune des récifs coralliens du détroit de Torres (Pacifique sud, Océanie). Lors de cette recherche naturaliste, il fut frappé par l'apparente déperdition des savoirs des habitants de la région depuis l'arrivée des Européens. Cette perception l'incita à engager aussitôt des recherches ethnographiques afin de documenter des pratiques, des savoirs et des systèmes de croyances qui lui paraissaient menacés.

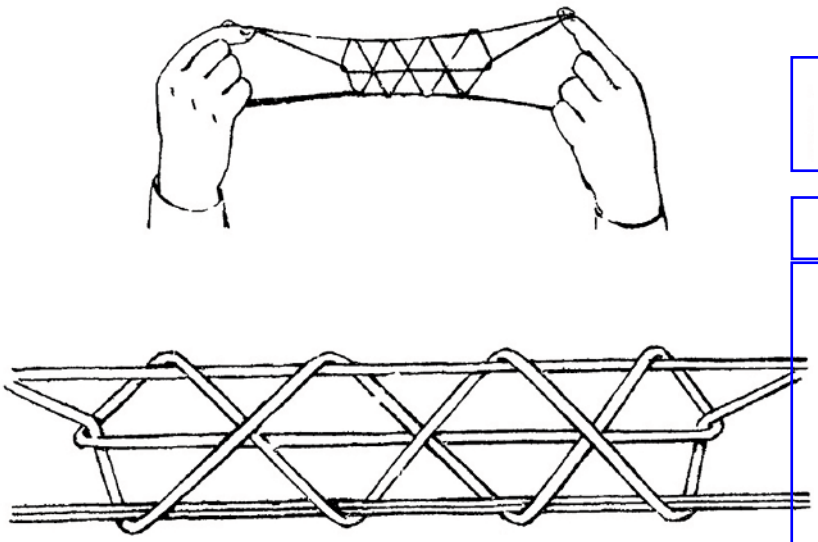
À son retour en Grande-Bretagne, Haddon entreprit une étude comparée des « arts primitifs » océaniens, en inscrivant son travail dans l'approche théorique de la « biologie des images ». Le projet de ce courant disciplinaire (dont la paternité est généralement attribuée à l'archéologue Augustus Pitt Rivers) était d'étudier « l'évolution et la distribution géographique des formes dans les arts primitifs », de manière comparable à l'étude des êtres vivants dans la théorie darwinienne de l'évolution.

Si Haddon s'intéressa aux jeux de ficelle très élaborés des îliens du détroit de Torres dès sa première visite en 1888, c'est au cours de l'expédition anthropologique menée sous sa direction dans la région, en 1898, qu'il s'efforça de noter les méthodes de construction d'une trentaine de figures de ficelle, en collaboration avec l'anthropologue, neurologue, et psychiatre britannique William Rivers. Tous deux élaborèrent une nomenclature permettant d'enregistrer les différentes étapes de réalisation d'un jeu de ficelle.

La publication de cette recherche, en 1902, incita d'autres ethnographes à collecter de tels jeux dans diverses sociétés ; en témoignent les nombreuses collections de jeux de ficelle, fondées sur cette nomenclature, publiées au cours du XXe siècle. Dans le contexte des théories diffusionnistes de l'époque et dans une perspective d'ethnologie comparée, l'un des principaux objectifs de ces collectes était de contribuer à mettre au jour des contacts entre différentes sociétés et les voies de migration suivies par certaines populations.

William Rivers *(à gauche)*, Alfred Haddon *(assis)* et les autres membres de leur expédition dans les îles du détroit de Torres, en 1898.

© Wikimedia commons



En 1902, lors de leur voyage dans les îles du détroit de Torres, au sud de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, William Rivers et Alfred Haddon enregistrèrent les différentes étapes de construction de nombreuses figures de ficelle, comme celle-ci, dite « de la clôture autour du puits ».

rationalité et à l'abstraction dans les sociétés «sans écriture», principalement à la faveur des travaux de Claude Lévi-Strauss. Ce dernier fonde son projet d'anthropologie structurale sur la prémisse d'une unité de l'esprit humain.

Dans deux ouvrages parus en 1962, *La Pensée sauvage* et *Le Totémisme aujourd'hui*, il offre une double critique des conceptions dominantes sur les modes de pensée dans les sociétés «sans écriture»: il réfute à la fois l'approche fonctionnaliste de Malinowski, qui suggère que ces formes de pensée sont pleinement «déterminées par les besoins fondamentaux de la vie» (subsistance, sexualité…), et la perspective lévy-bruhlienne selon laquelle la pensée «primitive» diffère fondamentalement de la pensée «moderne» en ce qu'elle serait «entièrement déterminée par l'émotion et les représentations mystiques».

Par opposition, Lévi-Strauss entend montrer que la pensée à l'œuvre dans ces sociétés peut être à la fois «désintéressée» (non utilitaire) et «intellectuelle». Dans *La Pensée sauvage*, il souligne ainsi «l'appétit de connaissance objective» qui constitue «l'un des aspects les plus négligés de la pensée de ceux que nous nommons "primitifs"». Il fait valoir que si cet appétit de connaissance objective «est rarement dirigé vers des réalités de même niveau que celles auxquelles s'attache la science moderne, il implique des démarches intellectuelles et des méthodes d'observation comparables».

L'entrée dans la seconde moitié du XX^e siècle marque ainsi l'amorce d'un tournant épistémologique chez les anthropologues quant à la façon d'aborder les formes de rationalité et de logique de peuples non occidentaux. Un tournant que l'on décèle aussi chez des mathématiciens: c'est en s'appuyant plus significativement sur des travaux d'anthropologie que certains furent à l'origine du développement de l'ethnomathématique.

UNE MATHÉMATICIENNE AMÉRICAINE EN AFRIQUE

Les textes considérés comme fondateurs de l'ethnomathématique ont été publiés entre les années 1970 et 1980. En 1973 paraît d'abord l'ouvrage *Africa Counts. Number and Pattern in African Cultures*, de Claudia Zaslavsky, professeuse de mathématiques à New York, qui avait à cœur de proposer à ses élèves, majoritairement afro-américains, un enseignement fondé pour partie sur des matériaux africains. Dans cet essai consacré à des sociétés d'Afrique subsaharienne, Zaslavsky analyse, comme autant d'expressions d'une rationalité mathématique, différentes pratiques usuelles qu'elle a observées lors de ses séjours au Kenya et au Nigeria, relatives aux noms de nombres, à la structuration du temps, à l'architecture, aux motifs décoratifs ou encore à des jeux. Même si ses analyses peuvent sembler aujourd'hui peu approfondies, Zaslavsky a proposé une perspective novatrice (orientée, dans ses termes, vers les «sociomathématiques»), qu'elle a promue à l'université Columbia et qui a incité d'autres chercheurs à poursuivre dans cette voie.

Le terme «ethnomathématique» fut véritablement introduit dans les années 1980

Le terme «ethnomathématique(s)» fut véritablement introduit dans les années 1980, dans les travaux respectifs de la mathématicienne américaine Marcia Ascher et du mathématicien brésilien Ubiratàn D'Ambrosio, qui en proposèrent chacun une définition.

Ubiratàn D'Ambrosio est l'auteur du premier article dont le titre mentionne explicitement ce terme. Dans ce texte paru en 1985, il définit les «ethnomathématiques» comme les mathématiques pratiquées par les différentes sociétés ou tout groupe social pouvant être >

© JSTOR, W. H. R. Rivers et A. C. Haddon, Man, vol. 2, pp. 146-153, 1902

> identifié au travers de traditions et d'objectifs communs, qu'il s'agisse de communautés rurales ou urbaines, de groupes de travailleurs, de classes professionnelles… L'objectif de D'Ambrosio est d'étudier les mathématiques pratiquées dans l'ensemble des groupes humains, à toutes les époques. Ce programme ambitieux consiste en ce sens en une anthropologie générale des concepts et des pratiques mathématiques.

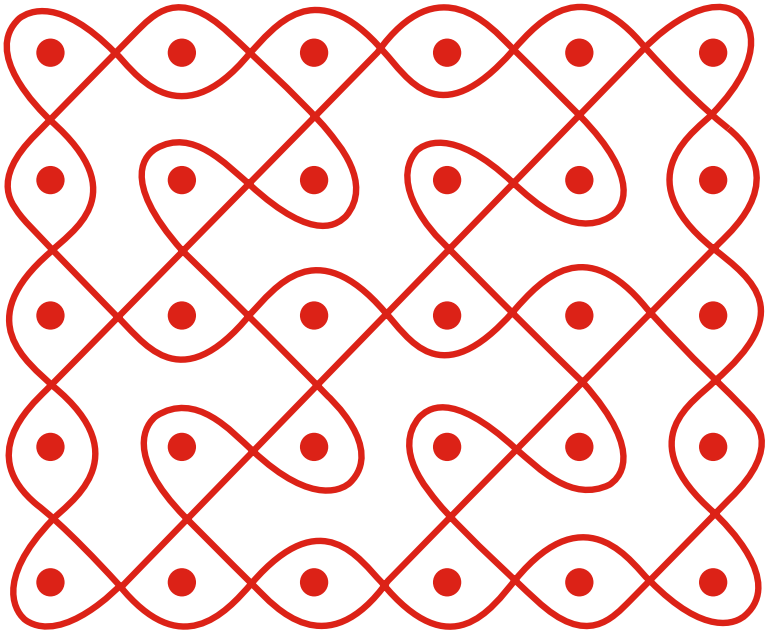
Au-delà de ses implications pour l'histoire et l'épistémologie des mathématiques, il a aussi des objectifs pédagogiques et politiques. Pour D'Ambrosio, il s'agit en effet de contribuer à refonder les cursus scolaires et à « restaurer la dignité des personnes » appartenant à des sociétés colonisées, en promouvant la reconnaissance et l'intégration de leurs pratiques mathématiques dans les enseignements.

L'ETHNOMATHÉMATIQUE SELON LES ÉPOUX ASCHER

C'est également au début des années 1980 que la mathématicienne américaine Marcia Ascher commence à esquisser les contours d'un programme d'« ethnomathématique » en proposant – avec son époux anthropologue, Robert Ascher – une analyse à la fois mathématique et anthropologique des *quipu* incas (un système d'écriture au moyen de nœuds le long de cordelettes). Publiée en 1981, cette étude incita les époux Ascher à poursuivre des recherches visant plus largement à étudier « les idées mathématiques des sociétés sans écriture », comme ils l'explicitèrent dans un article fondateur intitulé « Ethnomathematics », paru en 1986.

Dans son ouvrage *Ethnomathematics* (1991), où elle développe les objectifs de ce projet de recherche, Marcia Ascher précise ce qu'elle entend par « idées mathématiques », notion qu'elle utilise « pour échapper aux connotations occidentales du mot mathématiques » : il s'agit des « idées qui traitent de nombres, de logique, de configurations spatiales, et surtout de la combinaison ou l'agencement de ces composantes en systèmes ou structures ». Elle souligne que ces idées ne relèvent généralement pas d'une catégorie autochtone particulière, mais « peuvent être identifiées dans nombre de pratiques comme la navigation, les calendriers, les jeux, les relations de parenté, etc. ».

Parmi les travaux à l'origine de la constitution d'une approche ethnomathématique figurent aussi ceux du Hollandais Paulus Gerdes, professeur de mathématiques à l'université de Maputo, au Mozambique. Son approche, multiple, combine celles de D'Ambrosio et d'Ascher. Comme Ascher, il met au jour le caractère mathématique d'activités pratiquées dans des sociétés de tradition orale, telles que les dessins sur le sable des Tchokwe de l'Angola ; et comme D'Ambrosio, il tend aussi à privilégier les enjeux pédagogiques de l'ethnomathématique, utilisant ses recherches pour élaborer des matériaux didactiques à destination des futurs enseignants de mathématiques africains. Par ailleurs, Gerdes amorce un travail novateur en montrant comment les idées qui émergent de l'étude des ethnomathématiques amènent à élaborer de nouvelles questions mathématiques.



Dans les années 1990, les dessins sur le sable des Tchokwe de l'Angola, tel celui-ci, ont inspiré le mathématicien Paulus Gerdes tant pour concevoir des outils d'enseignement des mathématiques que pour élaborer de nouvelles questions mathématiques.

Depuis, l'ethnomathématique est devenue un champ disciplinaire enseigné dans certaines universités. Si les premiers travaux, menés principalement par des chercheurs de formation mathématique, n'impliquaient que rarement une observation directe (ou participante), les ethnomathématiciens actuels empruntent plus souvent aux méthodes de l'ethnographie pour fonder leurs analyses.

Parallèlement, des chercheurs en sciences humaines comme Fabienne Wateau, Gary Urton, Sophie Desrosiers et Perig Pitrou témoignent d'un intérêt renouvelé pour l'étude ethnologique des systèmes de numération et de mesure ou d'activités à caractère géométrique et algorithmique telles que le tissage ou le tressage de vanneries : ils entendent notamment interroger les spécificités culturelles de ces pratiques. Quant au rôle didactique de ces activités, il est désormais au cœur des discussions sur l'éducation mathématique dans les sociétés autochtones. Espérons que ces différentes approches de l'ethnomathématique contribueront à une vision moins ethnocentrée des mathématiques. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Vandendriessche et C. Petit, **Des prémices d'une anthropologie des pratiques mathématiques à la constitution d'un nouveau champ disciplinaire : l'ethnomathématique**, *Revue d'histoire des sciences humaines*, vol. 31, pp. 189-219, 2017.

M. Ascher, **Ethnomathematics : A Multicultural View of Mathematical Ideas**, Brooks and Cole Publishing Company, 1991.

O. Raum, **Arithmetic in Africa**, Evans Brothers, 1938.

© Charlotte Calament/Pour la Science

ÈME

29 3/4

FESTIVAL D'ASTRONOMIE

DE FLEURANCE (GERS)

DU 7 AU 14 AOÛT 2020

À LA FOIS RÉEL & VIRTUEL

LE FESTIVAL S'ADAPTE

Illustration réalisée par evystory / Habillage graphique & typographique : créative obsession - graphiste31.com

Festival d'astronomie de Fleurance
Ferme des étoiles

LE GRAND RENDEZ-VOUS ASTRO DE L'ÉTÉ 2020

SUIVEZ LE FESTIVAL EN LIGNE
Infos, Programme & Réservation
www.festival-astronomie.fr

CONTACTEZ-NOUS
05 62 06 62 76
contact@fermedesetoiles.fr

RETROUVEZ-NOUS SUR
YouTube

RENDEZ-VOUS

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

DANS LES ARCANES DES TRIPLETS PYTHAGORICIENS

La géométrie des triangles rectangles a entraîné l'arithmétique des triplets pythagoriciens, connus depuis au moins deux millénaires. Ces triplets suscitent de nombreuses questions, qui ne sont pas toutes résolues.

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)

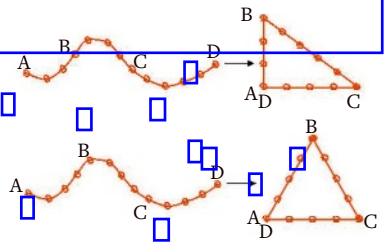
Pour disposer d'un angle droit, on prend une feuille de papier au bord bien rectiligne et on replie le bord sur lui-même, ce qui produit un pli orthogonal au bord et crée donc un angle droit parfait. Mais comment s'y prendre si, à la place d'une feuille, on n'a sous la main qu'une corde ? La solution, aussi connue que merveilleuse, associe arithmétique et géométrie et illustre la profondeur magique des mathématiques. La solution, dont on ignore qui l'imagina en premier, procède en quatre étapes (*schéma ci-dessous*) :

– En faisant des nœuds ou à l'aide d'un crayon, on marque sur la corde deux points dont l'écart fixera l'unité de longueur.

– En tendant la corde et en la repliant, on crée 11 autres marques sur la corde, distantes deux à deux d'une unité.

– En utilisant ces 13 marques, on repère alors quatre points A, B, C et D séparés de 3 unités, puis de 4, puis de 5.

– On fait coïncider A et D et on tend la corde, ce qui donne un triangle rectangle en B (on va voir pourquoi) et donc un angle droit.



Cette corde est dénommée « corde à treize nœuds » ou « corde des druides ». On peut avec la même corde obtenir un triangle équilatéral en prenant cette fois des points A, B', C' et D de façon qu'il y ait 4 unités de longueur entre A et B', entre B' et C' et entre C' et D. On fait coïncider A et D, on tend la corde et, bien évidemment, le triangle ABC est équilatéral, ce qui donne des angles de 60°.

Ce type de manipulations était vraisemblablement utilisé au Moyen Âge par les bâtisseurs des cathédrales. On prétend parfois que les Égyptiens ont utilisé la corde à treize nœuds, mais, selon les historiens spécialistes comme Eli Maor (*voir la bibliographie*), rien ne l'atteste avec certitude.

LE PLUS VIEUX THÉORÈME ?

La méthode de la corde repose sur ce qui est peut-être le plus ancien et fameux théorème, le théorème de Pythagore :

« Le carré de la longueur de l'hypoténuse d'un triangle rectangle est égal à la somme des carrés des longueurs des deux autres côtés. »

Plus précisément, la méthode de la corde à treize nœuds utilise la réciproque du théorème : « si le carré de la longueur d'un côté d'un triangle est égal à la somme des carrés des longueurs des deux autres côtés, alors ce triangle est rectangle et son hypoténuse est le plus grand côté. »

Pour le premier triangle, on a $3^2+4^2=9+16=25=5^2$, ce qui justifie la méthode, mathématiquement aussi parfaite que la méthode de la feuille repliée. Notons que la corde sera plus pratique que la feuille pour dessiner des motifs géométriques dans un jardin, sur un champ ou pour contrôler la géométrie d'un édifice dont on veut que les murs >

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

LA TABLETTE BABYLONIENNE PLIMPTON 322

1

L'interprétation de la tablette babylonienne d'argile numéro 322 de la collection Plimpton, conservée à l'université Columbia, à New York, et qui date d'environ 1800 ans avant notre ère, est débattue. Si des spécialistes pensent y reconnaître une liste de triplets pythagoriciens, d'autres n'y voient qu'une série d'exercices de calcul, ou la disposition d'une table numérique liée au système de numération en base 60 utilisé par les Babyloniens.

2

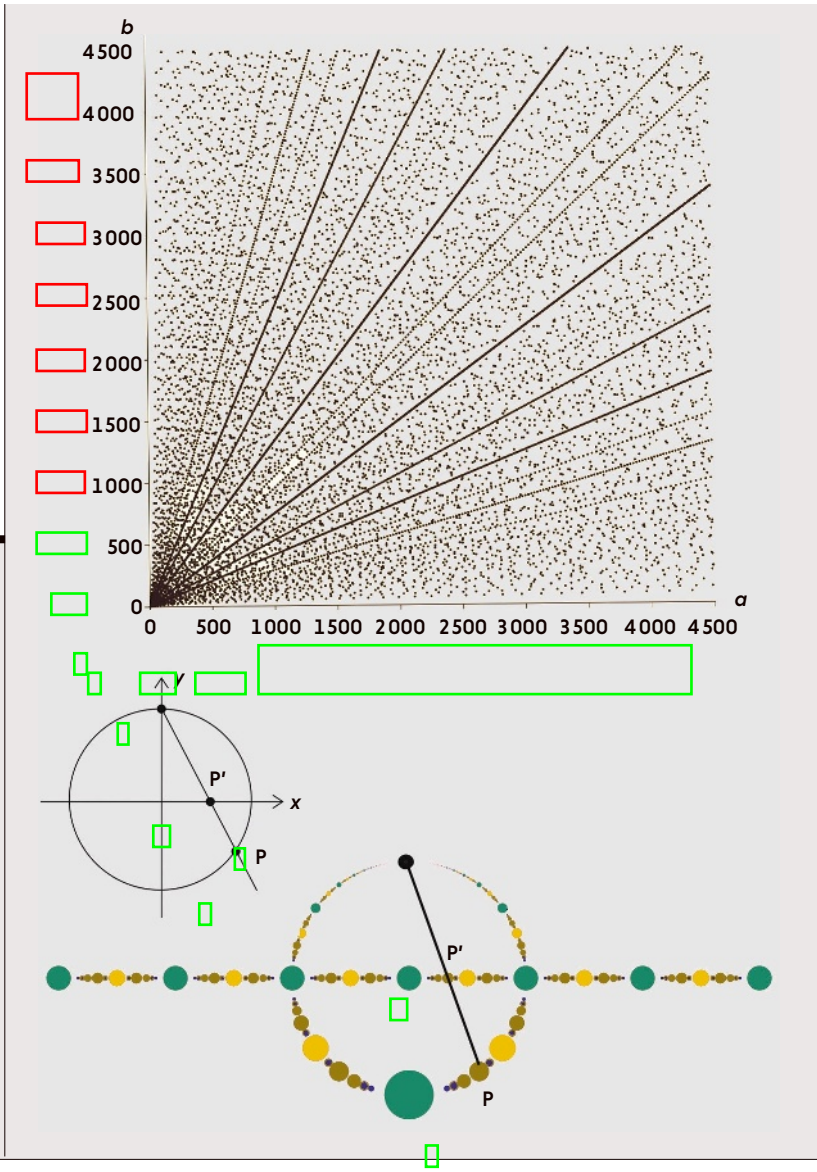
LES TRIPLETS PYTHAGORICIENS PRIMITIFS ET EUCLIDIENS

Connaissant les triplets pythagoriciens (a, b, c), on peut représenter les points de coordonnées (a, b). Le graphique ci-contre, en haut, correspond ainsi aux valeurs de a et b inférieures à 4 500. Les droites qui partent de l'origine correspondent aux triplets qui se déduisent d'un triplet en multipliant ses composantes par un même entier.

La famille de triplets pythagoriciens attribuée à Euclide est celle de tous les triplets de la forme $(m^2 - n^2, 2mn, m^2 + n^2)$, où m et n sont des entiers et $m > n$.

À chaque triplet de ce type correspond un point P, de coordonnées rationnelles, $((m^2 - n^2)/(m^2 + n^2), 2mn/(m^2 + n^2))$, du cercle de rayon unité centré sur l'origine. Ces coordonnées satisfont en effet l'équation $x^2 + y^2 = 1$.

La projection stéréographique du cercle unité sur la droite $y = 0$ envoie l'ensemble des points P rationnels du cercle unité associés aux triplets pythagoriciens sur les points P' à coordonnées rationnelles $(m/n, 0)$ de cette droite (*schémas ci-contre*). À chaque nombre rationnel correspond donc, par l'inverse de la projection stéréographique, un unique point à coordonnées rationnelles sur le cercle unitaire, ce point donnant un triplet pythagoricien selon la formule d'Euclide (pour plus de détails, voir https://bit.ly/2AtHKLM et https://bit.ly/3hmybik).

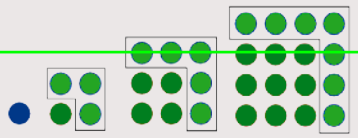


© Wikimedia Commons/Domaine public (tablette)

3 LES TRIPLETS PYTHAGORICIENS DE PYTHAGORE

On attribue à Pythagore la découverte de la famille de triplets qui commence par (3, 4, 5), (5, 12, 13), (7, 24, 25), famille qu'avec nos notations nous écrivons $(a, b, c) = (2n + 1, 2n^2 + 2n, 2n^2 + 2n + 1)$. On vérifie, en développant, que ces triplets satisfont la relation $a^2 + b^2 = c^2$.

Mais d'où vient la formule ? On peut raisonnablement conjecturer qu'elle provient du raisonnement géométrique fondé sur la formation des nombres carrés successifs, illustré ci-dessous.



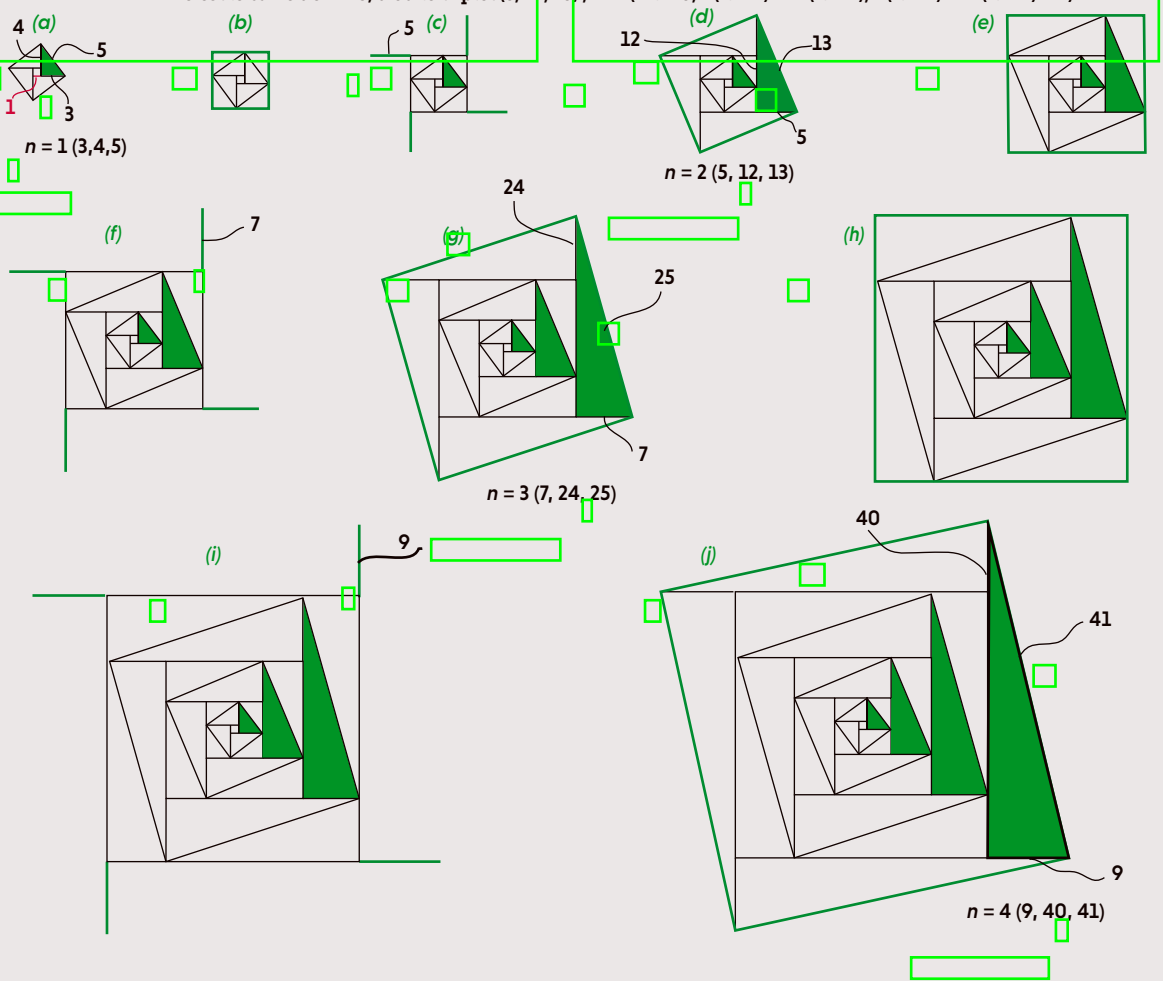
On remarque qu'en ajoutant au carré de n le nombre impair $2n + 1$, on obtient le nombre carré suivant. Avec les notations modernes, cela se démontre immédiatement : $n^2 + (2n + 1) = (n + 1)^2$. Cela signifie que si la différence des carrés de deux nombres consécutifs A et $(A + 1)$ est le carré d'un nombre B, alors le triplet $(B, A, A + 1)$ est un triplet pythagoricien. On tente donc de trouver des nombres A tels que $(A + 1)^2 - A^2 = 2A + 1$ soit un carré, B^2.

$A = 1$: $2A + 1 = 3$ n'est pas un carré ;
$A = 2$: $2A + 1 = 5$ n'est pas un carré ;
$A = 3$: $2A + 1 = 7$ n'est pas un carré ;
$A = 4$: $2A + 1 = 9$ est le carré de $B = 3$, d'où le triplet (3, 4, 5) ;
$A = 5$: $2A + 1 = 11$ n'est pas un carré ;
...
$A = 12$: $2A + 1 = 25$ est le carré de $B = 5$, d'où le triplet (5, 12, 13) ;

Et ainsi de suite. On observe que les entiers B qui donnent un triplet pythagoricien sont les nombres impairs successifs $B = 2n + 1$. Le nombre A qui correspond vérifie donc $2A + 1 = B^2 = (2n + 1)^2 = 4n^2 + 4n + 1$. On trouve $A = 2n^2 + 2n$ et $A + 1 = 2n^2 + 2n + 1$. La famille de triplets pythagoriciens associée à la construction est donc :
$(a, b, c) = (2n + 1, 2n^2 + 2n, 2n^2 + 2n + 1)$.

En 2015, Luis Teia Gomes a découvert une intéressante et astucieuse disposition en spirale des triangles rectangles associés aux triplets de la série de Pythagore. On part de quatre triangles associés au premier triplet de la série (3, 4, 5). On les dispose selon le schéma *(a)*. Le petit carré central a pour côté 1, car il est le résultat de la soustraction 4 – 3. Le carré en *(b)* a un côté dont la longueur est la somme des longueurs des deux petits côtés du premier triangle, soit 7 = 3 + 4. On prolonge par le nombre impair 5, *(c)*, et cela donne en *(d)* le triangle associé au second triplet de la série (5, 12, 13).
On recommence les mêmes opérations *(e, f, g, h, i)* avec les nombres impairs suivants 7, puis 9, etc.

Pour montrer que cette construction fonctionne indéfiniment, on raisonne par récurrence en supposant qu'on est arrivé au triangle donné par : $(a, b, c) = (2n + 1, 2n^2 + 2n, 2n^2 + 2n + 1)$. Le petit côté du triangle suivant est le nombre impair $2n + 3$, et le second côté de ce triangle, par construction, a pour longueur la somme des deux côtés du triangle précédent et de $2n + 3$, soit :
$(2n + 1) + (2n^2 + 2n) + (2n + 3) = 2n^2 + 6n + 4 = 2(n + 1)^2 + 2(n + 1)$.
C'est ce qu'il nous fallait pour le triangle suivant, associé au triplet :
$(2n + 3, 2(n + 1)^2 + 2(n + 1), 2(n + 1)^2 + 2(n + 1) + 1)$.



> et le plan des pièces soient parfaitement carrés ou rectangulaires.

On dit que les trois nombres 3, 4 et 5 forment un « triplet pythagoricien », et plus généralement, c'est le nom donné à tous les triplets d'entiers positifs a, b, c tels que $a^2+b^2=c^2$.

Toute idée mathématique ouvre un territoire infini de questions auxquelles on ne répond jamais entièrement ; aujourd'hui encore, on mène des recherches sur ces triplets pythagoriciens, on formule de nouvelles conjectures qui exigent l'utilisation de puissants ordinateurs pour en venir à bout… ou qui restent sans solution. On présentera ici quelques résultats classiques et merveilleux sur les triplets pythagoriciens, puis de plus récents comme la bijection de l'arbre de Berggren, pour terminer par des conjectures liées aux coloriages pythagoriciens.

IL EN EXISTE UNE INFINITÉ

Existe-t-il d'autres triplets pythagoriciens que (3, 4, 5) ? Oui, évidemment : en doublant (3, 4, 5), ce qui donne (6, 8, 10), on a bien $6^2+8^2=10^2$.

Plus généralement, si (a, b, c) est un triplet pythagoricien et si d est un entier quelconque, alors (ad, bd, cd) est un autre triplet pythagoricien. Pour connaître tous les triplets pythagoriciens, on pourra donc se concentrer sur ceux dont les trois éléments ne sont pas multiples d'un même entier ; on les dénomme « triplets pythagoriciens primitifs ». Le triplet (3, 4, 5) est primitif, (6, 8, 10) ne l'est pas.

Pythagore, au VI^e^ siècle avant notre ère, n'a laissé aucun texte écrit et les sources diverses le concernant se contredisent. Il est cependant à peu près certain qu'il connaissait le triplet (3, 4, 5). Le philosophe Proclus de Lycie, au V^e^ siècle de notre ère, dans son commentaire sur le livre I des *Éléments* d'Euclide (rédigé vers 300 avant notre ère), attribue à Pythagore la découverte de la formule générale que nous notons aujourd'hui $(2n+1, 2n^2+2n, 2n^2+2n+1)$, où n est un entier positif. Elle produit une famille infinie de triplets pythagoriciens primitifs – on vérifie en effet aisément que $(2n+1)^2+(2n^2+2n)^2$ est égal à $(2n^2+2n+1)^2$. Les triplets de cette famille sont primitifs, car si d est un diviseur des trois éléments, c'est un diviseur de $2n^2+2n+1$ et de $2n^2+2n$, donc de leur différence qui est 1, d'où $d=1$. Par exemple, on obtient (3, 4, 5) pour $n=1$ et (5, 12, 13) pour $n=2$. L'encadré 1 explique l'idée géométrique à l'origine de la formule de Pythagore et montre une disposition découverte récemment permettant de combiner géométriquement tous les triplets de cette famille.

EST-CE BIEN PYTHAGORE ?

Bien sûr, les historiens se sont demandé si c'est vraiment Pythagore ou un membre de son école qui a découvert l'idée de ces triplets >

4 L'ARBRE DE BERGGREN

Si (a, b, c) est un triplet pythagoricien, il en va de même de :
$A(a, b, c) =$
$(a - 2b + 2c, 2a - b + 2c, 2a - 2b + 3c)$;
$B(a, b, c) =$
$(a + 2b + 2c, 2a + b + 2c, 2a + 2b + 3c)$;
$C(a, b, c) =$
$(-a + 2b + 2c, -2a + b + 2c,$
$-2a + 2b + 3c)$.
Tout triplet pythagoricien primitif peut s'écrire de façon unique sous la forme d'une suite finie de transformations A, B ou C appliquée au triplet (3, 4, 5). Par exemple, CBA(3, 4, 5) = (187, 84, 205).

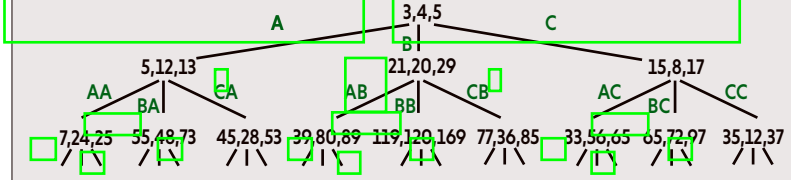
Sur la figure ci-dessous, on a représenté le début de l'arbre ternaire infini engendré par A, B et C. Ce surprenant résultat ne fut démontré qu'en 1934 par un certain B. Berggren (*voir la bibliographie*).

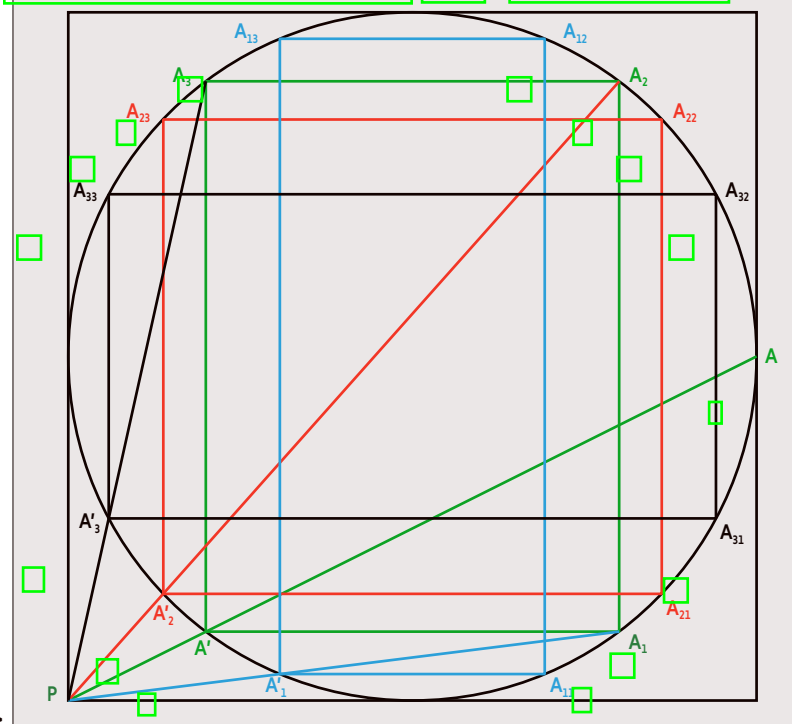
L'arbre de Berggren a une étonnante interprétation géométrique due à Roger Vogeler, mathématicien à l'université du Connecticut. On part d'un carré dans lequel est inscrit un cercle. On joint le coin en bas à gauche du carré *(le point P)* au point de tangence du cercle avec le carré sur le côté vertical du carré à droite *(le point A)*. Le segment PA coupe le cercle en un point A'. En partant de A', on construit le rectangle vert $A'A_1A_2A_3$ inscrit dans le cercle et ayant ses côtés horizontaux et verticaux. Deux côtés adjacents de ce rectangle avec la diagonale donnent un triangle rectangle de type (3, 4, 5), le premier triplet pythagoricien primitif.

À partir de A_1, on recommence l'opération faite à partir de A. On obtient un second rectangle $A'_1A_{11}A_{12}A_{13}$ *(en bleu)* qui donne le triplet (5, 12, 13). La même opération à partir de A_2, puis A_3, donne le rectangle $A'_2A_{21}A_{22}A_{23}$ *(en rouge)* et le triplet (21, 20, 29), puis le rectangle $A'_3A_{31}A_{32}A_{33}$ *(en noir)* et le triplet (15, 8, 17). On a alors obtenu les trois premières branches de l'arbre de Berggren.

Chaque nouveau rectangle donne trois points supplémentaires et donc trois nouveaux rectangles et triplets, ce qui produit au total les 9 triplets pythagoriciens de niveau 2 de l'arbre de Berggren, etc.

Pour une démonstration de cette incroyable construction de tous les triplets pythagoriciens primitifs, voir l'article d'André Stoll cité en bibliographie.





5 COLORIAGE DES ENTIERS

Les jeux de coloriage peuvent être pratiqués de toutes sortes de façons… et en particulier avec les triplets pythagoriciens où ils ont suggéré un problème résolu récemment.

Le jeu consiste à colorier les entiers 1, 2, 3, … en rouge ou en bleu de telle façon que les entiers d'un même triplet pythagoricien ne soient jamais tous de la même couleur. Le but est bien sûr de colorier les entiers aussi loin que possible.

En 2008, en utilisant des programmes, Joshua Cooper et Chris Poirel ont pu colorier les entiers jusqu'à 1 344. Le record a été battu en 2012 par William Kay, qui a colorié les entiers jusqu'à 1 514, puis en 2015 par Joshua Cooper et Ralph Overstreet, qui ont atteint l'entier 7 664.

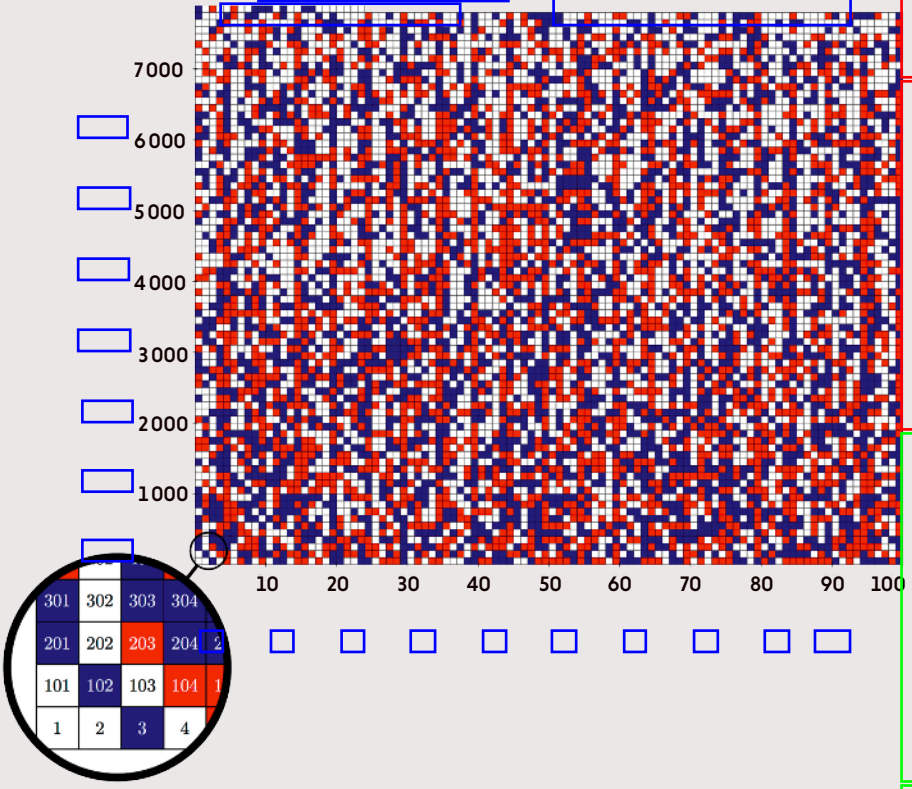
La question était : ces progrès ont-ils une limite ? En 2016, Marijn Heule, Oliver Kullmann et Victor Marek ont su aller jusqu'à 7 824, mais surtout, ils ont réussi à démontrer qu'on ne ferait jamais mieux : au-delà de 7 824, de tels coloriages n'existent pas.

Dans le dessin ci-dessous, la solution pour 7 824 est représentée. Les carrés laissés en blanc peuvent être colorés en rouge ou en bleu sans que cela contredise l'objectif recherché ; le dessin représente donc un grand nombre de solutions pour 7 824.

On peut faire quelques contrôles : les entiers 4 et 5 sont de couleurs différentes, donc le triplet (3, 4, 5) ne sera pas monochrome quelle que soit la couleur qu'on donnera à 3. Même chose pour (6, 8, 10), et ainsi de suite.

La preuve que les entiers jusqu'à 7 825 ne peuvent pas être coloriés pour satisfaire la contrainte du problème a nécessité un calcul énorme équivalent à 35 000 heures de calcul pour un ordinateur usuel, calcul bien évidemment effectué en parallèle (sinon, il aurait exigé quatre ans).

Une variante du problème existe : on cherche cette fois un coloriage à 3 couleurs et on exige que chaque triplet pythagoricien comporte au moins 2 couleurs. On sait qu'on peut colorier jusqu'à 11 066, mais on ignore si l'on peut aller plus loin, ni même s'il est possible de colorier l'infinité des entiers.



> qualifiés aujourd'hui de pythagoriciens. Aucune réponse définitive ne semble possible.

D'une part, il y a une difficulté due à la tablette babylonienne en argile notée Plimpton 322, gravée en caractères cunéiformes et datée d'environ 1800 avant notre ère. Bien qu'incomplète, elle semble présenter une liste de triplets pythagoriciens. Mais les spécialistes ne sont pas tous d'accord et d'autres interprétations de la tablette ont été proposées. On ne peut donc pas affirmer avec certitude que les Babyloniens aient précédé Pythagore.

D'autre part, il existe un texte indien, le « Baudhāyana Sulba Sūtra », rédigé entre 800 et 400 avant notre ère, qui énonce ce que nous nommons le théorème de Pythagore et qui donne la liste de triplets pythagoriciens (3, 4, 5), (5, 12, 13), (8, 15, 17), (7, 24, 25), (12, 35, 37). Étant donné l'imprécision de la date de rédaction du texte, il est impossible, là encore, de savoir si Pythagore a été devancé.

On ignore donc si le théorème de Pythagore et les triplets associés sont dus à l'école pythagoricienne. L'origine des premières notions mathématiques est délicate à retracer !

APRÈS PYTHAGORE

Toujours selon Proclus, les triplets pythagoriciens ont aussi intéressé Platon (427 à 347 avant notre ère) qui connaissait une seconde famille infinie de triplets pythagoriciens, celle donnée par la formule $(n^2-1, 2n, n^2+1)$. Comme celle de Pythagore, cette famille infinie ne donne que partiellement l'ensemble des triplets primitifs.

C'est Euclide qui mentionne la première famille complète permettant d'obtenir tous les triplets pythagoriciens primitifs. La famille dépend de deux paramètres, des entiers positifs m et n avec $m > n$, et s'écrit $(m^2-n^2, 2mn, m^2+n^2)$. Cette formule donne tous les triplets primitifs, mais pas uniquement. Le triplet est primitif si m et n ne sont pas tous les deux impairs et s'ils n'ont pas de diviseur commun supérieur à 1 (pour une démonstration, voir : https://en.wikipedia.org/wiki/Pythagorean_triple).

Si l'on veut une formule qui donne tous les triplets pythagoriciens sans exception, on introduit un troisième paramètre entier k et la famille devient $(k(m^2-n^2), 2kmn, k(m^2+n^2))$.

Il y a beaucoup de triplets pythagoriciens primitifs. En se limitant à ceux dont tous les éléments sont inférieurs à 100, on en trouve 16 : (3, 4, 5), (5, 12, 13), (8, 15, 17), (7, 24, 25), (20, 21, 29), (12, 35, 37), (9, 40, 41), (28, 45, 53), (11, 60, 61), (16, 63, 65), (33, 56, 65), (48, 55, 73), (13, 84, 85), (36, 77, 85), (39, 80, 89), (65, 72, 97).

Depuis plus de deux millénaires, on étudie les propriétés de cette famille infinie. Voici quelques affirmations prouvées la concernant.

© M. J. H. Heule et al., https://www.cs.utexas.edu/~marijn/ptn/

Leur démonstration constitue une collection d'exercices dont certains sont difficiles.

Soit (a, b, c) un triplet pythagoricien primitif, avec $a<b<c$. On a alors :

– Un entier parmi a et b est impair et c est impair.

– L'entier $(c-a)(c-b)/2$ est toujours un carré. Par exemple, $(13-5)(13-12)/2=4=2^2$ et $(85-13)(85-84)/2=36=6^2$.

– Au plus un des trois entiers a, b ou c est un carré.

– Un entier exactement parmi a et b est multiple de 3.

– Un entier exactement parmi a et b est multiple de 4.

– Un entier exactement parmi a, b et c est multiple de 5.

– Tous les facteurs premiers de c sont de la forme $4k+1$ avec k entier, et c lui-même est donc de la forme $4k+1$ avec k entier.

– Pierre de Fermat démontra que l'aire du triangle associé à un triplet pythagoricien, $ab/2$, n'est jamais un carré ni le double d'un carré (https://mathworld.wolfram.com/PythagoreanTriple.html).

– Aucun des angles aigus (mesurés en degrés) d'un triangle correspondant à un triplet pythagoricien n'est un nombre rationnel.

– Tout entier à partir de 3 se retrouve dans un triplet pythagoricien au moins (primitif ou non).

– Tout entier à partir de 3 qui n'est pas de la forme $4k+1$ se retrouve dans un triplet pythagoricien primitif.

– Derrick Norman Lehmer montra en 1900 un étrange résultat : si l'on note $N(k)$ le nombre de triplets pythagoriciens primitifs dont la somme (le périmètre du triangle associé) est inférieure à k, alors le rapport $N(k)/k$ tend vers $\log(2)/\pi^2$ quand k tend vers l'infini.

– Si f_n est le n-ième nombre de Fibonacci ($f_0=f_1=1$ et $f_n=f_{n-1}+f_{n-2}$), alors le triplet $(f_n f_{n+3}, 2f_{n+1}f_{n+2}, f_{n+1}^2 f_{n+2}^2)$ est pythagoricien.

– ab est toujours multiple de 12, et abc multiple de 60 (https://mathworld.wolfram.com/PythagoreanTriple.html).

– Certains triplets pythagoriciens primitifs donnent des triangles rectangles ayant la même aire. Les deux plus petits sont $(20, 21, 29)$ et $(12, 35, 37)$. On connaît un trio de triplets pythagoriciens donnant des triangles de même aire : $(4485, 5852, 7373)$, $(3059, 8580, 9109)$, $(1380, 19019, 19069)$.

– Un magnifique résultat démontré en 1934 par le Suédois B. Berggren invoque des transformations A, B et C qui ne manquent rien, sans répétitions (*voir l'encadré 4*) : tout triplet pythagoricien primitif s'écrit de façon unique sous la forme d'une suite finie de A, B ou C appliquée à $(3, 4, 5)$. Par exemple, ABC$(3, 4, 5)$ donne $(115, 262, 277)$ et AABBCC$(3, 4, 5)$ donne $(2299, 7140, 7501)$.

La popularité des triplets pythagoriciens a amené un problème de coloriage et une compétition de calcul. L'idée vient de Paul Erdős et Ronald Graham. Ce dernier offre d'ailleurs 250 dollars à celui qui résoudra le problème.

COLORIAGES PYTHAGORICIENS

La question est la suivante : peut-on séparer l'ensemble des entiers en un nombre fini k de sous-ensembles S_1, S_2, ..., S_k de façon qu'aucun S_i ne contienne trois nombres d'un même triplet pythagoricien ?

On peut par exemple tenter de séparer les entiers en deux sous-ensembles : S_1= l'ensemble P des nombres pairs et S_2= l'ensemble I des nombres impairs. Cela ne convient pas, car le triplet $(6, 8, 10)$ serait tout entier dans P. Si la réponse est non à la question d'Erdős et Ronald Graham, il faut une séparation des entiers en une infinité de sous-ensembles pour éviter tout triplet. Si la réponse est oui, il faut indiquer le plus petit entier k permettant la séparation.

Savoir si la réponse au problème est le nombre $k=2$ revient à rechercher un coloriage en deux couleurs des nombres entiers en évitant que les trois éléments d'un même triplet pythagoricien soient de la même couleur. On peut essayer progressivement en allant jusqu'à un certain entier maximum. Le coloriage suivant des entiers de 1 à 20 est correct : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

En 2008, à l'aide de programmes puissants, un tel coloriage a été obtenu jusqu'à l'entier 1344, puis en 2012 jusqu'à 1514, puis en 2015 jusqu'à 7664. Enfin, en 2016, on a pu aller jusqu'à 7824. Ce résultat de Marijn Heule, Oliver Kullmann et Victor Marek est un maximum, car ces chercheurs ont aussi montré qu'un coloriage à deux couleurs ne pouvait pas exister pour les entiers jusqu'à 7825. Pour séparer les entiers en sous-ensembles sans triplets pythagoriciens, il faut donc au moins trois sous-ensembles.

Un risque d'erreur dans les opérations menées pour obtenir le résultat provenait de la conversion de l'énoncé du problème en une formule de logique pure. En 2019, une vérification de cette conversion a été proposée par Luís Cruz-Filipe, Joao Marques-Silva, Peter Schneider-Kamp. La méthode a mis en œuvre l'assistant de preuves *Coq* conçu à l'Inria, en France : l'informatique aide à trouver des solutions à des conjectures et permet de consolider les résultats en procédant à des contrôles *a posteriori* garantissant au mieux les résultats. La conjecture qu'un partage en trois est possible reste aujourd'hui non résolue.

L'histoire n'est pas finie : on a proposé des applications des triplets pythagoriciens pour engendrer des suites pseudo-aléatoires, pour mener des opérations de partage de clés en cryptographie et pour configurer des systèmes quantiques ! ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Cruz-Filipe *et al.*, **Formally verifying the solution to the Boolean Pythagorean triples problem**, *Journal of Automated Reasoning*, vol. 63(3), pp. 695-722, 2019.

S. Eliahou et J. Fromentin, **Pythagore et mixité**, *Images des Mathématiques*, 2017 : https://images.math.cnrs.fr/Pythagore-et-mixite.html

M. Heule *et al.*, **Solving and verifying the Boolean Pythagorean triples problem via cube-and-conquer**, *International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing*, Springer, 2016 (https://arxiv.org/pdf/1605.00723.pdf).

E. Maor, **The Pythagorean Theorem : A 4,000-Year History**, Princeton University Press, 2007.

A. Stoll, **Générations géométrique et algébrique des triplets pythagoriciens**, *L'Ouvert*, vol. 100, pp. 1-8, 2000 (http://numerisation.univ-irem.fr/ST/IST00012/IST00012.pdf).

B. Berggren, **Pytagoreiska trianglar**, *Elementa : Tidskrift för Elementär Matematik*, vol. 17, pp. 129-139, 1934.

Un remarquable petit film : https://www.3blue1brown.com/videos-blog/2017/5/26/all-possible-pythagorean-triples-visualized

L'AUTEUR

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

UNE MÉTÉORITE DANS L'ŒIL

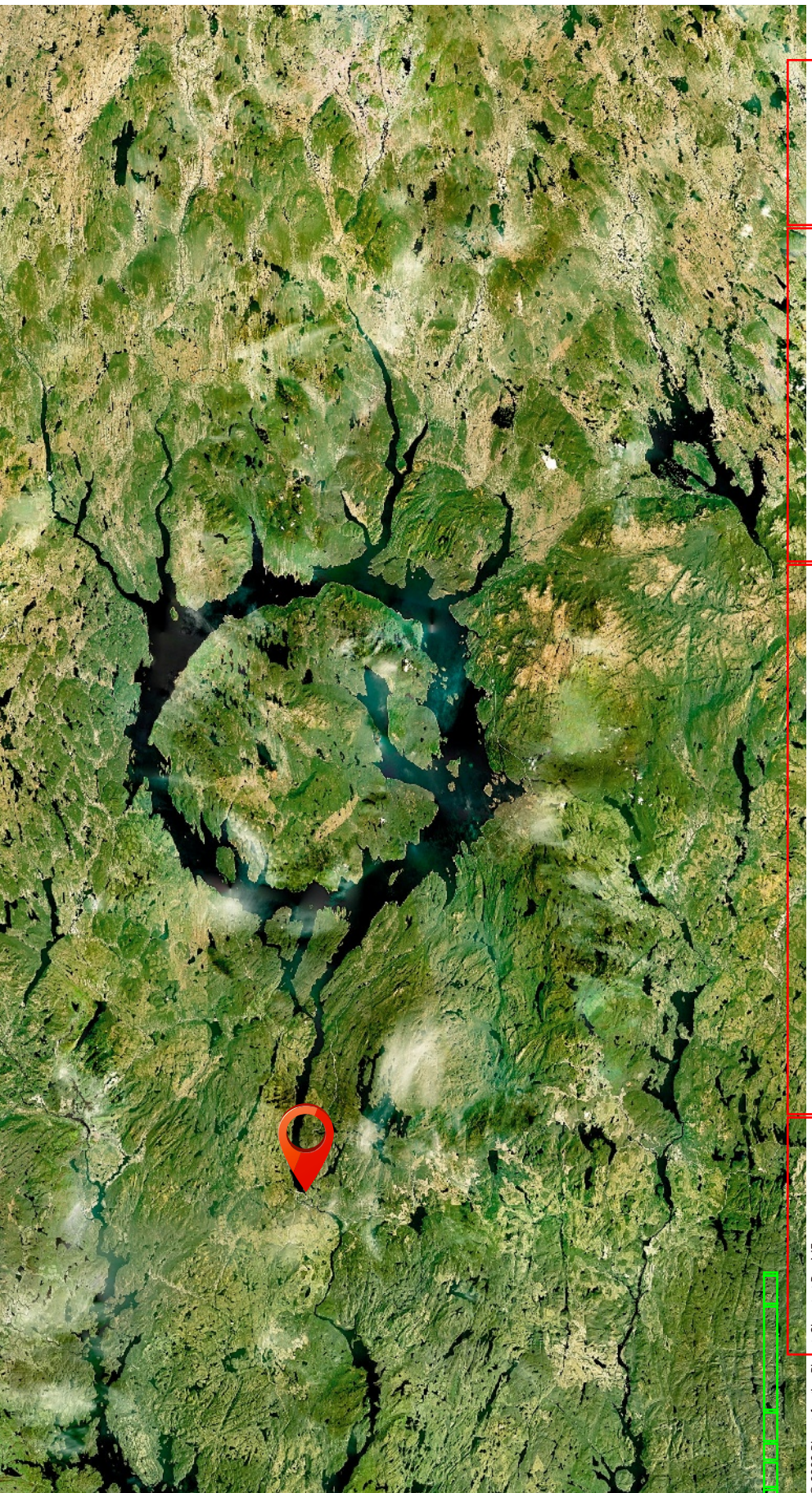
Paul Duncombe a entrepris l'étude géologique, zoologique, anthropologique… et artistique de la reconquête par la nature de l'«Œil du Québec», un cratère d'impact vieux de plus de 200 millions d'années.

Des canards sur la place de la Comédie-Française, à Paris, un puma dans les rues de Santiago, au Chili, deux rorquals près des côtes de Marseille… Pendant les mois de confinement que nous venons de passer, la nature a semble-t-il repris sinon ses droits au moins quelques libertés, profitant de l'absence de perturbation d'origine humaine. Le scénario est connu : quand la pression humaine diminue, la nature renaît. C'est le cas dans la zone démilitarisée entre les deux Corées ou autour de Tchernobyl, en Ukraine. Parfois, il arrive qu'une catastrophe plus radicale encore, comme une éruption volcanique, remette les compteurs à zéro, laissant à nu un territoire que la nature va là aussi progressivement reconquérir : une aubaine pour les spécialistes de la biodiversité cherchant à comprendre les interactions en jeu dans les écosystèmes. Et quand la catastrophe en question est la chute d'une grosse météorite ?

C'est l'objet du projet intitulé « Manicouagan », de l'artiste français Paul Duncombe, qui vient de recevoir le prix décerné par l'association Coal, fondée en 2008 par des professionnels de l'art contemporain, de l'écologie et de la recherche. Cette année, à l'occasion du Congrès mondial de la nature de l'UICN 2020, qui devait avoir lieu du 11 au 19 juin à Marseille et est désormais reporté à janvier 2021, l'édition avait pour thème l'érosion de la biodiversité.

Manicouagan ? C'est le nom d'un cratère d'impact laissé par une météorite de 8 kilomètres de diamètre, tombée sur ce qui est aujourd'hui le Canada il y a quelque 214 millions d'années avec une vitesse estimée entre 17 et 30 kilomètres par seconde. Le choc aurait liquéfié la roche sur 9000 mètres de profondeur ! La proximité temporelle de l'événement avec l'extinction du Trias-Jurassique plaide pour un possible lien de cause à effet. D'autant que plusieurs phénomènes du même type semblent

Le cratère de Manicouagan, ou « Œil du Québec », et en particulier le barrage Daniel-Johnson, vus de l'espace.



© 2020 Planet for the Planet, Skysat et RapidEye.

contemporains, comme la formation du cratère de Rochechouart-Chassenon, entre les départements français de la Charente et de la Vienne. Certains spécialistes parlent de *catena*, un alignement d'impacts météoritiques consécutifs à la dislocation d'un astéroïde.

On fait difficilement mieux qu'une des six grandes extinctions de masse que la Terre a connues comme remise à zéro de la nature ! Le cratère de Manicouagan, ou plutôt ce qu'il en reste, c'est-à-dire l'astroblème, est aujourd'hui rempli d'eau à la suite de l'édification du barrage Daniel-Johnson. Au centre, le mont Babel, de 952 mètres de hauteur, marque le centre du choc météoritique. Vue du ciel, l'étendue d'eau a une forme circulaire qui lui vaut le surnom d'« Œil du Québec ». Aujourd'hui, toute la région est une réserve où la biodiversité est protégée.

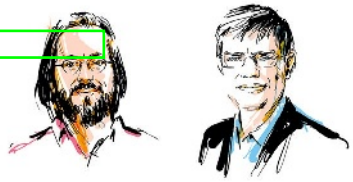
C'est là que Paul Duncombe, accompagné de scientifiques et d'artistes notamment innus (un peuple autochtone de la péninsule du Labrador), s'est installé dans la station Uapishka aux abords du cratère de Manicouagan afin d'enquêter sur les singularités géographiques, géologiques, zoologiques, botaniques, anthropologiques… du terrain, grâce entre autres à la réalisation de scans tridimensionnels de zones remarquables, de prélèvements d'échantillons, de relevés d'empreintes animales. L'idée est d'explorer l'ensemble des mécanismes ayant conduit à la reconquête du site après l'impact (la roche aurait mis de 1600 à 5000 ans pour refroidir complètement) par les végétaux, les insectes et autres espèces vivantes et ce, jusqu'aux premières cultures autochtones et l'engloutissement artificiel des vastes forêts du territoire par les eaux. L'ensemble de l'expédition et de ses conclusions fera l'objet d'installations artistiques présentées au Canada et en France.

Paul Duncombe, qui réfléchit depuis longtemps aux crises écologiques majeures, à commencer par celle que nous traversons, s'est déjà illustré sur le terrain de la reconquête de la nature. De fait, plusieurs de ses œuvres mettent en scène la colonisation de vestiges (une Citroën 2CV, un banc public arraché, un arbre déraciné…) par la faune et la flore. Cette fois, les échelles spatiales et temporelles sont d'un tout autre ordre. ■

Le site internet du projet :
http://www.projetcoal.org/coal/

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

EN ROUTE VERS MARS ! MAIS QUELLE ROUTE ?

Il s'agit de choisir les trajectoires des sondes spatiales de telle façon que les moteurs-fusées consomment le moins possible de carburant.

Le lancement de plusieurs missions spatiales vers Mars est prévu cette année, entre la mi-juillet et le début d'août. Une fenêtre favorable qui ne se répète que tous les 26 mois.

Tianwen-1, *Hope*, *Mars 2020*... Le point commun à tous ces noms ? Il s'agit de missions spatiales à destination de Mars dont le lancement est prévu entre la mi-juillet et le début d'août 2020. Une accumulation temporelle qui n'est pas fortuite : ces missions profitent d'une fenêtre de lancement vers la Planète rouge qui ne s'ouvre que tous les 26 mois. Toutes ces sondes spatiales suivront la même trajectoire, *grosso modo* une demi-ellipse. Pourquoi cette fenêtre ? Et quelles trajectoires ces engins empruntent-ils ? Les lois de la mécanique permettent de répondre.

DU BON USAGE DES MOTEURS À RÉACTION

Comment, dans le Système solaire, modifier une trajectoire régie exclusivement par l'attraction gravitationnelle du Soleil et des autres planètes ? Pour ce faire, il faut exercer une force. Or dans le vide spatial, il n'y a ni sol terrestre sur lequel prendre appui, ni eau sur laquelle flotter, ni air pour se faire porter. Si l'on exclut l'utilisation de la lumière du Soleil comme le font les voiles solaires, la seule possibilité qui reste est le principe de l'action et de la réaction.

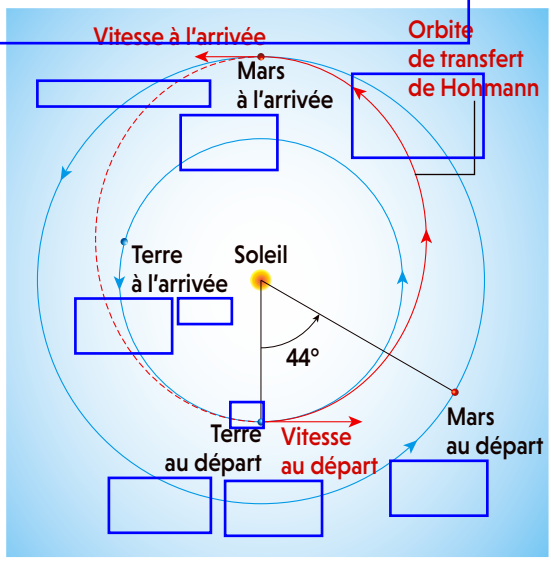
Lorsqu'un système physique éjecte une masse vers l'arrière, la conservation de la quantité de mouvement (le produit de la masse par la vitesse) implique que le reste du système est propulsé vers l'avant. En pratique, pour les moteurs-fusées, la force propulsive résultant de cette éjection est le produit du débit de masse par la vitesse d'éjection. Cela a deux conséquences.

D'une part, cette force ne dépend pas de la vitesse déjà acquise par la fusée ; autrement dit, il n'est pas de plus en plus difficile d'accélérer (contrairement au cas d'une voiture !). D'autre part, les moteurs à combustion chimique utilisés pour les sondes interplanétaires ne peuvent fonctionner en continu, compte tenu des petites quantités de carburant embarquées et des débits massiques requis pour accélérer convenablement. Une fois la sonde spatiale libérée de l'attraction terrestre, à l'échelle de la durée et des distances d'une mission vers Mars, tout se passe comme si le fonctionnement des moteurs se limitait à quelques brefs instants et provoquait une variation de vitesse instantanée. On parle alors d'« incrément » de vitesse de la sonde en un point de sa trajectoire.

© Illustrations de Bruno Vacaro

L'ORBITE DE TRANSFERT DE HOHMANN

La fenêtre de lancement la plus favorable pour une mission vers Mars se reproduit tous les 26 mois. Dans cette situation ici représentée, les propulseurs de la sonde lui confèrent un incrément de vitesse à son départ depuis la Terre, dans le sens du mouvement. Cela met la sonde sur une partie de trajectoire elliptique, l'« orbite de transfert de Hohmann », jusqu'à rejoindre l'orbite de Mars (assimilée ici à un cercle pour simplifier) au périhélie de l'ellipse. Là, un second incrément de vitesse est donné à la sonde pour qu'elle accompagne la Planète rouge dans son mouvement de révolution.



Comment dans ces conditions aller sur Mars ? Pour simplifier, une fois la sonde partie de la Terre, oublions l'attraction de cette dernière ainsi que celle de Mars et des autres planètes, et imaginons que notre engin se trouve sur la même orbite que la Terre. Cela signifie que l'on part d'une trajectoire quasi circulaire autour du Soleil parcourue à la vitesse, respectable, de 29,8 kilomètres par seconde (km/s).

Toute modification de vitesse transformera cette orbite circulaire en une ellipse dont le Soleil est un foyer, seule forme possible de trajectoire pour les objets piégés par le champ de gravitation du Soleil. Comment, dans cette situation, choisir l'incrément de vitesse pour optimiser la trajectoire et utiliser le moins possible de carburant ? Autrement dit, dans quelle direction pointer et quel incrément minimal de vitesse fournir ?

L'idée qui vient naturellement à l'esprit est de s'éloigner du Soleil, donc de pousser dans la direction opposée à notre étoile. Mauvaise idée ! Comme l'illustre l'encadré page 90, la trajectoire qui en résulte est beaucoup plus limitée que lorsque l'incrément de vitesse est fourni dans la direction de la vitesse initiale.

OPTIMISER LA TRAJECTOIRE

On peut le comprendre d'un point de vue énergétique. L'énergie fournie à l'engin spatial par la force de poussée (qui, on l'a vu, est indépendante de son mouvement) est d'autant plus élevée que cette force et la vitesse sont colinéaires. Or, à la fin, pour s'éloigner du « puits » de gravité du Soleil, il faut bien augmenter son énergie mécanique.

En poussant dans le sens du mouvement, on optimise cette augmentation en plaçant la sonde sur une trajectoire elliptique, le point où est appliqué l'incrément étant le périhélie (le point le plus proche du Soleil) de cette ellipse. L'incrément minimal est alors celui pour lequel l'aphélie (le point de l'ellipse le plus distant du Soleil) est sur l'orbite de Mars. Cela correspond à un supplément de vitesse de 2,9 km/s et la trajectoire suivie, appelée « orbite de transfert de Hohmann » en l'honneur de l'ingénieur allemand Walter Hohmann qui l'a proposée en 1925, est une demi-ellipse (*voir l'encadré ci-dessus*). Ce type de trajectoire est communément employé avec les satellites artificiels, pour les transférer d'une orbite basse >

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

> (à 300 km d'altitude) vers une orbite géostationnaire (à 35 800 km).

Suivre cette trajectoire «optimale» a cependant deux conséquences. Sa durée est parfaitement connue en vertu des lois de Kepler régissant le mouvement d'un corps en orbite autour du Soleil: 258 jours. Cela fixe la fenêtre de lancement, car il faut que, 258 jours après le départ de la mission depuis la Terre, Mars soit sur son orbite dans la position diamétralement opposée par rapport au Soleil. Ce n'est possible que si Mars est dans une certaine position par rapport à la Terre au moment du départ, ce qui n'arrive que tous les 26 mois.

Seconde conséquence: à l'arrivée sur l'orbite martienne, la vitesse de la sonde est seulement de 21,5 km/s, insuffisante pour suivre Mars qui se déplace à 24,1 km/s. Un nouvel incrément de 2,6 km/s est donc nécessaire, pour un total à l'aller de 5,5 km/s. Notons qu'il reste tout à fait possible de faire le voyage plus vite et de partir à une autre période, mais cela nécessite alors bien plus de carburant pour une même masse utile.

PROFITER DE LA GRAVITÉ DES PLANÈTES?

On peut établir de la même façon les paramètres du voyage retour: la durée totale atteint 974 jours, très longue pour des cosmonautes! De plus, ce scénario est très idéalisé du point de vue énergétique, car il oublie qu'avant d'être soumis à la seule force gravitationnelle du Soleil, il faut pouvoir quitter le puits de gravité de la Terre et, pour le retour, celui de Mars. Cela nécessite d'atteindre des vitesses considérables, appelées vitesse de libération, respectivement de 11,2 km/s et 5,1 km/s, qui viennent s'ajouter aux incréments précédents.

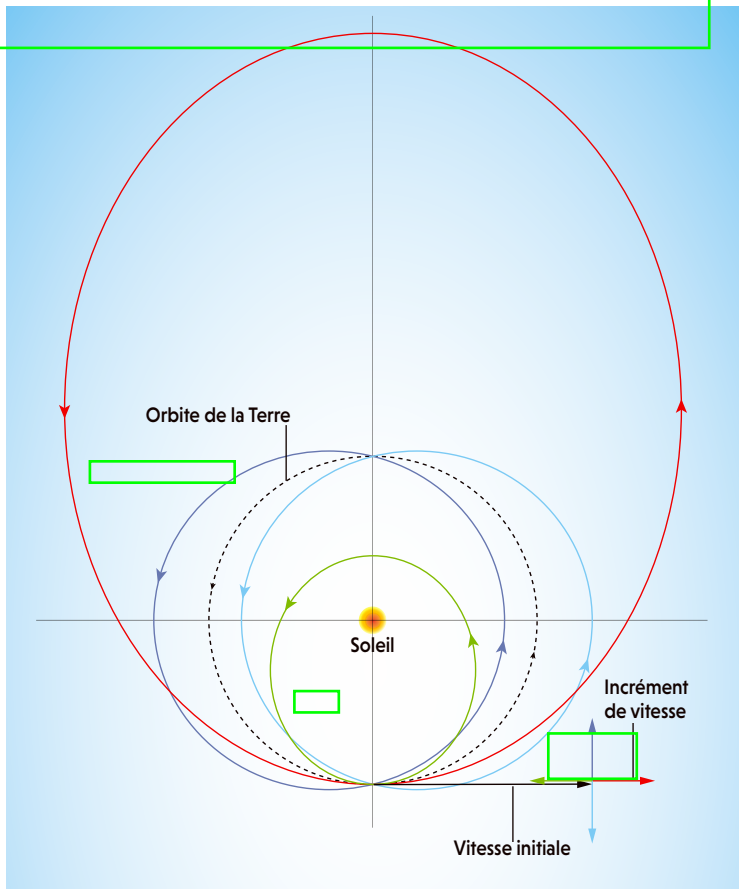
Cela explique pourquoi il peut être avantageux de choisir un lancement depuis une orbite basse: il faut toujours payer énergétiquement pour amener les éléments de la fusée sur cette orbite mais, ensuite, le coût du voyage est notablement réduit, en profitant de la vitesse déjà acquise. Des calculs donnent ainsi un incrément de 3,6 km/s au lieu des 2,9 km/s.

Les gravités planétaires présentent parfois quelques avantages. Imaginons que notre sonde spatiale arrive au voisinage de Mars en la devançant sur sa trajectoire. Si elle arrive suffisamment près de Mars, l'attraction gravitationnelle de Mars devient supérieure à l'attraction gravitationnelle du Soleil. On dit que la sonde est rentrée dans la sphère d'influence de Mars, dont le rayon est estimé à environ 600 000 km. Sa trajectoire est alors contrôlée par Mars, sa vitesse va rapidement augmenter en se rapprochant de la planète, avec le risque soit de la percuter, soit de la frôler à plus de 5,1 km/s et de repartir dans l'espace. C'est pourquoi on freine en général la sonde pour la placer en orbite basse avant qu'elle ne se pose sur la planète. Nul besoin de l'accélérer comme on l'avait évoqué (même si freiner coûte aussi de l'énergie).

On peut aussi jouer sur l'influence gravitationnelle de Mars pour raccourcir la durée du voyage: comme l'orbite de Mars est tangente à l'orbite de transfert à l'aphélie, on peut faire tomber la sonde dans le puits de gravité de la planète bien avant que l'aphélie soit atteint. Le gain peut alors atteindre un bon mois. ■

UN INCRÉMENT DE VITESSE BIEN DIRIGÉ

L'incrément de vitesse appliqué à une sonde spatiale à son départ depuis la Terre donne à l'engin une trajectoire elliptique différente selon la direction de l'incrément. Lorsque l'incrément est donné dans le sens du mouvement initial (celui de la Terre), l'énergie acquise est maximale et la trajectoire qui en résulte *(en rouge)* a la portée la plus grande. Trois autres situations *(en vert, bleu clair et bleu foncé)*, pour des incréments dirigés en sens opposé ou perpendiculairement au mouvement, sont également figurées ici.



BIBLIOGRAPHIE

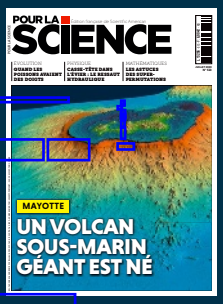
A. Stinner et J. Begoray, **Journey to Mars : The physics of travelling to the red planet,** *Physics Education*, vol. 40(1), pp. 35-45, 2005.

L. M. Celnikier, **Basics of Space Flight,** Frontières, 1993.

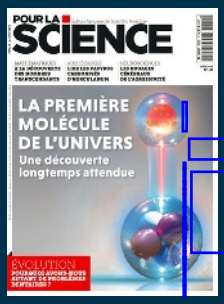
POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512

N° 511 (mai 20)
réf. PL511

N° 510 (avril 20)
réf. PL510

N° 509 (mars 20)
réf. PL509

N° 508 (fév. 20)
réf. PL508

N° 507 (jan 20)
réf. PL507

N° 506 (déc. 19)
réf. PL506

N° 505 (nov. 19)
réf. PL505

N° 504 (oct. 19)
réf. PL504

N° 503 (sept. 19)
réf. PL503

N° 502 (août 19)
réf. PL502

À retourner accompagné de votre règlement à :

Next2C – Service abonnements Pour La Science – 26 BD Président Wilson CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr

☑ **OUI,** je commande des numéros de **Pour la Science**, au tarif unitaire de 9,90 €.

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

1re réf. 0 1 x 9,90 € = 9,90 €
2e réf. ..... x 9,90 € = ... €
3e réf. ..... x 9,90 € = ... €
4e réf. ..... x 9,90 € = ... €
5e réf. ..... x 9,90 € = ... €
6e réf. ..... x 9,90 € = ... €

TOTAL À RÉGLER ..... €

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*
☐ **Carte bancaire**
N° .....
Date d'expiration .....
Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) .....

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 341 797 393 – Siret : 341 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour La Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : https://rebrand.ly/charte-donnees-pls. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR

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

LE PLUS VIEUX PARASITE DU MONDE

Que sont ces mystérieux tubes à la surface de coquillages vieux de 510 millions d'années?

Bactéries, organismes unicellulaires, végétaux, animaux... On trouve des parasites dans toutes les grandes familles du vivant. Mais depuis quand existent-ils et, surtout, qui étaient leurs hôtes? La réponse n'est pas simple, car si les paléontologues ont trouvé de nombreux fossiles de parasites, dont certains datant du Cambrien (il y a entre 541 et 485 millions d'années), rares sont ceux retrouvés avec leur hôte. Il est donc très difficile de retracer l'évolution du phénomène lui-même. Néanmoins, tout récemment, une équipe autour de Zhifei Zhang, Luke Strotz et Timothy Topper, de l'université Northwest, à Xi'an, en Chine, a découvert un organisme qui pourrait bien être le plus vieux parasite connu, fixé pour l'éternité sur son hôte fossilisé.

Le parasitisme correspond à une interaction durable particulière de deux organismes vivants. Pour sa nutrition et sa reproduction, le parasite tire profit de son hôte qui en subit donc un effet négatif, d'intensité variable suivant les cas. Mettre en évidence un parasitisme ancien nécessite donc non seulement de trouver une trace d'interaction durable de deux organismes, mais aussi de montrer qu'elle est délétère pour l'un.

En 2005, Dieter Waloszek, alors à l'université d'Ulm, en Allemagne, et ses collaborateurs ont décrit des larves fossilisées du Cambrien supérieur (–490 millions d'années) qui présentent des ressemblances frappantes avec celles des pentastomides actuels. Or ces crustacés sont des parasites des voies respiratoires de vertébrés terrestres (reptiles, oiseaux, mammifères). On peut donc penser qu'au Cambrien aussi, les pentastomides étaient des parasites. Dans une synthèse parue en 2015, Kenneth De Baets, de l'université Friedrich-Alexander, à Erlangen-Nuremberg, en Allemagne, et Timothy Littlewood, du Muséum d'histoire naturelle de Londres, ont ainsi proposé qu'il s'agissait des plus anciens parasites fossiles décrits.

Toutefois, sans hôtes identifiés, impossible d'être sûr que les pentastomides étaient déjà des parasites à

Ces brachiopodes formaient des communautés de milliers d'individus, tapissant les fonds marins cambriens d'une prairie hérissée.

Si plus de la moitié des spécimens avec tubes étudiés en Chine ne portaient que 1 à 3 tubes, il n'était pas rare d'en trouver avec 4, 5 ou 6 tubes.

© Zhifei Zhang

EN CHIFFRES

12 000

On a répertorié quelque 12 000 espèces fossiles de brachiopodes, contre 461 espèces actuelles. Avec leurs quelque 9 200 espèces connues, les bivalves (ou lamellibranches) les ont largement supplantés aujourd'hui.

205

Pour parvenir à leurs conclusions, Zhifei Zhang et ses collègues ont étudié 205 brachiopodes fossiles avec tubes et 224 sans tubes.

16

Un brachiopode fossile portait 16 tubes à lui seul. Mais les chercheurs ont observé qu'au-delà de 3 tubes, le nombre de tubes n'influait plus sur la croissance du brachiopode.

Brachiopode
Neobolus wulongqingensis
Longueur : env. 7 cm

Plus cette extrémité du tube est proche de la base de la coquille et plus il s'est fixé tôt sur le brachiopode durant son développement.

Sur tous les spécimens examinés, le tube se prolongeait jusqu'au bord de la coquille.

l'époque. Ce que concluent les deux chercheurs en insistant sur l'importance de la reconstitution des phylogénies pour cerner les origines des parasitismes, à défaut d'une description des relations entre parasites et hôtes dans les temps anciens.

C'est dans ce contexte que Zhifei Zhang et ses collègues se sont lancés dans l'étude de mystérieux organismes incrustés sur les coquilles de brachiopodes du Cambrien inférieur (étage 4, de –514 à –509 millions d'années) de la Chine du Sud, dans l'est du Yunnan. Les brachiopodes sont des animaux à symétrie bilatérale dont la coquille est constituée de deux valves de plan de symétrie différent de celui des bivalves que l'on rencontre sur nos côtes, comme les moules ou les coquilles Saint-Jacques. Constituant une douzaine de familles dès le début du Cambrien, ils ont eu leur plénitude dans l'Ordovicien (il y a entre 485 et 443 millions d'années), mais se sont effondrés lors de l'extinction de la fin du Permien, il y a environ 252 millions d'années. Le nombre d'espèces actuelles est ainsi très réduit.

SUR DE VIEUX BRACHIOPODES CHINOIS

Le brachiopode *Neobolus wulongqingensis* domine la formation géologique étudiée en Chine : on y distingue de denses concentrations de milliers d'animaux quasiment jointifs. Leur exceptionnelle fossilisation permet de remarquer que la majorité des coquilles sont encroûtées par des tubes allongés, biominéralisés. Un tel animal, qui en utilise un autre comme support, est appelé un « épibionte ». Toutefois, difficile de préciser à quelle famille ces tubes appartiennent : alors que certaines parties molles des brachiopodes sont parfois préservées, il n'en est pas de même pour ces animaux encroûtants, si bien qu'il est impossible de les classer dans un embranchement.

Néanmoins, s'appuyant sur l'abondance de spécimens, les paléontologues ont constaté que ces épibiontes n'existent que sur des brachiopodes. De plus, l'ouverture de leur tube est toujours >

> dirigée vers la commissure antérieure des deux valves, ce qui indique une relation temporelle importante, car cela signifie que la croissance du tube suit celle de la coquille. En d'autres termes, plus le tube est long par rapport à la longueur de la coquille, plus la fixation de l'épibionte est ancienne.

UN PARASITE CLEPTOMANE

Dans la faune marine actuelle, on connaît bon nombre de cas d'épibiontie qui n'affectent pas l'animal support, par exemple des annélides ou des algues sur des huîtres ou des coquilles Saint-Jacques. Le tube serait-il lui aussi un épibionte sans effet néfaste, et donc non parasitaire ? Le gisement chinois est si riche que les chercheurs ont pu réaliser des études statistiques sur la taille des coquilles des brachiopodes. Ils ont ainsi montré que les animaux portant des tubes encroûtants présentaient une biomasse moyenne inférieure à ceux qui n'en portaient pas, signe que l'interaction a eu un effet délétère sur l'hôte.

Par ailleurs, ils ont remarqué une corrélation forte entre la distance du point d'attachement du tube par rapport au bord postérieur de la coquille (le bord relié à l'autre valve) et la biomasse des brachiopodes : plus le tube est attaché près du bord postérieur, plus la biomasse est faible. Or la distance du point d'attachement du tube reflète le moment où, durant la croissance du brachiopode, l'épibionte s'est accroché, et donc la durée de l'interaction. Ainsi, les brachiopodes qui ont vécu une longue interaction durable avec des épibiontes présentent une biomasse inférieure à celle d'animaux ayant eu une interaction courte.

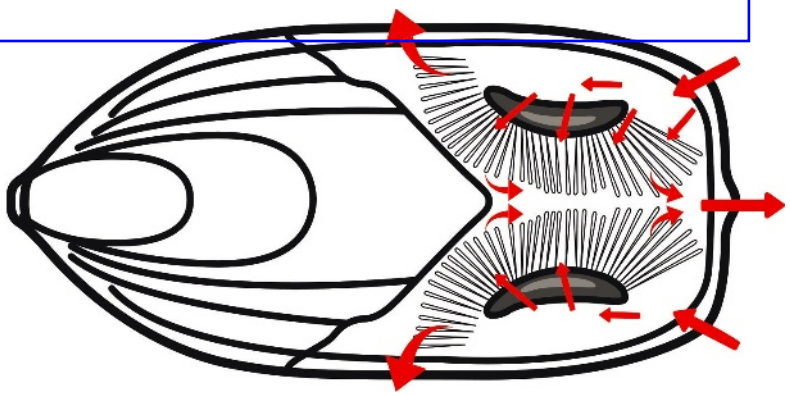
On peut assimiler ce phénomène à une perte de valeur sélective (ou succès reproducteur), étant donné que la reproduction de tels animaux est dépendante de leur biomasse. La valeur sélective étant amoindrie, le brachiopode souffre de son épibionte : c'est donc un parasitisme.

Comment, dans ce cas, l'animal a-t-il souffert de son épibionte ? Les chercheurs sont partis de leur première observation : les tubes encroûtants débouchent près de la commissure des deux valves. Or les brachiopodes sont des animaux filtreurs, qui réalisent un courant d'eau perpétuel à l'intérieur de leur coquille. Ce dernier est organisé par un organe à l'anatomie complexe, le lophophore, recouvert de cellules ciliées. Certains lophophores ont été fossilisés, et la comparaison avec la structure et le fonctionnement des brachiopodes actuels permet de déterminer avec précision la situation de l'entrée des courants d'eau laminaires dans la coquille. Or une autre étude statistique montre que l'ouverture des tubes encroûtants se situe préférentiellement à ces points d'entrée. La conclusion est simple : l'animal épibionte était également filtreur, et il captait les particules nourricières portées par les courants d'eau. En quelque sorte, il volait la nourriture de son hôte, d'où la dénomination de « cleptoparasite » – un nom que l'on donne aussi, par exemple, aux frégates qui dérobent les proies des autres oiseaux marins.

Il est vraisemblable que, dans le cas présent, le parasitisme soit obligatoire pour l'épibionte, c'est-à-dire la condition de sa survie, car on ne l'a trouvé nulle part ailleurs, comme sur les trilobites et les cailloux. Il y a donc établissement d'une interaction durable avec l'hôte. Or le cleptoparasitisme est très rare dans la faune marine actuelle. Serait-ce parce que ce stade devrait naturellement évoluer vers une interaction parasitaire plus intime, à l'instar de celle d'un crustacé, la sacculine, et de certains crabes, où la sacculine, au départ probablement simple épibionte, est ensuite entrée dans son hôte ? On n'en a pas encore la démonstration. ■

UNE CONFIGURATION OPTIMALE

Les brachiopodes sont des animaux filtreurs qui se nourrissent grâce aux courants d'eau qu'engendre un organe complexe muni de cils, le lophophore *(ci-dessous celui d'une lingule)*. La circulation *(flèches)* est telle que l'eau entre à environ 45° par rapport à l'axe de l'animal *(ici horizontal)* et ressort le long de cet axe. Or Zhifei Zhang et ses collègues ont montré que sur les brachiopodes fossiles découverts en Chine, les parasites s'installaient préférentiellement à environ 45° par rapport à l'axe de ces animaux, là où, justement, le flux entrant est maximal…



Hervé Le Guyader a récemment publié : **Biodiversité : le pari de l'espoir,** (Le Pommier, 2020).

BIBLIOGRAPHIE

Z. Zhang *et al.*, **An encrusting kleptoparasite-host interaction from the early Cambrian,** *Nat. Commun.*, vol. 11, article 2625, 2020.

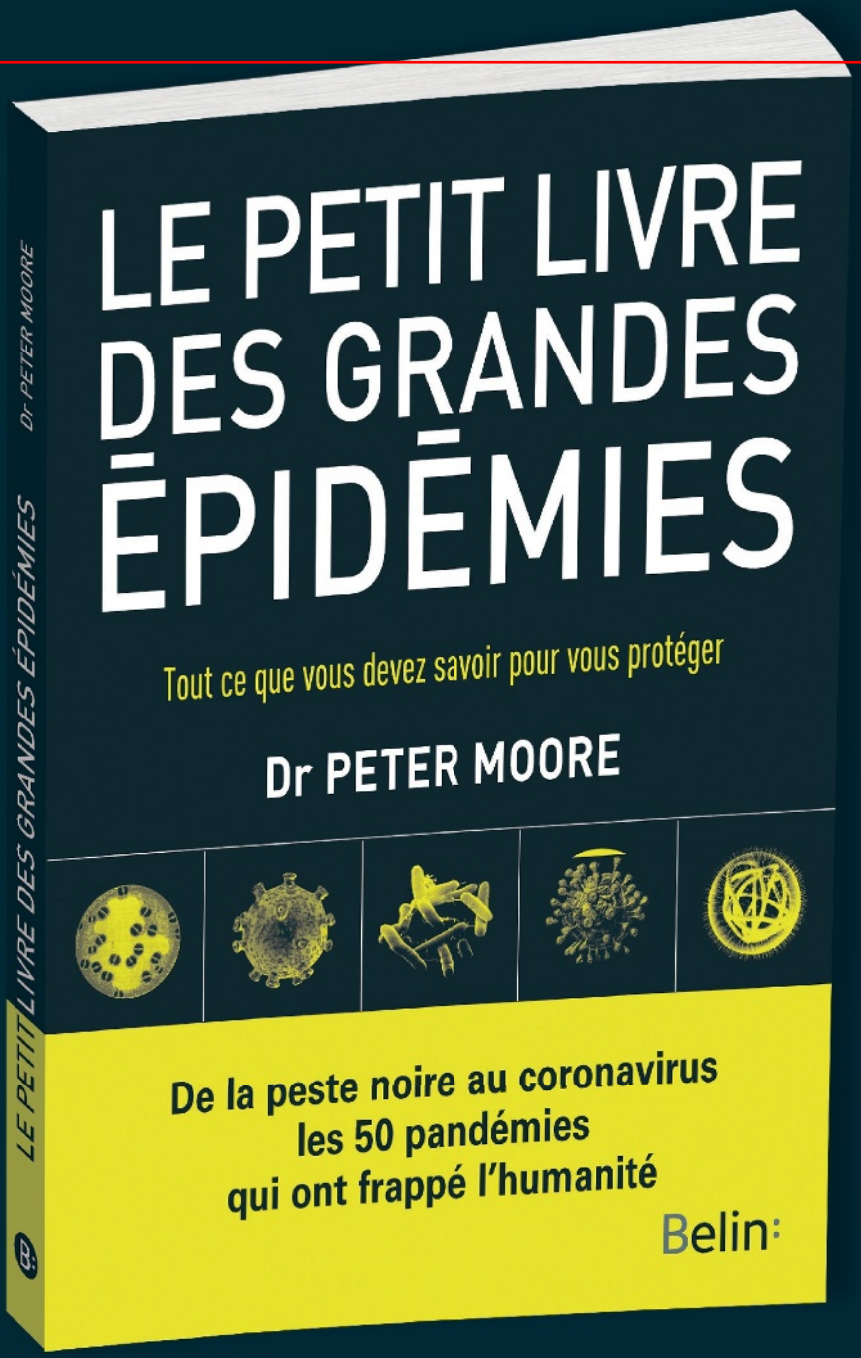
T. L. F. Leung, **Fossils of parasites : what can the fossil record tell us about the evolution of parasitism ?**, *Biol. Rev.*, vol. 92, pp. 410-430, 2017.

K. De Baets et D. T. J. Littlewood, **The importance of fossils in understanding the evolution of parasites and their vectors**, *Advances in Parasitology*, vol. 90, pp. 1-51, 2015.

D. Waloszek *et al.*, **A new Late Cambrian pentastomid and a review of the relationships of this parasitic group**, *Earth & Environ. Sci. Trans. R. Soc. Edinb.*, vol. 96, pp. 163-176, 2005.

© Charlotte Calamen/Pour la Science

De la peste noire au coronavirus...



belin-editeur.com

Belin ÉDITEUR

L'AUTEUR

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

BEURRE ET HUILE, OC ET OÏL RÉCONCILIÉS

Le mariage du beurre et de l'huile d'olive est-il «contre nature»? Pas du tout, et il peut même faire de délicieux mélanges.

Le beurre clarifié, obtenu en retirant les protéines *(la matière blanche qui flotte)*, est de la pure matière grasse, composée de triglycérides – comme l'huile.

Dans le Nord de la France, le beurre et la crème, et dans le Sud, l'huile! Cette partition justifiait l'appellation «à la provençale» pour les cuisines à l'huile, bien plus que l'objet tomate, car cette dernière était inconnue au temps des premiers livres de cuisine française. Reste que le mélange beurre-huile est considéré contre nature, tant au nord qu'au sud de la Loire. Tout au plus certains esprits forts, mais d'inspiration erronée, ajoutent-ils un peu d'huile pour empêcher, croient-ils, le beurre de noircir quand on le chauffe. Ce mélange ne prévient pas le brunissement, dû aux protéines du beurre. Seule une «clarification» peut éviter le phénomène: on fond le beurre et l'on récupère la phase liquide.

Quelle loi gastronomique proscrirait-elle le mélange de beurre et d'huile d'olive? La chimie, au contraire, nous y invite, car huile et beurre sont, pour la partie grasse (le beurre contient jusqu'à 18% d'eau) des mélanges de «triglycérides». Les matières grasses ne contiennent que des quantités très faibles d'acides gras, contrairement à ce que les réclames voudraient nous faire accroire.

Presque toutes les molécules des corps gras sont en effet des triglycérides, molécules composées d'un résidu de glycérol et de trois résidus d'acides gras: si la molécule est obtenue par estérification, à partir de glycérol et d'acides gras, alors des atomes d'oxygène et d'hydrogène sont éliminés, sous la forme de molécules d'eau. Ainsi, dans les triglycérides formés, il n'y a plus ni glycérol ni acides gras, d'où la dénomination – encombrante, mais indispensable – de «résidus» qui qualifie ces deux composants.

Les triglycérides du beurre se comptent par millions, puisque l'on a identifié 400 résidus d'acides gras différant par leur longueur ou par leurs insaturations (des doubles liaisons entre des atomes de carbone voisins), et chaque triglycéride a un point de fusion différent: c'est la raison pour laquelle ce mélange qu'est le beurre commence à fondre à –10 °C, et que sa fusion s'achève à environ 55 °C.

Lui ajoute-t-on de l'huile? Les triglycérides se mêlent aux triglycérides, et seul le comportement de fusion est changé, comme les pâtissiers le savent bien, eux qui fondent du beurre avec du chocolat, le beurre venant, par ses triglycérides qui fondent à plus basses températures, amollir le chocolat.

Il n'y a donc aucune difficulté à produire une matière grasse hybride en mêlant de l'huile d'olive et du beurre: le goût original tiendra à la fois du Sud et du Nord... Qu'en faire? D'abord, elle sera merveilleusement tartinable. Mais nous pouvons aussi la travailler, par exemple en y dispersant de la fleur de sel, avec son délicieux croquant... Ou en pensant aux animaux, qui sont soit vertébrés, avec une structure dure au centre, soit invertébrés, avec le dur autour: puisque nous avons produit une chimère de matière grasse, pourquoi ne pas faire une chimère de consistance, avec du dur à la fois au centre et autour?

La recette ci-dessous indique comment produire l'analogue de l'exosquelette. Il manque un nom pour un tel objet. Pourquoi pas «linné»? Le pauvre naturaliste suédois en aurait frémi, de voir ainsi son système de classification du vivant abattu par ces alliances contre nature: le mariage de la carpe et du lapin, en quelque sorte. ■

LA RECETTE

1. Chauffer doucement 100 g de beurre ; retirer à la cuiller l'écume qui surnage et décanter pour récupérer le beurre clarifié.
2. Y ajouter 100 g d'huile d'olive, disperser 25 g de sel en cristaux, puis couler dans une plaque sur 2 cm d'épaisseur.
3. Répartir à intervalles réguliers des amandes, et mettre au grand froid.
4. Quand le mélange est solidifié, le couper en cubes que l'on passe alternativement dans un œuf battu et dans de la chapelure.
5. Frire et servir chaud ces « linnés ».

© Shutterstock.com/Horlimages

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Next2C – Service abonnements Pour La Science
26 BD Président Wilson – CS 40032 – 67085 Strasbourg CEDEX – email : pourlascience@abopress.fr

PAG20STD

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE **PAPIER** — **59€** Au lieu de ~~82,80€~~ — D1459E
- 12 n° du magazine papier

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE** — **79€** Au lieu de ~~114,40€~~ — P1A79E
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

☐ FORMULE **INTÉGRALE** — **99€** Au lieu de ~~174,40€~~ — I1A99E
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

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

☐ **Carte bancaire**

N° ....

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

Signature obligatoire :

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

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

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

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur **www.pourlascience.fr**

P.92 LOPHOPHORE

Les brachiopodes, des coquillages très répandus il y a 450 millions d'années (et plutôt rares aujourd'hui), sont des animaux filtreurs, qui réalisent un courant d'eau perpétuel à l'intérieur de leur coquille. Le lophophore est l'organe qui organise ce courant. Recouvert de cellules ciliées, il produit une aspiration à environ 45° par rapport à l'axe du coquillage et un rejet de l'eau filtrée le long de cet axe.

P.30 GAIA-ENCELADUS

Cette galaxie serait entrée en collision avec la Voie lactée il y a 10 milliards d'années. L'analyse de certaines étoiles dans la Galaxie permet de retracer cet épisode lointain.

P.46

« Fonder une politique climatique sur la seule introduction d'une taxe carbone n'est pas sans poser des problèmes majeurs d'acceptabilité sociale »

PATRICK CRIQUI
Laboratoire d'économie appliquée de Grenoble

P.88 258

Sur la trajectoire la plus économe en énergie, une sonde spatiale atteint Mars en 258 jours. Cette route dessine une ellipse dont le Soleil occupe un foyer, la Terre étant à l'aphélie au moment du départ et Mars au périhélie à l'arrivée.

P.86 MANICOUAGAN

Ce cratère au Québec est le résultat de l'impact d'une météorite de 8 kilomètres de diamètre. Le choc a liquéfié la roche sur 9 000 mètres de profondeur et aurait mis plusieurs milliers d'années pour se refroidir. Cet événement pourrait être à l'origine de l'extinction du Trias-Jurassique il y a 200 millions d'années.

P.56 FURCA

Beaucoup de collemboles, des arthropodes de quelques millimètres et parfois moins, portent une furca à l'extrémité de l'abdomen. Cette sorte de fourche à deux dents est en général repliée, mais peut se déployer brusquement, ce qui permet à l'animal d'effectuer des sauts de plusieurs centimètres de hauteur selon l'espèce.

P.16 5 MILLIARDS

C'est le nombre de vidéos sur Youtube. En supposant que 0,001 % des vidéos (soit 50 000) prophétisent une catastrophe (séisme, pandémie, incendie, etc.) et que l'on a 10 000 scénarios de catastrophes possibles, si l'une de ces catastrophes survient, la probabilité qu'elle ait été prédite sur Youtube est de 99,3 % !

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Août 2020 – N° d'édition M0770514-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 –
Distribution : MLP – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 246771 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

CNRS FORMATION ENTREPRISES

Le CNRS propose un catalogue de plus de 260 formations technologiques à destination des entreprises pour l'année 2020

L'organisme de formation continue du CNRS présente un large panel de stages courts (3 jours en moyenne) dans tous les domaines : des biotechnologies à la synthèse chimique en passant par l'intelligence artificielle, le big data et les enjeux sociétaux.

Cet outil de transfert des savoirs et savoir-faire du CNRS permet de former plus de 1600 professionnels chaque année issus des secteurs privé (PME et grands groupes) et public.

DECOUVREZ QUELQUES STAGES PROPOSÉS PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES

DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

- Intelligence artificielle : état de l'art et applications
  du 06 au 08/10/2020
  PARIS - 3 jours — 1 800 €
- Fondements du machine learning et du deep learning
  du 23 au 26/11/2020
  MARSEILLE - 4 jours — 2 200 €
- Analyse statistique des réseaux
  du 25 au 27/11/2020
  PARIS - 3 jours — 1 500 €

BIOINFORMATIQUE

- Analyse avancée de séquences
  du 13 au 15/10/2020
  BORDEAUX - 3 jours — 1 200 €

GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION

- Architecture Microservice - mise en œuvre avec JHipster
  du 15 au 16/10/2020
  GRENOBLE - 2 jours — 1 200 €

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

- Adsorption gazeuse et applications: caractérisation des matériaux et séparation ou stockage des gaz
  du 30/11 au 02/12/2020
  MARSEILLE - 2,5 jours — 1 300 €

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

- Physico-chimie des polymères et propriétés mécaniques
  du 25 au 27/11/2020
  PARIS - 3 jours — 1 750 €

CHIMIE ANALYTIQUE

- Caractérisation des protéines par spectrométrie de masse dans le contexte de la protéomique
  du 23 au 27/11/2020
  PARIS - 5 jours — 2 300 €
- Analyses en ligne par GC-MS, GC-MS/MS et GC/Q-TOF de micropolluants organiques dans des matrices environnementales
  du 01 au 03/12/2020
  TALENCE - 2,5 jours — 1 300 €
- La spectrométrie de masse en tant que détecteur chromatographique GC-MS et LC-MS : initiation
  du 01 au 04/12/2020
  PALAISEAU - 4 jours — 1 800 €

MICROSCOPIE ET IMAGERIE

- Microscopie électronique en transmission pour la biologie cellulaire
  du 13 au 16/10/2020
  GIF-SUR-YVETTE - 3,5 jours — 1 600 €
- Microscopie électronique à balayage (MEB) en science des matériaux
  du 14 au 16/10/2020
  STRASBOURG - 2 jours — 1 000 €

BIOLOGIE

- Virologie fondamentale, moléculaire et structurale
  du 05 au 06/11/2020
  GIF-SUR-YVETTE - 2 jours — 1 000 €
- Cytométire en image
  du 09 au 11/12/2020
  LYON - 3 jours — 1 300 €

SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE

- Jeunesses en exil : quel accueil des mineurs non accompagnés ?
  du 23 au 25/11/2020
  PARIS - 3 jours — 850 €

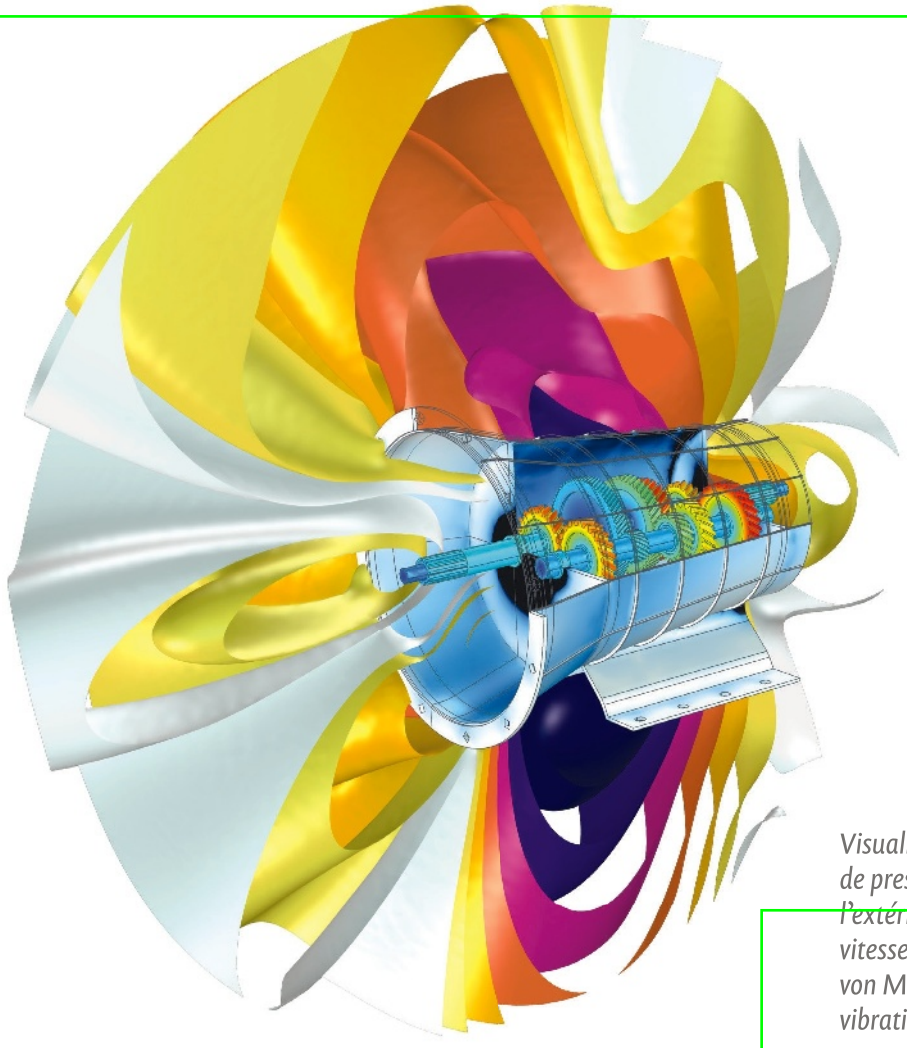
COGNITION ET COMPORTEMENT

- Personnes autistes dans l'entreprise : inclusion, innovation et création de valeur
  du 21 au 22/09/2020
  PARIS - 1,5 jours — 1 000 €
- La communication interpersonnelle dans les relations humaines : fondamentaux, analyses et mises en pratique
  du 20 au 21/10/2020
  PARIS - 2 jours — 1 000 €
- Le comportement émotionnel : quantifier les effets des émotions sur les actions corporelles et les stratégies visuelles
  du 16 au 18/11/2020
  TOURCOING - 2,5 jours — 1 500 €
- Entretien d'explicitation - Niveau 1
  du 23 au 26/11/2020
  LYON - 4 jours — 1 100 €

Découvrez l'ensemble des stages de formation 2020 et 2021 sur cnrsformation.cnrs.fr

Ou contactez-nous à cfe.contact@cnrs.fr ou 01 69 82 44 55

Des simulations de tests de bruit et vibrations que vous pouvez voir et entendre !



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'extérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment en améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation

COMSOL