



Pour la Science

La science expliquée par ceux qui la font

■ Biologie

**DÉCONFINEMENT
MASSIF DE CIGALES
AUX ÉTATS-UNIS**

■ Art et mathématiques

**LE CHARME
DISCRET DU
TABLEAU NOIR**

■ Histoire des sciences

**LA FABULEUSE
DÉCOUVERTE
DE L'INSULINE**

07/21

LES 1001 MORTS DES ÉTOILES

Des supernovæ atypiques
multiplient les scénarios



ON A MENÉ

L'ENQUÊTE

TOUS LES PAPIERS
SE RECYCLENT.

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

PLUS D'INFORMATIONS SUR LE RECYCLAGE
SUR TRIERCESTDONNER.FR



Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Stagiaire: Valentin Rakovsky

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Kerychuel

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy, Charlotte Calament

Révisseuse: 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:

Laure Bally-Cuif, Maud Bruguière, Eric Fuchey,

Ariane Gayout, Michael Greenfield, Nabila Jabrane Ferrat,

Jean-François Julien, Pierre Alexandre Kaminski,

Vincent Laudet, Philippe Marlière, Stéphane Puissant,

Laurent Reber, Eric Rigolot, Stéphen Rostain,

José-Alain Sahel, Maria Sánchez Gofí, François Vialard,

Christophe Vigny

PUBLICITÉ France

stephanie.julien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

www.boutique.groupepourlascience.fr

Courriel: serviceclients@groupepourlascience.fr

Tél.: 01 86 70 01 76

Du lundi au vendredi de 9 h à 13 h

Adresse postale:

Service abonnement

Groupe Pour la Science

56 rue du Rocher

75008 Paris

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Alicia Abadie

Tél.: 04 88 15 12 47

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Laura Helmut

President: Stephen Pincock

Executive vice president: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou

francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus

dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American» dans les

livres édités par «Pour la Science» doivent être adressés 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.

10-31-1282

pefc-france.org

DITO



Maurice Mashaal
Rédacteur en chef

FEUX D'ARTIFICE STELLAIRES

Juillet est, en France du moins, une période où l'on peut admirer de beaux feux d'artifice. Pour la Science vous invite ce mois-ci à vous pencher sur des feux d'artifice bien plus spectaculaires, pour peu que l'on accepte notre incapacité à les voir directement: les supernovæ. Sauf si elles se produisent dans la Voie lactée ou à proximité de cette galaxie, ce qui n'arrive en moyenne qu'une à trois fois par siècle, ces explosions d'étoiles sont en effet invisibles à l'œil nu.

Ce phénomène correspond à des étoiles en fin de vie, lorsqu'elles ont consommé tout leur «carburant» nucléaire et que leur autogravité conduit alors à un effondrement brutal de l'astre. Par une sorte de rebond, cet effondrement provoque l'éjection violente dans l'espace des couches externes de l'étoile. Ces morts cataclysmiques d'étoiles se déroulent selon des scénarios assez bien connus, dont le détail dépend beaucoup de la masse de l'astre. Mais ces dernières années, grâce aux progrès instrumentaux, les astrophysiciens observent de plus en plus de supernovæ qui font exception. Et s'efforcent d'expliquer et de caractériser ces explosions stellaires exotiques, afin de mieux comprendre l'évolution des étoiles en général (voir pages 24 à 33).

On a par ailleurs soupçonné l'étoile Bételgeuse de présenter des signes précurseurs d'une mort prochaine, ce dont les médias se sont fait l'écho il y a quelque temps. Bételgeuse, une supernova en préparation? L'astrophysicien Miguel Montargès répond que non: il nous explique la vraisemblable solution de l'énigme et comment lui et ses collègues y sont parvenus (voir pages 34 à 39).

Ce mois de juillet est aussi pour beaucoup d'entre nous une période de renouveau, avec le desserrement des contraintes liées à la crise sanitaire. Nous en avons profité pour améliorer la présentation de votre magazine avec, notamment, un nouveau logo. Outre un repérage aisé, elle vise à souligner la spécificité (et la qualité!) de Pour la Science, que nous espérons être un repère dans un monde où la mésinformation a pris de l'ampleur. Bon déconfinement, et bonne lecture! ■

SOMMAIRE

N° 525 / Juillet 2021

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Premier succès de l'optogénétique contre la cécité
- Tchernobyl: un regain d'activité surprenant
- L'épaisseur de la peau du noyau de plomb mesurée
- Un pendule dans la turbulence
- Vitesse du son: un savoir inné
- Des céréales avant les céréales
- Quand des bactériophages revisitent l'alphabet génétique
- Un village précolombien en Guadeloupe
- Coordination chez les cellules souches neurales
- Vers un vaccin contre l'asthme allergique

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

DISPUTES ENVIRONNEMENTALES

Repenser l'économie après la pandémie
Catherine Aubertin

P. 22

LES SCIENCES À LA LOUPE

Comment mesurer la culture scientifique?
Yves Gingras

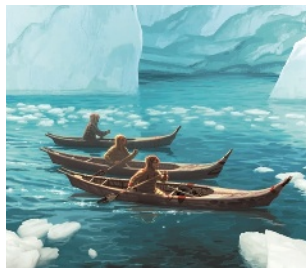


En couverture :
© Kenn Brown, Mondolith Studios.
© Wikimedia Commons/Kmrober (Jennifer Raff)

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.

GRANDS FORMATS



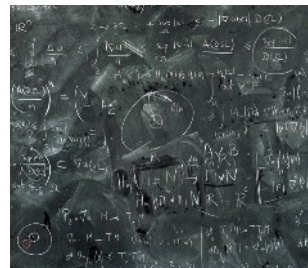
P. 44

PALÉOGÉNÉTIQUE

QUI ÉTAIENT LES PREMIERS AMÉRICAINS?

Jennifer Raff

Racontée par la génétique et l'archéologie, l'histoire du peuplement des Amériques devient un roman-fleuve palpitant dont on ne connaît pas encore tous les épisodes.



P. 62

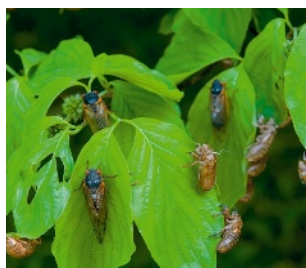
PORTFOLIO

LES MATHS AU TABLEAU!

Clara Moskowitz

Photographies de Jessica Wynne

Couchés à la craie sur des tableaux noirs, les raisonnements des mathématiciens expriment la beauté de leur discipline. La preuve en images.



P. 54

BIOLOGIE

DES CIGALES MASSIVEMENT DÉCONFINÉES

Kate Wong et Cherie Sinnen

Après dix-sept ans passés sous terre, des milliards de cigales dites « périodiques » émergent simultanément ce printemps et cet été dans l'est des États-Unis.



P. 72

HISTOIRE DES SCIENCES

LA FABULEUSE DÉCOUVERTE DE L'INSULINE

William Rostène et Pierre De Meyts

Il y a cent ans, dans un petit laboratoire de Toronto, quatre universitaires firent une découverte qui a changé la vie de millions de diabétiques.

COMMUNIQUÉ
PAGES I À IV (APRÈS LA P. 39)

Préparer la mobilité électrique

En partenariat avec



Pour la Science

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



P. 24

LES MILLE ET UNE MORTS DES ÉTOILES

Anna Y. Q. Ho

La plupart des étoiles meurent selon des scénarios bien connus. Mais ces dernières années, les astronomes ont découvert un nombre croissant de supernovæ inhabituelles qui ne se conforment pas aux schémas classiques.

P. 34

« L'ÉNIGME DE BÉTELGEUSE EST PROBABLEMENT RÉSOLUE »

Entretien avec Miguel Montargès

La baisse record de luminosité de l'étoile Bételgeuse en 2019 et 2020 a suscité un vif intérêt, certains imaginant que l'astre était sur le point de se transformer en supernova. Il n'en est rien. Avec ses collègues, l'astrophysicien Miguel Montargès a réussi à expliquer ce phénomène exceptionnel. Il nous raconte comment.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

LES DÉLICATS PARADOXES DE BERRY ET DE SKOLEM

Jean-Paul Delahaye

Pour contourner les paradoxes de la définissabilité, il est nécessaire de distinguer théorie et métathéorie.

P. 86

ART & SCIENCE

Le désir bleu du jardinier satiné

Loïc Mangin



P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Manier le lasso, un art subtil

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

La botte secrète de l'aleurode

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Paillettes et lampes à lave en cuisine

Hervé This

P. 98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

P.18 Livres du mois

P.20 Disputes environnementales

P.22 Les sciences à la loupe

PREMIER SUCCÈS DE L'OPTOGÉNÉTIQUE CONTRE LA CÉCITÉ

Le gène introduit dans l'œil du patient n'étant pas en concentration suffisante pour détecter les signaux lumineux, des lunettes spéciales qui amplifient ces signaux accompagnent le dispositif conçu par l'équipe de José-Alain Sahel et Botond Roska.



Un patient atteint de rétinite pigmentaire et devenu aveugle a partiellement retrouvé la vue grâce à une thérapie génique visant à rendre photosensibles des neurones de la rétine.

Les troubles de la vue sont les pertes sensorielles les plus fréquentes. Dans le monde, 2,2 milliards de personnes ont une déficience de la vision de près ou de loin, selon l'Organisation mondiale de la santé. L'une des principales causes de malvoyance est la destruction des photorécepteurs, les neurones de la rétine qui convertissent les rayons lumineux en signaux électriques, signaux que le cerveau interprète en images. Cette destruction peut survenir lors de maladies génétiques, telle la rétinite pigmentaire, ou multifactorielles, comme la dégénérescence maculaire liée à l'âge. Depuis quelques dizaines d'années, en l'absence de traitements efficaces contre ces maladies, les chercheurs explorent diverses techniques de compensation visuelle.

On a d'abord pensé à l'implant rétinien: un minuscule réseau d'électrodes déposé sur la rétine pour remplacer les photorécepteurs. Une caméra fixée à des lunettes transmet les données visuelles à un microprocesseur qui les convertit en impulsions électriques envoyées à l'im-

Les essais d'implants rétiniens n'ont pas été aussi concluants qu'espéré

plant. Celui-ci transmet alors ces signaux au nerf optique, comme le feraient les photorécepteurs. Toutefois, les essais

cliniques n'ont pas été aussi concluants qu'espéré: si les personnes arrivaient de nouveau à distinguer des objets très contrastés, leur vision restait très en deçà de un vingtième, le seuil légal de cécité. Aussi, en 2019, plusieurs entreprises ont préféré interrompre leurs essais cliniques sur de tels implants, et diverses équipes tentent d'améliorer le procédé en couvrant une plus grande région de la rétine ou en fabriquant un réseau d'électrodes directement photosensible.

Mais, parallèlement, une autre approche a fait son chemin et pourrait prendre ces implants de vitesse: l'optogénétique. Mise au point dans les années 2000, cette technique consiste à introduire dans des neurones le gène d'une channelopsine, une protéine photosensible associée à un canal membranaire qui s'active en présence de lumière:

Tchernobyl : un regain d'activité surprenant

Les systèmes de surveillance de la centrale de Tchernobyl montrent une augmentation récente du flux de neutrons, signe possible d'une activité de fission accrue dans les débris. Igor Le Bars, de l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), fait le point sur la situation.



Propos recueillis par Sean Bailly

IGOR LE BARS
directeur de l'expertise
de sûreté à l'IRSN

Tchernobyl est revenu dans l'actualité. Pourquoi ?

Les détecteurs installés autour d'un local de la centrale contenant plusieurs dizaines de tonnes de corium, un mélange de combustible nucléaire et de divers matériaux du cœur fondu, ont enregistré une augmentation d'environ 50 % du flux de neutrons en quatre ans. Cela peut indiquer une augmentation des réactions de fission en chaîne se produisant dans le corium.

Avait-on déjà observé des variations de ce flux ?

En 1990, quatre ans après l'accident de Tchernobyl, le flux s'était accru d'un facteur 60 en quelques jours. Durant les semaines précédentes, il avait beaucoup plu et le sarcophage construit pour isoler les restes de la centrale n'était pas étanche. L'eau s'était donc infiltrée jusque dans le corium. Or l'eau favorise les réactions de fission en chaîne. En effet, lorsqu'un noyau fissionne, il émet des neutrons dotés d'une grande vitesse. Ceux-ci réagissent peu avec d'autres noyaux. Mais en présence d'un modérateur (comme l'eau), les neutrons interagissent avec ce matériau, transfèrent une partie de leur énergie cinétique et ralentissent. Ils atteignent alors une vitesse optimale pour créer des réactions en chaîne. C'est le principe utilisé dans les réacteurs, mais il peut survenir naturellement.

Pour empêcher un emballement des fissions, en 1990, les autorités avaient injecté du nitrate de gadolinium, un « poison neutronique » qui absorbe les neutrons et bloque les réactions en chaîne.

Quel était le risque ?

Le risque est l'accident de criticité. Si l'on atteint un régime où, en moyenne, la fission d'un noyau entraîne la fission d'au moins un autre noyau, la croissance de neutrons devient exponentielle. Cela ne conduit pas à une explosion, car plusieurs phénomènes dans le matériau agissent comme des contre-réactions.

Mais on a alors une émission intense de rayonnements, qui peut être brève ou durer plus longtemps. Près de 60 accidents de ce type ont été répertoriés, dans l'industrie ou des laboratoires. Le dernier date de 1999, sur le site de Tokaimura au Japon, et a persisté vingt heures.

La situation actuelle est-elle du même type ?

Non, l'évolution est trop lente pour penser que ce local de Tchernobyl est le siège d'un accident de criticité. Reste à comprendre ce qui se passe. La nouvelle structure qui couvre le réacteur depuis 2016 est étanche. Il y a donc a priori un assèchement des locaux. On peut penser que, avant, il y avait tellement d'eau qu'elle absorbait une partie des neutrons. Avec l'assèchement du matériau, on tendrait progressivement vers un taux d'humidité optimal pour modérer les neutrons et ainsi favoriser les réactions en chaîne.

Une autre possibilité est encore liée à l'eau. Les détecteurs sont assez distants du local et les neutrons traversent plusieurs murs pour les atteindre. Or, si l'eau des murs s'évapore, les neutrons seraient un peu moins ralentis, pénétreraient plus loin et seraient plus nombreux à produire un signal dans les détecteurs.

Quelles sont les conséquences pour la suite ?

Si cette situation n'est pas inquiétante dans l'immédiat, il faut la suivre. L'augmentation de l'activité radiologique est un problème pour les projets de démantèlement de la centrale et du premier sarcophage. Par ailleurs, les conditions pourraient évoluer et s'approcher de celles d'un accident de criticité. La priorité est donc de comprendre ce qui se passe. Or nous manquons d'informations pour expliquer précisément la hausse du flux de neutrons. La zone est très radioactive et même envoyer des robots d'exploration est difficile, les composants électroniques étant vulnérables aux neutrons. ■

le canal s'ouvre, un flux d'ions entre dans le neurone et le polarisent, ce qui crée un signal électrique. En d'autres termes, si des neurones non photosensibles sont encore présents dans la rétine, ce qui est souvent le cas dans ces maladies, il « suffit » de les cibler avec un tel gène pour les rendre photosensibles.

C'est l'approche qu'une équipe internationale autour de José-Alain Sahel, de l'Institut de la vision, à Paris, et Botond Roska, de l'université de Bâle, en Suisse, développe depuis plus de dix ans et dont le premier essai clinique vient de fournir un succès prometteur : l'équipe a partiellement restauré la vision d'un patient de 58 ans atteint de rétinopathie pigmentaire et dont la vision se limitait à la perception de la lumière.

Dans l'œil le plus atteint du patient, l'équipe a injecté le gène d'une channelopsine (la rhodopsine-canal ChrimsonR) produite par l'algue *Chlamydomonas noctigama*. Cette protéine a l'avantage d'être sensible à la lumière ambrée (590 nanomètres), plus sûre pour l'œil que les autres channelopsines exploitables, de longueurs d'onde plus proches du bleu.

Après une phase de stabilisation de près de cinq mois, le patient a commencé à apprendre à utiliser les lunettes spéciales qui complètent le dispositif. Ces lunettes amplifient le signal en captant les scènes visuelles à l'aide d'une caméra qui les convertit, pixel par pixel, à la longueur d'onde perçue par la channelopsine.

Après sept mois d'entraînement, le patient a rapporté des signes d'amélioration visuelle. Sa vue reste encore sous le seuil légal de cécité, mais il est désormais capable de localiser, compter et toucher des objets, et de voir les passages piétons. L'essai se poursuit avec six autres patients qui ont déjà reçu l'injection, et des pistes sont explorées pour améliorer l'acuité visuelle.

La thérapie optogénétique est d'ailleurs explorée dans d'autres domaines, comme la compensation des pertes auditives, l'atténuation des douleurs neuropathiques ou l'activation de régions du cerveau endommagées par un traumatisme. L'optogénétique n'a pas fini de faire parler d'elle. ■

Marie-Neige Gordonnier

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

L'ÉPAISSEUR DE LA PEAU DU NOYAU DE PLOMB MESURÉE

La meilleure connaissance de la structure du noyau de plomb permet
~~de mieux comprendre celle des étoiles à neutrons.~~

Certaines mesures portant sur des échelles infimes, de l'ordre du femtomètre (10^{-15} mètre), ont des répercussions à des échelles astronomiques. Dans la vision simplifiée du noyau d'un atome, ses composants (les protons et les neutrons) s'y répartissent de façon aléatoire. Or, dans les noyaux lourds, les neutrons, souvent plus nombreux que les protons, subissent une pression qui les repousse légèrement vers la périphérie du noyau. Ce dernier présente donc une couche superficielle riche en neutrons, sa «peau». La collaboration Prex, menée par Kent Paschke, de l'université de Virginie, aux États-Unis, a utilisé les installations du laboratoire américain Jefferson pour mesurer l'épaisseur de cette couche externe dans le noyau de plomb 208, un isotope stable comportant 82 protons et 126 neutrons. Cette donnée révèle certaines conditions qui règnent dans le noyau, mais qui, à d'autres échelles, influent aussi sur la structure des étoiles à neutrons.

La distribution des protons dans les noyaux est bien étudiée depuis plusieurs décennies. En effet, dans les expériences de diffusion dite «élastique», un faisceau d'électrons bombarde un noyau dont les protons, chargés électriquement, dévient les électrons de leur trajectoire. L'analyse de cette diffusion permet de déterminer la répartition des protons et notamment le rayon de la sphère qu'ils occupent.

Cette méthode ne peut pas s'appliquer à la distribution des neutrons qui, comme leur nom l'indique, ne portent pas de charge électrique. La collaboration Prex s'est donc appuyée sur une autre force fondamentale, l'interaction faible. Les électrons sont susceptibles d'être déviés par les neutrons en échangeant des bosons Z, particules vectrices de l'interaction faible. Les chercheurs ont mesuré la différence entre la diffusion d'électrons de polarisation «droite» et celle des électrons de polarisation «gauche», c'est-à-dire dont le spin est orienté respectivement dans le sens du mouvement ou à l'opposé. La valeur de cette asymétrie, due à la nature de l'interaction faible, est directement reliée à la distribution des neutrons.



Au cœur de l'atome, le noyau est souvent représenté comme un mélange désordonné de protons et de neutrons. En réalité, dans le cas des noyaux riches en neutrons, ces derniers sont soumis à une pression qui les repousse vers la périphérie, où ils forment une couche de faible épaisseur, la «peau» du noyau.

Les chercheurs ont ainsi obtenu un rayon de 5,8 femtomètres pour la distribution des neutrons dans le noyau. En soustrayant le rayon connu par ailleurs pour la distribution des protons, ils ont déduit que la peau du noyau de plomb 208 a une épaisseur de 0,283 femtomètre.

En quoi ce résultat est-il intéressant dans l'étude des étoiles à neutrons? La peau du noyau se forme du fait d'une «pression de symétrie», interne au noyau et due au principe d'exclusion de Pauli: celui-ci interdit que des particules identiques (de spin demi-entier), en l'occurrence les neutrons, occupent un même état quantique. Comme cette pression augmente avec la densité nucléaire, elle devient très forte dans une étoile à neutrons. Compte tenu de l'effet de peau, un tel astre pourrait ainsi être plus grand que ne le suggérerait sa seule masse. Dans un système binaire en coalescence, l'étoile à neutrons serait alors plus déformable, un comportement qui influencerait sur la forme des ondes gravitationnelles émises lors de sa fusion avec l'autre étoile. ■

Sean Bailly

D. Adhikari et al., *Physical Review Letters*, vol. 126, article 172502, 2021

Quasicristal et Trinity

Le 16 juillet 1945, l'armée américaine a testé sa première bombe atomique dans le désert du Nouveau-Mexique. Dans le cratère, l'onde de choc a formé de nombreux minéraux, dont la trinitite rouge (du nom de la bombe Trinity). Paul Steinhardt, de l'université de Princeton, vient de découvrir dans cette trinitite une structure de quasicristal. Ce chercheur avait donné ce nom à des solides présentant une structure assez régulière, comme un cristal, mais non périodique.

PNAS, 17 mai 2021

Cancer du sein et pollution de l'air

La pollution atmosphérique augmente les risques de cancer du poumon, mais qu'en est-il du cancer du sein ? Rémy Slama, de l'Inserm, et ses collègues ont mené une métaanalyse pour évaluer le lien entre les trois principaux types de polluants présents dans l'air et cette maladie. Le dioxyde d'azote est particulièrement pointé du doigt. En 2017, en France, près de 60 000 femmes ont été diagnostiquées avec un cancer du sein, dont environ 3 % des cas seraient attribuables à cette molécule.

Environ. Health Perspect., 26 mai 2021

Une très vieille spirale

Grâce aux données du radiotélescope Alma, au Chili, Takafumi Tsukui et Satoru Iguchi, de l'Observatoire japonais d'astronomie, ont découvert dans l'Univers jeune – âgé de seulement 1,4 milliard d'années – une galaxie de morphologie spirale et de masse comparable à celle de la Voie lactée. Comment une telle structure a-t-elle pu se former si tôt ? Les chercheurs suggèrent qu'elle aurait été en interaction gravitationnelle avec une petite galaxie voisine dont elle a absorbé le gaz.

Science, 20 mai 2021

UN PENDULE DANS LA TURBULENCE

Sous l'action du vent, un avion peut être soumis à des turbulences aussi intenses qu'imprévisibles dont l'origine n'est pas clairement comprise. Bien qu'aléatoire, ce type de phénomènes obéit à des lois statistiques. Pour étudier plus facilement ces perturbations dans les écoulements d'un fluide, Ariane Gayout, Mickaël Bourgoïn et Nicolas Plihon, du laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Lyon, ont conçu un dispositif expérimental très simple, utilisant un pendule placé dans une soufflerie, dont ils ont montré que le comportement obéissait à des lois statistiques de même nature.

Le pendule, un disque de quelques centimètres de diamètre fixé à une tige, est soumis à trois forces : son poids, la portance et la traînée. Pour une vitesse du vent donnée, on peut définir deux positions d'équilibre stable, notées T et P (selon que la traînée ou la portance domine). À partir d'une position T, le pendule peut sauter spontanément dans la position P à cause de tourbillons qui se forment près du pendule. Pour une vitesse donnée, les chercheurs ont constaté que le temps d'attente pour avoir un saut suit une loi de probabilité exponentielle, une loi définie par un seul



Certaines turbulences dans le sillage des avions suivent des lois statistiques qu'il est possible de reproduire avec un simple pendule, un système beaucoup plus facile à étudier.

paramètre nommé « temps caractéristique ». En outre, ce dernier dépend de la vitesse du vent ou, de façon équivalente, de l'angle α que fait le pendule par rapport à la verticale en position T. Ariane Gayout et ses collègues ont montré que le temps caractéristique varie comme l'exponentielle de l'exponentielle du sinus de l'angle α . La combinaison de ces deux variabilités, l'une contrôlée, l'autre non, se traduit par des temps d'attente très variables : de moins d'une seconde à plus d'une heure. ■

Lucas Gierczak

A. Gayout et al., *Physical Review Letters*, vol. 126, article 104501, 2021

BIOLOGIE ANIMALE

VITESSE DU SON : UN SAVOIR INNÉ

Eran Amichai et Yossi Yovel, de l'université de Tel Aviv, en Israël, ont montré que la chauve-souris a une connaissance innée de la vitesse du son. Pour repérer ses proies et se déplacer, cet animal utilise l'écholocation. Mais pour convertir en distance le délai entre l'émission et la réception de ses signaux ultrasonores, elle doit « connaître » la vitesse du son. Or, comme cette dernière varie un peu selon les conditions atmosphériques, les deux chercheurs ont voulu savoir si sa valeur était apprise par la chauve-souris, et donc ajustable, ou innée. Ils ont élevé des nouveau-nés de l'espèce *Pipistrellus kuhlii* dans un environnement enrichi en hélium, où le son se propage 15% plus vite. Les animaux sous-estimaient les distances ! Remis dans des conditions normales, ils retrouvaient leur capacité à déterminer correctement les distances. À l'inverse, des adultes élevés dans des conditions normales n'ajustaient pas leur appréciation des distances



La chauve-souris pipistrelle en plein vol. Elle s'oriente dans la nuit grâce à l'écholocation, qui nécessite de connaître la vitesse du son pour estimer les distances.

dans l'enceinte riche en hélium. La vitesse (usuelle) du son est donc innée chez ce mammifère volant. ■

Nicolas Butor

E. Amichai et Y. Yovel, *PNAS*, vol. 118(19), article e2024352118, 2021

EN IMAGES

DES CÉRÉALES AVANT LES CÉRÉALES

Les céréales apportent à l'humanité 45% de ses calories alimentaires. On pense que les humains les ont sélectionnées à partir de graminées sauvages, mais une équipe franco-turque emmenée par Valérie Andrieu-Ponel, de l'université d'Aix-Marseille, vient de montrer qu'une sélection naturelle a préparé l'avènement de l'agriculture et des céréales actuelles.

Les chercheurs ont étudié les pollens (*grande image ci-contre: un grain de pollen actuel de seigle «germe»*) trouvés dans les strates d'une longue carotte de sédiments prélevée dans le lac d'Acigöl, en Turquie. À chaque étage de cette séquence couvrant 2,3 millions d'années, ils ont découvert des grains de pollen de seigles et autres blés sauvages (*Secale*, *Cerealia t.*, *Triticum*) mesurant plus de 40 micromètres (*petites images ci-contre*), taille qui caractérise normalement les céréales, c'est-à-dire les graminées cultivées. Comme Valérie Andrieu-Ponel et ses collègues ont aussi découvert des spores de champignons ne se développant que sur les bouses, cette équipe de chercheurs pense que les grands herbivores ont exercé une pression de sélection sur les graminées sauvages: leur broutage aurait favorisé celles qui se reproduisent davantage grâce à leurs grains de pollen plus nombreux, mieux protégés et plus aptes à féconder, graminées que les chercheurs nomment «protocéréales». En d'autres termes, l'humanité n'a fait que choisir dans la nature ces lignées de graminées à gros grains, puis les a sélectionnées artificiellement pour amplifier encore leurs rendements. ■

François Savatier

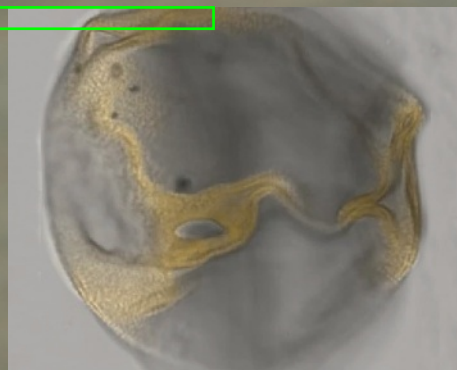
V. Andrieu-Ponel et al., *Scientific Reports*, vol. 11, article 8914, 2021



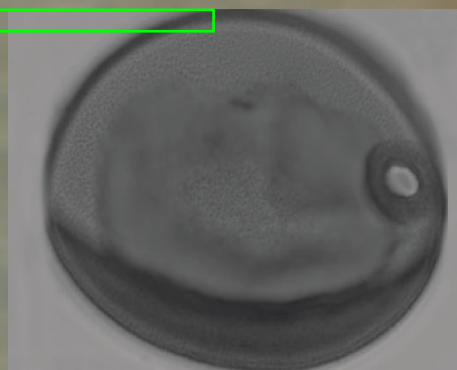
Secale sp., 55 µm, 871 000 ans



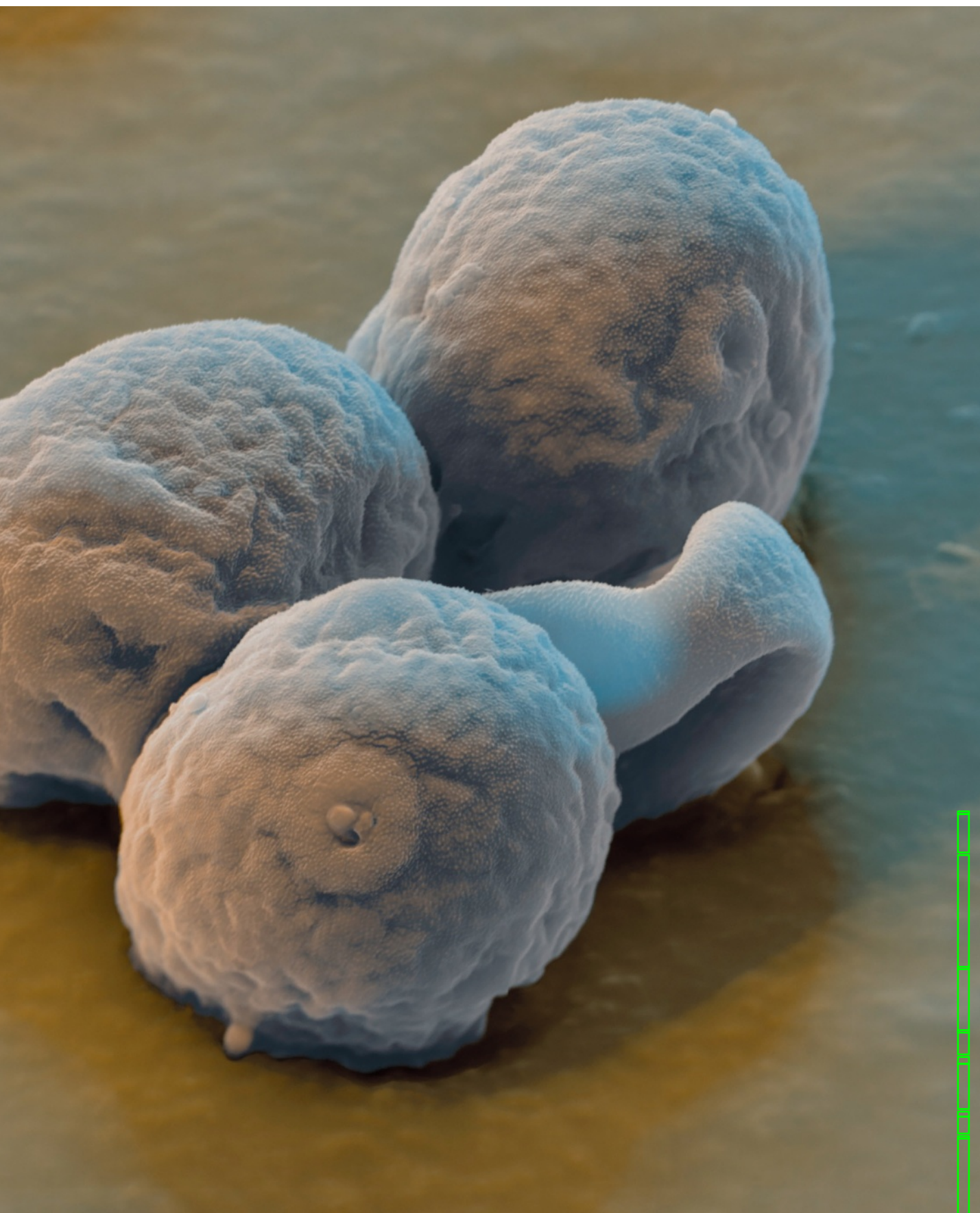
Cerealia t., 50 µm, 1 709 000 ans



Cerealia t., 40 µm, 2 206 000 ans



Triticum sp., 55 µm, grain actuel



© Valerie Andrieu-Ponel et al. (à gauche); © Science Photo Library / EYE OF SCIENCE (à droite)

BIOCHIMIE

QUAND DES BACTÉRIOPHAGES REVISITENT L'ALPHABET GÉNÉTIQUE

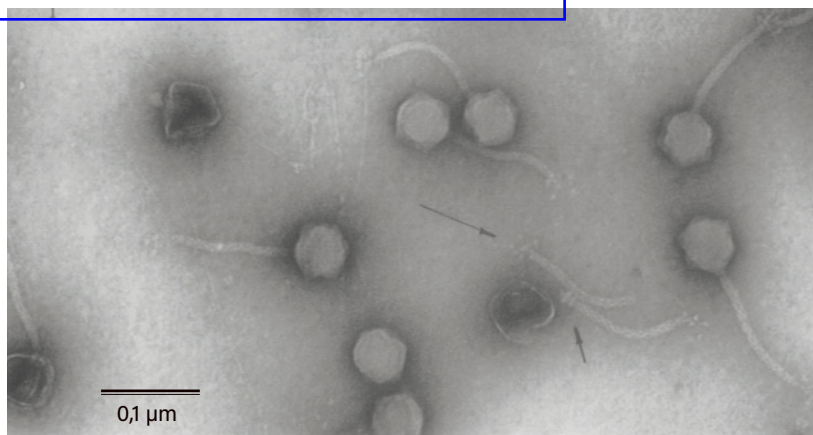
Dans l'ADN d'un virus de bactéries, l'une des quatre lettres du code génétique est systématiquement remplacée par une autre non standard. L'enquête sur cette énigme amène à questionner jusqu'à l'origine de la vie.

A la fin des années 1970, dans les eaux douces des faubourgs de Leningrad, des biologistes russes isolèrent un curieux virus. Dénommé «cyanophage S-2L» à cause de sa capacité à détruire des cyanobactéries, ce bactériophage portait une séquence d'ADN inattendue. L'ADN est habituellement constitué d'une succession de quatre molécules – des nucléotides –, chacune portant une base nucléique différente: l'adénine (A), la thymine (T), la guanine (G) et la cytosine (C). Or dans l'ADN du bactériophage, toutes les adénines étaient remplacées par une 2-aminoadénine, notée Z.

Les bactériophages étaient déjà connus pour arborer diverses bases modifiées, même si la lettre Z n'avait jamais été rencontrée. La nouveauté résidait dans le fait qu'une base modifiée remplace totalement une des lettres standard. Dès les années 1980, divers chercheurs ont étudié les caractéristiques que cette nouvelle base conférerait à l'ADN. Néanmoins, la synthèse de cette molécule restait une énigme... jusqu'à ce que trois équipes lèvent le voile non seulement sur sa fabrication et son incorporation dans l'ADN viral, mais aussi sur son origine.

À l'aide d'une analyse métagénomique, Yan Zhou, de l'université de Tianjin, en Chine, et ses collègues, et une équipe menée par Pierre Alexandre Kaminski, à l'institut Pasteur, ont indépendamment identifié deux enzymes impliquées dans la synthèse de la base Z. La première, PurZ, est produite par le cyanophage et assemble un précurseur de Z dans la bactérie infectée. La seconde, PurB, produite par la bactérie, est alors recrutée et poursuit la fabrication de la base.

La troisième équipe, menée par Philippe Marlière, du Genoscope, à Evry, a identifié chez d'autres bactériophages une enzyme – une polymérase –, qui privilégie la lettre Z au A lors de la fabrication de l'ADN. Aucune séquence ne semblait coder une telle enzyme chez le cyanophage S-2L, aussi l'équipe a-t-elle examiné d'autres phages: plusieurs portaient un gène semblable à celui de PurZ, signe qu'ils



Le cyanophage S-2L (ici en microscopie électronique à transmission) a un génome constitué d'une succession de quatre bases Z, T, G, C, et non les bases standard A, T, G, C.

utilisaient peut-être la base Z. Et tous portaient un gène semblable à celui d'une polymérase bactérienne.

Seul le cyanophage S-2L en était dépourvu. L'a-t-il perdue au fil de l'évolution? Est-elle produite par les cyanobactéries qu'il infecte? La question est ouverte. Mais il y a plus. En recherchant des séquences semblables à celle de PurZ dans les bases de données génomiques, les trois équipes ont découvert 50 à 100 génomes concernés. Principalement de bactériophages, mais aussi de bactéries et d'archées. La base Z n'est donc peut-être pas si exceptionnelle.

De plus, les bactériophages qui portent PurZ et la polymérase sont si variés et ont des cibles bactériennes si distinctes que ce duo, et donc les génomes contenant Z, doivent être anciens, antérieurs à la séparation des branches bactériennes concernées, il y a environ 3,5 milliards d'années. Les bactériophages auraient-ils détourné des gènes bactériens? Les génomes contenant Z sont-ils des vestiges d'une époque ancestrale où ils étaient plus abondants? Ils pourraient même être venus de l'espace: en 2011, l'analyse chimique d'une météorite a révélé la présence dans la roche de nucléotides, standard et non, dont la base Z. ■ M.-N. C.

Y. Zhou et al., D. Sleiman et al., V. Pozo et al., *Science*, vol. 372, pp. 512-524, 2021

MOQUEUR COMPOSITEUR

Le moqueur polyglotte (*Mimus polyglottos*), un oiseau d'Amérique du Nord, compose des chants à partir des mélodies des autres oiseaux, vient de montrer une équipe dirigée par Tina Roeske, de l'institut Max-Planck d'esthétique empirique à Francfort-sur-le-Main. « Nous avons testé à l'ordinateur, par des analyses quantitatives, l'intuition que ces oiseaux n'enchaînent pas les mélodies imitées au hasard, mais selon des règles cohérentes », explique-t-elle. Il en ressort que les oiseaux composent suivant quatre modes : ils changent de timbre, de ton, allongent les séquences ou les raccourcissent. Les mélodies complexes qui en résultent charment les autres oiseaux, mais aussi des humains, et rappellent celles que créent les compositeurs. ■

F. S.

T. C. Roeske et al., *Frontiers in Psychology*, vol. 12, article 630115, 2021

UN VILLAGE PRÉCOLOMBIEN EN GUADELOUPE



La sépulture 67 illustre bien l'habitude de replier les membres des défunts que l'on portait en terre.

MÉTHANE : UN PARADOXE RÉSOLU

Les sédiments des fonds marins sont riches en méthane (CH_4) que des communautés microbiennes exploitent comme source d'énergie et de carbone. Il existe deux isotopes stables de cet élément, le carbone 12 et le carbone 13. Le premier étant plus léger, les réactions transformant le méthane contenant du carbone 12 devraient être un peu plus rapides que celles avec le carbone 13, laissant ce dernier en excès dans le milieu. Or ce n'est pas ce que l'on observe. Pour résoudre le problème, Gunter Wegener, de l'institut Max-Planck de microbiologie marine, à Brême, en Allemagne, et ses collègues ont étudié des associations d'archées et de bactéries en laboratoire, en faisant varier la concentration de sulfate, composé qui intervient dans l'oxydation du méthane. Lorsque la concentration est faible, certaines réactions s'inversent et restituent dans le milieu le méthane contenant l'isotope léger. ■

S. B.

G. Wegener et al., *Science Advances*, vol. 7, article eabe4939, 2021

Dans la zone du Petit-Pérou, aux Abymes, la commune la plus peuplée de Guadeloupe, l'équipe de Nathalie Serrand, de l'Inrap, vient de fouiller une rareté à l'échelle des Antilles : un village amérindien datant de la période troumassoïde (du xe au xiii^{e} siècle). Sur place, la répartition de nombreux « trous de poteaux », c'est-à-dire les marques sombres laissées dans la terre par des piliers de bois, marque la présence de « carbets », maisons traditionnelles ouvertes en bois et toit de feuilles, d'un type que l'on construit en Amazonie depuis des millénaires. Cela n'a rien d'étonnant, puisque les populations précolombiennes des Petites Antilles sont d'origine amazonienne et parlaient en effet des langues du groupe arawak, bien représenté en Amazonie. Dans les dépotoirs du village, les archéologues ont retrouvé des tessons, des pierres de foyers, des ossements ainsi que des restes de crabes et de coquillages. Qui plus est, 113 sépultures ont été mises au jour, de sorte que – trouvaille extraordinaire ! – c'est tout un échantillon de la population précolombienne dont disposent les archéologues. Ces adultes et enfants furent déposés dans leurs tombes soit sur le dos, soit assis ou semi-assis, soit sur le côté, les corps repliés sur eux-mêmes, jambes comprimées sur les avant-bras et les bras pliés et collés contre le thorax. Ces positions n'étant pas naturelles, il est évident que les cadavres y ont été forcés, puis maintenus ainsi à l'intérieur de sacs ou par des liens. Le plus intéressant reste à venir : s'il se révèle possible de séquencer au moins une partie de l'ADN des défunts, des informations inédites sur les rapports entre les troumassoïdes guadeloupéens et d'autres populations précolombiennes devraient ressortir. ■

F. S.

Communiqué de l'Inrap, 29 avril 2021

GÉOSCIENCES

UN SÉISME QUI A DURÉ TRENTE-DEUX ANS

Le 16 février 1861, un mégaséisme d'une magnitude de 8,5 a secoué l'île de Sumatra et engendré un tsunami qui a fait plusieurs milliers de morts. Rishav Mallick, de l'université de technologie de Nanyang, à Singapour, et ses collègues ont précisé les conditions de son déclenchement.

Alors que les séismes normaux relâchent l'énergie mécanique accumulée de façon «bruyante» en quelques secondes ou quelques minutes, les «séismes lents» évacuent cette contrainte de façon plus discrète sur des durées plus longues, quelques semaines à plusieurs mois, parfois quelques années. Or, grâce à des mesures par satellite, on a découvert certains séismes lents associés à des mégaséismes.

Pour savoir si le séisme de Sumatra de 1861 a été précédé d'un séisme lent, Rishav Mallick et ses collègues ont étudié les motifs de croissance des coraux sur l'île Simeulue, située au large de Sumatra. Comme le corail ne pousse que lorsqu'il est immergé, son squelette enregistre toute variation du niveau de l'eau et donc aussi les déplacements verticaux du sol. Les chercheurs ont ainsi déterminé qu'à partir de 1740, la région a subi un lent affaissement



Ce microatoll (une colonie circulaire de corail) est situé au sud-est de l'île de Simeulue. La portion radiale prélevée a permis de reconstruire l'évolution du niveau de l'océan et du sol.

d'environ 1 à 2 millimètres par an. Le rythme s'est accéléré dès 1829, atteignant jusqu'à 1 centimètre certaines années. Le phénomène s'est arrêté en 1861, au moment du mégaséisme. Grâce à un modèle numérique, les géologues ont montré que la baisse du niveau du sol entre 1829 et 1861 s'explique par un séisme lent à faible profondeur, qui aurait donc duré trente-deux ans, un record ! En outre, en modifiant la répartition des contraintes dans la zone de subduction, ce séisme lent aurait déclenché le mégaséisme de 1861. ■

S. B.

R. Mallick et al., *Nature Geoscience*, vol. 14, pp. 327-333, 2021

EN BREF

Des lézards qui bullent

Certains arthropodes respirent sous l'eau (grâce à une bulle d'air qu'ils bloquent sous leur cuticule). Christopher Boccia, aujourd'hui à l'université Queen's au Canada, et ses collègues ont constaté que six espèces de lézards du genre *Anolis* auraient aussi cette capacité. Sous l'eau, les reptiles expirent et réinhalent régulièrement l'air contenu dans une bulle qui reste accrochée à leur tête, et utilisent ainsi le dioxygène non consommé. La bulle agirait peut-être aussi comme un échangeur gazeux, qui évacue le CO₂ dans l'eau.

Current Biology, 12 mai 2021

Plus fort que les fake news ?

Pourquoi les gens propagent-ils de fausses informations (ou infok) ? Benjamin Lyons, de l'université de l'Utah, et ses collègues ont analysé les résultats de deux enquêtes menées auprès de 8 285 habitants des États-Unis. Conclusion : 75 % des sondés surestiment leur capacité à distinguer des infok. Cet excès de confiance en soi est corrélé avec certaines pratiques : s'informer sur des sites non fiables et propager davantage de fausses informations sur les réseaux sociaux.

PNAS, 31 mai 2021

Des lacs en mal d'oxygène

Grâce à un suivi de près de 80 ans dans 393 lacs d'eau douce des régions tempérées, l'équipe autour de Kevin Rose, de l'institut polytechnique Rensselaer, aux États-Unis, a montré que ces milieux perdaient leur oxygène 2 à 9 fois plus vite que les océans. Depuis 1980, la perte est estimée à 5,5 % en surface et 18,6 % en profondeur. L'augmentation de la température est la principale cause de cette évolution problématique pour la biodiversité et la qualité de l'eau potable.

Nature, 2 juin 2021

ENVIRONNEMENT

TRAQUER LES FEUX ZOMBIES

Dans les forêts boréales, des feux se déclarent de plus en plus souvent au printemps, bien avant les épisodes de grande chaleur. Il s'agit de «feux zombies». À la suite d'un incendie en été, le feu couve tout l'hiver sous la neige, dans la couche organique constituée de tourbe et d'aiguilles d'épicéas en décomposition. Cette couche, très riche en carbone et pauvre en oxygène, fournit des conditions de combustion lente. Lorsque la neige fond et que le sol s'assèche, le feu reprend en surface. Les superficies moyennes concernées restent faibles, mais ont atteint jusqu'à 38 % des surfaces incendiées certaines années. Pour prévoir où et quand les feux zombies risquent de reprendre, Rebecca Scholten, de l'université libre d'Amsterdam, aux Pays-Bas, et ses collègues ont développé un algorithme d'analyse d'images satellitaires. Dans une analyse



Un incendie de forêt en Russie.

rétrospective, le programme a détecté sept grands feux zombies des années passées sur les neuf pour lesquels les chercheurs disposaient de données. Il a aussi identifié vingt grands feux zombies non documentés. ■

Isabelle Bellin

R. C. Scholten et al., *Nature*, vol. 593, pp. 399-404, 2021

DES CHÈVRES DOMESTIQUES IL Y A 10 000 ANS

Dans les monts du Zagros, en Iran, les sites de Ganj Dareh et de Tepe Abdul Hosein témoignent de la domestication de la chèvre (*Capra aegagrus hircus*) à partir de l'ibex bézoard (*Capra aegagrus*). Après avoir établi par le radiocarbone que ces sites datent de 8200 à 7600 avant notre ère, Kevin Daly, du Trinity College, à Dublin, et ses collègues ont séquencé l'ADN contenu dans les os trouvés sur place, et ainsi révélé un abattage sélectif des jeunes mâles. Une grande diversité de l'ADN mitochondrial (transmis par les femelles) en comparaison de celle du chromosome Y (transmis par les mâles) le confirme. Autrement dit, les plus anciennes chèvres domestiques connues vivaient à Ganj Dareh et à Tepe Abdul Hosein. ■

F. S.

K. G. Daly et al., PNAS, en ligne le 7 juin 2021

COORDINATION CHEZ LES CELLULES SOUCHES NEURALES

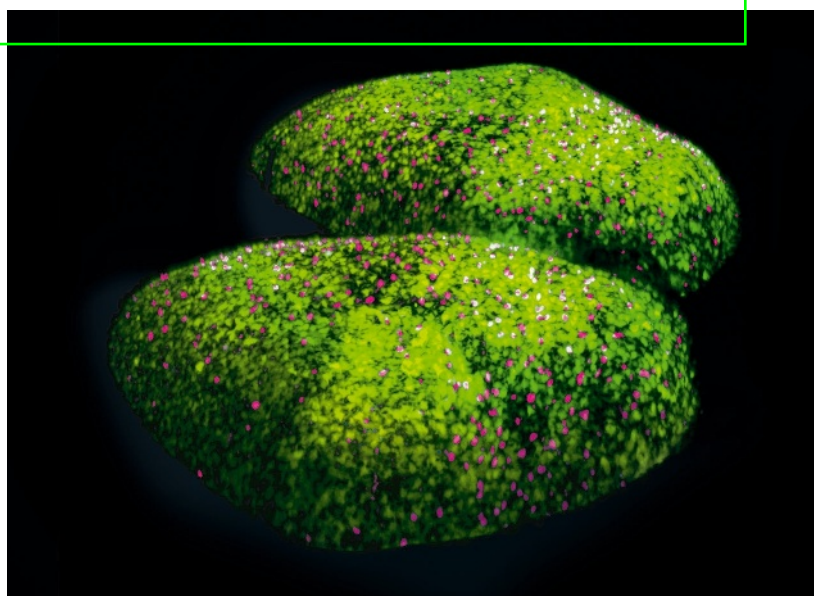


Image des cellules souches neurales recouvrant les deux hémisphères cérébraux d'un poisson-zèbre adulte. La plupart sont quiescentes (vertes), certaines sont en voie de différenciation (magenta).

VÉGÉTATION SOUS INFLUENCE

La fin du dernier maximum glaciaire, il y a près de 20 000 ans, a été un moteur important dans l'évolution de la végétation, mais on sait que l'impact des humains en la matière a été croissant et est notable depuis 200 ans au moins. Cependant, peu de résultats portaient sur les effets anthropiques plus anciens. En étudiant la végétation terrestre sur les 18 000 dernières années grâce à 1181 enregistrements de pollens fossiles de tous les continents hormis l'Antarctique, l'équipe d'Ondřej Mottl et Suzette Flantua, de l'université de Bergen, en Norvège, a montré une accélération des changements dans la composition de la végétation il y a 3 000 à 4 000 ans selon les continents. Comme cette accélération n'est pas compatible avec les seules variations climatiques, les humains, via leurs activités agricoles notamment, auraient dès cette époque commencé à modifier fortement les écosystèmes. ■

I. B.

O. Mottl et al., Science, vol. 372, pp. 860-864, 2021

Dans le cerveau adulte des vertébrés, les cellules souches neurales se divisent, se différencient et permettent la génération de nouveaux neurones, ce qui est important pour la croissance de l'organe, son éventuelle réparation et sa plasticité. Avant de se diviser, les cellules souches neurales doivent d'abord s'activer, c'est-à-dire sortir de leur état de repos dit «de quiescence». Comment l'activation est-elle contrôlée de façon à maintenir la pérennité des populations de cellules souches? Laure Bally-Cuif, de l'institut Pasteur, et ses collègues ont étudié le cas du poisson-zèbre.

Ces chercheurs ont constaté qu'à un instant donné, les cellules activées n'étaient pas distribuées de façon aléatoire: elles étaient moins présentes dans l'entourage des cellules filles des cellules souches. L'équipe a identifié la voie moléculaire impliquée dans l'inhibition de cette activation dans le voisinage de ces cellules filles. Elle a ensuite développé un modèle probabiliste qui suggère que l'activation des cellules souches neurales est coordonnée dans le temps et dans l'espace au sein de la population souche, mais aussi que les cellules souches elles-mêmes sont responsables de cette coordination. «Les propriétés intrinsèques de ce système lui permettent d'être en équilibre dynamique perpétuel», souligne Laure Bally-Cuif.

Mieux connaître ces mécanismes est important, car on sait par exemple que le recrutement et l'activation des cellules souches diminuent avec l'âge. Il serait aussi intéressant de savoir si de tels mécanismes sont à l'œuvre au sein de tumeurs, dont on pense qu'elles contiennent des cellules souches «superquiescentes» qui pourraient être responsables de récurrences. ■

Aline Gerstner

N. Dray et al., Cell Stem Cell, en ligne le 5 avril 2021

MÉDECINE

VERS UN VACCIN CONTRE L'ASTHME ALLERGIQUE

Un vaccin ciblant des acteurs du système immunitaire permet, chez la souris, de diminuer les symptômes de l'asthme allergique sévère.

Entraîner le système immunitaire à lutter dans les voies respiratoires contre son propre emballage face à des allergènes? C'est l'idée suivie par Laurent Reber, chercheur à l'Inserm et à l'institut Pasteur, et ses collègues, en partenariat avec l'entreprise Neovacs. L'équipe a mis au point un vaccin capable de diminuer les symptômes de l'asthme sévère chez la souris.

L'asthme est une maladie très hétérogène, mais on estime que 50% des patients présentent une forme d'origine allergique qui se caractérise par une inflammation des bronches et une gêne respiratoire à la suite de l'inhalation d'allergènes, le plus souvent des acariens. Cette exposition entraîne la production, dans les voies respiratoires, d'anticorps (des immunoglobulines IgE) et de cytokines (des interleukines-4 et 13, en abrégé IL-4 et IL-13). Ces dernières, en se fixant à des récepteurs cellulaires, déclenchent des réactions en cascade qui aboutissent à une hyperréactivité des voies respiratoires, une surproduction de mucus et un recrutement de globules blancs. Si les corticoïdes représentent le traitement de référence dans l'asthme, des anticorps thérapeutiques ont été récemment développés pour les cas d'asthme sévère résistants aux corticoïdes. « Ces anticorps ciblent les voies de signalisation de l'IL-4 et de l'IL-13 et sont efficaces dans l'asthme sévère. Mais ils sont très onéreux, de l'ordre de 15000 euros par an pour un patient, et nécessitent des injections très fréquentes, toutes les deux semaines », explique Laurent Reber.

Son équipe a donc décidé de développer un vaccin, dans l'idée d'éduquer le système immunitaire à produire ses propres anticorps contre les interleukines-4 et 13. Elle a mis au point un vaccin conjugué nommé « kinoïde » en couplant des protéines IL-4 et IL-13 avec une protéine particulière, une forme mutée non pathogène de la toxine diphtérique. Cette dernière est très immunogène et déclenche une réaction du système immunitaire. « Ces vaccins conjugués sont très utilisés dans la lutte anti-infectieuse pour cibler des protéines qui n'induisent pas de réponse immunitaire, par exemple parce qu'elles sont trop petites. Ici, il s'agissait de "leurrer" le système immunitaire pour qu'il



La ventoline, à base de salbutamol, est un bronchodilatateur fréquemment utilisé en cas de crise d'asthme. Certaines crises, plus aiguës, nécessitent des corticoïdes. Mais les crises sévères résistent parfois à ce dernier traitement. La piste d'un vaccin est à l'étude.

4 MILLIONS

C'est le nombre de personnes en France souffrant d'un asthme chronique. Dans le monde, cette pathologie touche près de 300 millions d'individus.

reconnaître des protéines du soi », décrypte Laurent Reber.

Les résultats précliniques sur des souris montrent que ce vaccin induit bien la production d'anticorps contre les interleukines-4 et 13, avec une forte activité neutralisante chez 90% des animaux dès 6 semaines après la vaccination. Cette activité était toujours visible chez 60% des souris un an après. Les chercheurs ont montré une efficacité dans la diminution des symptômes typiques de la maladie : baisse des taux d'IgE, du recrutement de globules blancs, de la production de mucus et de l'hyperréactivité des voies respiratoires.

Dans une deuxième expérience, aucun effet secondaire n'a été observé, ce qui reste à confirmer dans des essais cliniques sur l'humain, puisque ces cytokines peuvent aussi être impliquées dans des processus de défense physiologique, notamment contre des vers parasites. Des essais sont prévus d'ici à deux ans chez l'humain. ■

Noëlle Guillon

E. Conde et al., *Nature Communications*, vol. 12, article 2574, 2021

EN BREF

Le génome des crevettes sociales

Chez les crevettes *Alpheidae*, certaines espèces ont une organisation eusociale, d'autres beaucoup moins. Dustin Rubenstein, de l'université Columbia, et son équipe ont constaté que les premières avaient un plus grand génome que les secondes, et très enrichi en transposons (séquences qui sautent d'une position à une autre dans le génome). Grâce à un modèle, ils expliquent cette différence par la division très marquée de la société où la reine est souvent la seule à se reproduire.

PNAS, 7 juin 2021

Contre la jaunisse de la betterave

Les pucerons sont vecteurs du virus de la jaunisse, qui cause de grandes pertes dans les cultures de betteraves. Interdits en France en 2018, les néonicotinoïdes ont été réintroduits par dérogation, étant la seule solution de lutte efficace. À partir de 3 800 études, l'Anses met en avant 22 autres pistes (produits phytopharmaceutiques, des insectes prédateurs des pucerons, etc.). Chacune a des « résultats corrects, mais insuffisants », et seule une stratégie combinée serait donc efficace.

Anses, 2 juin 2021

Pas de tardigrades lunaires ?

En 2019, la mission israélienne Beresheet s'est écrasée à la surface de la Lune avec, à son bord, des tardigrades. Ont-ils survécu ? Alejandra Traspas et Mark Burchell, de l'université du Kent, au Royaume-Uni, ont mené des expériences sur ces petits animaux réputés très robustes. Résultat : ils résistent à des impacts jusqu'à des vitesses de 900 mètres par seconde et une pression de 1,14 gigapascal. La collision a été plus lente, mais la pression a peut-être été supérieure...

Astrobiology, 11 mai 2021

GÉNÉTIQUE

LE PLACENTA, DÉCHARGE À ANOMALIES ?

Étrangeté anatomique, le placenta a probablement commencé à prendre forme il y a environ 150 millions d'années, lorsqu'un rétrovirus a infecté un ancêtre ovi-pare des mammifères. Cette interface connectant la mère et le fœtus assure l'apport à ce dernier des nutriments, de l'eau et de l'oxygène dont il a besoin, et l'évacuation de ses déchets, tels que le dioxyde de carbone. Toutefois, cet organe unique et vital n'a pas fini de nous surprendre. Dans certains cas, des parties du placenta présentent un génome différent de celui du fœtus, avec des chromosomes surnuméraires, alors que le placenta et le fœtus proviennent du même œuf fécondé. Ce phénomène d'incohérence génomique, connu depuis des années, porte le nom de « mosaïque confinée au placenta » et survient dans près de 2 % des grossesses. Les mécanismes sous-jacents étaient jusqu'alors inconnus. En effectuant un séquençage complet du génome de 86 biopsies de 37 placentas, l'équipe de Sam Behjati, de l'institut Sanger, à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, a montré que la structure du placenta ressemble à un « patchwork de tumeurs ».



Représentation d'un fœtus âgé de 27 semaines, avec son placenta. Cet organe réserve encore des surprises.

Les chercheurs estiment que cet organe serait capable de tolérer des défauts génétiques majeurs et qu'il jouerait peut-être un rôle de « décharge ». Il hériterait des erreurs survenues tôt dans le développement embryonnaire et écartées du futur fœtus lors de la séparation des lignées cellulaires fœtale et placentaire. Ce mécanisme pourrait être crucial pour assurer le bon déroulement de la grossesse. Une meilleure connaissance de la mosaïque du placenta permettra peut-être, dans l'avenir, de comprendre les complications et maladies pouvant survenir durant la grossesse. ■

William Rowe-Pirra

T. H. H. Coorens et al., *Nature*, vol. 592, pp. 80-85, 2021

BIOLOGIE ANIMALE

LES BANDES DU POISSON-CLOWN

Selon qu'il habite dans l'anémone car-pette, *Stichodactyla gigantea*, ou dans l'anémone magnifique, *Heteractis magnifica*, le poisson-clown *Amphiprion percula* forme ses caractéristiques bandes blanches plus ou moins vite. L'équipe menée par Vincent Laudet, de l'institut des sciences et technologies d'Okinawa, au Japon, a mis en évidence le rôle des hormones thyroïdiennes. En traitant des poissons-clowns avec ces hormones, les chercheurs ont constaté que les bandes apparaissent plus vite. Ils ont alors comparé l'expression des gènes des animaux selon leur habitat. Ceux vivant dans *Stichodactyla gigantea*, dont les bandes apparaissent plus vite, présentent une activité plus importante du gène *duox*, gène impliqué dans la synthèse des hormones de la thyroïde. Mais pourquoi ce gène a-t-il une activité différente selon l'environnement du poisson ? Les chercheurs explorent une piste qui reste à confirmer : l'anémone



Des poissons-clowns de l'espèce *Amphiprion percula* dans la baie de Kimbe, en Papouasie-Nouvelle-Guinée.

Stichodactyla gigantea, plus toxique que l'anémone magnifique, induirait un stress chez le poisson-clown qui se traduirait par une production hormonale plus importante. ■ S. B.

P. Salis et al., *PNAS*, vol. 118(23), article e2101634118, 2021

INTERNET ET SOCIÉTÉ

ARCHÉOLOGIE-HISTOIRE



WIKIPÉDIA

Rémi Mathis

First, 2021
224 pages, 14,95 euros

L'auteur, ancien président de l'association Wikimedia France et distingué conservateur chartiste à la BnF, nous livre ici un panorama complet de l'aventure intellectuelle et culturelle qu'est Wikipédia, à l'occasion des 20 ans de l'encyclopédie.

Son histoire: la conjonction entre un pionnier – Jimmy Wales – et une communauté de geeks scientifiques, premiers contributeurs, le tout sous l'égide du logiciel libre et du wiki (espace contributif). Son importance en termes de contributeurs: qui sort-ils, «combien de divisions» (y compris les divisions... entre contributeurs). Les oppositions et malentendus: la narration d'un épisode avec la Direction centrale du renseignement intérieur à propos d'un émetteur militaire dans le Rhône est savoureuse, comme celle de la critique de Wikipédia par certaines personnalités, à cause de la page qui leur est consacrée (Narcisse, quand tu nous tiens!).

Importante aussi est la discussion consacrée aux images (venant du projet-frère *WikiCommons*): qu'est-ce qu'une licence *Creative Commons*? Comment inciter, en France notamment, des institutions muséales et culturelles à mettre leur patrimoine iconographique sur Wikipédia – une page illustrée étant toujours plus alléchante? L'auteur conclut en indiquant que le «projet d'encyclopédie libre» qu'est Wikipédia est à présent un ovni dans le paysage actuel de l'Internet, quasi totalement marchand (pour les sites à grande audience): l'existence de l'encyclopédie rappelle l'utopie d'interconnexion et de diffusion gratuite qu'a pu être la Toile à ses débuts. Il ouvre une perspective autour du projet *WikiData*, et sa participation au web de données. Vingt ans d'une histoire riche et certainement pas achevée: c'est un parcours plaisant, fait de chapitres rythmés, auquel nous invite cet ouvrage.

ALEXANDRE MOATTI

Chercheur associé au laboratoire Sphere, université de Paris



LE BATEAU DE PALMYRE. QUAND LES MONDES ANCIENS SE RENCONTRAIENT

Maurice Sartre

Tallandier, 2021
336 pages, 21,90 euros

Fruit d'une large enquête conduite dans des publications dispersées et sur des sujets très divers, cet ouvrage ne peut qu'exciter la curiosité. Tout le monde connaît le proverbe: «Tous les chemins mènent à Rome»; mais beaucoup oublient que les mêmes chemins conduisent, en sens inverse, vers la frontière et son au-delà. Les voyageurs qui ont pris à rebours ces voies ont créé une «mondialisation», fondée sur une curiosité plus ou moins scientifique et sur des échanges commerciaux dont témoigne ce que les archéologues appellent «le mobilier»: vases, amphores, monnaies, etc.

Ainsi, Pythéas de Marseille est allé dans le Grand Nord, vers l'*Ultima Thule* (l'Islande?). Le périple demandé par Néchao a conduit des Phéniciens à faire le tour de l'Afrique. Des Carthaginois, menés par Hannon, sont descendus jusqu'au Sud marocain. Des commerçants, par la mer Rouge, ont gagné le Yémen puis l'Inde, tel ce Palmyrénien, habitant du désert qui était devenu propriétaire de bateaux. Au-delà, d'autres Méditerranéens ont atteint le Turkestan chinois (pays des Sères?), sans doute pas la Chine, bien que ce pays leur ait été connu.

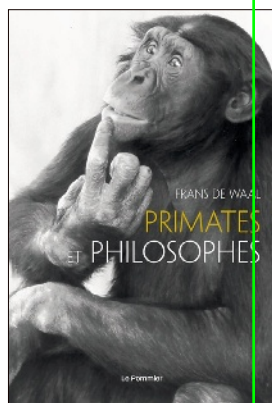
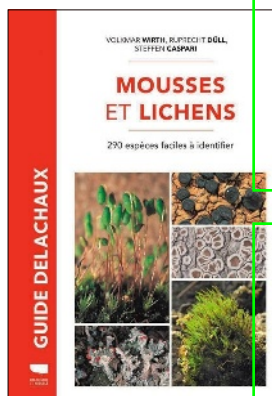
Ils recherchaient des éléphants de guerre en Érythrée, l'encens et les aromates du Yémen, le poivre et les perles des Indes et de Ceylan. En échange, ils donnaient des pièces d'or, sans doute peu, et de la céramique (vases et amphores de vin). «La soi-disant route de la soie», pour reprendre l'expression de Maurice Sartre, a été moins empruntée qu'on ne l'a cru.

Et ce n'est pas tout. Des Orientaux ont été attirés par un art gréco-romain mis au service du bouddhisme. Des Occidentaux ont été curieux de leur sagesse – on dit qu'Alexandre le Grand avait rencontré dix brahmanes pour les interroger sur leur religion.

Un livre recommandé.

YANN LE BOHEC

Professeur émérite à l'université Paris 1 Panthéon-Sorbonne



BOTANIQUE

MOUSSES ET LICHENS

Volkmar Wirth

Delachaux & Niestlé, 2021
336 pages, 35,90 euros

Ce guide d'identification présente 160 lichens et 130 mousses, parmi les espèces les plus communes et les plus remarquables – un sujet rarement traité dans l'espace francophone. Traduit d'un livre allemand publié en 2018, l'ouvrage s'articule en deux parties. Chacune commence par une présentation générale: modalités de récolte des échantillons et synthèse exhaustive des critères de détermination pour les lichens; caractéristiques morphologiques et physiologiques des hépatiques et des muscinées (les mousses).

Une clé simplifiée d'usage facile, définie à partir de caractéristiques morphologiques, de substrat et de position sur celui-ci renvoie aux pages traitant les espèces concernées. La partie descriptive des espèces suit le même plan de présentation pour les lichens et les mousses: caractères distinctifs essentiels, réactions colorées (spécifiques aux lichens), risques de confusion, écologie et chorologie. Des informations complémentaires sur les usages, les propriétés thérapeutiques, l'étymologie et d'autres anecdotes renforcent la connaissance de l'espèce.

Notons le souci de précision nomenclaturale pour quelques genres de lichens dont l'éclatement en différents genres n'est pas encore bien assimilé. Dans ce cas, les nomenclatures traditionnelle et actuelle sont précisées. Une brève revue bibliographique et un index des 290 taxons (dénominations latine et française) terminent l'ouvrage.

Très bien traduit, cet ouvrage d'une grande rigueur scientifique sera essentiel aux naturalistes débutants ou confirmés. Du reste, son format est tout à fait adapté aux prospections sur le terrain!

CHANTAL VAN HALUWYN
Université de Lille 2

ÉTHOLOGIE

PRIMATES ET PHILOSOPHES

Frans de Waal

Le Pommier, 2020
260 pages, 22 euros

Ce livre du célèbre primatologue, psychologue et éthologue hollandais rassemble le contenu d'un ouvrage paru sous le même titre en 2009, un texte issu de ses conférences données à Princeton en 2003 et une partie (représentant plus de la moitié) constituée d'une longue préface et de commentaires de plusieurs spécialistes de philosophie morale auxquels l'auteur répond: il s'agit donc davantage d'un débat que d'un livre d'auteur.

Le sujet, en partie traité dans *Le Bon Singe. Les bases naturelles de la morale* (Bayard, 1997), est centré sur les racines de l'altruisme. L'homme est-il moral par nature, ou seulement par culture comme on l'a longtemps supposé quand on ne connaissait pas le comportement social des autres mammifères? C'est évidemment une révolution que de montrer qu'il y a une continuité entre les comportements apparemment les plus propres à notre espèce et ceux des animaux. C'est pour insister sur ce type de question (qui paraissait, il y a peu, anthropomorphique) que l'auteur se revendique de la nouvelle école d'éthologie cognitive, dont il est le leader, plutôt que de celle d'éthologie objectiviste des fondateurs Konrad Lorenz et Nikolaas Tinbergen.

Ce livre approfondit donc avec nuance et pédagogie les concepts d'altruisme, d'égoïsme, de coopération et d'entraide. Une tâche nécessaire parce que ces termes, dans lesquels tout un chacun se reconnaît, sont en réalité complexes et sources de confusion. Les passionnés de sciences humaines comme ceux de biologie ont donc tout à apprendre de cette remise en question argumentée et référencée de l'anthropocentrisme.

PIERRE JOUVENTIN
Directeur de recherche émérite au CNRS

ET AUSSI



IDENTIFIER LES ROCHES

Jürg Meyer

Delachaux & Niestlé, 2021
144 pages, 25,90 euros

Pour identifier des roches, il faut: des connaissances de base; quelques outils, apprendre des clés d'identification et savoir classer les roches dans leurs familles. Ce livre vous décrit tout cela par mille schémas, photos et paragraphes bien choisis et bien sentis. Conçu par un vulgarisateur hors pair, mais aussi géologue, guide de haute montagne et formateur-conférencier, ce manuel est une perle d'efficacité.

LES SAUTERELLES-FEUILLES DE GUYANE

Serge Xiberras et Pierre Ducaud

Musée des Confluences, 2021
360 pages, 45 euros

Ressembler à une feuille est déjà une prouesse, mais ressembler à une feuille moisie ou morte aux bords comme dentelés par un grignotage de chenilles? C'est ce que font les sauterelles-feuilles, notamment celles de la forêt amazonienne. Dans ce qui est autant une synthèse scientifique qu'un livre d'entomologie très bien illustré, les auteurs se livrent à l'étude systématique des sept espèces de sauterelles-feuilles de Guyane connues à ce jour: phylogénie, reproduction, développement, activités, variations, en particulier des formes « dissimulantes », métissages... Pour les passionnés de biomimétisme et d'insectes.

IL ÉTAIT UNE FOIS LE SANG

Olivier Garraud et Jean-Daniel Tissot

Humensciences, 2021
352 pages, 19 euros

Le sang a de nombreux rôles vitaux, que ce livre explique clairement. Sont discutées les maladies de cet organe liquide, mais aussi celles qu'il révèle et celles dont il nous défend. On y apprendra que le système ABO des groupes sanguins traduit notre hérédité, mais aussi la nécessité pour le système immunitaire de distinguer le soi du non-soi. Les aspects culturels – prix du sang, rapport au sang, sang dans les cosmogonies... – sont également abordés. Une somme sur ce fluide biologique vital écrite par deux spécialistes, médecins immunologistes et hématologistes.

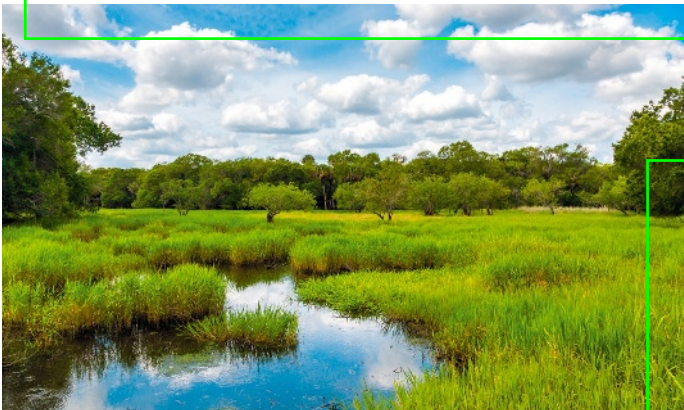


La chronique de
CATHERINE AUBERTIN

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

REPENSER L'ÉCONOMIE APRÈS LA PANDÉMIE

**Les plans de relance post-Covid négligent
les aspects environnementaux : un déni de réalité
et une occasion manquée.**



Comme d'autres
espaces naturels,
les zones humides
se raréfient. Parce
que leur utilité
n'a pas de valeur
marchande ?
De plus en plus,
les spécialistes
incriminent plutôt
les défaillances
des institutions et
les choix de société.

La pandémie de Covid-19 a stimulé la production de nombreux rapports sur les relations entre économie et biodiversité. Si le lien entre émergence du virus et pression anthropique sur le vivant reste à démontrer, les agences onusiennes, les ONG, des économistes et des entrepreneurs dénoncent le rôle de la croissance économique dans l'effondrement de la biodiversité et, en retour, les risques que fait courir cet effondrement au système économique mondial et à l'humanité.

Ces alarmes sont anciennes. La nouveauté est que tous les rapports émettent des recommandations qui rompent avec les solutions marchandes de la « croissance verte ». Ils remettent en cause le dogme économique qui analyse érosion de la biodiversité et pollutions comme des défaillances de marché et de droits de propriété (« Ce qui est gratuit et qui n'appartient à personne est promis à destruction »). Ils pointent d'abord les défaillances institutionnelles et les choix

de société. Les trois grandes propositions du volumineux rapport (<https://bit.ly/3uAe5Y8>) de l'économiste Partha Dasgupta, remis en février dernier au gouvernement britannique, l'illustrent bien. Explicitons-les.

**Seuls 10% des plans
de relance peuvent être
considérés comme verts**

Ne pas extraire de la nature plus qu'elle ne peut supporter. La demande de services d'approvisionnement (matières premières) a été satisfaite aux dépens des services de régulation qui ne permettent plus aujourd'hui le maintien des grands cycles biogéochimiques et la capacité de régénération de la planète. Pour sortir de la zone dangereuse où nous sommes déjà, les ONG invitent à plus de sobriété et la

coalition d'entreprises WBCSD appelle à « réinventer le capitalisme » pour revenir en deçà des « limites planétaires ».

Changer de mentalité. C'est comprendre à quel point nous dépendons de la nature qui est notre milieu de vie et où nous puisons nos ressources. Repenser le sens de la croissance économique implique de modifier les indicateurs de richesse. Or la nature obéit à des processus « silencieux, invisibles et changeants ». Un système de prix ne peut rendre compte de l'abondance et de la rareté de ses services, ni des dommages qu'elle subit. Imaginons ce que serait le prix des denrées agricoles s'il fallait intégrer l'impact de leur production sur la santé et sur l'environnement !

Transformer institutions et systèmes. C'est diversifier les économies régionales, favoriser la participation citoyenne et garantir les droits des plus vulnérables. C'est aussi avoir une vision globale à long terme où biodiversité, changement climatique, désertification sont interconnectés et adopter l'approche « Une seule santé » qui lie la santé humaine à celle de tous les autres êtres vivants et aux écosystèmes.

Devant cette rhétorique consensuelle, on se met à rêver d'une grande transition où l'économie renoncerait à la course au profit et à la consommation pour se consacrer à la préservation de l'environnement et à la lutte contre les inégalités.

Pourtant, l'OCDE s'inquiète : « Tout compte fait, la réponse des pouvoirs publics au Covid-19 pourrait causer plus de tort que de bien à la biodiversité. » Et l'Union internationale pour la conservation de la nature note : « Seuls 10% des plans de relance peuvent être considérés comme verts. » La dizaine de milliers de milliards de dollars des plans de relance post-Covid allège en effet les réglementations environnementales et reconduit les subventions néfastes accordées aux secteurs carbonés, dans un nationalisme peu compatible avec la coopération internationale. Combien faudra-t-il de rapports et de virus pour modifier le cours normal des affaires ? ■

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 524 (Juin 21)
réf. PL524



N° 523 (Mai 21)
réf. PL523



N° 522 (Avril 21)
réf. PL522



N° 521 (Mars 21)
réf. PL521



N° 520 (Fév 21)
réf. PL520



N° 519 (Jan 21)
réf. PL519



N° 518 (Déc. 20)
réf. PL518



N° 517 (Nov. 20)
réf. PL517



N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516



N° 515 (Sept. 20)
réf. PL515



N° 514 (Août 2014)
réf. PL514



N° 513 (Juill. 20)
réf. PL513

À retourner accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – serviceclients@groupepourlascience.fr



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

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

1 ^{re} réf.	2 ^{de} réf.	3 ^e réf.	4 ^e réf.	5 ^e réf.	6 ^e réf.
0.1	9.40				
x 9,40 € =	9.40				

TOTAL À RÉGLER _____ €

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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom: _____

Prénom:

Adresse:

Code postal : Ville :

Téléphone _____

Courriel :

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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



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

Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France Métropolitaine uniquement

Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les 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.

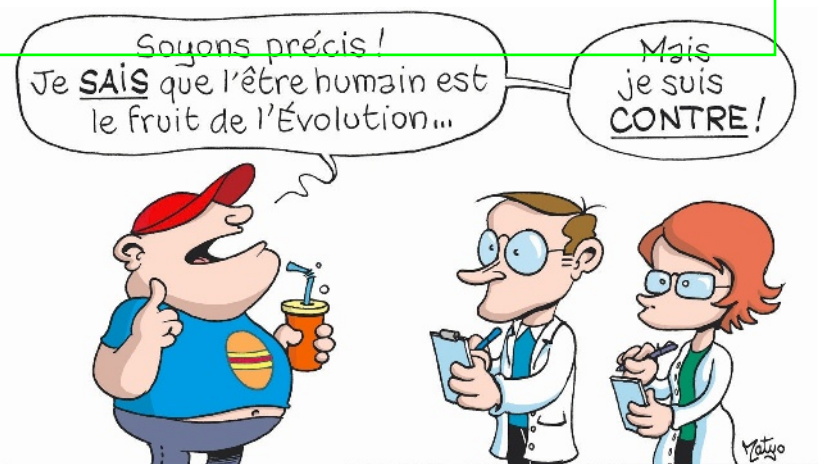


La chronique de
YVES GINGRAS

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

COMMENT MESURER LA CULTURE SCIENTIFIQUE ?

Le savoir scientifique entre parfois en conflit
avec des croyances bien ancrées. Il faut en tenir compte
pour formuler correctement les questions des sondages.



La pandémie de Covid-19 n'a pas seulement fait couler beaucoup d'encre et généré encore plus de mégaoctets de commentaires sur les plateformes numériques. Elle a aussi reposé la question lancinante et récurrente du niveau de culture scientifique des citoyens et citoyennes. Pour avoir une idée, même approximative, de l'évolution du niveau des connaissances scientifiques parmi la population, il existe des indicateurs fondés sur un certain nombre de questions classiques, auxquelles il s'agit de répondre « vrai » ou « faux ». Par exemple, on demande si « le Soleil tourne autour de la Terre », si « les électrons sont plus petits que les atomes » ou encore si « les premiers humains vivaient à la même époque que les dinosaures ».

Un instrument de ce genre est utilisé par l'Eurobaromètre, qui pose treize questions, et, aux États-Unis, par le National Science Board, qui en pose neuf. On fait alors la moyenne des bonnes

réponses et, en répétant l'enquête tous les deux ans par exemple, comme on le fait aux États-Unis, on peut suivre l'évolution de cet indicateur dans le temps ou le comparer avec d'autres pays.

**Pour des questions ne
heurtant pas les croyances,
le taux de bonnes
réponses aux États-Unis
est aussi élevé qu'ailleurs**

S'il peut paraître évident qu'une mauvaise réponse à ce genre de questions relativement simples constitue une bonne mesure du degré d'ignorance des sciences, le faible taux de bonnes réponses fournies aux États-Unis à la question portant sur l'évolution – qui demande si « l'être humain s'est développé à partir d'espèces

animales plus anciennes » – a fait naître des doutes sur ce que mesurait vraiment cette question. En effet, bon an mal an, depuis le milieu des années 1980, le taux de bonnes réponses tourne autour de 42 %. Par comparaison, la même question posée aux Canadiens en 2013 donnait 74 % de bonnes réponses.

La religion étant très présente aux États-Unis, les analystes se sont demandé si cette question ne confondait pas les croyances et les connaissances des personnes interrogées. En raison de la formulation de l'énoncé, on ne sait pas vraiment, en fait, si les gens savent que la science dit que les humains sont le fruit de l'évolution ou s'ils disent ne pas croire à cet énoncé. Pour trancher la question, un nouveau sondage a été réalisé en 2004 en testant deux formulations différentes. La première reprenait la formulation initiale, tandis que la seconde demandait s'il était vrai (ou faux) que « selon la théorie de l'évolution, l'être humain s'est développé à partir d'espèces animales plus anciennes ».

Or, à cette dernière question, le taux de bonnes réponses grimpe à 74 % ! En somme, on peut bel et bien savoir que la science dit que l'on descend d'animaux plus anciens, mais ne pas adhérer à un tel énoncé pour des raisons religieuses. Dans une population d'évangélistes, on pourrait probablement constater des modifications analogues pour une question sur l'âge de la Terre ou le Big Bang. Une personne peut savoir ce que la science affirme, mais s'en détacher quand cela met en cause ses croyances religieuses.

En revanche, quand on demande si « le centre de la Terre est chaud », les taux de bonnes réponses sont aussi élevés aux États-Unis qu'au Canada ou ailleurs dans le monde, car cela ne semble pas affecter des croyances religieuses ancrées.

En somme, des questions qui semblent évidentes, et donc constituer un bon indicateur du concept de « connaissance scientifique », peuvent finalement se révéler problématiques quand on prend le temps de réfléchir aux sens qu'il est possible de leur attribuer. ■

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT!**



N° 111 (mai. 21)
réf. DO111



N° 110 (févr. 20)
réf. DO110



N° 109 (nov. 20)
réf. DO109



N° 108 (sept. 20)
réf. DO108



N° 107 (mai 20)
réf. DO107



N° 106 (févr. 20)
réf. DO106



N° 105 (nov. 19)
réf. DO105



N° 104 (juil. 19)
réf. DO104



N° 103 (avr. 19)
réf. DO103



N° 102 (fév. 19)
réf. DO102



N° 101 (nov. 18)
réf. DO101



N° 100 (août 18)
réf. DO100

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

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

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

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

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

TOTAL À RÉGLER €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Téléphone :

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

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

Les informations que nous collectons dans ce bulletin de commande vous 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 newsletter 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.



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

L'ESSENTIEL

> Généralement, le destin ultime d'une étoile est simplement dicté par sa masse. Mais certains cas semblent déroger à cette règle.

> On observe que certaines étoiles émettent de puissants jets de plasma, tandis que d'autres expulsent une importante fraction de leur gaz quelques jours avant de mourir.

> Grâce à des instruments scrutant de grandes régions du ciel, on commence à voir de plus en plus de ces événements atypiques.

> En accumulant des observations, les astrophysiciens identifieront des traits caractéristiques parmi ces comportements exotiques, ce qui aidera à en comprendre l'origine et la diversité.

L'AUTRICE



ANNA Y. Q. HO
astronome à l'université de Californie à Berkeley, et spécialiste des fins de vie d'étoiles massives



Les mille et une morts des étoiles

La plupart des étoiles meurent selon des scénarios bien connus.

Mais ces dernières années, les astronomes ont découvert un nombre croissant de supernovæ inhabituelles qui ne se conforment pas aux schémas classiques.

Lorsqu'une étoile massive en fin de vie explose, elle produit dans certains cas un jet de plasma très énergétique. Grâce aux techniques d'observation les plus récentes, les astronomes sont en mesure d'étudier ce phénomène rare.

Le 9 septembre 2018, un télescope robotisé effectuait un relevé de routine du ciel nocturne lorsqu'il repéra ce qui ressemblait à une nouvelle étoile. Au fil des heures, cette «étoile» devint dix fois plus brillante. Un logiciel que j'avais écrit pour identifier des événements célestes inhabituels déclencha alors une alerte. Il faisait nuit en Californie et je dormais, mais mes collègues de l'autre côté de la Terre réagirent promptement à ce signalement. Douze heures plus tard, divers télescopes terrestres et spatiaux avaient recueilli assez de données pour confirmer qu'il s'agissait d'une supernova – une explosion d'étoile – dans une galaxie lointaine. Mais cet événement n'avait rien d'une supernova «banale».

En combinant les mesures des différents télescopes, nous sommes parvenus à la conclusion qu'après avoir brillé pendant des millions d'années, l'étoile a fait quelque chose d'aussi surprenant que mystérieux. Elle s'est subitement débarrassée de ses couches de gaz externes, formant ainsi un cocon de poussière et de gaz autour d'elle. Quelques jours à une semaine plus tard, l'étoile a explosé. Les débris de l'explosion sont alors entrés en collision avec le cocon et ont ainsi produit un flash inhabituellement brillant et de courte durée. Parce que l'explosion a eu lieu dans une galaxie très éloignée (sa lumière a mis près de un milliard d'années à atteindre la Terre), elle n'était pas assez brillante pour être vue à l'œil nu. Cependant, elle était assez lumineuse pour nos observatoires. Et grâce à une recherche rétrospective dans les données des télescopes, nous avons même réussi à retrouver l'étoile en train de se «deshabiller» deux semaines avant d'exploser, alors qu'elle était encore cent fois moins brillante que lors de son explosion.

Au cours de ma thèse, j'ai ainsi observé des étoiles qui ont expulsé une part importante de leur gaz dans les derniers jours de leur vie lors d'éruptions violentes, mais aussi des astres dont le vestige du cœur est resté actif après l'effondrement de l'étoile et a émis des jets de matière se déplaçant à des vitesses hyperrelativistes (très proches de la vitesse de la lumière). Ces processus extrêmes semblent rares et ne se conforment pas aux schémas standard que les astrophysiciens ont dressés sur la mort des étoiles. Mais le simple fait qu'ils puissent se produire de temps à autre indique que nous avons encore beaucoup de choses à comprendre sur les mécanismes essentiels de la vie et de la mort des étoiles.

Grâce aux progrès techniques des instruments d'observation et de l'analyse des données, les astrophysiciens sont en train d'enrichir régulièrement cette collection de fins stellaires atypiques qui remettent en cause les scénarios classiques. Ces événements soulèvent des

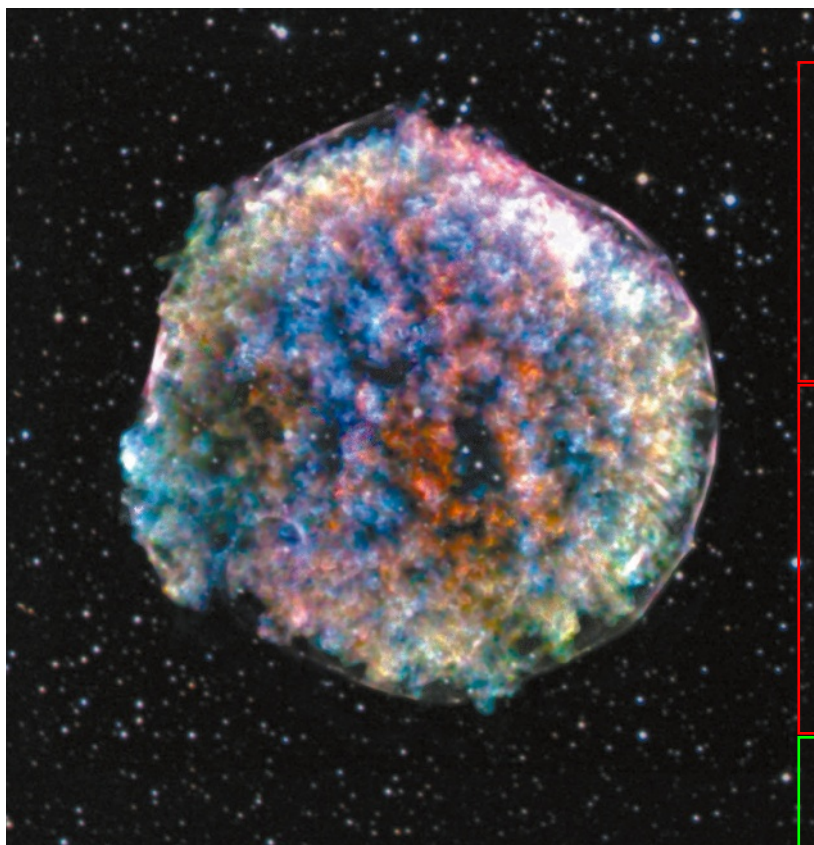
questions fondamentales: quels sont les facteurs qui déterminent comment un astre va mourir? Pourquoi certaines étoiles terminent-elles leur vie avec des éruptions ou des jets violents, tandis que d'autres explosent, tout simplement? Nous ne sommes qu'au début de l'exploration de ces fins exceptionnelles d'étoiles, mais nous accumulons progressivement des indices offrant des pistes de réponses.

UNE NOUVELLE ÉTOILE

L'histoire de la naissance, de la vie et de la mort d'une étoile est celle d'une compétition entre différentes forces. Les étoiles naissent dans de vastes nuages interstellaires d'hydrogène. Le gaz s'accumule dans certaines régions sous l'effet de l'attraction de la force gravitationnelle. Cette dernière devient assez intense pour s'opposer à des forces qui tendent à disperser le gaz, comme la pression des champs magnétiques. Lorsqu'une portion du nuage s'effondre sur lui-même en une protoétoile, la densité augmente de 20 ordres de grandeur et sa température croît de plusieurs millions de degrés. Dans ces conditions, les atomes d'hydrogène entrent en collision avec suffisamment d'énergie pour se lier et former de l'hélium. Cette fusion libère de l'énergie: la boule de gaz chauffe et brille. Une nouvelle étoile est née.

Avec la robotisation des télescopes, nous sommes capables de repérer des milliers de supernovæ chaque année

Comme le nuage initial, l'étoile est elle-même le théâtre d'une compétition entre la gravitation, qui attire le gaz vers l'intérieur, et la pression due à la fusion nucléaire, qui le repousse vers l'extérieur. L'évolution d'une étoile est donc un équilibre délicat entre ces forces; un équilibre qui dépend de la température et de la masse de l'astre. Dans les étoiles de faible masse et en conditions modérées, l'hydrogène fusionne lentement en hélium et c'est tout: ainsi, le Soleil est



né il y a plus de 4 milliards d'années et brûle encore son hydrogène. Les étoiles plus massives présentent une pression gravitationnelle plus forte et une température plus élevée. Elles consomment rapidement leur carburant nucléaire et ont une vie très courte, de l'ordre de 10 millions d'années. Ces fourneaux stellaires ont cependant une chaîne de fusion nucléaire riche et synthétisent des éléments « lourds » (oxygène, carbone, néon, fer, etc.).

La masse d'une étoile détermine aussi comment elle mourra. Les étoiles de moins de huit masses solaires environ connaissent une fin relativement paisible. Une fois la réserve de combustible nucléaire épuisée, s'y amorce la fusion d'éléments plus lourds. Ces réactions étant plus énergétiques, l'étoile enflé et expulse dans l'espace ses couches externes, formant une magnifique nébuleuse planétaire. Puis, faute d'une température suffisante pour que les processus de fusion se poursuivent, le noyau de l'étoile se contracte et devient alors une naine blanche: un objet chaud et dense d'environ une demi-masse solaire pour une taille à peine supérieure à celle de la Terre.

Les étoiles massives, en revanche, connaissent une fin violente en raison des températures et des pressions énormes régnant dans leur cœur. Quand elles atteignent le stade de production du fer, la chaîne de combustion nucléaire se brise. Le fer est si stable qu'il ne

En 1572, l'astronome Tycho Brahe a observé à l'œil nu la supernova SN1572. Les restes de l'étoile (le « rémanent ») sont encore visibles aujourd'hui, mais pas à l'œil nu. En 2019, les astronomes ont étudié la distribution tridimensionnelle et hétérogène du gaz et de poussière expulsés lors de cette explosion. L'image en fausses couleurs a été prise par le télescope spatial *Chandra*. On y voit le silicium qui se déplace vers la Terre (en bleu) ou s'en éloigne (en rouge). Les autres couleurs correspondent à d'autres éléments.

fusionne pas pour former des éléments plus lourds. Conséquence: la pression qui s'opposait à la gravité disparaît, et le cœur de l'étoile s'effondre sur lui-même. Sous l'effet de la pression extrême, les atomes sont alors si proches les uns des autres qu'une nouvelle force entre en scène: l'« interaction forte ». Une forme de pression inédite rétablit un équilibre. Le cœur devient alors une étoile à neutrons, c'est-à-dire un état très dense où la matière est essentiellement constituée de neutrons.

Si l'étoile est assez massive (à partir de 20 masses solaires environ), la gravité l'emporte même sur l'interaction forte et l'étoile à neutrons s'effondre encore davantage jusqu'à former un trou noir. Dans un cas comme dans l'autre, quand le cœur périclite, une partie de l'énergie libérée provoque une violente éjection des couches externes de l'étoile dans l'espace. Cette explosion spectaculaire, une supernova, est si lumineuse que, pendant quelques jours, elle brille plus que l'ensemble de toutes les autres étoiles de sa galaxie.

Depuis des millénaires, les humains ont remarqué à l'œil nu ce phénomène de supernova. Notamment, en 1572, l'astronome danois Tycho Brahe a ainsi constaté la formation d'une « nouvelle étoile » dans la constellation de Cassiopée. Elle était aussi brillante que Vénus, un éclat qu'elle a conservé pendant plusieurs mois avant de s'estomper. Le vestige de l'explosion est encore visible aujourd'hui (voir l'image ci-contre).

AU-DELÀ DE LA VOIE LACTÉE

Pour qu'une supernova soit visible à l'œil nu, elle doit se produire dans la Voie lactée, comme la supernova de Tycho, ou dans l'une de ses galaxies satellites. Cet événement est rare. Il ne sera peut-être pas donné de voir un jour une telle explosion sans l'aide d'un télescope, mais l'espoir est permis. Au cours du ^{xx}e siècle, les astronomes ont commencé à utiliser des télescopes pour chercher des supernovæ au-delà de la Voie lactée. La méthode est simple: en faisant des observations régulières de certaines galaxies, nous traquons des objets qui s'allument puis s'éteignent, des « événements astronomiques transitoires ». Avec la robotisation des télescopes et le développement de caméras très performantes, nous sommes capables de repérer des milliers de supernovæ chaque année.

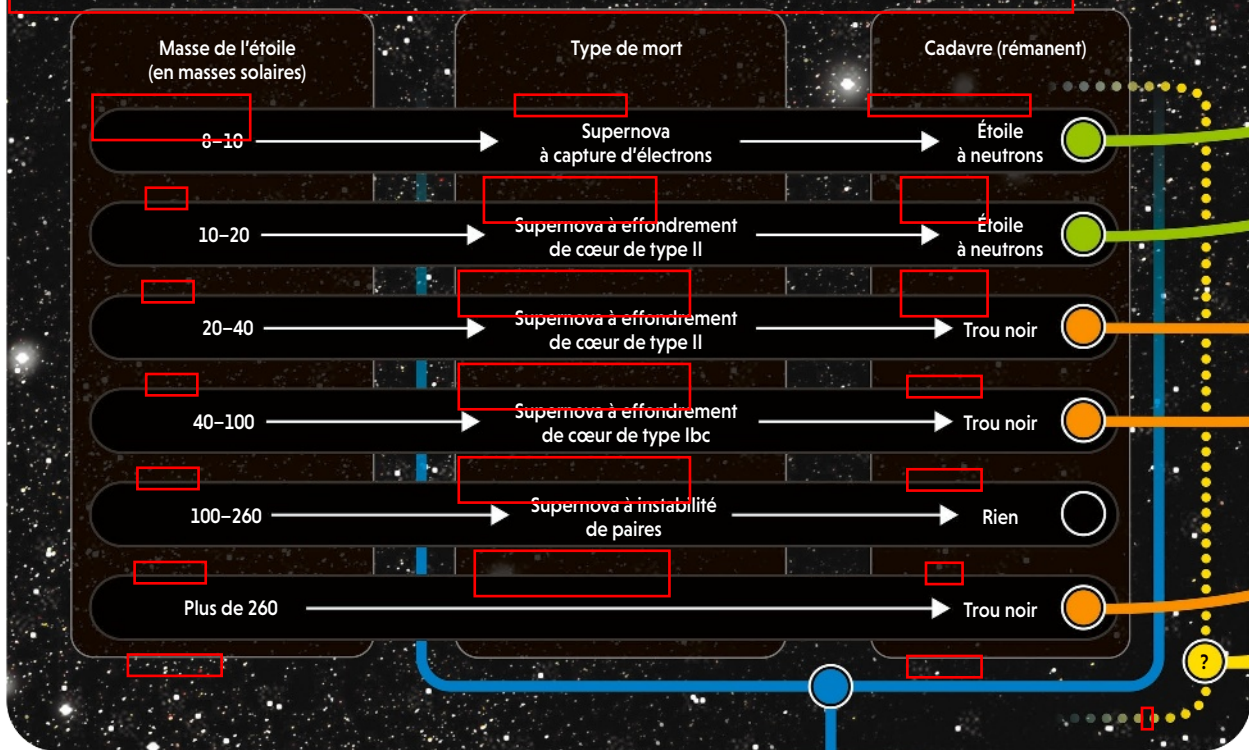
Dans les années 1960, grâce au développement de télescopes spatiaux, les astronomes ont découvert des événements astronomiques transitoires particuliers, les sursauts de rayons gamma (ou GRB, pour *gamma-ray burst*), de brèves bouffées de rayons gamma. C'est seulement dans les années 1990 que les chercheurs ont compris que ces sursauts gamma sont associés à la mort violente de certaines étoiles massives qui s'effondrent en étoiles à neutrons ou

DES SUPERNOVÆ ÉTONNANTES

Les scénarios de mort stellaire ont longtemps été simples : on pensait que la vie et le destin ultime d'une étoile dépendaient uniquement de sa masse. Mais, ces dernières années, la découverte de supernovæ atypiques a montré que l'histoire est beaucoup plus complexe que cela. Parfois, le cœur d'une étoile mourante devient un moteur qui propulse un jet puissant ou un vent qui fait exploser l'étoile avec un supplément d'énergie. Dans d'autres cas, les étoiles évacuent de la matière juste avant l'explosion fatale.

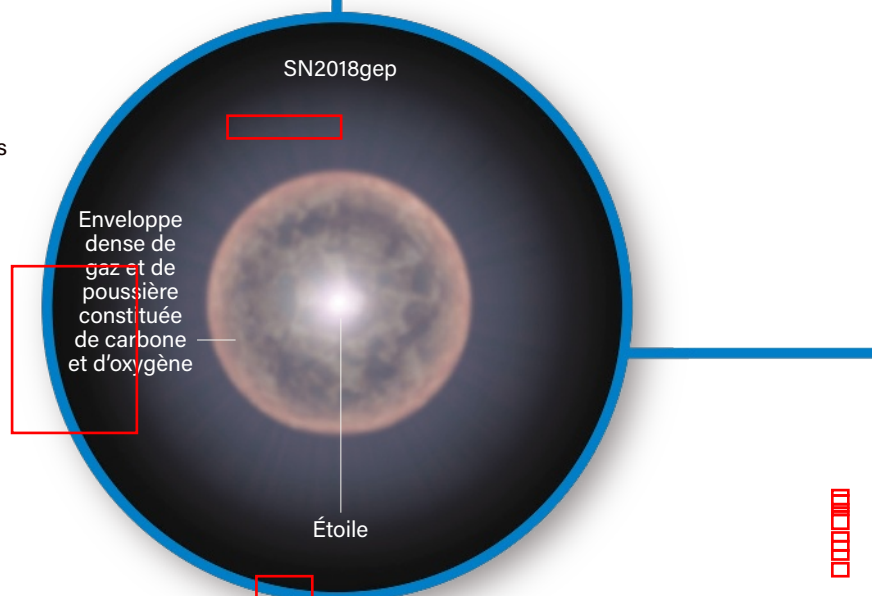
A Scénarios classiques

Jusqu'à présent, on pensait que la masse d'une étoile déterminait son destin. En fonction de ce paramètre, le type d'explosion en supernova varie et produit un vestige différent. Bien que cette représentation reste en grande partie valable, le processus s'en écarte dans quelques cas rares et produit des issues différentes (présentées dans les cercles vert, orange, bleu et jaune).



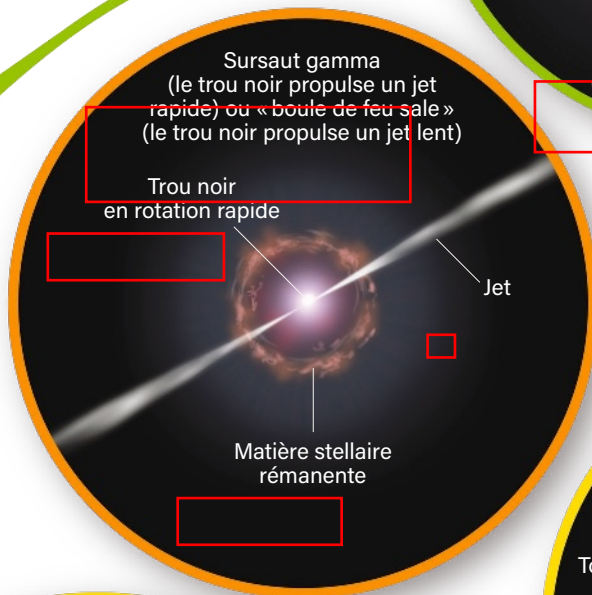
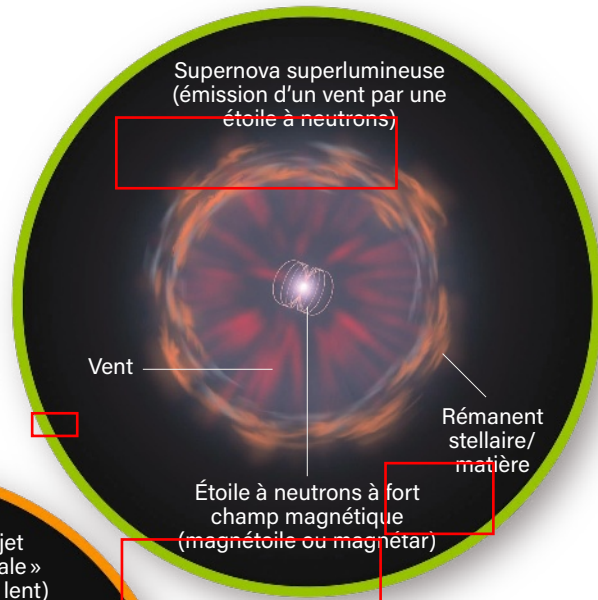
C Signes annonciateurs d'une mort imminente

Certaines étoiles massives se délesteraient d'une fraction importante de leur gaz dans les derniers jours ou dernières semaines de leur vie. Quand l'étoile explose finalement, les débris de l'explosion entrent en collision avec la matière récemment éjectée, ce qui produit un spectacle éclatant. On ignore pourquoi certaines étoiles se comportent ainsi. Peut-être est-ce le résultat d'une rotation rapide ou d'une interaction avec une autre étoile ? Peut-être cela résulte-t-il de changements dans les profondeurs de l'étoile pendant les dernières étapes de la combustion nucléaire ? L'exemple présenté ici (cercle bleu) est fondé sur la supernova récemment observée SN2018gep.



B Moteurs à explosions

Parfois, l'objet compact (une étoile à neutrons ou un trou noir) engendré par l'étoile en fin de vie reste actif et forme un moteur qui propulse un jet ou un vent puissant. Cela se produit probablement quand le cœur de l'étoile est en rotation extrêmement rapide au moment de l'effondrement. Peut-être l'étoile était-elle déjà en rotation rapide, ou bien a-t-elle pris de la vitesse par le biais d'une interaction avec un compagnon binaire ? Des exemples d'explosions de cœur sont présentés ici (cercles vert, orange et jaune).



en trous noirs. L'objet compact nouveau-né engendre un jet de matière très étroit, qui se fraie un chemin depuis le cœur à travers ce qui reste de l'étoile. Et nous pouvons observer ce jet si, par chance, il est dirigé vers la Terre.

Or la plupart des étoiles massives ne produisent pas de sursauts gamma. Des conditions particulières semblent nécessaires à la formation des jets. La plupart du temps, les étoiles épuisent leur combustible, leur cœur s'effondre en une étoile à neutrons ou un trou noir, et c'est tout. Mais dans un sursaut gamma, selon certaines théories, l'objet compact central resterait actif et deviendrait une sorte de «moteur».

plus éphémère: elle disparaît quelques heures après être apparue. Ainsi, la stratégie mise en place pour détecter une émission rémanente consiste d'abord à détecter un sursaut gamma grâce à un satellite puis à diriger différents télescopes adaptés dans la direction du sursaut.

L'inconvénient de cette approche est que nous manquons de nombreux événements. En effet, par cette méthode, nous ne voyons que des événements particuliers, où un jet s'est formé, a percé l'enveloppe stellaire et est orienté vers la Terre. Pour de nombreuses raisons, nous pourrions manquer le sursaut gamma. Par exemple, même si le jet se forme, les photons gamma émis par celui-ci n'arrivent pas toujours à s'échapper de l'étoile mourante. Ils restent piégés si la vitesse du jet est inférieure à 99,995% de la vitesse de la lumière. Mais pour atteindre de telles vitesses, le jet doit traverser l'étoile sans entraîner avec lui trop de matière.

Or, même si le jet ne perce pas l'enveloppe stellaire, il devrait malgré tout produire des émissions rémanentes. Ce type de rayonnement devrait donc être visible sans la présence de sursaut gamma, soit parce que le jet était trop lent, soit parce qu'il n'était pas dirigé vers la Terre, soit parce qu'aucun télescope ne surveillait cette partie du ciel, etc. De nombreux travaux ont été menés pour observer les émissions rémanentes sans sursaut gamma, mais avec un succès limité.

Avec les progrès des techniques d'observation, les chances de détecter ces émissions rémanentes ont augmenté. Dans le cadre de ma thèse de doctorat, entamée en 2018, j'ai entrepris de dénicher de tels événements en utilisant le *Zwicky Transient Facility* (ZTF), qui venait d'être inauguré. Ce télescope robotisé installé à l'observatoire Palomar, en Californie, est conçu pour surveiller l'apparition de points lumineux très brillants et fugaces. Mes encadrants m'avaient alors avertie que je risquais de ne pas trouver ce que je cherchais. Ils m'ont conseillé de garder l'œil ouvert, que peut-être d'autres objets atypiques se manifesteraient en chemin. Et c'est exactement ce qui s'est produit. Quand j'ai soutenu ma thèse, son contenu était très différent de ce que j'avais prévu.

LA «VACHE», UN ÉVÉNEMENT TRANSITOIRE TRÈS BIZARRE

Au début de mes travaux de recherche, j'ai écrit un programme pour repérer des phénomènes célestes dont la luminosité changerait plus rapidement que celle des supernovæ ordinaires. En une journée, mon code isolait entre 10 et 100 candidats, mais aucun ne correspondait à ce que je cherchais.

En juin 2018, quelque chose a néanmoins retenu mon attention. Un rapport du relevé astronomique robotisé Atlas (auquel participe le ZTF) faisait état d'un événement étrange noté AT2018cow. «AT» est le préfixe

AT2018cow était 10 à 100 fois plus brillant qu'une supernova ordinaire

Par exemple, le trou noir naissant pourrait se retrouver entouré d'un disque d'accrétion contenant d'importantes quantités de gaz. Ce disque aurait une durée de vie très courte et tomberait rapidement sur le trou noir, formant un jet de matière animée d'une très grande vitesse. Autre possibilité, l'effondrement pourrait donner naissance à une étoile à neutrons présentant un fort champ magnétique et une rotation rapide; on parle dans ce cas de magnétar. Le ralentissement d'un tel objet, freiné par son propre champ magnétique, libérerait aussi de l'énergie sous la forme d'un faisceau de plasma brûlant. Ce jet partirait du cœur de l'étoile et traverserait le reste de la matière stellaire qui n'a pas fini sa chute, et émettrait un rayonnement gamma intense dans l'axe du jet.

Le passage du jet à travers l'étoile entraîne son explosion en une supernova d'un type particulier, noté Ic-BL, qui est dix fois plus énergétique que les supernovæ classiques. Ensuite, le jet percute le gaz et la poussière du milieu interstellaire au voisinage de l'étoile et produit ainsi de la lumière dans tout le spectre électromagnétique; on parle d'émission rémanente. Cette dernière ne se propage pas uniquement dans l'axe des jets: elle est quasi isotrope, ce qui donne *a priori* plus de chances de la voir. Cependant, l'émission rémanente est difficile à observer car, bien que mille fois plus brillante que les supernovæ typiques, elle est cent fois

SURSAUTS GAMMA: UN FUTUR PROMETTEUR

Propos recueillis par Sean Bailly



SYLVAIN GUIRIEC

professeur à l'université George-Washington, à Washington, et chercheur au centre Goddard de la Nasa

Avec quelle fréquence détecte-t-on des sursauts gamma ?

Le télescope spatial *Fermi* détecte un sursaut tous les deux jours en moyenne. On a observé plus de 8 000 sursauts gamma depuis leur découverte dans les années 1960.

Quelles sont les sources des sursauts gamma ?

L'explosion initiale des sursauts dure typiquement de quelques millisecondes à quelques dizaines de secondes. On les classe en deux familles. Les « sursauts longs » durent plus de deux secondes et sont associés aux effondrements d'étoiles massives. Les « courts » sont déclenchés par la coalescence d'objets compacts (des paires d'étoiles à neutrons, ou un trou noir et une étoile à neutrons).

Mais, début 2021, avec mes collègues, nous avons mis en évidence que des explosions géantes de magnétars – des étoiles à neutrons en rotation rapide et à champ magnétique intense – dans des galaxies proches produisent parfois des sursauts gamma courts.

Comment les distinguer d'un sursaut de coalescence ?

Leur spectre en fréquence a une signature un peu différente de celui d'une coalescence. Mais nous n'avons pas toujours des données couvrant tout le spectre électromagnétique. Quand un événement est repéré par un satellite, l'alerte est aussitôt transmise à d'autres observatoires pour étudier l'objet dans d'autres fréquences. Mais un sursaut gamma est si bref qu'il est souvent impossible de réorienter les télescopes assez vite pour voir l'explosion initiale. Nous n'avons ainsi que quelques dizaines de sursauts observés dans le visible.

Quelle est la solution ?

La solution est d'avoir des télescopes à grand champ, qui voient à tout instant une grande portion du ciel. C'est le cas du *Zwicky Transient Factory*. Et ça sera aussi le cas du télescope *Vera-Rubin* en cours de construction. Le défi pour ce futur observatoire sera la quantité d'information collectée.

Avec quelques millions d'événements transitoires par nuit, les capacités de traitement et de stockage sont limitées. Il faut donc mettre au point des algorithmes efficaces pour sélectionner les objets les plus intéressants.

Une autre voie est la complémentarité avec les détecteurs d'ondes gravitationnelles. Par exemple, l'onde gravitationnelle GW170817 captée par les interféromètres *Ligo-Virgo* a été associée à un sursaut, ce qui indique clairement que celui-ci était le résultat d'une coalescence. Les expériences de neutrinos astrophysiques nous apporteront aussi des informations précieuses.

Enfin, de nouveaux projets d'observatoires gamma, X et infrarouge sont en préparation, tels *Gamow Explorer* (dont je suis responsable principal adjoint) du côté de la Nasa ou *Theseus* pour l'ESA. Ils permettront d'étudier les sursauts des premières étoiles de l'Univers. L'observatoire spatial franco-chinois *SVOM* prévu pour 2022 sera aussi un instrument capital pour l'étude des sources transitoires.

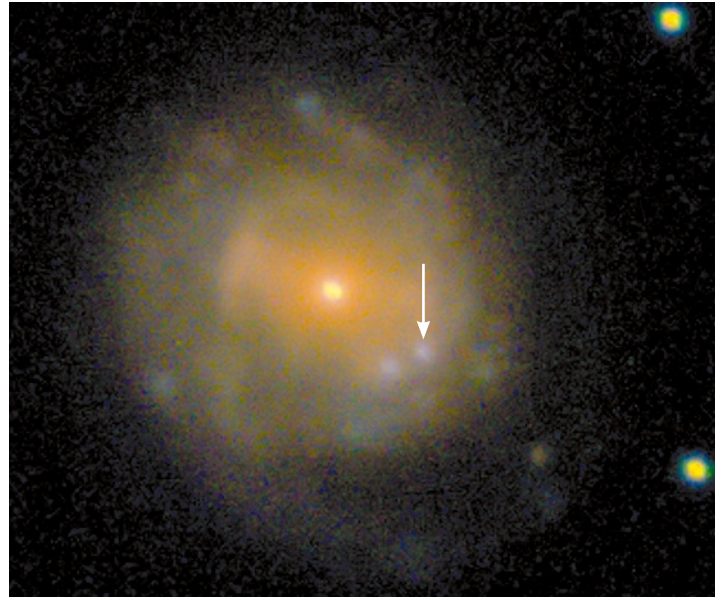
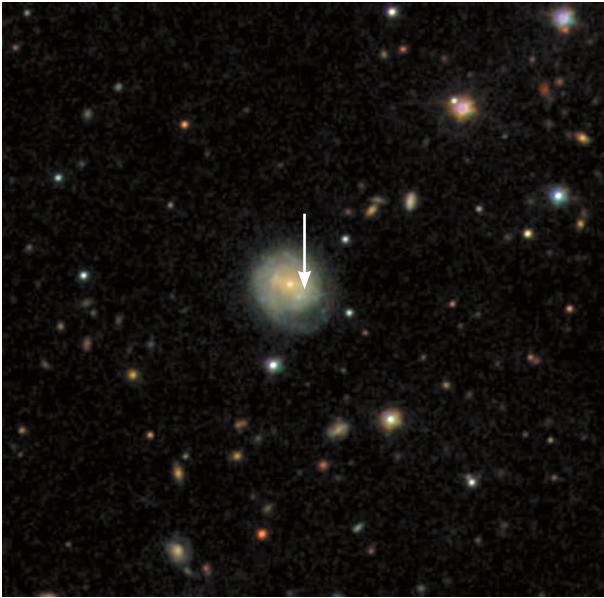
automatiquement accolé à tous les événements astronomiques transitoires, «2018» correspond à l'année de la découverte, et «cow» est une suite unique et aléatoire de lettres d'identification qui, ici, formait un mot, «vache» en anglais (il n'en fallait pas plus pour surnommer l'événement). Au début, les observations semblaient indiquer des similitudes entre cet événement et un sursaut gamma, sauf qu'il n'y avait pas eu de détection de rayons gamma. «Enfin! Je tiens une émission rémanente!» ai-je pensé. Mais la situation a rapidement changé. Parce qu'AT2018cow était si brillant (10 à 100 fois plus brillant qu'une supernova ordinaire) et si proche (à 200 millions d'années-lumière), l'objet a suscité un grand intérêt dans le monde entier. Les astronomes l'ont observé dans tout le spectre électromagnétique.

UNE EXPLOSION ATYPIQUE

AT2018cow a surpris toute la communauté. Le déroulé de l'événement était complètement différent de toutes les explosions cosmiques jamais observées. Et nous étions dans la même situation que les aveugles de la célèbre fable indienne: lorsque ces individus rencontrèrent un éléphant, ils en tâtèrent chacun une partie différente de l'animal, mais ne s'accordèrent pas sur une description commune. Ainsi, le premier en touchant la trompe la comparait à un serpent, le deuxième palpant l'oreille pensait à un éventail, pour un troisième la patte rappelait le tronc d'un arbre. De la même façon, nos diverses observations de la Vache étaient difficiles à combiner en une vision cohérente. L'explosion présentait des caractéristiques de plusieurs types de phénomènes différents. Diverses explications ont été rapidement proposées, mais sans toujours convaincre.

Mes collègues et moi avons travaillé dur pour compiler les données, afin de comprendre comment les interpréter. Certains de ces moments restent parmi mes meilleurs souvenirs de thèse: quand nous avons calculé ensemble au tableau noir les propriétés de l'onde de choc, quand un membre de l'équipe a déboulé dans le couloir en agitant une feuille avec de nouveaux résultats, ou encore quand nous avons échangé des regards ébahis à l'annonce d'une nouvelle mesure extraordinaire.

Finalement, nous avons conclu qu'il y avait deux composantes majeures dans AT2018cow. La première était un moteur central, comme dans un sursaut gamma. Mais sa longévité était bien supérieure, de l'ordre de plusieurs semaines plutôt que quelques jours, car les rayons X émanant du cœur de l'explosion ont brillé bien plus longtemps que prévu. La seconde composante était un cocon de gaz et de poussière d'environ un millième de masse solaire dont, pour une raison inconnue, l'étoile était entourée au moment de son explosion. Nos preuves de



L'événement AT2018cow, surnommé la Vache, a été 10 à 100 fois plus lumineux qu'une supernova classique. Il se serait déroulé dans la galaxie CGCG 137-068, située à 200 millions d'années-lumière (plan large à gauche, et resserré à droite). Il a été repéré grâce à des algorithmes qui comparent des images d'une même région du ciel pour détecter la formation soudaine de points brillants.

l'existence du cocon sont indirectes: quand l'étoile a explosé, nous avons vu un éclair de lumière optique et d'ondes radio qui semblait indiquer que des débris avaient heurté de la matière nimbant l'étoile. De tels cocons ont été observés dans d'autres types d'explosions, mais nous ne savons pas comment ils se forment: il se peut que cette matière soit larguée par l'étoile peu avant son explosion.

La plupart du temps, l'objet compact, une étoile à neutrons ou un trou noir, est complètement enveloppé dans ce qui reste de l'étoile; nous n'avons donc que des informations indirectes sur sa naissance. Mais si l'interprétation que nous faisons des données d'AT2018cow est correcte, le cœur stellaire qui s'est effondré était relativement visible. Pour la première fois, nous avons peut-être directement observé la formation de l'objet compact. Ces informations nous permettront de mieux comprendre comment cette naissance se produit. Il n'en reste pas moins de nombreuses questions. De quel type était l'étoile qui a explosé? Le moteur central était-il alimenté par une étoile à neutrons ou un trou noir? Pourquoi l'étoile a-t-elle expulsé de la matière peu avant d'exploser? Pour avancer, il nous fallait trouver des événements similaires. Nous avons alors entrepris de dénicher un autre AT2018cow à l'aide du relevé astronomique ZTF.

Trois mois plus tard, je pensais que j'en tenais effectivement un autre exemple avec l'explosion brillante et rapide du 9 septembre 2018, évoquée au début de l'article. Initialement, cet événement ressemblait beaucoup à AT2018cow. Mais en moins d'une semaine, il est devenu clair que nous avions là une supernova de type Ic-BL (le type associé aux sursauts gamma), notée SN2018gep.

Certes, ce n'était pas un autre AT2018cow, mais nous avions en revanche quelque chose qui s'apparentait à un sursaut gamma. En cinq jours, nous avions recueilli des observations détaillées sur tout le spectre électromagnétique. Nous avons cherché les traces d'un jet dans les données, sans succès. Mais encore une fois, cet événement présentait un comportement atypique: un rayonnement optique intense à évolution rapide, qui ne correspond pas à une émission rémanente et qui résulterait de la collision de débris d'explosion avec un cocon de matière.

DÉLESTAGE DE GAZ

Ce scénario était surprenant. D'autres types d'étoiles, comme les supergéantes rouges, émettent du gaz et de la poussière puis se retrouvent enveloppés dans des cocons, mais ces astres ne sont pas associés avec les types de supernovæ présentant des sursauts gamma. Notre découverte impliquait que davantage de types d'étoiles que nous ne le pensions sont susceptibles de larguer du gaz à la fin de leur existence.

L'étude de SN2018gep nous a permis de montrer que le gaz a été relâché dans les derniers instants de l'étoile. En effet, ce matériau se trouvait très près de l'étoile au moment de l'explosion; s'il avait été expulsé plus tôt, il aurait eu le temps de s'en éloigner davantage. L'étoile a perdu une fraction importante de son atmosphère externe dans les derniers jours ou les dernières semaines de sa vie, après avoir brillé pendant des millions, voire des dizaines de millions d'années. Ce délestage serait donc un indice annonciateur de la mort de l'étoile. Une fois de plus, il nous restait des questions. À quel point ce comportement qui précède

l'explosion est-il fréquent? Quel est le mécanisme physique qui le produit?

Mes recherches ont pris une direction inattendue. Je ne m'intéressais plus seulement aux sursauts gamma, mais aussi aux signes avant-coureurs de l'explosion des étoiles massives.

C'est seulement dans les six derniers mois de ma thèse que j'ai enfin trouvé un candidat solide pour une émission rémanente de sursaut gamma (notée SN2020blt). Le 28 janvier 2020, alors que j'examinais les événements sélectionnés par mon code, j'ai remarqué quelque chose de prometteur. La prudence était de mise (au fil des années, j'avais eu de nombreux faux espoirs). J'ai immédiatement demandé des observations complémentaires sur un télescope de La Palma, aux îles Canaries. Elles ont confirmé que cette source s'atténuait rapidement, comme on s'y attend pour une émission rémanente. Cette nuit-là, j'ai sollicité des observations urgentes sur le télescope *Hale* de cinq mètres, à l'observatoire Palomar, qui ont montré que la source continuait de s'affaiblir. La nuit suivante, j'ai obtenu des données dans la gamme des rayons X grâce au télescope spatial *Neil Gehrels-Swift Observatory*, confirmant qu'il s'agissait d'une émission rémanente de sursaut gamma. La nuit d'après encore, j'ai réussi à obtenir un bref créneau sur le télescope *Keck*, à Hawaï, dans l'espoir de mesurer la distance à laquelle s'était produite l'explosion.

Équipée d'un sac de couchage, j'ai dormi dans la salle d'observation à distance de mon université, l'institut de technologie de Californie. J'avais réglé mon réveil sur quatre heures du matin pour préparer mon observation. Celle-ci était programmée en toute fin de nuit. J'étais stressée. À une heure où le ciel s'éclaircit rapidement, allais-je obtenir des mesures suffisantes de ma source déjà assez peu lumineuse? J'ai fait au mieux, puis j'ai téléphoné à mon collègue Dan Perley, de l'université John Moores, à Liverpool, au Royaume-Uni, et nous avons examiné les données ensemble. J'avais eu de la chance. La source était faible, mais il y avait une signature évidente dans la lumière de l'événement qui nous a permis de mesurer sa distance. Quand cette étoile a explosé, l'Univers n'avait que 2,3 milliards d'années. Les photons de l'explosion ont mis 11,4 milliards d'années pour atteindre la Terre. À une telle distance, tout autre objet transitoire qu'un sursaut gamma aurait été impossible à observer.

Quelques mois après cette première émission rémanente, nous en avons trouvé une deuxième. Pour mettre cela en perspective, antérieurement à ZTF, seules trois émissions rémanentes avaient été trouvées sans l'aide de la détection du sursaut gamma associé, alors que nous en avons trouvé deux en quelques mois. Comme notre stratégie de recherche

semblait opérationnelle et efficace, nous espérons en trouver rapidement d'autres.

Pour le moment, avec deux émissions rémanentes sur lesquelles travailler, il est difficile d'apporter des réponses aux nombreuses questions qui se sont accumulées sur ce sujet. Il est même difficile de dire si une émission rémanente donnée est un sursaut gamma normal dont on aurait manqué le jet ou s'il a pu être produit par un autre type de phénomène. Il nous faudra trouver davantage d'événements avant de pouvoir dire si nous assistons à des phénomènes vraiment différents.

ÉTOFFER LE CATALOGUE

Au cours de mes travaux, nous avons découvert de nombreux types inhabituels d'explosions stellaires: AT2018cow dont nous avons peut-être vu la naissance de l'objet compact résultant; l'étrange supernova Ic-BL (le type associé aux sursauts gamma) qui s'est fracassée sur un cocon de matière mais ne présentait pas de jet; deux autres supernovæ Ic-BL qui avaient probablement des jets, mais moins énergétiques et plus larges que ceux des sursauts gamma ordinaires; et, vers la fin de ma thèse, deux véritables émissions rémanentes, dont l'une s'est révélée être associée à un sursaut gamma.

L'histoire et le destin des étoiles semblaient s'organiser suivant des catégories simples et faciles à caractériser. Mais depuis peu, la mort des astres semble suivre des chemins bien plus riches et surprenants. Pour l'instant, les astronomes sont tels des zoologistes, explorant des territoires inconnus et caractérisant les différentes espèces qu'ils rencontrent (dans mon cas, des explosions stellaires). L'étape suivante consistera à repérer des motifs caractéristiques parmi les événements atypiques que nous découvrirons. Avec quelle prévalence se produit chaque type d'explosions? Se produisent-elles dans des galaxies aux caractéristiques particulières (riches ou pauvres en éléments lourds, en poussière, etc.)? Ces différentes catégories correspondent-elles à des «espèces» vraiment différentes, ou bien sont-elles simplement des manifestations variées d'un même phénomène? Mes collègues et moi travaillons déjà sur quelques pistes impliquant la vitesse de rotation de l'étoile ou encore des interactions de l'astre avec d'autres étoiles.

Pour répondre à ces questions, nous aurons besoin d'un catalogue bien plus étoffé. D'ici à quelques années, l'observatoire *Vera-Rubin*, actuellement en construction au Chili, utilisera la plus grosse caméra numérique jamais conçue (plus de 3 milliards de pixels) pour détecter 10 millions d'événements transitoires chaque nuit. C'est dix fois plus que le ZTF. Avec un instrument aussi puissant, il sera possible de comprendre pourquoi les étoiles meurent de mille et une façons différentes. ■

BIBLIOGRAPHIE

O. J. Roberts et al., **Rapid spectral variability of a giant flare from a magnetar in NGC 253**, *Nature*, vol. 589, pp. 207-210, 2021.

A. Y. Q. Ho et al., **ZTF20aaajknsq (AT 2020blt) : A fast optical transient at $z \approx 2.9$ with no detected gamma-ray burst counterpart**, *The Astrophysical Journal*, vol. 905, article 98, 2020.

A. Y. Q. Ho et al., **Evidence for late-stage eruptive mass loss in the progenitor to SN2018gpe, a broad-lined Ic Supernova : Pre-explosion emission and a rapidly rising luminous transient**, *The Astrophysical Journal*, vol. 887, article 169, 2019.

D. Kasen, **Des kilonovæ aux ultranovæ**, *Pour la Science*, n° 474, avril 2017.

MIGUEL MONTARGÈS
est postdoctorant au Lesia
(Laboratoire d'études spatiales
et d'instrumentation en
astrophysique), à l'observatoire
de Paris et à l'université PSL (Paris
Sciences & Lettres). Il est spécialiste
des supergéantes rouges
et notamment de Bételgeuse.



L'énigme de Bételgeuse est probablement résolue

La baisse record de luminosité de l'étoile Bételgeuse en 2019 et 2020 a suscité un vif intérêt, certains imaginant que l'astre était sur le point de se transformer en supernova. Il n'en est rien. L'astrophysicien Miguel Montargès nous raconte comment, avec ses collègues, il a réussi à expliquer ce phénomène exceptionnel.

Pourquoi Bételgeuse est-elle une étoile si médiatique ?

Dans le ciel, Bételgeuse ne passe pas inaperçue. Elle appartient à la constellation d'Orion que l'on reconnaît inmanquablement grâce à sa ceinture, composée de trois étoiles alignées. De part et d'autre de cette dernière, on trouve deux étoiles très brillantes, une bleue, Rigel, et une rouge, Bételgeuse.

Bételgeuse est, après Antarès, la deuxième supergéante rouge la plus proche du Soleil.

Comme Antarès se situe plus près du centre galactique, elle est cernée de nombreuses autres étoiles. Elle est donc un peu plus difficile à repérer. Bételgeuse, plus isolée, se détache parfaitement dans le ciel nocturne. Elle brille dans l'infrarouge aussi intensément que Vénus dans le visible. Les astronomes, professionnels et amateurs, ont ainsi une affection particulière pour cette étoile. Alors, quand il lui arrive un événement extraordinaire comme une chute importante de sa luminosité, cela attire nécessairement l'attention.

On parle d'une étoile proche, mais à quelle distance se trouve-t-elle exactement ?

De façon étonnante, on connaît assez mal cette distance. Quand une étoile est proche, on utilise la technique de la parallaxe. Pour comprendre le principe de cette mesure, tendez un bras devant vous avec le pouce dressé. Regardez-le avec l'œil gauche, puis avec l'œil droit. Le doigt semble bouger par rapport à l'arrière-plan fixe. Avec la mesure de ce « déplacement », ou parallaxe, et un peu de trigonométrie, il est possible de calculer la distance entre vos yeux et le pouce. Avec les étoiles, on utilise la même approche, les deux yeux étant remplacés par votre télescope sur Terre, ou en orbite, à six mois d'intervalle, donc à deux positions opposées lors de la révolution de la planète autour du Soleil. Cette technique fonctionne pour les étoiles les plus proches, car plus elles sont lointaines, plus la parallaxe est faible et difficile à évaluer.

Pour Bételgeuse, cette méthode devrait donner de bons résultats, *a priori*. Il n'en est rien... Pour une raison étonnante : la parallaxe est inférieure au diamètre de l'étoile ! La plupart des astres sont juste des points, même quand on les observe avec des instruments puissants. Bételgeuse est si grosse (son diamètre est équivalent à 1000 fois celui du Soleil) et si proche qu'on ne peut pas la considérer comme un point. Par ailleurs, sa surface est soumise à d'importantes fluctuations et il est difficile de définir son centre. Par conséquent, l'incertitude est grande dans le calcul de sa parallaxe.

Le satellite *Hipparcos*, dédié à des mesures de parallaxes, a permis d'obtenir une distance d'environ 520 années-lumière, avec une incertitude de 73 années-lumière. Malgré sa

précision plus élevée, le successeur d'*Hipparcos*, *Gaia*, ne peut malheureusement pas mesurer la

parallaxe de Bételgeuse... car cette dernière est trop brillante pour la caméra du satellite ! En 2018, Graham Harper, de l'université du Colorado, et ses collègues ont réalisé une mesure de parallaxe avec des radiotélescopes. Ils ont obtenu une distance de 724 années-lumière. C'est la valeur que j'utilise en général. Plus récemment, en 2020, Meridith Joyce, de l'université australienne de Canberra, et ses collègues ont proposé une méthode originale. Ils ont utilisé des modèles d'hydrodynamique stellaire pour évaluer de façon indépendante cette distance à 548 années-lumière, mais les incertitudes restent importantes.

Quand on travaille avec cette étoile, il faut garder en tête ce problème de la mesure de la distance. Ces incertitudes se propagent à toutes les autres grandeurs que l'on voudrait déterminer : la luminosité, la température, etc.

Si Bételgeuse n'est pas un point, est-il possible d'avoir une image de sa surface ?

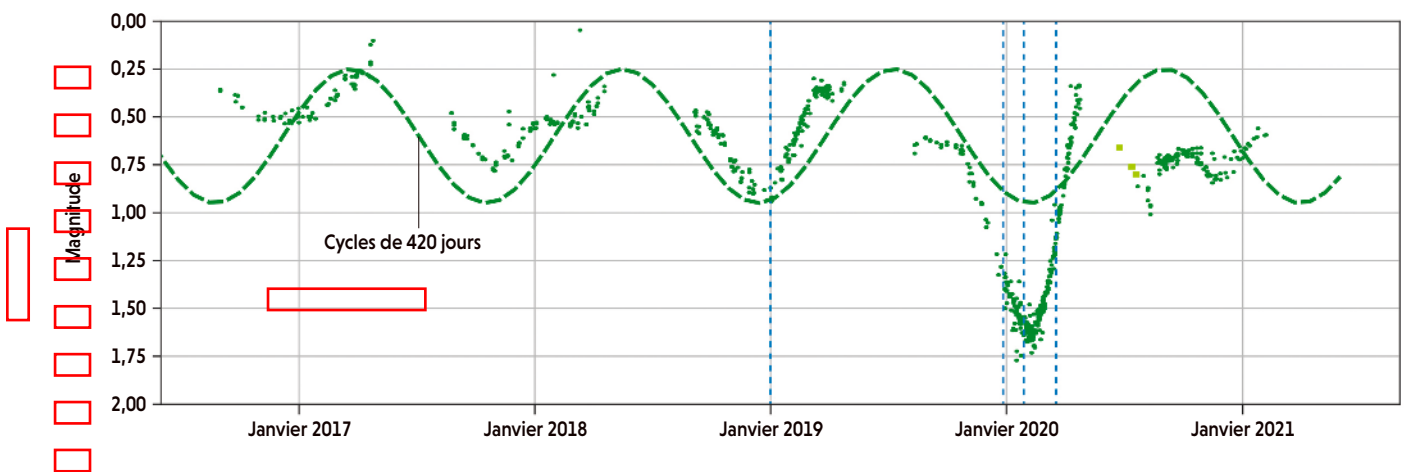
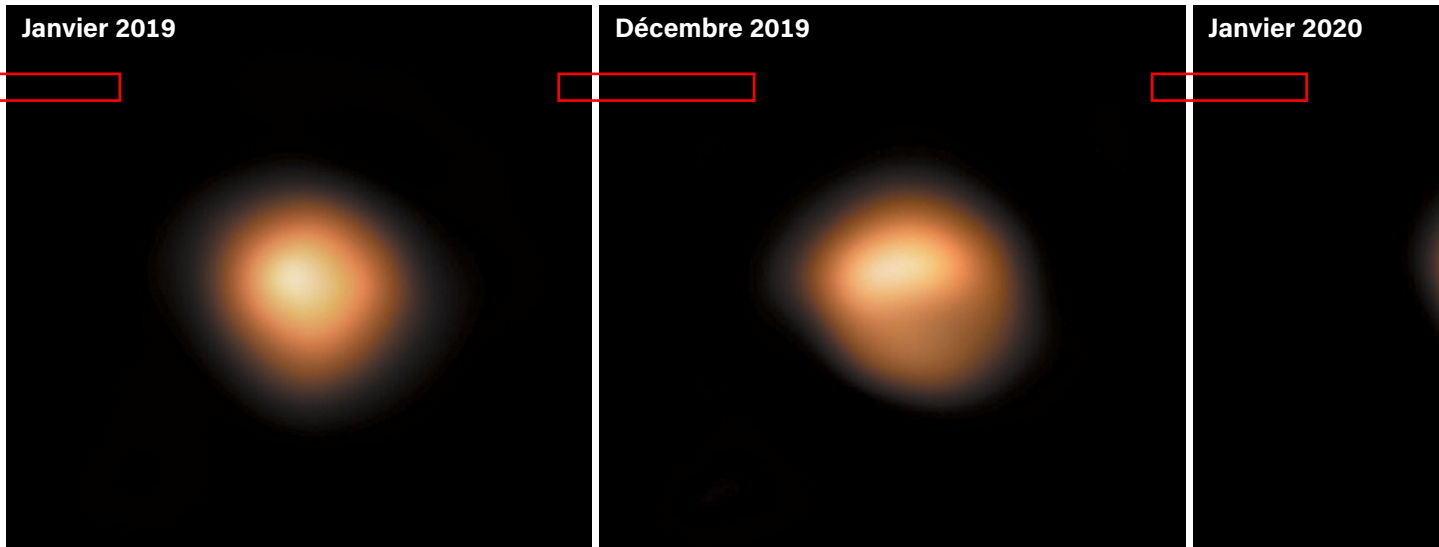
Bételgeuse nous offre effectivement cette chance quasi unique : nous pouvons obtenir une image de sa surface grâce aux techniques d'interférométrie des plus grands télescopes, tels le VLT (*Very Large Telescope*) et Alma (*Atacama Large Millimeter Array*). Cette étoile est donc un laboratoire idéal pour étudier les supergéantes rouges.

Que sont ces supergéantes rouges ?

Dans cinq milliards d'années, lorsque le Soleil épuiera son carburant, la fusion de l'hydrogène ne sera pas suffisante pour maintenir l'équilibre de l'étoile, qui commencera à se contracter sur elle-même. De nouvelles réactions de fusion s'enclencheront et conduiront à voir le rayon de l'astre enfler jusqu'à environ l'orbite de la Terre. Le Soleil sera alors une géante rouge.

Suivant un schéma similaire, les supergéantes rouges sont le destin d'étoiles beaucoup plus massives que le Soleil, des géantes bleues (de 10 à 40 masses solaires). Ces dernières consomment très vite leur hydrogène et ont une durée de vie très courte, de l'ordre de 10 à 100 millions d'années. Elles deviennent alors des supergéantes rouges. Puis, quand ces astres épuisent à leur tour leur carburant, ils explosent en supernovæ (voir l'article pages 24 à 33). Leur cœur s'effondre et forme une étoile à neutrons ou un trou noir, selon la masse finale de la supergéante rouge.

Or les supergéantes rouges perdent beaucoup de matière au cours de leur vie sous la forme d'un important vent stellaire. Bételgeuse expulse chaque année l'équivalent de 10^{-6} masse solaire, mais on estime qu'elle contient encore 98% de la masse de la géante bleue dont elle est issue. Par exemple, VY Canis Majoris perd en



Grâce à l'instrument *Sphere* du VLT, Miguel Montargès a photographié la surface de Bételgeuse avant et durant la baisse de luminosité, en janvier et décembre 2019, puis en janvier et mars 2020. La tache en bas à droite est probablement un nuage de poussière émis par l'étoile dans la ligne de visée. En janvier 2020, l'étoile semble complètement voilée. Le suivi de la luminosité de l'étoile sur plusieurs années (*graphique*) montre que les variations respectaient un cycle d'environ 420 jours. Après la grande baisse de 2019-2020, l'évolution est beaucoup moins régulière.

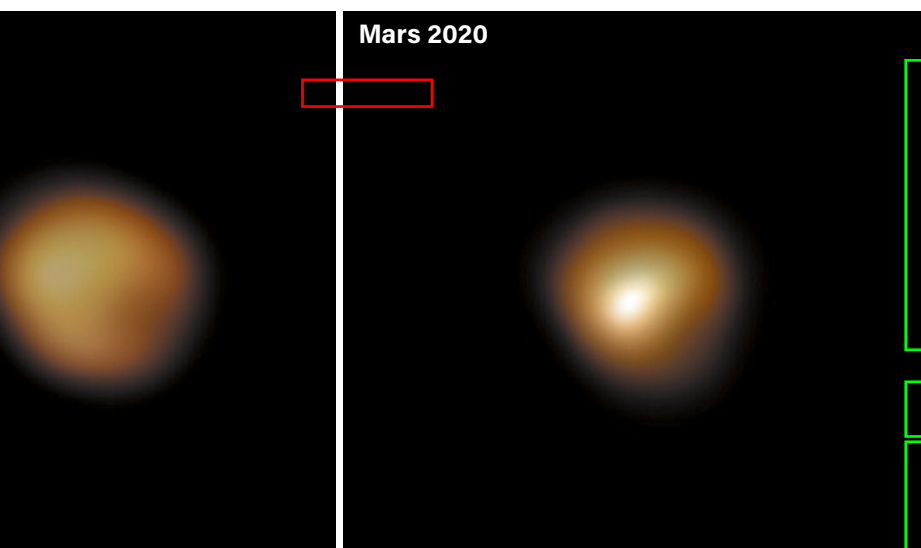
moyenne 6×10^{-4} masse solaire par an et aurait déjà cédé 30% de sa masse initiale.

Dans cette famille d'étoiles, la perte de masse est le moteur essentiel de leur destin. Elle influe sur les caractéristiques de la supernova et sur la formation finale d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons. Cependant, nous comprenons très mal les mécanismes en jeu et comment ces étoiles peuvent se défaire de jusqu'à 60% de leur masse avant d'exploser. Une fois que le gaz s'est échappé de la surface et a commencé à se condenser en poussières, on sait expliquer comment la pression de radiation le pousse et contribue au vent stellaire. Mais comment la matière quitte-t-elle la surface? Plusieurs phénomènes interviennent dont il reste à préciser le rôle. Le gaz chauffé en profondeur remonte en surface où il se refroidit, puis s'enfonce de nouveau vers l'intérieur de l'astre. Sur Bételgeuse, ces mouvements de convection sont importants et pourraient mener à une perte de matière. En outre, la gravité au niveau de la surface est assez faible.

Encore plus étonnant, on sait depuis les années 1960 que certaines supergéantes rouges

peuvent subir une «cure de jouvence» et revenir au stade de géante bleue. Ce retour en arrière est probablement lié à la composition chimique du cœur de l'étoile et se déclenche quand l'astre a expulsé une certaine quantité de matière. La géante bleue peut ensuite reprendre une évolution normale et devenir une supergéante rouge et exploser en supernova. Mais elle peut aussi exploser au stade de géante bleue ou dans un stade intermédiaire de supergéante jaune.

Les supergéantes rouges sont un maillon important dans l'évolution cosmique globale. Ces étoiles produisent beaucoup d'éléments lourds comme l'oxygène, le silicium, etc., qu'elles expulsent avec le vent stellaire ou lors de la supernova. Ces gaz, en se refroidissant, se condensent et forment de la poussière (tels des silicates et des alumines), la fameuse «poussière d'étoiles» dont nous sommes tous constitués. Les volumes de poussière engendrés sont gigantesques; VY Canis Majoris en a tellement relâché qu'elle se cache derrière un épais cocon opaque. Bételgeuse présente un environnement encore transparent qui permet d'observer sa surface.



Quand avez-vous commencé à travailler sur les supergéantes rouges ?

Mon sujet de thèse, sous la direction de Pierre Kervella, au Lesia, à Meudon, était déjà focalisé sur Bételgeuse. Je continue d'étudier les supergéantes rouges. C'est d'ailleurs pour comprendre les mécanismes de perte de masse de ces astres que j'étais pendant le Nouvel An 2018-2019 au VLT, pour prendre des clichés de Bételgeuse. J'ai utilisé l'instrument *Gravity* pour observer les cellules de convection à la surface de l'étoile et l'instrument *Sphere* pour explorer la poussière émise dans l'environnement stellaire proche. Grâce à son optique adaptative, *Sphere* a une résolution angulaire supérieure au télescope spatial *Hubble*, ce qui permet d'étudier finement la distribution de la poussière. Le principe de l'optique adaptative repose sur un miroir qui se déforme en temps réel et corrige les perturbations induites par les turbulences de l'atmosphère. À cette époque, Bételgeuse semblait se comporter normalement.

Que s'est-il passé ensuite ?

En novembre 2019, des astronomes ont commencé à noter que la luminosité de Bételgeuse diminuait vite et était plus basse que prévu. Je n'étais pas trop surpris. L'étoile a une luminosité variable, qui suit des cycles assez réguliers de 400 et 2000 jours. Pour moi, nous étions sur une baisse du cycle court modulée par celle du cycle long : la conjonction des deux cycles pouvait très certainement expliquer une atténuation plus importante que lors des baisses précédentes.

Quelle est l'origine de ces cycles ?

Bételgeuse est une étoile variable semi-régulière marquée par un comportement périodique parfois interrompu par des irrégularités.

Sa luminosité oscille suivant un cycle de 400 jours environ. L'origine de ces cycles n'est pas complètement comprise. Les explications avancées sont liées à la durée de vie des cellules de convection et de possibles pulsations du cœur de l'étoile. Mais les spécialistes ne s'accordent pas sur la façon dont ces phénomènes agissent et se traduisent par des cycles. Nous sommes vraiment loin de bien appréhender ces supergéantes rouges !

Cette baisse de luminosité Bételgeuse était-elle néanmoins particulière ?

En janvier 2020, la luminosité de l'étoile a diminué d'un facteur 2,5 par rapport à sa valeur moyenne. Cette baisse était un record, du jamais vu. Et cela se voyait à l'œil nu. Comparée à Rigel, dans la constellation d'Orion, Bételgeuse semblait très faible.

En 2009, lors d'une précédente baisse de luminosité assez marquée, un collègue astronome avait été interviewé et avait mentionné que la fin de l'étoile était « proche »... Aux échelles astrophysiques, cela signifie qu'elle n'allait pas exploser avant 10000 ans ! Je pense que le message avait été mal compris et certains médias ont titré qu'une supernova était imminente. La baisse de fin 2019-2020 a probablement relancé cette confusion.

D'une certaine façon, je rejoins cet enthousiasme. Il n'y a pas eu de supernova dans la Voie lactée depuis 400 ans, depuis qu'on a des instruments d'une grande précision pour les étudier. Une telle explosion serait un événement historique pour les astrophysiciens. Malheureusement, Bételgeuse n'explosera pas demain.

Quelle a été votre réaction face à cette fausse idée de supernova ?

Constatant l'enthousiasme des médias et du grand public pour cette histoire, j'ai proposé de faire une nouvelle observation de Bételgeuse au VLT. Mon intention était de montrer qu'il ne se passait rien d'anormal, en dehors des fameux cycles de l'étoile responsables d'un assombrissement de sa surface. La meilleure solution était donc de prendre un cliché à haute résolution angulaire de l'astre. Ma demande d'observation a été acceptée et réalisée le 27 décembre 2020. Et j'ai été surpris par le résultat !

Que montrait l'image ?

Dans le domaine visible, la partie en bas à droite de l'étoile était presque dix fois plus sombre que le reste de la surface (voir les photos ci-dessus). Il se passait donc quelque chose d'exceptionnel, contrairement à ce que je pensais. La publication de cette image a encouragé de nombreux chercheurs à se pencher sur les différentes explications possibles pour comprendre ce phénomène. Sur les quatre pistes principales, deux ont été écartées assez vite.

Lesquelles ?

On peut imaginer qu'une dilatation ou une contraction de l'astre influe sur son activité et sa brillance. Mesures ont montré que Bételgeuse n'avait pas sensiblement changé de taille.

Un nuage de poussière passant devant la ligne de visée aurait aussi pu expliquer le phénomène observé. Un nuage interstellaire est peu probable, mais un nuage circumstellaire, c'est-à-dire un nuage qui évolue en orbite autour de Bételgeuse, est un bon candidat. L'étoile, qui expulse beaucoup de poussière, est entourée d'un grand nombre de ces nuages (voir l'image ci-contre). Cependant, si le responsable était un tel amas de gaz et de poussière, la tache obscure devrait se déplacer à la surface des images et masquer progressivement différentes régions. Or ce n'est pas le cas.

Quelles sont les autres explications possibles ?

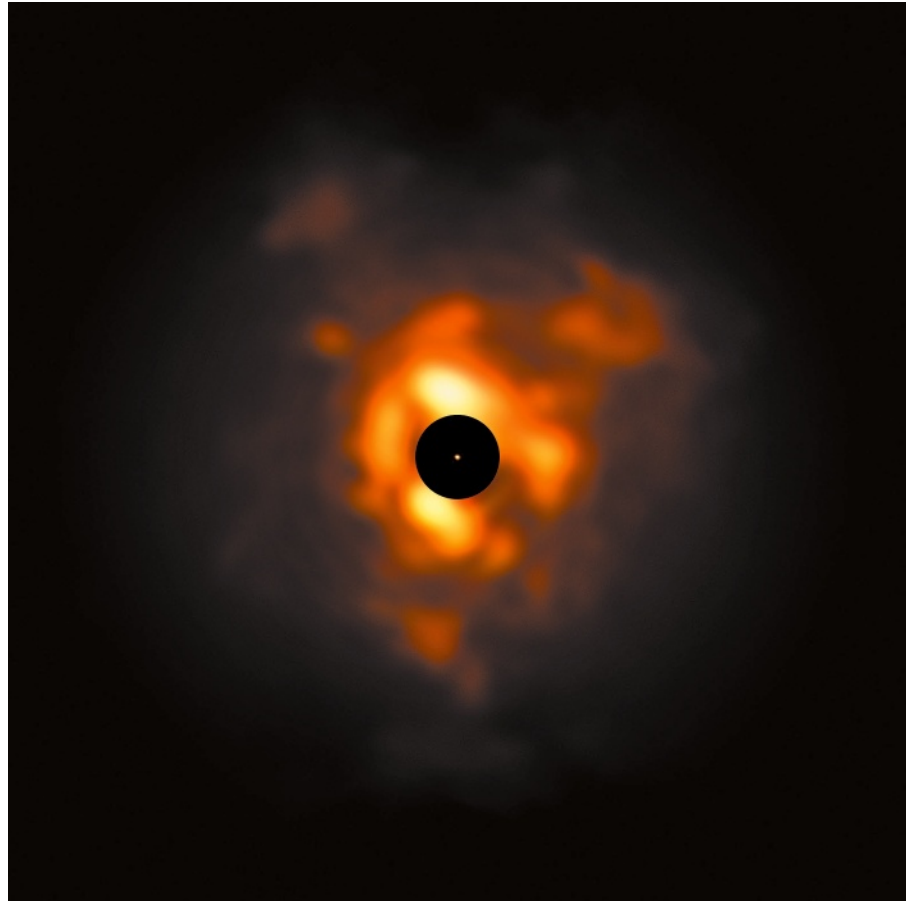
L'assombrissement d'une cellule de convection de Bételgeuse pourrait expliquer cette baisse de luminosité. Sur cette étoile, les cellules de convection sont très grandes, avec des tailles de l'ordre de 60% du rayon de l'étoile. Ces dimensions sont contrôlées par l'intensité de la gravité à la surface. Dans une étoile où cette force est plus importante, le gaz retombe plus vite. Ainsi, dans le cas du Soleil, les cellules de convection sont petites, de l'ordre de 1 000 kilomètres de largeur.

En 2018, avec des collègues, nous avons mesuré par spectropolarimétrie que la vitesse d'élévation du gaz par convection sur Bételgeuse est d'environ 22 kilomètres par seconde. Mais une bulle de gaz très chaude pourrait arriver un peu plus vite et s'élever légèrement plus haut que d'habitude par rapport à la surface. Le gaz se refroidirait alors davantage. Or, en se refroidissant, la cellule convective devient plus sombre. On aurait donc une grande région de luminosité plus faible à la surface de l'étoile. Ce scénario est compatible avec le fait que la baisse de luminosité de Bételgeuse soit survenue 424 jours après le précédent minimum. Une pulsation de l'étoile a probablement émis une bulle de gaz très chaud vers la surface.

Le dernier scénario s'appuie sur la même idée que le précédent. Le gaz très chaud est arrivé si vite à la surface qu'il se serait libéré de l'attraction de l'étoile. Il aurait formé un nuage qui se serait éloigné de l'astre. En se refroidissant au-dessous de 2000 kelvins, une partie du gaz se serait condensée en poussière opaque, occultant une fraction de la surface de l'étoile.

Comment départager ces deux scénarios ?

C'est assez difficile. Il faut faire une modélisation précise du phénomène afin de rendre compte de toutes les mesures dont nous



Prise grâce à l'instrument Visir du VLT, cette image montre le rayonnement infrarouge thermique émis par la poussière qui entoure Bételgeuse (le disque noir occulte l'étoile et sa proche périphérie trop brillante; l'image de l'astre obtenue avec *Sphere* a été rajoutée au centre, à la même échelle). L'étoile expulse en effet de grandes quantités de matière dans son environnement.

disposons. La situation était assez confuse, plusieurs équipes ont publié des conclusions contradictoires. Pour certains chercheurs, les données s'expliquaient sans la présence de poussière. Pour d'autres, c'était le contraire. Pour avoir une réponse définitive, j'avais dans l'idée de demander du temps d'observation sur le radiotélescope *Alma*, qui avait prévu d'opérer dans sa configuration étendue en juin-juillet 2020.

Ce radiotélescope est constitué de 66 antennes d'un diamètre compris entre 7 et 12 mètres. Elles fonctionnent de concert en faisant interférer leurs signaux. Grâce à cette technique, on simule l'équivalent d'un télescope géant.

Un avantage d'*Alma* est que les antennes sont mobiles. On peut alors les installer dans une configuration très resserrée, ou au contraire très étendue où les antennes sont écartées de 16 kilomètres. Dans cette dernière configuration, une bonne résolution de la surface de Bételgeuse est atteignable.

Le radiotélescope *Alma* est très sensible à la présence de gaz. Si l'origine du phénomène était un nuage de poussière et de gaz qui s'éloignait de Bételgeuse quasiment selon notre ligne de visée, nous devrions pouvoir mesurer avec *Alma* l'effet Doppler de ce mouvement. Le spectre de la lumière émise par le gaz serait décalé vers le bleu, le nuage se déplaçant vers

nous. Malheureusement, la pandémie de Covid-19 a déjoué mes plans.

Que s'est-il passé ?

Pour protéger les équipes et lutter contre la propagation du virus, la plupart des grands observatoires dans le monde ont fermé. Le VLT a cessé ses opérations le 24 mars 2020. Par chance, j'ai eu du temps d'observation juste trois jours avant la fermeture. En revanche, *Alma* a fermé le 19 mars et je n'ai pas pu réaliser la mesure que j'espérais.

Cette décision était évidemment la bonne. Mais pour Bételgeuse, le temps était compté.

Si le phénomène était dû à un nuage de poussière, celui-ci allait finir par sortir de la ligne de visée et, en grossissant, il allait se diluer et devenir quasi invisible pour nos instruments. Il me restait donc à travailler sur la modélisation du nuage.

En quoi consiste-t-elle ?

Il s'agit d'une simulation du transfert radiatif de la poussière. Le nuage est chauffé par le rayonnement de l'étoile, et diffuse alors la lumière vers la Terre. En modélisant l'astre et le nuage, on reconstruit l'image qu'on aurait en les observant depuis la Terre et on compare aux données. La difficulté vient du nombre de paramètres : la position du nuage, sa taille, sa composition, la taille des grains de poussière, etc. J'ai ainsi évalué des milliers de scénarios, chacun prenant une heure de temps de calcul dans le centre informatique de mon laboratoire de l'époque, l'institut d'astronomie de la KU Leuven, en Belgique. J'ai aussi simulé le cas d'une tache froide localisée à la surface de l'étoile, sans poussière, comme le suggérerait l'étude de Thavisha Dharmawardena, de l'institut Max-Planck d'astronomie, à Heidelberg, en Allemagne, et ses collègues. Mais le nuage de poussière semble mieux rendre compte des observations.

Le nuage, sphérique, aurait un rayon compris entre 675 et 900 millions de kilomètres (soit à peu près le rayon de Bételgeuse), une masse de poussière de l'ordre de $3 \text{ à } 13 \times 10^{-10}$ masse solaire et 200 fois plus de gaz. L'énigme de Bételgeuse est ainsi probablement résolue. Mais dans l'espoir de confirmer ce scénario, de nouvelles observations sont en cours (et d'autres, en préparation) pour voir s'il est encore possible d'apercevoir la trace de ce nuage de poussière. Mais sa non-détection ne permettra pas pour autant de disqualifier cette explication.

Que nous apprend cet épisode exceptionnel sur les supergéantes rouges ?

C'était un événement incroyable pour comprendre la perte de masse de ces étoiles. Nous savons qu'elles évacuent de la matière en continu grâce au vent stellaire. Et nous nous doutions qu'elles pouvaient aussi expulser de

façon épisodique de grandes quantités de gaz et de poussière, comme cela serait le cas ici. Le nuage de la modélisation représente entre 35% et 128% de la perte moyenne annuelle de Bételgeuse. Dans mon programme d'observation de janvier 2019, un de mes objectifs était justement de voir des expulsions radiales de nuages de poussière. D'en avoir eu une quasiment dans la ligne de visée est un événement inespéré. Quelles étaient les chances d'assister à un tel phénomène ?

Un nuage de poussière expulsé par l'astre aurait occulté une fraction de sa surface

La courbe de luminosité de Bételgeuse signalerait-elle une prochaine surprise ?

Après la grande baisse de 2019-2020, la luminosité est remontée très vite et a atteint un maximum beaucoup plus tôt que ne le prévoit le cycle de 400 jours. Attendu pour octobre-novembre, le maximum s'est produit en juillet ! Il était donc important de continuer d'examiner Bételgeuse. Problème : quand le Soleil se retrouve sur la ligne de visée en juin et juillet, nous ne pouvons plus voir Bételgeuse.

Pour pallier cette interruption dans le suivi, des collègues ont tenté d'utiliser le rover martien *Curiosity*, mais cela n'a pas fonctionné. Andrea Dupree, du centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, a utilisé l'un des satellites *Stereo*. Ceux-ci étudient les interactions Soleil-Terre avec l'un situé en avance et l'autre en retard sur l'orbite terrestre. Ils offrent ainsi un point de vue différent pour observer Bételgeuse. Les mesures de luminosité de Bételgeuse obtenues par *Stereo* ont montré un nouveau décrochage rapide. Quand le suivi a repris depuis les instruments sur Terre, la courbe de luminosité était assez erratique, même si l'on a l'impression qu'un retour à la normale se profile (voir la figure page 36). Il est encore trop tôt pour interpréter ce comportement. Est-il lié à la grande baisse qui a précédé ? Mes collègues et moi y travaillons déjà !

PROPOS RECUEILLIS
PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

M. Montargès et al., **A dusty veil shading Betelgeuse during its great dimming**, *Nature*, en ligne le 17 juin 2021.

A. Dupree et al., **Spatially resolved ultraviolet spectroscopy of the great dimming of Betelgeuse**, *The Astrophysical Journal*, vol. 899, article 68, 2020.

T. E. Dharmawardena et al., **Betelgeuse fainter in the submillimeter too : an analysis of JCMT and APEX monitoring during the recent optical minimum**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 897, article L9, 2020.

G. M. Harper et al., **An updated 2017 astrometric solution for Betelgeuse**, *The Astronomical Journal*, vol. 154, article 11, 2017.

Préparer la mobilité électrique

La croissance du nombre de véhicules électriques sur les routes nécessite d'anticiper le développement de nouveaux équipements, comme les bornes de recharge rapide à haute puissance, et les profils de consommation liés à ces nouveaux usages. Pour cela, Enedis mise sur la simulation, l'expérimentation et l'étude du comportement des usagers.

Trouver une prise. Si cet impératif reste encore étranger à bon nombre d'automobilistes, il devrait s'imposer dans les années à venir. En 2020, malgré la crise de l'industrie automobile suite au Covid-19, la vente de véhicules électriques a progressé de 180% par rapport à 2019. Ce qui représente près de 194 000 nouveaux véhicules électriques ou hybrides rechargeables sur les routes. Selon certains scénarios établis par la Commission de régulation de l'énergie, ils seront 15 millions en 2035... Pour les gestionnaires du réseau d'électricité, il s'agit de faire face.

«L'augmentation de la consommation due à la mobilité électrique ne devrait pas excéder 10% en 2035, par rapport à aujourd'hui», selon Mona Mahmoud, cheffe de projet mobilité électrique au sein d'Enedis. Cela ne fera donc pas s'effondrer le réseau. Pourtant, il est impératif d'accompagner ce changement: en tant que principal distributeur d'électricité (95% du territoire), nous jouons

un rôle clé dans le déploiement des infrastructures de recharge en assurant leur raccordement et leur alimentation continue. Notre objectif est donc de prévoir, grâce notamment à notre R&D, les renforcements du réseau là où ils sont nécessaires de manière à ne pas risquer de freiner, mais au contraire être un facilitateur et accélérateur de la mobilité électrique.»

MULTIPLES PRISES

Le défi est d'autant plus complexe que les modalités de ce déploiement comportent de nombreux paramètres: ajouter que quelques bornes de recharge rapide ici et là ne suffira pas! Déjà, il existe plusieurs types de prises. À domicile, où interviennent 80% des recharges des particuliers, il est possible de se brancher sur une prise classique (1,8 kW – 8 A) à condition de pouvoir attendre au moins huit heures pour récupérer 80% d'autonomie. C'est ce que font 43% des utilisateurs aujourd'hui. L'autre solution consiste à recourir à une prise

renforcée (3,7 kW – 16 A), voire à une borne de recharge dite «wallbox» (7,4 kW – 32 A), qui permet de diviser le temps de charge par deux ou par quatre. Sur autoroute, la problématique est différente. La vitesse de recharge est prépondérante, les automobilistes n'étant pas disposés à rester branchés durant des heures. Il faut ainsi nécessairement installer des bornes de recharge rapide.

Préparer la mobilité signifie donc qu'il faut anticiper la pose de ces nouvelles bornes aux caractéristiques variées ainsi que leur consommation, en respectant la règle de base du système électrique: la production doit toujours s'ajuster à la demande. Pour Régis Le Drezen, chef de département à la direction du développement, de l'innovation et du numérique d'Enedis, «c'est une révolution comparable à ce que l'on a vécu dans les années 1980 avec l'arrivée du ballon d'eau chaude, un équipement très gourmand en électricité. Les



distributeurs sont concernés de manière directe lorsqu'il faut installer des bornes sur la voirie par exemple, et indirecte avec la hausse de la consommation des particuliers qui rechargent chez eux. Dans les deux cas, le grand enjeu est d'anticiper au mieux les évolutions afin d'identifier les infrastructures nécessaires et d'en chiffrer le coût.»

15 H DE TEMPS DE CALCUL...

Pour cela, il est nécessaire de mettre au point des outils de calculs afin de simuler cette arrivée de véhicules électriques sur le réseau. «Le réseau ne voit pas des véhicules mais des points de charge, précise Florence Robin, ingénieure études réseau chez Enedis. Et chaque point se caractérise par un profil de charge représentant la puissance consommée en fonction du temps. Nous devons donc simuler, pour différents types de réseaux (urbain dense, rural, zone industrielle...), l'évolution de ces points de charge et de leur profil durant les quinze prochaines années. Et ainsi prévoir les raccordements nouveaux, et les renforcements qui seront nécessaires.»

Pour y parvenir, il a fallu adapter des outils de calculs préexistants à ce nouvel usage, avec deux difficultés majeures. «Les courbes de charge sont très variées, détaille Florence Robin. Il n'y a en réalité pas de réseau type,

même en ville. Sans compter que le comportement des automobilistes variera considérablement selon les zones d'habitation. Il faut donc faire des simulations sur un nombre de réseaux significatifs, afin d'avoir une idée de l'impact au niveau de la maille nationale.»

Autre difficulté: certaines prises, comme les wallbox, ou les stations de recharge ultrarapide Ionity, demandent une grande puissance (jusqu'à 350 kW), avec un fort impact potentiel sur le réseau. Or, une prise est forcément très localisée, et les conséquences de sa consommation varieront selon son emplacement, si elle est située dans une maison, ou bien avec d'autres, sur un parking par exemple. Cela oblige à une grande précision dans les modélisations. «Pour certains réseaux, nous sommes allés jusqu'à quinze heures de temps de

calcul d'ordinateur contre trois heures et demie habituellement, illustre Florence Robin. Mais au final, nous avons déterminé un échantillon de réseaux représentatifs pour notre problématique. Pour chaque réseau, il a fallu modéliser l'impact de ces nouveaux points de charge et de leur consommation sur la distribution en fonction du temps. Nous nous sommes appuyés sur différents scénarios de développement de la mobilité électrique réalisés par la Direction de la Stratégie d'Enedis ainsi que sur de nombreux rapports et enquêtes publics qui nous ont apporté les données nécessaires sur les habitudes de recharge des usagers, les performances des voitures, la présence d'entreprises dotées d'un parc de véhicules électriques... Les paramètres sont nombreux, et variables.»

Difficulté supplémentaire: toutes ces simulations seraient remises en cause en

Il n'y a pas de réseau électrique type, même en ville: le comportement citadin varie considérablement d'une région à l'autre

LES AUTOROUTES FACE AUX DÉFIS DES POIDS LOURDS ÉLECTRIQUES ET DE LA MOBILITÉ LONGUE DISTANCE

En avril 2019, le Parlement européen a décidé, dans le cadre du **Clean Mobility Package**, que les poids lourds devraient réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 15% en 2025, et de 30% à l'horizon 2030. La décarbonation du transport de marchandises est en marche, mais elle pose des problèmes techniques. S'il est possible de doter les poids lourds de batteries, leur poids devient vite rédhibitoire. « Vous vous retrouvez avec des batteries de dix tonnes, constate Mona Mahmoud. Elles prennent de la place dans les camions, et une partie de l'énergie qu'elles délivrent sert à les transporter. Pour éviter cela et embarquer des batteries plus petites sans réduire l'autonomie, une solution consisterait à se recharger en roulant. »

Recharger les batteries en roulant ? La solution technique aboutira d'ici 10 ou 15 ans... si tous les pays européens parviennent à se mettre d'accord

Trois technologies sont actuellement à l'étude.

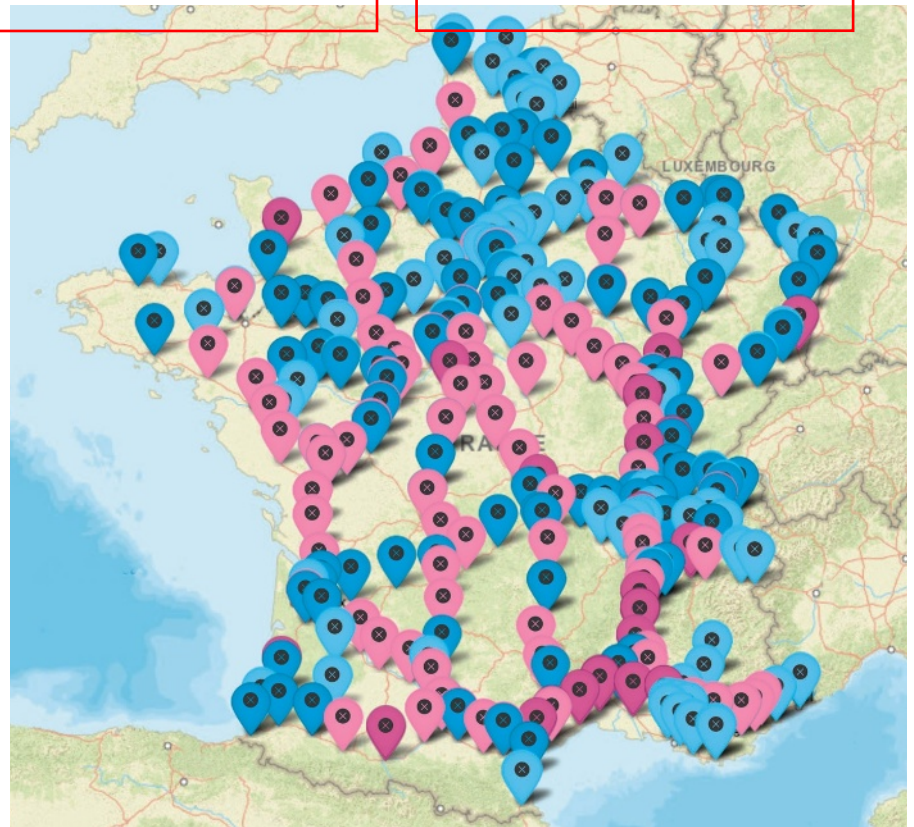
La première, une solution « aérienne », imagine une voie de l'autoroute équipée de caténaires, comme les voies ferrées. Les camions s'y brancheraient via des pantographes pour alimenter leur batterie. Des tests ont actuellement lieu en Allemagne, avec le groupe Siemens. La deuxième, une solution « au sol », consisterait à alimenter le véhicule via un rail. Cette voie est à l'étude en Suède, avec Alstom. Enfin, troisième piste de recherche, une méthode plus innovante, mais moins aboutie pour l'instant, recourt à une technique « sans contact », grâce à l'induction électromagnétique. « En générant des champs magnétiques, des bobines sous la chaussée permettraient au camion de se recharger simplement en passant dessus, à l'aide des courants induits, détaille Mona Mahmoud. Une piste est en construction en collaboration avec Renault et Enedis sur le site Vedecom de Satory, près de Versailles afin de procéder à des tests. Le grand avantage de cette méthode est que les véhicules individuels pourraient aussi se recharger. En revanche, elle nécessite d'importants travaux de voirie. » Toutes ces solutions pourraient voir le jour d'ici dix ou quinze ans. D'autant plus que la technologie retenue ne pourra l'être qu'à

l'échelle européenne. Tous les pays devront donc se mettre d'accord. Quoi qu'il en soit, l'enjeu est crucial pour les autoroutes qui doivent, en attendant, s'équiper en bornes, comme le reste du territoire. Il existe aujourd'hui, pour les véhicules légers, 100 bornes de recharge rapide 50 kW permettant de récupérer 50 % d'autonomie en trente minutes. Un réseau appelé à croître puisque plusieurs entreprises sont en train de déployer des réseaux de recharge à très haute puissance (jusqu'à 350 kW). Seulement, selon que les camions se rechargeront en roulant ou bien sur les aires d'autoroutes, cela modifiera un peu la donne...

ÉQUIPER 400 AIRES D'AUTOROUTES

En attendant de connaître l'impact exact de cette décarbonation des transports lourds, Enedis anticipe encore. « Il s'agit de prévoir de quelle manière nous devons équiper les aires d'autoroutes, détaille Régis Le Dren. À partir des données dont nous disposons déjà sur les types de déplacements (vacances, travail), les horaires, les saisons, les véhicules, les entrées

et sorties sur l'autoroute, la distance parcourue, nous avons calculé combien de voitures passaient devant chaque aire. Cela nous donne une estimation de leur besoin en électricité. Or alimenter plusieurs bornes haute puissance sur un seul site nécessite parfois d'installer des câbles capables d'acheminer 10 MW, d'où parfois des travaux plus longs et plus coûteux. Entre les autorisations et le génie civil, on compte jusqu'à un an de travaux, pour un coût d'environ un million d'euros. » Pour les sociétés autoroutières, qui ont l'obligation d'installer des bornes rapides sur leurs aires, identifier leurs besoins en alimentation électrique est donc crucial. « Nous avons réalisé et partagé aux sociétés d'autoroutes une estimation des coûts de renforcement des réseaux pour accompagner le déploiement des stations sur environ 400 aires d'autoroutes. » Avec une bonne nouvelle toutefois : sauf changement drastique de nos habitudes, le flux de véhicules sera toujours maximal en été. L'appel de puissance des autoroutes se produira donc au moment où, sur le reste du territoire, la consommation est réduite.



Estimation de la consommation électrique des principales aires d'autoroute à l'horizon 2035



► cas de rupture technologique importante, dans le domaine des batteries par exemple, ce qui oblige les équipes à un travail de veille constante auprès du secteur automobile.

L'objectif est donc de prévoir le nombre de nouvelles prises à installer, mais aussi, pour les alimenter, les nouveaux départs moyenne tension (HTA) à ajouter à la sortie des 2300 postes sources que compte le territoire. Et enfin les renforcements nécessaires sur certains des 800 000 transformateurs HTA-BT situés au plus près des habitations, afin de pouvoir délivrer davantage de puissance aux usagers d'un quartier comportant de nombreuses prises. «Un premier rapport fondé sur ces simulations est sorti en 2020, détaille Régis Le Drezen. Il estime le coût de ces adaptations du réseau à 4,5 milliards d'euros sur quinze ans. Environ 80 % de cette somme sera allouée aux nouveaux raccordements, le reste étant consacré au renforcement du réseau.»

PILOTER LA RECHARGE

La mise à disposition de points de recharge ne constitue pas le seul levier pour accompagner la mobilité électrique. Encore faut-il s'en servir le plus judicieusement possible, du point de vue du système dans son ensemble. Il s'agit du pilotage de la recharge, qui repose sur le comportement de l'automobiliste et le déploiement de solutions automatiques intelligentes pour leur faciliter la vie. «Le premier niveau du pilotage, c'est tout simplement le recours aux heures creuses pour recharger sa voiture, explique Régis Le Drezen. Si les utilisateurs se branchent en rentrant chez eux vers 18 heures, cela va multiplier les petites charges

inciter les consommateurs à se recharger aux bonnes heures? «Nous observons cela de près, affirme Régis Le Drezen. Nous n'imposons rien aux clients, mais beaucoup ont déjà le réflexe des heures creuses pour leurs usages domestiques. Par ailleurs, la plupart des constructeurs équipent leurs véhicules d'applications intelligentes qui déclenchent automatiquement la recharge aux meilleurs prix, ce qui permet de ne pas retourner tard le soir dans son garage pour brancher sa voiture.»

Autre levier intéressant pour ne pas trop bouleverser le réseau: le recours aux énergies renouvelables. «Nous anticipons une puissance électrique d'origine photovoltaïque multipliée par quatre dans les dix prochaines années. Or, les panneaux produisent un maximum d'électricité entre 10 heures et 16 heures, à un moment où les besoins sont moindres. D'où l'idée d'inciter l'utilisateur disposant d'une telle installation à brancher son véhicule pendant ces heures-là. Il ne vendra pas son électricité au réseau, mais sera gagnant au final en ne payant pas de recharge. Sur un an, l'économie peut atteindre 300 euros.»

La recharge pilotée et le recours aux énergies renouvelables constituent donc les deux axes majeurs pour limiter l'impact du développement de la mobilité sur le réseau dans les années à venir. Pour s'en assurer, Enedis a développé le démonstrateur aVENir (accompagnons le Véhicule Électrique avec la nécessaire intelligence de la recharge). Démarré en 2019 avec le support de l'Ademe, doté de 5 millions d'euros, il se déroule en Auvergne-Rhône-Alpes et Sud, et implique les grands acteurs de la mobilité: Renault, PSA, TotalÉnergies, Schneider Electric, et des chercheurs universitaires.



Un démonstrateur d'aVENir teste des bornes bidirectionnelles à l'Enedis Lab à Nanterre.

d'énergie photovoltaïque peut être davantage synchronisée avec les consommations sur des mailles locales, et prévenir le client qu'il peut se recharger avec des énergies renouvelables...»

aVENir va aussi permettre de tester des solutions plus innovantes encore, comme le «V2G», ou «Vehicule to Grid». «Nous considérons toujours que l'électricité va du réseau vers la voiture, constate Mona Mahmoud. Mais nous pouvons imaginer demain des véhicules stationnés qui joueraient le rôle de producteur d'énergie, en cédant au réseau une partie de l'électricité stockée dans leurs batteries, pour faire face à un pic de consommation par exemple. Si l'on songe aux millions de véhicules garés la plupart du temps, cela constitue une réserve d'énergie énorme.» Techniquement, il s'agit de mettre au point des bornes «bidirectionnelles». Des prototypes entrent tout juste en phase de test. Les premières conclusions d'aVENir devraient être publiées dès la fin de 2021, et le démonstrateur se poursuivre jusqu'en 2022. «En réalisant à petite échelle ce que nous comptons développer sur l'ensemble du territoire, nous espérons valider la totalité de notre stratégie, conclut Mona Mahmoud. Car si la hausse de la consommation électrique due à la mobilité ne devrait pas poser de problème à l'échelle du territoire, le risque n'est pas nul localement, dans des régions en tension. Pour éviter cela, il faudra injecter «de l'intelligence» à différents niveaux, depuis la production jusqu'à la consommation. C'est à ce prix que la transition se fera en douceur, et à moindre coût.»

En cas de pic de consommation, des véhicules stationnés pourront céder au réseau une partie de l'électricité stockée dans leur batterie

sur le réseau à une heure où il est déjà très sollicité. Dans ce cas, Enedis devra faire davantage de travaux de renforcement. Tandis que s'ils se rechargent la nuit, ce surcroît pourrait être absorbé par les infrastructures actuelles.» Pour une Renault Zoe électrique, qui roule 12000 km par an, se recharger durant les heures creuses permet d'économiser jusqu'à 90 euros par an. Sera-ce suffisant pour

«Il s'agit d'expérimenter en conditions réelles différentes situations de pilotage de bornes de recharge de véhicules électriques, et leurs interfaces avec le réseau public de distribution, commente Régis Le Drezen. Ainsi, nous sommes en train de développer avec Total et Schneider Electric des applications capables de dire «Attention, le réseau est trop sollicité en ce moment». Ou de regarder si la production

L'ESSENTIEL

> Pendant la plus grande partie du xx^e siècle, un modèle de peuplement tardif des Amériques, *Clovis First*, a dominé.

> Les études génétiques récentes indiquent que deux groupes asiatiques ont fait partie des ancêtres des

chasseurs-cueilleurs parvenus dans les Amériques plus tôt qu'on ne le pensait, après le dernier maximum glaciaire.

> Trois scénarios concurrents décrivent la diffusion des populations humaines sur les continents américains.

L'AUTRICE



JENNIFER RAFF
paléogénéticienne au département d'anthropologie de l'université du Kansas, aux États-Unis

Qui étaient les premiers Américains?

Racontée par la génétique et l'archéologie, l'histoire du peuplement des Amériques devient un roman fleuve palpitant dont on ne connaît pas encore tous les épisodes.

Homo sapiens est apparu en Afrique il y a plusieurs centaines de milliers d'années. Il y a plus de 100 000 ans, notre espèce s'est ensuite répandue en Eurasie, croisant ses traces avec *Homo erectus*, des Néandertaliens, des Dénisoviens et d'autres espèces humaines. Puis, ayant investi l'Ancien Monde (l'Europe, l'Asie, l'Afrique), elle a abordé le Nouveau Monde (les deux Amériques). Les individus *sapiens* qui, pour la première fois, foulèrent le sol américain furent, pense-t-on, les premiers du genre *Homo* à le faire. Ils ont dû explorer et s'adapter aux environnements américains au cours d'une grande aventure, point de départ de l'histoire riche et complexe des milliers de sociétés américaines.

Lors de leur progression vers les Amériques, les ancêtres des Amérindiens ont affronté d'extraordinaires difficultés. Ils ont dû survivre au froid et à l'aridité extrême du dernier maximum glaciaire, cette période de froid intense qui s'est étendue de 26 000 à 19 000 ans avant

le présent; ils ont aussi dû s'adapter aux faunes et aux flores de ces terres inconnues.

Plusieurs points de vue existent pour expliquer cette grande aventure. Ainsi, les peuples amérindiens ont tous des récits oraux de leurs origines; transmis à travers les générations, ces récits véhiculent des informations importantes sur la formation de l'identité de chaque groupe et sur ses relations avec sa terre et les êtres non humains qui la peuplent. Certains de ces récits contiennent l'idée d'une migration depuis un autre lieu; d'autres non.

Pour comprendre le peuplement des Amériques, les scientifiques occidentaux ont un cadre de pensée très différent, fondé sur les recherches archéologiques et génétiques, tout en reconnaissant et respectant les récits traditionnels de cet épisode de l'histoire humaine, que ceux-ci soient compatibles ou non avec le récit construit par les chercheurs. Les efforts des archéologues, anthropologues, linguistes et paléoclimatologues ont produit divers scénarios quant à l'origine des Amérindiens, sur l'identité de leurs ancêtres ainsi que sur le



Pour atteindre le continent américain, les ancêtres des Amérindiens, originaires d'Asie, ont dû traverser des contrées au climat très froid. Sont-ils arrivés à pied ou en bateau?

moment et la façon dont ils sont arrivés sur les terres américaines.

L'hypothèse qui a longtemps prévalait est qu'une seule population de chasseurs-cueilleurs d'Asie orientale a pénétré en Amérique du Nord après le dernier maximum glaciaire en suivant des troupeaux de grands herbivores, ce qui a donné naissance par la suite à tous les groupes amérindiens actuels. Mais la génétique, arrivée en renfort au cours des récentes décennies, a balayé ce scénario, et il n'est pas exagéré de dire que ses résultats ont bouleversé notre vision du peuplement des Amériques. De nombreuses lacunes subsistent encore dans nos connaissances, mais les découvertes génétiques et archéologiques ont révélé la complexité réelle du processus. En particulier, nous savons désormais que l'ascendance des Amérindiens est constituée de plusieurs populations anciennes, et non d'une seule.

L'AMÉRIQUE AVANT CLOVIS

Pendant une grande partie du xx^e siècle, a dominé la théorie dite du *Clovis First*, c'est-à-dire «la culture clovisienne en premier» (Clovis est une ville du Nouveau-Mexique, où les premiers artefacts de cette culture ont été trouvés en 1929). Elle repose sur l'idée que «les pointes de Clovis», de grandes pointes bifaciales et foliacées caractéristiques que l'on retrouve dans tout le continent nord-américain, appartiennent aux premières populations humaines des Amériques. Ces magnifiques pointes de flèche et de lance en pierre dotées de cannelures pour faciliter leur emmanchement sont brusquement apparues il y a quelque 13 000 ans au sud des énormes calottes glaciaires qui recouvraient alors encore le nord du continent. On les trouve souvent en association avec des ossements de gros animaux disparus, tels des mammouths, des mastodontes ou des bisons.

De la datation et de la répartition des sites de la culture Clovis, les archéologues ont déduit que ses populations ont migré depuis la Sibérie vers l'Amérique du Nord en traversant la Beringie – un pont terrestre aujourd'hui submergé qui, à l'emplacement du détroit de Béring actuel, reliait la Sibérie orientale à l'Alaska –, puis ont progressé en longeant les montagnes rocheuses canadiennes par l'est, où un couloir libre de glace est apparu. Vivant en petits groupes très mobiles à la poursuite de gros gibier, les chasseurs clovisiens auraient rapidement progressé vers le sud et, en un millénaire environ, auraient peuplé l'Amérique du Sud.

Cependant, depuis le modèle *Clovis First*, les archéologues ont découvert des sites archéologiques plus anciens que les plus vieux des sites clovisiens. L'un d'eux, Monte Verde au sud du Chili, date d'il y a 14 200 ans. Les outils de pierre, de bois et d'os taillés que l'on

y a mis au jour ne ressemblent en rien au Clovisien. Cette industrie prouve que, plus d'un millénaire avant l'apparition de la culture Clovis, des humains étaient déjà parvenus au sud de l'Amérique du Sud.

Les immenses progrès de la biologie moléculaire de la fin du xx^e siècle ont ouvert aux chercheurs de nouvelles perspectives, grâce à la possibilité d'extraire de l'ADN des restes humains anciens. Les chercheurs ont commencé par séquencer et analyser l'ADN mitochondrial et celui du chromosome Y. L'ADN mitochondrial, une petite boucle d'ADN contenue dans les mitochondries, ces organites qui fournissent à la cellule de l'énergie, ne se transmet qu'au sein des lignées féminines, tandis que le chromosome Y, le chromosome sexuel masculin, ne se transmet qu'au sein des lignées masculines. En comparant les lignées mitochondriales et du chromosome Y des populations amérindiennes modernes et anciennes, les chercheurs ont pu situer dans le temps les principaux événements démographiques de l'histoire du peuplement des Amériques.

Les généticiens ont ainsi confirmé que les populations ancestrales des Amérindiens vivaient en Asie, et qu'elles ont traversé une période d'isolement génétique pendant le pic du dernier maximum glaciaire; cette période

Les généticiens ont confirmé que les populations ancestrales des Amérindiens vivaient en Asie

fut suivie par une expansion rapide de la population, précédant de plusieurs millénaires la culture Clovis et le site de Monte Verde. Mais cette vision n'était à ce stade qu'une ébauche, fondée sur seulement quelques parties du génome. Le génome complet d'une personne apporte une masse bien supérieure d'informations sur son ascendance, sans commune mesure avec les seuls ADN mitochondriaux et du chromosome Y.

Aujourd'hui, il est relativement facile de séquencer des génomes complets de personnes vivantes. Les génomes des membres de certains groupes amérindiens actuels contiennent des variations génétiques issues de leurs contacts

avec les Européens après 1492, année de l'arrivée de Christophe Colomb dans les Caraïbes.

Quant aux parties génomiques héritées des peuples indigènes antérieurs au contact avec les Européens, elles révèlent une histoire de plusieurs dizaines de milliers d'années.

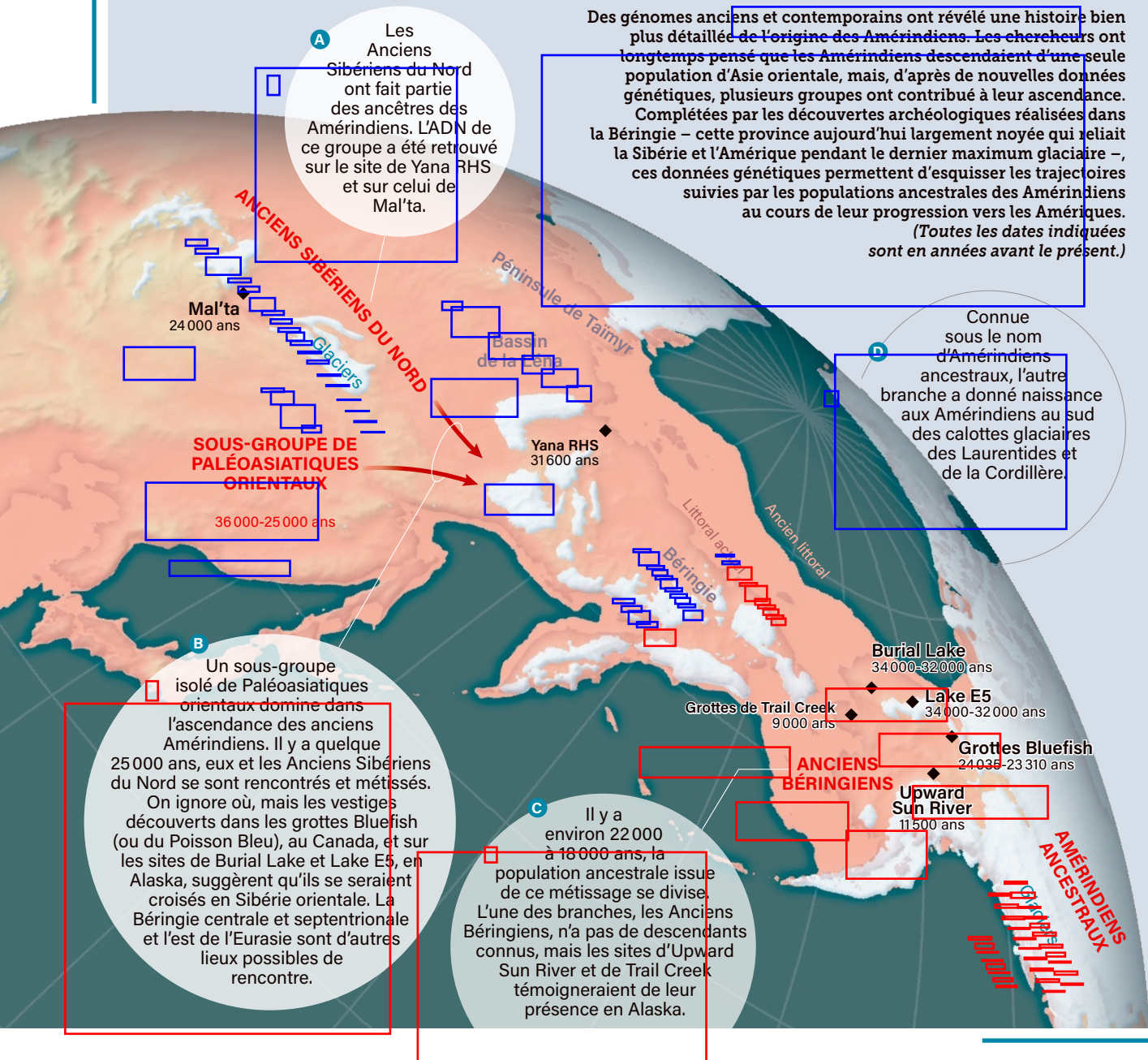
Il peut être extrêmement difficile d'extraire un génome de vieux restes osseux ou dentaires, car la plus grande partie de l'ADN qu'il contient provient des microorganismes du sol ou de plantes et d'animaux actuels, voire de tous les humains qui les ont touchés; les fragments

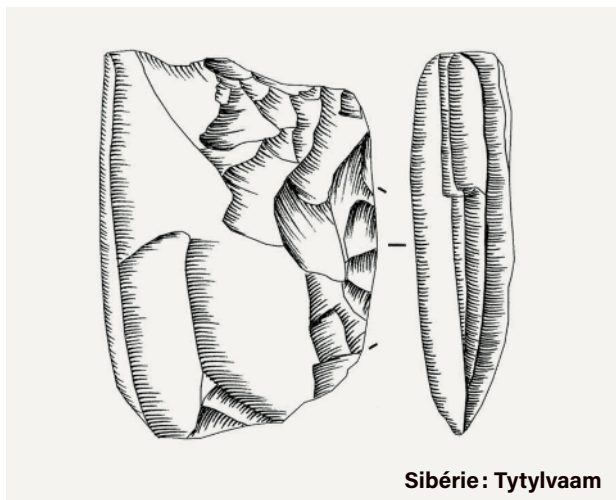
d'ADN d'origine sont rares et endommagés. Des progrès récents rendent toutefois possible de récupérer et d'analyser cet ADN, même s'il est très mal conservé. Ces avancées ont multiplié le nombre de génomes d'anciens humains séquencés et de nouvelles méthodes pour les analyser nous aident à saisir les histoires qu'ils racontent.

Combinés, les génomes anciens et modernes brossent un tableau bien plus détaillé des origines des premiers Amérindiens que celui déduit des seuls ADN mitochondriaux ou

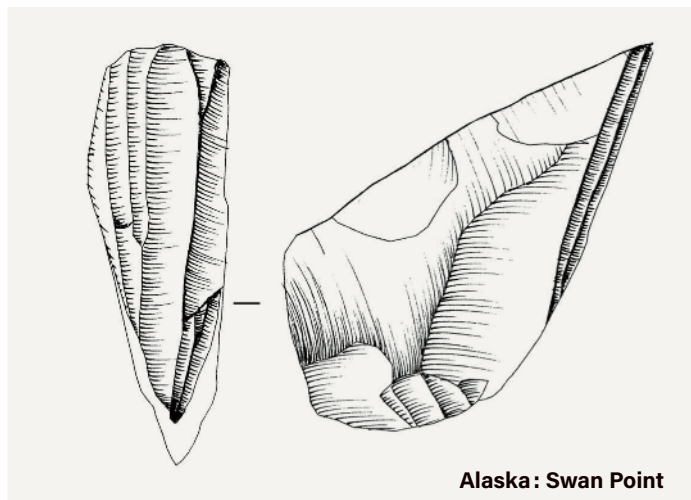
LES RAMEAUX ANCESTRAUX

Des génomes anciens et contemporains ont révélé une histoire bien plus détaillée de l'origine des Amérindiens. Les chercheurs ont longtemps pensé que les Amérindiens descendaient d'une seule population d'Asie orientale, mais, d'après de nouvelles données génétiques, plusieurs groupes ont contribué à leur ascendance. Complétées par les découvertes archéologiques réalisées dans la Béringie – cette province aujourd'hui largement noyée qui reliait la Sibérie et l'Amérique pendant le dernier maximum glaciaire –, ces données génétiques permettent d'esquisser les trajectoires suivies par les populations ancestrales des Amérindiens au cours de leur progression vers les Amériques. (Toutes les dates indiquées sont en années avant le présent.)





Sibérie : Tytylvaam



Alaska : Swan Point

Les nucléus de la culture post-Dyuktai (à gauche, site de Tytylvaam, 10 000 ans avant le présent) et ceux découverts sur le site de Swan Point, en Alaska (à droite, 14 100 ans avant le présent), relèvent clairement de la même méthode de débitage de lamelles par pression. Or certains spécialistes considèrent que les pierres taillées de Swan Point ont aussi des points communs avec celles de la culture Clovis, typique de l'Amérique du Nord et apparue il y a moins de 14 000 ans.

du chromosome Y. Ils révèlent en particulier d'où sont provenues leurs différentes branches ancestrales amérindiennes et quand elles se sont croisées.

UNE CONVERGENCE ANCIENNE

Désigner un moment précis comme l'« origine » d'un « peuple » est arbitraire et simpliste jusqu'à l'absurde. Les populations humaines se sont toujours constituées par assemblage d'individus divers, chacun ayant sa propre histoire généalogique. Il faut toutefois bien commencer quelque part, et nous allons donc faire débiter l'histoire génétique des Amérindiens au Paléolithique supérieur.

Il y a environ 36 000 ans, une population de l'Extrême-Orient s'est lentement isolée de sa population mère en 11 000 ans environ. Il y a quelque 25 000 ans, ce groupe était désormais distinct génétiquement des autres habitants de l'Asie orientale. C'est ce groupe isolé de Paléoasiatiques orientaux qui a fourni la majorité de l'ascendance des premiers Amérindiens.

Il y a 39 000 ans, une autre branche ancestrale des Amérindiens s'est formée : les « Anciens Sibériens du Nord ». Il y a 31 000 ans, des membres de ce groupe ont occupé le site de Yana Rhinoceros Horn (ou Yana RHS en abrégé) situé près de la rivière Yana au nord de la Sibérie orientale, donc dans la partie occidentale de la Béringie. Les deux dents de lait que l'on y a trouvées donnent un rare aperçu de cette population de chasseurs-cueilleurs vivant toute l'année dans cette région très septentrionale.

Ces dents appartenaient à deux garçons qui les ont perdues entre 10 et 12 ans. En 2019, Martin Sikora, de l'université de Copenhague, et ses collègues en ont extrait de l'ADN. Ces génomes ont révélé d'une part que les deux garçons n'étaient pas apparentés, d'autre part qu'ils étaient membres d'une population comportant environ 500 individus reproducteurs,

ce qui est assez considérable. Contrairement aux Néandertaliens, dont les génomes traduisent des populations de faible effectif disparaissant périodiquement de telle ou telle région, les Anciens Sibériens du Nord semblent avoir réussi à se maintenir et à prospérer au sein des très difficiles environnements sibériens.

Les Anciens Sibériens du Nord se sont répandus dans toute la Sibérie septentrionale et centrale. Les restes d'un enfant qui vécut sur un site du nom de Mal'ta attestent de leur présence dans le centre-sud de la Sibérie il y a quelque 24 000 ans, c'est-à-dire au Paléolithique supérieur (50 000 à 11 700 ans avant le présent). L'ADN extrait de ce fossile a révélé qu'un grand nombre de populations géographiquement très dispersées – notamment les Eurasiens occidentaux actuels (groupe comprenant les Européens) et les premiers Amérindiens – ont des ancêtres parmi les Anciens Sibériens du Nord.

Les deux principales branches ancestrales des premiers Amérindiens – le groupe isolé de Paléoasiatiques orientaux et les Anciens Sibériens du Nord – se sont rencontrées il y a 25 000 à 20 000 ans et se sont métissées. La population ancestrale qui en est issue s'est formée peu après le début du dernier maximum glaciaire, pendant lequel le climat sibérien était si froid que très peu de plantes et d'animaux survivaient dans cette partie de l'Eurasie. Il était impossible ou du moins extrêmement difficile pour des humains d'y vivre : de fait, en Sibérie septentrionale, pratiquement aucun site archéologique ne date de la période comprise entre 30 000 et 20 000 ans.

Les archéologues en déduisent que les populations s'étaient réfugiées ailleurs, où le climat était meilleur et les ressources plus abondantes. On ignore ce qui s'est passé exactement, mais il est vraisemblable que la rencontre du groupe isolé de Paléoasiatiques

orientaux et des Anciens Sibériens du Nord s'est produite parce que le changement climatique a poussé les Anciens Sibériens du Nord à émigrer vers le sud.

Où les deux groupes se sont-ils rencontrés? Ce n'est probablement pas en Bérिंगie occidentale, puisqu'après l'abandon du site de Yana RHS il y a quelque 31 000 ans, la région semble s'être dépeuplée. Il reste, comme zones possibles de rencontre, l'Eurasie orientale, la Bérिंगie centrale ou orientale et la Bérिंगie septentrionale. La génétique ne tranche pas cette question géographique. Les génomes des Amérindiens indiquent que, peu de temps après s'être métissés avec les Anciens Sibériens du Nord, leurs ancêtres sont restés isolés plusieurs milliers d'années lors du dernier maximum glaciaire. Cet isolement suggère fortement que la rencontre n'a pas eu lieu en Eurasie orientale, où la présence d'autres groupes aurait presque certainement entraîné des métissages supplémentaires. Certains archéologues affirment pourtant que l'Eurasie orientale est la seule région où l'on trouve des indices nombreux et sans ambiguïté de la présence humaine pendant le dernier maximum glaciaire.

UN REFUGE EN BÉRINGIE CENTRALE?

Une autre possibilité est que les ancêtres des Amérindiens aient survécu au dernier maximum glaciaire dans un refuge situé en Bérिंगie centrale. Les reconstitutions paléoenvironnementales suggèrent que grâce à des courants océaniques chauds, il a pu y avoir un climat modéré dans cette région, qui aurait ressemblé à une zone humide. Cela en aurait fait un lieu de vie assez confortable pour humains et animaux pendant la période d'extension maximale des calottes glaciaires. Mais puisque la partie centrale de la Bérिंगie est aujourd'hui sous les eaux du détroit de Bérिंग, aucun indice archéologique n'accrédite cette théorie. Sur le versant nord de l'Alaska et au Yukon, il existe tout de même des sites suggérant une présence humaine en Bérिंगie orientale au cours du dernier maximum glaciaire. Les preuves ne suffisent pas à convaincre la plupart des archéologues, mais invitent à mieux explorer ces régions difficiles d'accès.

L'Arctique sibérien, région située au-dessus de 66 degrés de latitude au nord et à l'ouest de la Bérिंगie occidentale, n'est apparu que récemment comme un autre refuge possible lors du dernier maximum glaciaire, et donc comme un endroit de rencontre envisageable entre le groupe isolé de Paléoasiatiques orientaux et les Anciens Sibériens du Nord. De grandes parties de cette région sont aujourd'hui immergées, mais, au cours du dernier maximum glaciaire, il s'agissait d'une vaste plaine de steppe-toundra, où vivaient de grandes populations de

mammouths, de rhinocéros laineux, de bisons et de chevaux, autant de proies intéressantes pour des chasseurs-cueilleurs. Les conditions de vie devaient y être difficiles, mais les indices génétiques et archéologiques recueillis sur le site de Yana RHS montrent que les humains d'Eurasie orientale et septentrionale y étaient déjà bien adaptés avant même les débuts du dernier maximum glaciaire. Une fois de plus, comme pour tous les refuges potentiels des ancêtres des Amérindiens hors l'Asie orientale, les indices archéologiques de présence humaine dans cette région pendant le dernier maximum glaciaire manquent.

Même si nous ne savons pas exactement où les Anciens Sibériens du Nord et le groupe isolé de Paléoasiatiques orientaux se sont métissés, nous pouvons déduire des données génétiques ce qui s'est passé ensuite. Immédiatement après le métissage des deux populations, et pendant qu'elles étaient coupées des autres humains, des événements démographiques complexes se sont produits en série à intervalles rapprochés dans le temps, qui ont conduit aux peuples des Amériques et de Sibérie.

Il y a environ 22 000 à 18 100 ans, la population ancestrale amérindienne s'est divisée en deux branches au moins. La première, celle des «Anciens Béringiens», n'a pas de descendants vivants connus. La seconde, celle des «Amérindiens ancestraux», a, comme son nom l'indique, conduit à la formation des premières populations amérindiennes, au sud des calottes glaciaires des Laurentides et de la Cordillère.

La branche des Amérindiens ancestraux s'est probablement elle-même subdivisée en plusieurs rameaux distincts au cours du dernier maximum glaciaire. L'un de ces rameaux – la «Population non échantillonnée A» (*Unsampled population A*) – n'a pas laissé de

Le site archéologique de Swan Point se trouve dans le bassin-versant de la rivière Tanana, en Alaska central. Les fouilles de six occupations successives ont fourni la plus grande série stratigraphique alaskaise commençant il y a quelque 14 000 ans et se terminant il y a environ 2 500 ans. Les microlithes d'un type connu aussi en Sibérie orientale et la grande faune aujourd'hui disparue en Alaska retrouvées sur le site remontent à la période où un pont terrestre reliait encore la Sibérie et le nord de l'Amérique.

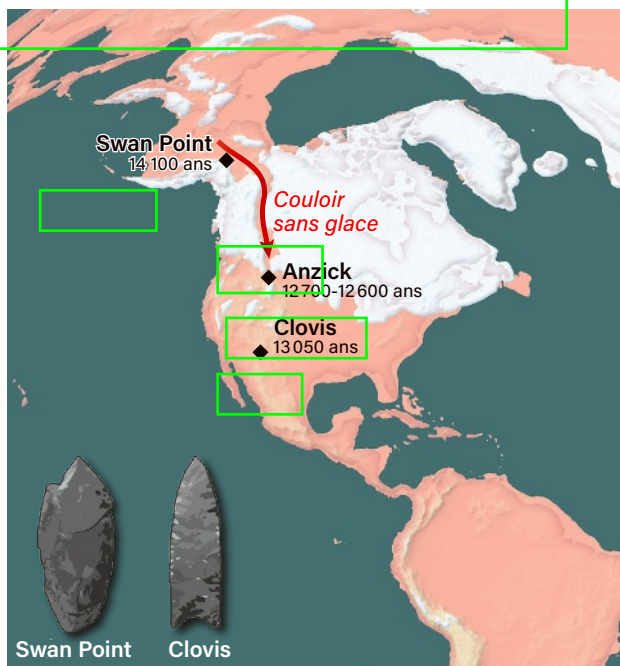


LES SCÉNARIOS POSSIBLES DU PEUPLEMENT DES AMÉRIQUES

Quand, où et comment les ancêtres des peuples amérindiens sont-ils arrivés dans les Amériques ? Trois grands scénarios sont en compétition pour répondre à ces questions. (Toutes les dates indiquées sont en années avant le présent.)

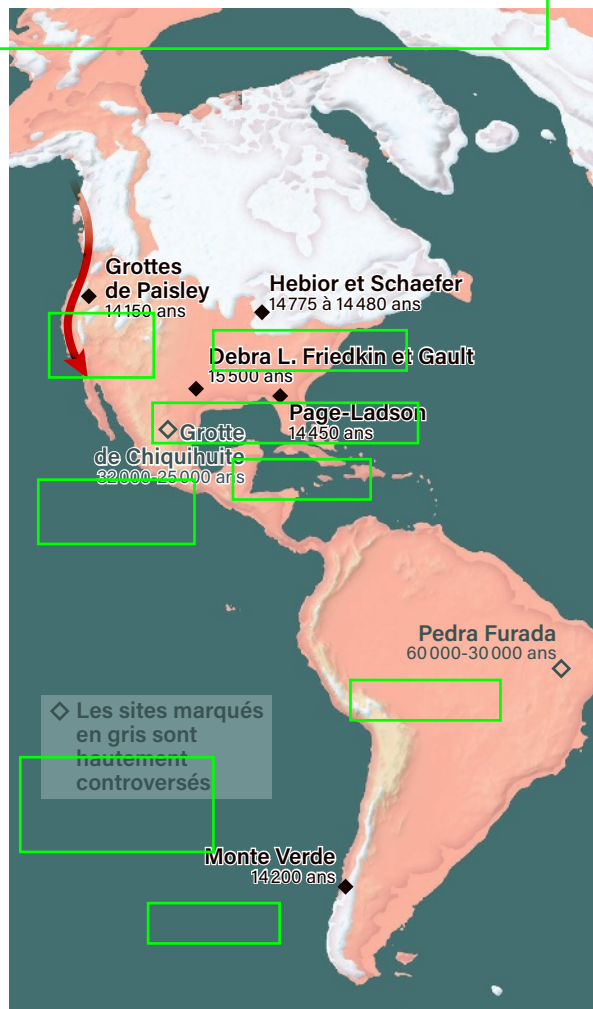
Scénario 1 : Un peuplement tardif

Certains archéologues soutiennent que les personnes qui ont fabriqué les pointes de flèche caractéristiques découvertes pour la première fois sur le site de Clovis, au Nouveau-Mexique, puis sur d'autres sites tels qu'Anzick, dans le Montana, furent les premiers humains à s'établir avec succès sur le continent américain. Le site de Swan Point, en Alaska, joue un rôle important dans leur argumentation, car il contient des outils de pierre qui semblent relier la culture plus ancienne de Dyuktai, en Sibérie, à la culture Clovis, en Amérique du Nord. Pour les partisans de la théorie *Clovis First*, les humains ont foulé le continent américain bien après le dernier maximum glaciaire, après avoir emprunté le couloir sans glace formé lors du retrait des glaciers le long du piémont oriental des Rocheuses. Ces chercheurs considèrent les sites pré-Clovis comme étant invalides ou sans rapport avec les Amérindiens actuels.



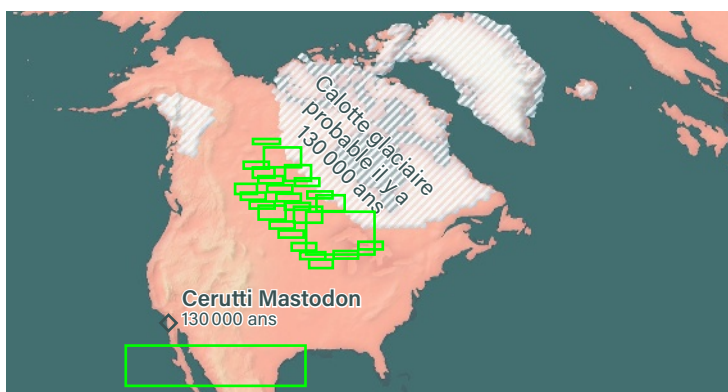
Scénario 2 : Un peuplement côtier précoce

D'autres archéologues accordent une grande importance aux sites pré-Clovis, arguant qu'ils témoignent d'une présence humaine sur les continents américains bien avant l'apparition de l'industrie clovisienne et l'ouverture du couloir sans glace. Pour ces chercheurs, les Amérindiens ancestraux ont probablement progressé en bateau le long de la côte Pacifique à partir d'environ 17 000 ans, voire plus tôt, dès 20 000 ans ou même 30 000 ans, si l'on en croit des indices controversés d'activité humaine ancienne recueillis sur le site brésilien de Pedra Furada et sur le site mexicain de la grotte de Chiquihuite.



Scénario 3 : Un peuplement extrêmement précoce

Une poignée de chercheurs pensent que les humains ont atteint les Amériques bien plus tôt encore. Ils s'appuient notamment sur le site de Cerutti Mastodon, en Californie, où auraient été retrouvés les ossements d'un mastodonte dépecé et des outils en pierre datant de 130 000 ans. Si ces vestiges présumés résultent réellement d'une activité humaine, ils impliqueraient que les premiers humains dans les Amériques appartenaient à l'espèce *Homo erectus* plutôt qu'à *Homo sapiens*. La plupart des chercheurs rejettent cette idée.



restes fossiles ou archéologiques directs suffisants pour le définir, mais les Mixes, une population amérindienne vivant près d'Oaxaca, au Mexique, semblent avoir hérité d'une partie de son ADN.

Quelques populations actuelles de l'Amazonie semblent avoir des ancêtres supplémentaires issus d'un groupe apparenté aux Australasiens (Aborigènes, Maoris...) et nommé «Population Y». Ce possible lien constitue l'une des plus surprenantes découvertes de ces dernières années. Des traces du même signal génétique se sont aussi révélées dans un fossile humain de quelque 40000 ans découvert dans la grotte de Tianyuan, en Chine. Pour le moment, les indices recueillis suggèrent qu'un ancien groupe humain répandu dans toute l'Asie a transmis ses gènes aux peuples actuels du Pacifique et à certaines populations amazoniennes. Les chercheurs travaillent encore à déterminer combien de peuples anciens et actuels ont cette ascendance et où vivait la population source.

Plus important encore, toutes les études génomiques excluent la possibilité que les Amérindiens se soient mélangés aux Européens, aux Africains ou à toute autre population avant 1492. L'ensemble des données génétiques et archéologiques exclut ce scénario, dont se sont pourtant nourries certaines séries télévisées populaires.

EN DIRECTION DU SUD

Après le dernier maximum glaciaire, les Amérindiens ancestraux se sont déplacés vers le sud et divisés en au moins trois branches. La première n'est représentée que par un seul génome, celui d'une femme qui vécut il y a environ 5600 ans sur le plateau Fraser en Colombie-Britannique. On ne sait pas grand-chose d'autre sur cette population.

Les deux autres branches englobent toute la diversité génétique actuellement connue des populations vivant au sud des anciennes calottes glaciaires. La branche des Amérindiens du Nord comprend les ancêtres des Algonquins, des Na-Dénés (Alaska et Canada occidental), des Salishs (sud de la Colombie-Britannique) et des Tsimshians (estuaire du fleuve Skeena en Colombie-Britannique). La branche des Amérindiens du Sud comprend les ancêtres des peuples indigènes largement répartis en Amérique du Sud, en Amérique centrale et dans une grande partie de l'Amérique du Nord (les peuples indigènes de l'Arctique ont en outre des ancêtres issus de migrations ultérieures).

Les chercheurs ne s'accordent pas sur la chronologie, les lieux et les façons dont ces populations se sont dispersées sur les continents. À ce jour, trois grands scénarios sont en concurrence.

Les archéologues les plus prudents s'en tiennent à ce qui est essentiellement une version actualisée de la théorie *Clovis First*. Selon eux, le site de Swan Point, au centre de l'Alaska, serait la clé de la compréhension du peuplement des Amériques. Daté d'environ 14100 ans, il s'agit du plus ancien site non controversé de Beringie orientale. L'industrie lithique que l'on y trouve a des liens évidents avec celle des cultures Dyuktai en Sibérie et Clovis.

D'après ces archéologues, les ancêtres des Amérindiens se trouvaient au nord-est de l'Asie ou en Sibérie pendant le dernier maximum glaciaire et n'ont migré vers l'Alaska en traversant le pont terrestre de Bering seulement il y a 16000 à 14000 ans. Ils soutiennent que la culture de Clovis représente la première installation humaine réussie dans les Amériques par des groupes qui auraient progressé le long du Couloir libre de glace, le passage désenglacé qui s'est formé au piémont oriental des Rocheuses lors du retrait progressif des calottes; ces premiers groupes auraient peut-être été suivis par d'autres vagues de migration depuis la Sibérie. Dans cette théorie, les sites plus anciens que ceux de la culture Clovis sont soit considérés comme non valides, soit attribués à des groupes n'ayant contribué ni culturellement ni biologiquement aux Amérindiens.

D'autres archéologues soulignent au contraire l'importance des sites antérieurs à la culture Clovis, notamment celui de Page-Ladson découvert très loin de l'Alaska dans le nord de la Floride. Décrit en 2016 par Jessi Halligan, de l'université d'État de Floride, Michael Waters, de l'université A&M du Texas, et leurs collègues, ce site contient une industrie lithique, dont un couteau brisé trouvé en association avec des ossements de mastodontes datant de 14450 ans.

DES SITES ANTÉRIEURS À LA CULTURE CLOVIS

Pour ces chercheurs, Page-Ladson est un site important précisément parce qu'il aurait été insignifiant à l'époque: il se trouve près d'un petit point d'eau situé beaucoup plus loin du littoral qu'aujourd'hui, sans que rien ne le signale dans le paysage. Les humains y ont dépecé un mastodonte pour emporter sa viande et une de ses défenses, laissant derrière eux des os, l'autre défense et le couteau cassé. Leur visite sur ce site dénué de vestiges d'habitat, de la fabrication d'outils ou de toute autre activité a manifestement été brève. Cette halte de chasse rapide et ciblée suggère que le groupe humain impliqué était assez bien adapté pour connaître ce lieu obscur et les chances d'y trouver un mastodonte pour s'en nourrir et emporter ses défenses afin de fabriquer des outils.

Par ailleurs, un certain nombre de sites datés entre 16000 et 14000 ans ont été

découverts au sud de la limite des calottes glaciaires. Leur interprétation rend nécessaire une vision entièrement différente du scénario de peuplement tardif décrit précédemment.

D'une part, leur ancienneté limite les routes que les populations ont pu emprunter pour atteindre les Amériques. Le Couloir libre de glace situé entre les calottes des Laurentides et de la Cordillère ne s'est ouvert en effet qu'il y a 14 000 ans ou après : les occupants de sites plus anciens n'ont donc pas pu emprunter cette route. De plus, les ADN extraits de carottes sédimentaires lacustres au milieu du corridor non englacé suggèrent que celui-ci n'a retrouvé de faune et de flore qu'il y a au moins 12 600 ans environ, soit bien après l'arrivée des premiers Amérindiens. Et les premiers indices directs de présence humaine dans la région du couloir sans glace lui-même remontent à 12 400 ans. Tout indique donc que les premiers groupes humains en Amérique du Nord ne sont pas passés par le Couloir libre de glace.

L'itinéraire alternatif le plus probable est la côte Pacifique, devenue viable il y a 17 000 à 16 000 ans. L'existence de cette route côtière expliquerait mieux les données génétiques

relatives à l'expansion des Amérindiens du Sud. Les théories de l'histoire des populations les mieux admises aujourd'hui suggèrent que le groupe amérindien du Sud s'est rapidement diversifié en populations régionales dans toute l'Amérique du Nord, du Sud et centrale entre il y a 17 000 et 13 000 ans. Une progression le long de la côte Pacifique expliquerait mieux la vitesse et les dates de ces scissions que la voie terrestre, plus lente.

Selon une variante de ce scénario de peuplement côtier précoce, des humains étaient présents sur le continent américain pendant ou même légèrement avant le dernier maximum glaciaire, il y a 20 000, voire 30 000 ans. Des indices présumés d'une occupation antérieure au dernier maximum glaciaire auraient été découverts sur plusieurs sites au Mexique et en Amérique du Sud, notamment sur le site de Pedra Furada, dans le nord-est du Brésil. La plupart des archéologues sont toutefois sceptiques : ils doutent des datations présentées ou se demandent si les objets présentés comme des artefacts (faits par la main de l'homme) ne seraient pas plutôt des géofacts (issus d'un processus naturel).

DES HUMAINS EN AMÉRIQUE IL Y A PLUS DE 20 000 ANS ?

Quelle est l'ancienneté de l'occupation humaine des Amériques ? Depuis longtemps, les préhistoriens travaillant sur ce double continent sont divisés entre chronologies courte et longue : les partisans de la première défendent un peuplement tardif, entre 15 000 et 20 000 ans ; ceux de la chronologie longue soutiennent qu'il y avait déjà des humains dans les Amériques il y a plus de 20 000 ans. La paléogénéticienne Jennifer Raff décrit en détail trois grands scénarios issus de ces deux thèses.

Comment en est-on arrivé à des thèses aussi différentes ? À cause des difficultés de datation des sites, pourrait-on se dire. Le problème réside plutôt dans les preuves du passage d'humains dans les sites les plus anciens : certains préhistoriens les acceptent et d'autres les refusent. Ces derniers considèrent que les preuves de la présence humaine présentées (traces de découpe, outils simples, foyers, etc.) sont en fait le produit de phénomènes naturels : plutôt que des artefacts (effets ou objets produits par l'homme), il s'agirait de géofacts (effets ou objets naturels). Les expérimentations sur l'impact de certains phénomènes (chutes de pierre, action de l'eau, piétinement, etc.) sur des objets comme ceux retrouvés lors des fouilles montrent en effet qu'il est difficile dans certains contextes de faire la différence entre des objets naturels

et des outils. Pour mieux cerner ce type de situation, examinons trois cas.

Les grottes du Poisson Bleu (Bluefish), dans le Yukon canadien, ont livré des ossements, dont une infime partie (15 sur 36 000) porte de possibles traces de découpe. Bien qu'elles soient visuellement convaincantes, plusieurs spécialistes des restes fauniques considèrent qu'elles peuvent être naturelles, d'autant plus que les datations de ces ossements s'étalent sur plus de 10 000 ans (de 10 000 à 24 000 ans). Des outils de pierre manifestement taillés à la main ont été découverts dans ces grottes, mais le remplissage étant perturbé, une association définitive entre ces outils et les ossements ne peut être faite, ce que soulignent eux-mêmes les responsables de la fouille.

L'abri-sous-roche de Pedra Furada, au Brésil, contient plusieurs niveaux datant d'il y a 20 000 à 50 000 ans. Le site a jusqu'à présent été considéré comme très ambigu, car tous les outils présumés sont très simples et produits seulement à partir de gros galets de quartz, les mêmes que ceux tombant fréquemment de la falaise adossée au site. Il pourrait donc s'agir de pièces fragmentées lors de chutes de pierre.

La grotte de Chiquihuite, au Mexique, contient un niveau datant d'il y a environ 30 000 ans, qui porterait des outils lithiques. Sur les illustrations publiées l'année dernière, certaines pièces semblent

bien avoir été taillées à la main, mais on ne peut exclure qu'il s'agisse de géofacts.

Les chercheurs attendent donc avec impatience que des publications plus détaillées leur permettent de confirmer ou d'infirmer que ces roches ont été taillées par des humains.

Pour certains des sites anciens, les datations sont en accord avec les modèles de peuplement en vigueur. C'est le cas des grottes du Poisson Bleu qui peuvent s'inscrire dans le cadre de la théorie de l'isolement beringier. Mais ce n'est pas le cas du site de Cerutti Mastodon, en Californie, dont, s'il était admis, l'âge de 130 000 ans impliquerait à lui seul un modèle de colonisation complètement différent, avec une première colonisation par *Homo erectus*. Une possibilité que certains chercheurs, tel le préhistorien français Henry de Lumley, avaient proposée dans le passé à partir d'assemblages d'outils présumés, mais considérés depuis comme naturels.

Clairement, il faut scruter de près les traces présumées de présence humaine ancienne parsemant le double continent. Elles se confirmeront peut-être un jour. Toutefois, la démonstration du caractère humain (d'une trace, d'un objet ou d'une structure) doit être imparable. Nous n'en sommes pas là s'agissant des indices de la chronologie longue.

YAN AXEL GÓMEZ COUTOULY

CNRS - Archéologie des Amériques, Nanterre

Ce scepticism n'exclut pas la présence possible de populations sur le continent américain avant le dernier maximum glaciaire. Il signifie juste que de nouveaux indices seront nécessaires pour que cette hypothèse puisse être retenue (voir l'encadré page ci-contre). Si des humains ont foulé les Amériques pendant ou juste avant cette période, les effectifs de leurs populations ont été probablement si faibles qu'ils n'ont laissé qu'une très faible empreinte archéologique. Étonnamment, une présence précoce pourrait expliquer le signal déroutant de l'ascendance de la population Y dans certains groupes amazoniens: il pourrait s'agir du résultat d'un métissage entre les peuples qui se sont dispersés dans les Amériques après le retrait de la calotte glaciaire et ceux qui se trouvaient déjà en Amérique du Sud.

CERUTTI MASTODON, UN SITE TRÈS CONTROVERSÉ

Le troisième grand scénario est radicalement différent. Un petit groupe de chercheurs pense que l'humanité a atteint très tôt le Nouveau Monde. Cette affirmation repose en grande partie sur les restes de mastodontes vieux de 130 000 ans mis au jour sur le site de Cerutti Mastodon, en Californie. En 2017, une équipe menée par Steven Holen, du Muséum d'histoire naturelle de San Diego, est parvenue à la conclusion que les traces relevées sur les os d'un mastodonte sont le résultat d'un dépeçage et que des pierres découvertes sur le site sont des outils façonnés. On pense que la principale vague *sapiens* est sortie d'Afrique il y a 70 000 à 80 000 ans. Si les observations faites à Cerutti sont vraiment le résultat d'une activité humaine ancienne, elles montreraient non seulement qu'*Homo* est arrivé dans les Amériques bien plus tôt que ce que l'on pensait, mais aussi que les premiers humains dans le Nouveau Monde furent probablement des *Homo erectus* plutôt que des *Homo sapiens*.

La plupart des archéologues rejettent le site de Cerutti Mastodon pour de multiples raisons, notamment la possibilité que des engins de construction modernes, plutôt que des humains, aient brisé les restes du mastodonte, puisque celui-ci fut découvert dans les années 1990 au cours d'un projet de construction de route. En outre, les variations génétiques amérindiennes ne séparent pas les Amérindiens des autres humains et n'indiquent pas non plus de métissage entre *Homo sapiens* et d'autres formes humaines dans les Amériques. Si *Homo erectus* a atteint le Nouveau Monde, il n'a laissé ni fossiles ni contributions génétiques aux Amérindiens.

En l'état actuel des choses, la plupart des archéologues et des généticiens s'accordent à dire qu'*Homo sapiens* a investi l'Amérique du Nord il y a au moins 15 000 à 14 000 ans, mais

ils divergent sur l'interprétation des sites pré-clovisiens et donc sur la manière dont les premiers humains sont arrivés dans les Amériques. Ces divergences d'opinions reflètent toute la difficulté qu'il y a à travailler avec des archives incomplètes, qu'elles soient archéologiques ou génétiques. Des trois scénarios décrits ici, le deuxième est celui qui semble concilier au mieux les faits archéologiques et génétiques, mais, comme les deux autres, ce modèle de peuplement ne rend pas compte de toutes les données disponibles.

ACCEPTER L'INCERTITUDE

À mesure que progressera l'étude du peuplement des Amériques, son histoire se compliquera probablement encore. A ce jour, le nombre de génomes complets provenant de groupes amérindiens contemporains et anciens se compte en dizaines. Ces génomes sont inégalement répartis, puisque la plupart proviennent d'Amérique centrale, d'Amérique du Sud ou du nord de l'Amérique du Nord. Peu de génomes complets proviennent des États-Unis, ce qui traduit la défiance des peuples autochtones envers les chercheurs. Cette défiance est le résultat de l'exploitation passée des dimetières amérindiens par des médecins et des anthropologues qui cherchaient à établir des classifications raciales, qui n'ont aujourd'hui rien de scientifique. Il est donc essentiel que les généticiens collaborent avec les communautés amérindiennes afin d'assurer que la quête de connaissances génétiques n'amplifie pas le mal déjà fait.

Cette lacune géographique majeure dans notre compréhension des variations génétiques signifie que la recherche dans ce domaine évolue vite. Chaque nouveau génome séquencé ajoute énormément à nos connaissances. Au-delà des génomes humains, les chercheurs s'intéressent aussi à l'ADN d'autres sources, telles les bactéries et les virus associés à l'homme, ainsi que les proies des humains et les espèces accompagnatrices. Cette étude des ADN non humains éclairera peut-être les mouvements de populations, tout en respectant le caractère sacré des restes humains amérindiens.

Bientôt, de nouveaux faits invitant à modifier les théories présentées ici arriveront probablement. Cet article ne fait que donner le cadre où se placeront ces futures découvertes. Les spécialistes du peuplement des Amériques ont appris à tolérer l'ambiguïté et à accepter que leurs théories sont provisoires et seront révisées quand de nouveaux indices apparaîtront. Les techniques d'analyse de l'ADN et les nouvelles questions se multipliant, l'étude des premiers Amérindiens et de la façon dont leurs ancêtres ont fait franchir à notre espèce l'étape ultime de son expansion à toute la planète promet d'être passionnante. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Yu et al., **Paleolithic to Bronze Age Siberians reveal connections with First Americans and across Eurasia**, *Cell*, vol. 181, pp. 1-14, 2020.

M. Sikora et al., **The population history of northeastern Siberia since the Pleistocene**, *Nature*, vol. 570, pp. 182-188, 2019.

J. V. Moreno-Mayar et al., **Early human dispersals within the Americas**, *Science*, vol. 362, article eaav2621, 2018.

Y. A. Gómez Coutouly, **Apogée et déclin de la méthode Yubetsu**, *Bulletin de la Société préhistorique française*, vol. 115(1), pp. 7-42, 2018.

D. A. Bolnick et al., **Native American genomics and population histories**, *Annual Review of Anthropology*, vol. 45, pp. 319-340, 2016.

M. Raghavan et al., **Upper Palaeolithic Siberian genome reveals dual ancestry of Native Americans**, *Nature*, vol. 505, pp. 87-91, 2013.

L'ESSENTIEL

> Dans l'est des États-Unis, une émergence massive de cigales se produit au printemps et au début de l'été de cette année 2021.

> Il s'agit de cigales appartenant à plusieurs espèces dont le cycle de vie dure dix-sept ans.

La précédente émergence massive du même « groupe » de cigales s'est produite en 2004.

> Il existe d'autres groupes de cigales périodiques, spécifiques aux États-Unis, dont le cycle est soit de dix-sept ans, soit de treize ans.

LES AUTRICES



KATE WONG
cheffe des rubriques
évolution et écologie
à *Scientific American*



CHERIE SINNEN
illustratrice basée
en Californie

Des cigales massivement déconfinées

Après dix-sept ans passés sous terre, des milliards de cigales dites « périodiques » émergent simultanément ce printemps et cet été dans l'est des États-Unis.

En ce moment même, dans les jardins et les forêts de l'est des États-Unis, l'un des plus grands spectacles de la nature est en cours. Bien qu'il n'ait pas la majesté épique de la migration des gnous dans le Serengeti ou la beauté sereine des cerisiers en fleurs au Japon, cet événement n'en est pas moins impressionnant. Il s'agit de l'émergence massive des cigales périodiques du grand « Groupe X ».

Tous les dix-sept ans, les milliards de membres de ce Groupe X sortent de leurs galeries souterraines pour passer leurs derniers jours à chercher un partenaire en « chantant » et à s'accoupler au soleil. Cette génération a vu le jour en 2004, époque où Facebook n'existait qu'à l'université Harvard et où *Friends* diffusait son dernier épisode. Cette année-là, les juvéniles de cigales nouvellement éclos sont tombés de la hauteur des arbres et se sont enfouis dans le sol. Ils sont restés sous terre depuis lors, en se nourrissant de la sève des racines des herbes et des arbres, et ont poursuivi lentement leur croissance. Tout ce processus a

mené à ce moment de 2021 où ils remontent en masse à la surface – jusqu'à 3,4 millions de cigales par hectare – pour se transformer en adulte, émettre leur assourdissant « chant » d'amour, qui est plus précisément une cymbalisation, et produire la génération suivante avant de mourir quelques semaines plus tard.

Pour les premiers colons européens arrivés en Amérique du Nord, l'apparition soudaine de ces insectes en grand nombre rappelait les criquets des plaies d'Égypte décrites dans la Bible. Mais alors que les criquets sont des orthoptères qui forment des essaims géants et parcourent de longues distances en ravageant les cultures, les cigales appartiennent à un ordre d'insectes entièrement différent. Elles ne forment pas d'essaims et ne volent généralement pas plus de quelques dizaines de mètres. De plus, elles ne représentent qu'une faible menace pour les plantes : elles ne mangent pas les tissus végétaux et se nourrissent seulement de la sève des arbres. Certes, les femelles font des incisions dans les branches pour y déposer leurs œufs, ce qui peut affaiblir les jeunes arbres, mais pas les arbres et arbustes adultes.



Ces cigales sorties massivement de terre en 2013 appartiennent au Groupe II, dont la prochaine émergence massive se produira en 2030. Cette année 2021, c'est le Groupe X, le plus grand, qui émerge en masse.

Il existe près de 3400 espèces de cigales dans le monde. Mais les cigales « périodiques » qui émergent en masse une fois tous les dix-sept ou treize ans sont uniques à l'est des États-Unis. Les cigales à cycle de dix-sept ans vivent dans le Nord, et les cigales à cycle de treize ans se trouvent dans le Sud et la vallée du Mississippi.

SEPT ESPÈCES ÉTATS-UNIENNES

Les trois espèces de cigales à cycle de dix-sept ans – *Magicicada septendecim*, *M. cassini* et *M. septendecula* – forment des populations d'espèces mixtes appelées en anglais *broods* et que l'on nommera ici simplement « groupes », dont les membres émergent selon le même calendrier. Les différents groupes sont identifiés par des chiffres romains. Le Groupe X est le plus grand des douze groupes de cigales à cycle de dix-sept ans, qui émergent en des années différentes.

Quant aux cigales à cycle de treize ans, elles appartiennent à quatre espèces : *Magicicada tredecim*, *M. neotredecim*, *M. tredecassini* et *M. tredecula*. Elles aussi forment des groupes, qui sont au nombre de trois.

Les cycles de vie périodiques de ces cigales, avec leurs longues phases de développement et leurs émergences synchronisées, captivent depuis longtemps les scientifiques. Comme

l'explique la spécialiste Chris Simon, de l'université du Connecticut, la plupart des autres cigales étudiées jusqu'à présent ont des cycles de vie de trois à cinq ans. Leurs juvéniles se développent à des rythmes différents selon les facteurs génétiques et environnementaux, et ils sortent de terre une fois qu'ils ont atteint une certaine taille et un certain niveau de développement. Par conséquent, la progéniture d'une même femelle émerge au cours de différentes années, explique Chris Simon. Les cigales périodiques, en revanche, restent sous terre pendant un laps de temps fixe, indépendamment du moment où elles atteignent leur taille maximale, et émergent ensuite ensemble.

La manière exacte dont les cigales périodiques ont acquis ce mode de vie unique fait l'objet de recherches actives. Les analyses d'ADN suggèrent une chronologie approximative de leur évolution. Le dernier ancêtre commun de toutes les espèces actuelles de *Magicicada* a donné naissance à deux lignées il y a environ 3,9 millions d'années, au Pliocène. L'une de ces lignées s'est elle-même ramifiée 1,5 million d'années plus tard, au Pléistocène. Les trois lignées résultantes ont finalement donné naissance aux sept espèces de cigales à cycles de treize ou dix-sept ans vivant aujourd'hui.

Émergence tardive

Les cigales périodiques mettent plus de temps que tout autre insecte à se développer du stade de l'œuf à celui d'adulte. Elles passent la majeure partie de leur vie au stade de juvénile sous terre à se nourrir et à se développer, puis émergent de façon synchrone au bout d'un nombre déterminé d'années. Leur émergence synchrone en grand nombre permet de garantir les accouplements et la reproduction de l'espèce, même après que les prédateurs se sont rassasiés. Des études suggèrent que les juvéniles de ces insectes suivent l'écoulement du temps sur la base des fluctuations saisonnières de la sève des arbres dont ils se nourrissent. Mais on ignore comment ces cigales se souviennent du nombre d'années écoulées et ce qui les pousse à faire surface.

1 Environ six à dix semaines après que les cigales femelles ont pondu leurs œufs dans les arbres, de minuscules juvéniles de cigales éclosent et tombent sur le sol, puis s'y enfouissent.

2 Au début, ces juvéniles sucent les fluides des racines des herbes, puis creusent jusqu'à 20 à 30 centimètres de profondeur pour se nourrir de la sève des racines des arbres.

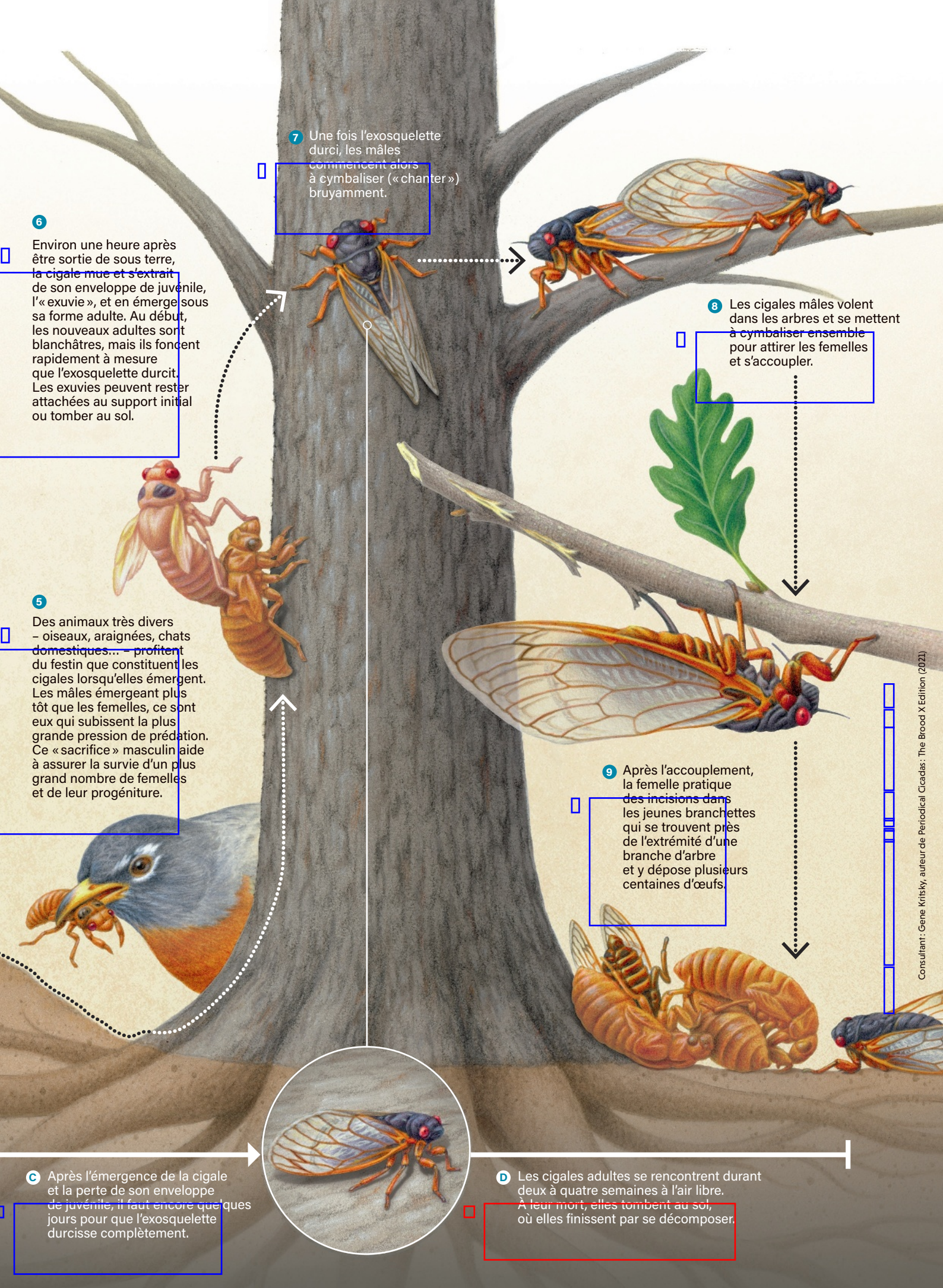
4 En mai, quelques mois avant leur dix-septième anniversaire, les juvéniles sortent à l'air libre. Au début, il y a plus de mâles que de femelles qui émergent ; six jours plus tard, c'est l'inverse.

3 En avril de leur seizième année, les cigales se frayent un chemin jusqu'à environ 10 à 15 centimètres sous la surface et attendent.

A Nées en juillet et en août, les cigales sont d'abord de pâles juvéniles ressemblant à des fourmis et mesurant à peine 2 à 3 millimètres de long.

B Elles passent par cinq stades de développement. À l'âge de 12 ou 13 ans, les cigales atteignent leur cinquième et dernier stade de développement, dit « nymphoïde ».





6

Environ une heure après être sortie de sous terre, la cigale mue et s'extrait de son enveloppe de juvénile, l'« exuvie », et en émerge sous sa forme adulte. Au début, les nouveaux adultes sortent blanchâtres, mais ils foncent rapidement à mesure que l'exosquelette durcit. Les exuvies peuvent rester attachées au support initial ou tomber au sol.

5

Des animaux très divers – oiseaux, araignées, chats domestiques... – profitent du festin que constituent les cigales lorsqu'elles émergent. Les mâles émergent plus tôt que les femelles, ce sont eux qui subissent la plus grande pression de prédation. Ce « sacrifice » masculin aide à assurer la survie d'un plus grand nombre de femelles et de leur progéniture.

C

Après l'émergence de la cigale et la perte de son enveloppe de juvénile, il faut encore quelques jours pour que l'exosquelette durcisse complètement.

7

Une fois l'exosquelette durci, les mâles commencent alors à cymbaliser (« chanter ») bruyamment.

8

Les cigales mâles volent dans les arbres et se mettent à cymbaliser ensemble pour attirer les femelles et s'accoupler.

9

Après l'accouplement, la femelle pratique des incisions dans les jeunes branchettes qui se trouvent près de l'extrémité d'une branche d'arbre et y dépose plusieurs centaines d'œufs.

D

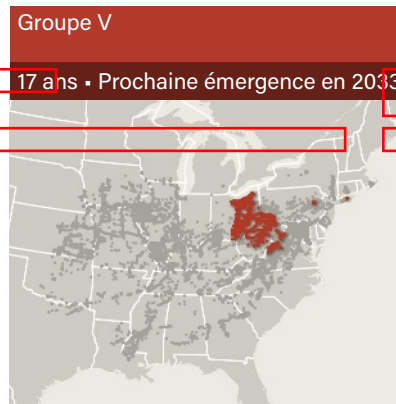
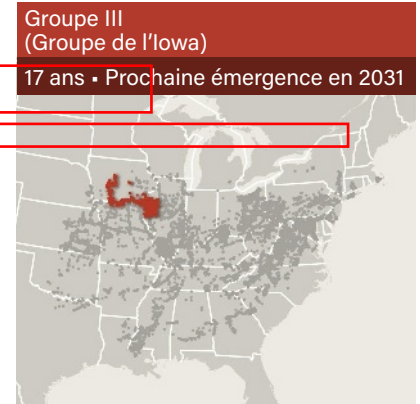
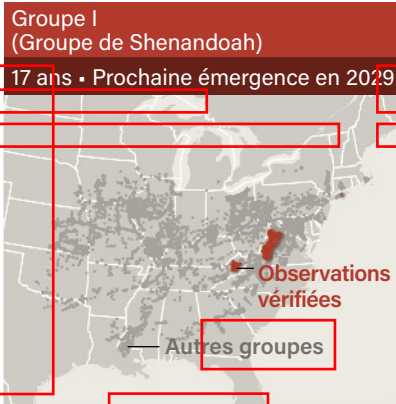
Les cigales adultes se rencontrent durant deux à quatre semaines à l'air libre. À leur mort, elles tombent au sol, où elles finissent par se décomposer.

GROUPES DE CIGALES PÉRIODIQUES ET ESPÈCES

Les cigales périodiques qui émergent tous les treize ou dix-sept ans sont uniques à l'est des États-Unis. Il existe trois espèces de cigales à cycle de dix-sept ans et quatre espèces de cigales à cycle de treize ans. Toutes les cigales ayant le même cycle de vie qui peuplent la même région et qui émergent la même année sont dites appartenir à un même « groupe » (*brood*, en anglais). Il existe douze groupes de cigales à cycle de dix-sept ans et trois groupes de cigales à cycle de treize ans.

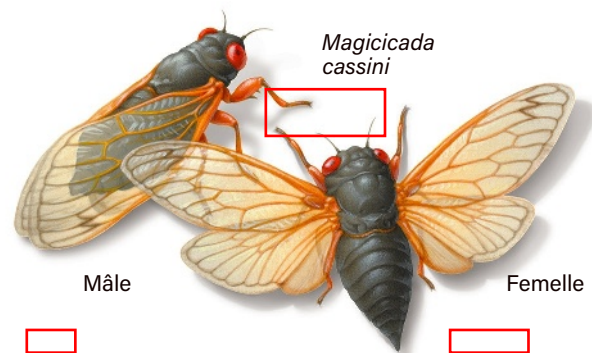
Un chiffre romain a été attribué à chaque groupe. On pense que les changements climatiques survenus au cours des 20 000 dernières années, combinés à la capacité des cigales périodiques à modifier temporairement leur cycle de vie pour émerger quatre ans plus tôt si les conditions sont favorables ou quatre ans plus tard si elles sont difficiles, sont à l'origine de la formation des groupes, dont les aires de répartition s'assemblent comme les pièces d'un puzzle.

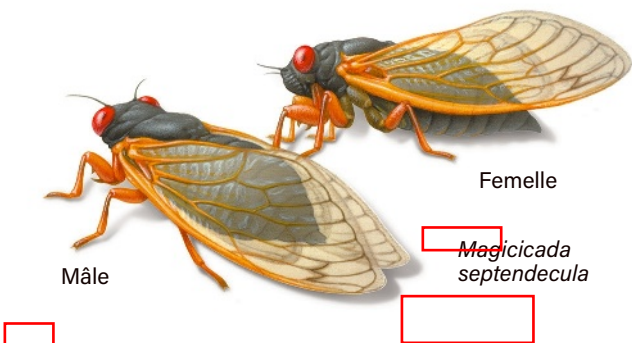
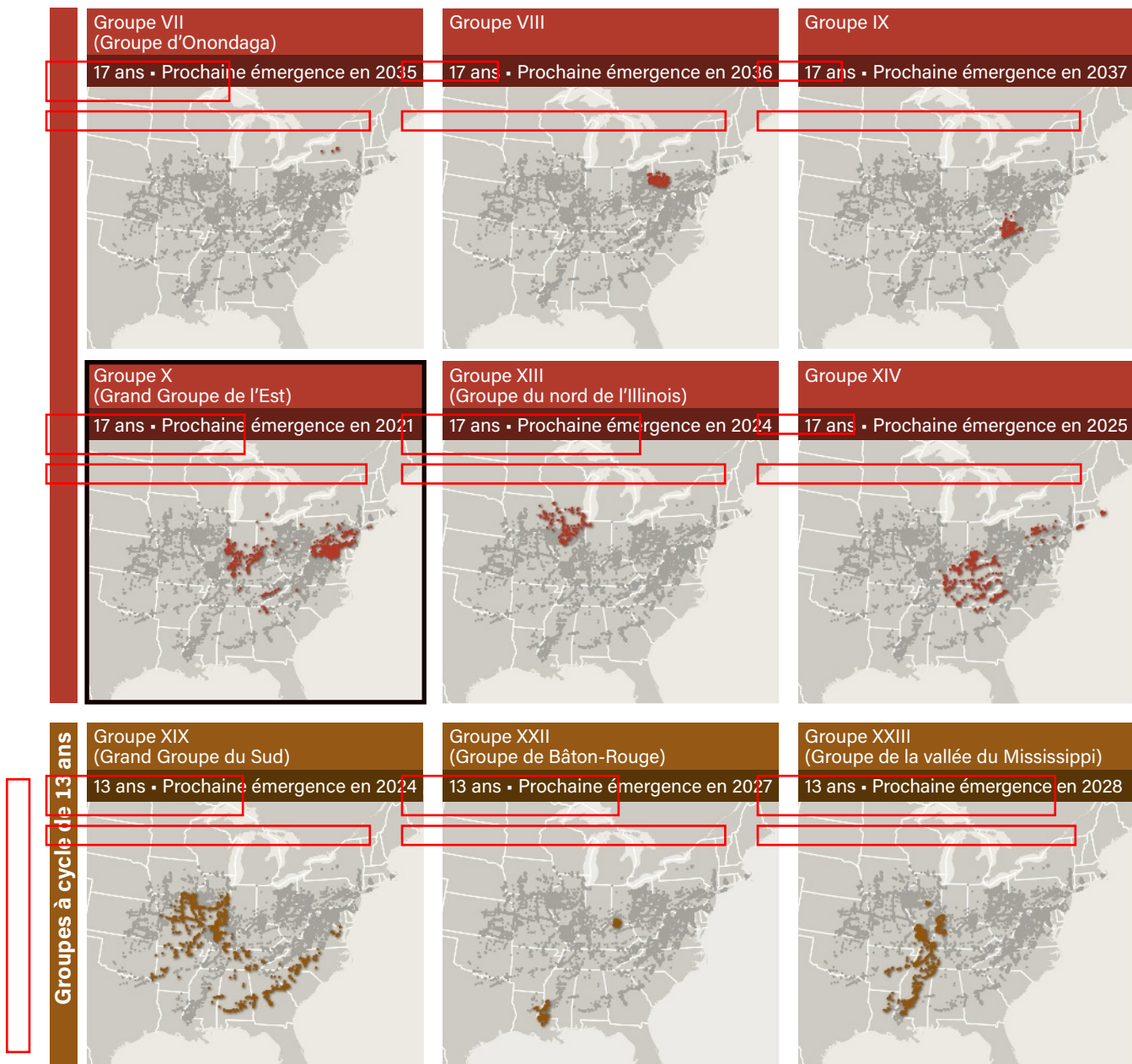
Groupes à cycle de 17 ans



LES MEMBRES DU GROUPE X

Les trois espèces de cigales de dix-sept ans – *Magicicada cassini*, *Magicicada septendecula* et *Magicicada septendecim* – ont les yeux rouges, le corps noir et des ailes aux nervures orange ; elles se ressemblent beaucoup. Mais elles diffèrent dans des détails de leur taille, de leur forme, de leur couleur et de leur cymbalisation. *M. septendecim* est la plus grande, par exemple, tandis que *M. septendecula* a de fines bandes orange sur le dessous de son abdomen, et *M. cassini* a une cymbalisation composée de crépitements suivis d'un bourdonnement strident. Chaque espèce à cycle de dix-sept ans a au moins un homologue à cycle de treize ans (*non montré*) qui lui est similaire sur les plans morphologique et comportemental.





MARGARETTA MORRIS, INJUSTEMENT OUBLIÉE

Au XIX^e siècle, Margaretta Hare Morris a découvert que les myriades de cigales américaines qui émergent en masse au printemps appartiennent à plusieurs espèces.

Ceux qui ont l'oreille fine peuvent remarquer que le chœur des cigales du Groupe X comporte plusieurs cymbalisations distinctes. Ce n'est pas parce que les cigales ont un vaste répertoire, mais parce que le Groupe X est formé de plusieurs espèces de cigales, dont *Magicicada septendecim* et *Magicicada cassini*, chacune « chantant » une mélodie différente.

Au début du XIX^e siècle, c'était encore une énigme, mais l'entomologiste américaine Margaretta Hare Morris avait des soupçons. Depuis son adolescence, elle observait attentivement l'émergence des cigales. Elle avait entendu les différents chants de cigales en 1817, puis de nouveau en 1834. Mais c'est en 1846, alors qu'elle avait 49 ans, qu'elle s'est sentie suffisamment confiante pour annoncer qu'elle avait découvert une nouvelle espèce.

En creusant sous ses arbres fruitiers, Margaretta Morris avait trouvé des juvéniles de cigales suçant les racines, cinq ans avant la date prévue de leur apparition. En 1846, le simple fait de déterminer comment les cigales pouvaient subsister sous terre pendant dix-sept ans constituait déjà une avancée. Elle a également découvert autre chose : certaines étaient nettement plus petites que les autres.

En 1846, Margaretta Morris adressa un rapport de ses découvertes à l'Académie des sciences naturelles de Philadelphie, l'une des principales organisations scientifiques de l'époque. « J'ai tendance à croire qu'il existe deux espèces, qui diffèrent suffisamment par leur taille », écrivit-elle.

Margaretta Morris décrit les grandes cigales (des *Magicicada septendecim*) comme étant calmes et ayant une cymbalisation bourdonnante. L'espèce plus petite, non nommée, était « extrêmement active, sautant en arrière d'un mouvement brusque » et émettait un son « aigu et strident, comme le bruit produit par le métier à tisser d'une tisseuse de bas ». Pour ceux d'entre nous qui ne sont pas familiers avec le son des tisserands de bas du XIX^e siècle, l'entomologiste Gene Kritsky a décrit leurs émissions sonores comme « une courte série de cliquetis rapides suivis d'un bourdonnement plus long ou d'un son de chuintement ».

Margaretta Morris n'étant pas membre de l'Académie des sciences naturelles, elle devait faire lire et présenter son rapport et ses spécimens à ses pairs par un scientifique masculin. Elle a pourtant persévéré. Elle a publié des articles dans des revues populaires et a invité d'éminents scientifiques du pays à venir dans son jardin

pour assister à ses découvertes, créant ainsi un vaste réseau de partisans prêts à approuver ses travaux.

C'est grâce à ces efforts que Margaretta Morris a été l'une des premières femmes élues à l'American Association for the Advancement of Science, en 1850, aux côtés de l'astronome Maria Mitchell. Pourtant, vous n'avez probablement jamais entendu son nom. Elle et ses travaux ont été oubliés pour plusieurs raisons, dont l'une est liée à l'espèce de cigale qu'elle avait mise en évidence.

En 1851, après la fin de la saison des cigales de cette année-là, John Cassin (un ornithologue) et James Cogswell Fisher (un géologue), membres de l'Académie des sciences naturelles qui avaient pourtant lu les rapports de Margaretta Morris, proclamèrent avoir découvert une nouvelle espèce de cigale. Elle était beaucoup plus petite et plus bruyante que sa parente plus connue (cela rappelle quelque chose, non ?). Ils la nommèrent en s'honorant eux-mêmes : *Cicada Cassinii* Fisher, 1852 (par convention, le nom d'auteur qui suit le binôme du nom scientifique de l'espèce est celui du descripteur, et l'année est celle de la publication de la description).

Pourquoi cette histoire de nom est-elle si importante ? D'après ce que je sais d'elle, Margaretta Morris ne se serait probablement pas soucée que l'insecte qu'elle a découvert porte le nom de quelqu'un d'autre. Elle n'était pas

Le nom de Cassin a été immortalisé, alors que celui de Morris a été effacé

particulièrement intéressée par la renommée scientifique, mais s'attachait juste à comprendre les merveilles du monde des insectes. Néanmoins, le fait que Cassin et Fisher aient sauté sur l'occasion pour donner leur nom à l'insecte signifie que lorsque l'excitation suscitée par l'émergence de 2021 du Groupe X sera couverte par les journaux, les podcasts et les livres, nous entendrons le nom de Cassin encore et encore. Il a été immortalisé, alors que celui de Morris a été effacé.



Margaretta Morris (1797-1867). Cette photo date des années 1840 environ. Avec sa sœur Elizabeth, botaniste, Margaretta a fait partie du milieu scientifique américain du XIX^e siècle.

Si le nom de Margaretta Morris avait été associé à cette petite créature stridente ainsi qu'à d'autres insectes qu'elle a découverts, cette femme aurait pu servir de modèle à d'autres personnes du même sexe qui, comme elle, se passionnaient pour l'étude des insectes. Les femmes entomologistes étaient rares au XIX^e siècle, et c'est encore nettement le cas aujourd'hui. Lorsque les fissures du plafond de verre sont masquées, il peut être décourageant pour la personne suivante de regarder ce plafond et d'essayer de déterminer comment le percer. C'est pourquoi il est important de se souvenir des pionnières (ou pionniers) qui ont poursuivi leurs passions malgré la solitude et le nombre de fois où quelqu'un d'autre s'est attribué le mérite de leur travail.

Ainsi, lorsque vous entendrez le son strident des cigales, que vous le trouviez odieux ou merveilleux, sachez qu'une astucieuse scientifique du XIX^e siècle, Margaretta Morris, était fascinée par ces insectes et que ses travaux ont aidé à mieux connaître ces cigales à cycle de dix-sept ans dont elle attendait l'émergence avec allégresse.

CATHERINE MCNEUR
professeure d'histoire à l'université d'État de Portland, aux États-Unis, autrice d'un livre à paraître sur Margaretta Hare Morris et Elizabeth Carrington Morris

La raison pour laquelle ces cigales ont adopté une périodicité de treize ou dix-sept ans reste inconnue. Selon une hypothèse, un cycle long à nombre premier d'années augmenterait les chances de survie en décalant l'émergence des cigales par rapport aux pics de populations de prédateurs, qui se produisent plus fréquemment, sur des cycles plus courts. Cependant, les deux autres cigales périodiques connues – l'une aux Fidji (*Raiateana knowlesi*) et l'autre en Inde (*Chremistica ribhoi*) – émergent respectivement à huit et quatre ans d'intervalle.

Des chercheurs ont proposé l'hypothèse selon laquelle les cigales périodiques ont évolué à partir de cigales non périodiques en remplaçant un calendrier d'émergence fondé sur la taille par un calendrier fondé sur l'âge. Cette modification se serait accompagnée d'un prolongement de la période de développement. Le changement climatique a probablement contribué à cette évolution. Les cigales périodiques sont sensibles à la température, qui détermine la durée de la saison de croissance. Durant le Pléistocène, la diminution des températures aurait ralenti en moyenne le développement des juvéniles, mais augmenté les variations de la période de croissance; cela aurait rendu, chez les cigales ancestrales, le moment de l'émergence encore plus variable qu'auparavant. Avec la réduction de la densité des cigales adultes émergeant lors d'une année donnée, les possibilités d'accouplement auraient diminué.

Dans de telles conditions, le passage d'une stratégie d'émergence fondée sur la taille à une stratégie fondée sur l'âge, dans laquelle les insectes restent longtemps sous terre puis remontent simultanément à la surface, augmenterait la densité de la population adulte à l'émergence et donc ses chances de trouver des partenaires et de se reproduire.

Émerger simultanément en très grand nombre submerge également les prédateurs: ainsi, même après que les oiseaux, les mammifères et les poissons se sont repus de ces insectes dodus et sans défense, il reste encore beaucoup de cigales susceptibles de s'accoupler pour assurer la génération suivante.

Le changement climatique a également façonné la répartition des groupes. Avec l'avancée et le recul des calottes glaciaires d'Amérique du Nord au cours des 20 000 dernières années, les forêts de feuillus dans lesquelles vivent les cigales ont vu leurs superficies soit diminuer, soit s'accroître. Les groupes de cigales ont évolué en réponse à ces cycles de refroidissement et de réchauffement.

Gene Kritsky, de l'université Mount St. Joseph à Cincinnati, dans l'Ohio, cite en exemple le Groupe X dans la partie occidentale de son État. Il y a 20 000 ans, la calotte glaciaire s'étendait jusqu'au nord de la ville actuelle de Cincinnati. Comme le sol était recouvert de

glace, il n'y avait pas de forêts, et donc pas de cigales, dans l'ouest de l'Ohio à cette époque.

Cependant, il y a environ 14 000 ans, la calotte glaciaire s'est retirée vers le nord. «Les forêts ont fait leur apparition, et les cigales périodiques sont venues avec elles», explique Gene Kritsky. L'Ohio accueille trois autres groupes

Émerger simultanément en très grand nombre a aussi l'avantage de submerger les prédateurs

de cigales à cycle de dix-sept ans, chacun occupant sa propre région de l'État. «La répartition dans l'Ohio des cigales de dix-sept ans correspond aux régions physiographiques créées par les périodes glaciaires», fait-il observer.

Les cigales périodiques ont pu s'adapter au changement climatique en partie parce que la durée de leur cycle de vie présente une certaine plasticité: leur calendrier d'émergence peut accélérer ou décélérer par tranches de quatre ans. Mais cette flexibilité ne garantit pas leur survie à long terme. Ainsi, le Groupe XI s'est éteint vers 1954; d'autres sont en déclin. La principale menace est la perte des habitats, souligne Gene Kritsky. En 1919, le ministère américain de l'Agriculture avait même prédit la disparition du Groupe X en raison de la déforestation.

La cartographie des émergences périodiques de cigales aide les scientifiques à évaluer l'état de santé des groupes. Depuis des décennies, les chercheurs demandent au public de signaler leurs observations – autrefois par carte postale, puis par téléphone et par courrier électronique. Aujourd'hui, ils utilisent une application développée par Gene Kritsky et ses collègues, appelée Cicada Safari, qui permet aux gens de soumettre des photos et des vidéos des cigales qu'ils rencontrent. On peut ainsi visualiser une carte de l'émergence du Groupe X en temps réel. «En 1902, l'USDA [le ministère américain de l'Agriculture] a dressé sa carte sur la base d'un peu moins de 1 000 cartes postales reçues», explique Gene Kritsky. Cette année, grâce à l'application, «nous espérons obtenir 50 000 photos». Un départ en beauté pour la promotion 2021 du Groupe X. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Kritsky, **Periodical Cicadas: The Brood X Edition**, Columbus, Ohio : Ohio Biological Survey, 2021.

M. Boulard, **Les cigales n'ont ni larve, ni nymphe : «brève de bionomie» en huit diapositives (Homoptera Cicadidae)**, *L'Entomologiste*, tome 75(6), pp. 357-360, 2020.

H. Bennet-Clark, **Le chant sexuel des cigales**, *Dossier Pour la Science*, n° 34, janvier 2002.

C. Simon, **Evolution of 15- and 17-year periodical cicadas**, *Bulletin of the Entomological Society of America*, vol. 34, pp. 163-176, 1988.

Couchés à la craie sur des tableaux noirs, les raisonnements
~~des mathématiciens expriment la beauté de leur discipline.~~
La preuve en images.

Couchés à la craie sur des tableaux noirs, les raisonnements
~~des mathématiciens expriment la beauté de leur discipline.~~
La preuve en images.

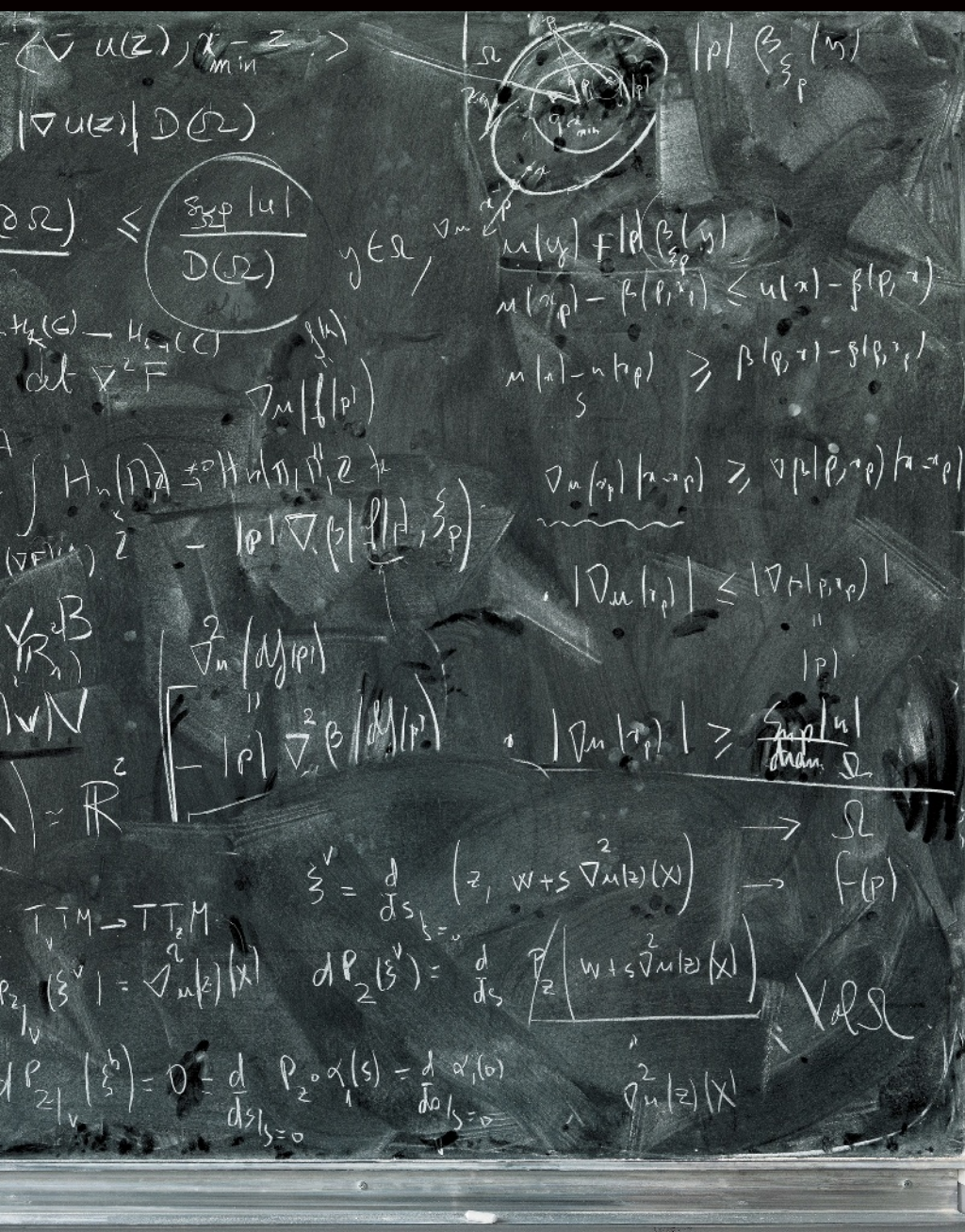


L'AUTRICE



CLARA MOSKOWITZ
cheffe des rubriques
espace et physique
à Scientific American

Photographies de JESSICA WYNNE



ISOPÉRIMÉTRIE

Une énigme remontant à l'Antiquité, le « problème de Didon », est la suivante : parmi toutes les figures planes ayant le même périmètre, laquelle entoure la plus grande superficie ? Comme les Grecs le savaient, la réponse est le cercle. Cela a été prouvé au XIX^e siècle. Mais un problème apparenté persiste en géométrie non euclidienne. Gilles Courtois, directeur de recherche à l'Institut de mathématiques de Jussieu, à Paris, étudiait cette question. « Nous pensions avoir trouvé une voie vers une solution, dit-il. Le schéma était si simple que nous avons pu l'écrire au tableau. » Malheureusement, l'idée n'a pas fonctionné, et le projet « reste un travail en cours ».

Même lorsqu'elles sont impénétrables, les mathématiques sont belles. La photographe américaine Jessica Wynne a entrepris de saisir cet attrait et a commencé en 2018 à photographier les tableaux noirs des mathématiciens à travers le monde. «Pénétrer dans des mondes qui sont en dehors de mon champ de connaissances m'a toujours intéressée», explique Jessica Wynne. Sans comprendre ce que représentaient les mathématiques figurant sur les tableaux noirs, elle a pu les apprécier sur un plan purement esthétique. «C'est un sentiment similaire à

celui que j'éprouve lorsque je contemple une peinture abstraite. Mais il s'y ajoute un intérêt du fait que, sous la surface, il y a beaucoup de signification et de profondeur, et que les mathématiques s'efforcent de révéler une vérité universelle.»

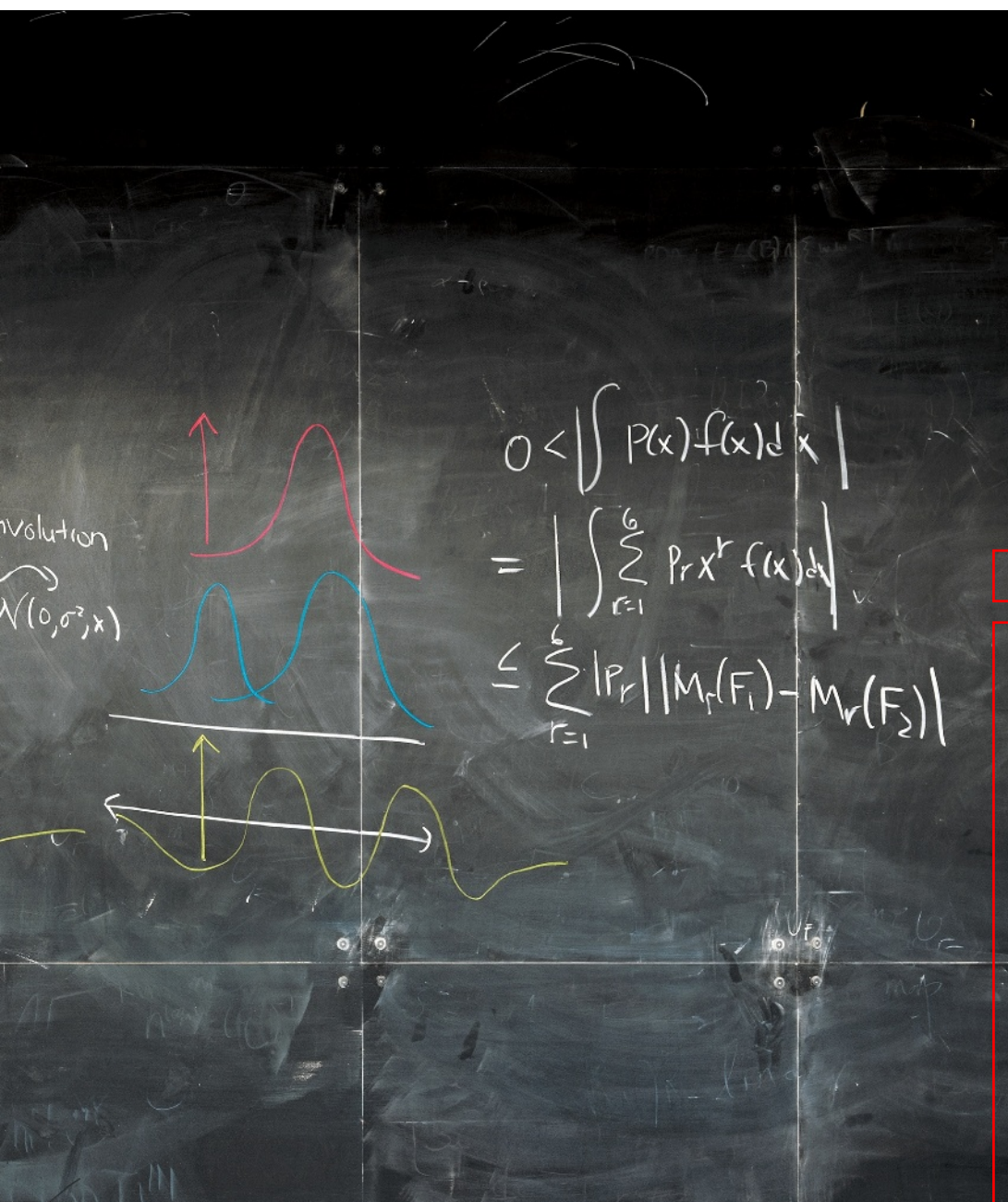
Jessica Wynne a été attirée par l'univers des maths lorsqu'elle s'est liée d'amitié avec deux mathématiciens qui étaient en vacances près de l'endroit où elle passait ses étés à Cape Cod, dans le Massachusetts. En découvrant leurs recherches, elle a remarqué de nombreux parallèles entre l'activité mathématique et l'activité artistique. «J'ai été vraiment surprise de voir comment ils travaillent et à quel



point ce qu'ils font est créatif», dit-elle. Lorsqu'elle a commencé à se rendre dans différentes universités pour rencontrer d'autres mathématiciens, elle a constaté que leurs tableaux noirs sont de styles très divers. «Certains étaient très propres, soignés et très bien réfléchis, se souvient-elle. Et d'autres n'étaient qu'explosion et chaos. Les tableaux noirs constituaient presque des portraits de la personne, tant ils dépendaient de la personnalité du mathématicien.»

Un grand nombre de ses photographies sont rassemblées dans un livre intitulé *Do Not Erase. Mathematicians and Their Chalkboards* («Ne pas effacer. Les mathématiciens et leurs

tableaux noirs»), publié en juin 2021 par Princeton University Press. Jessica Wynne a l'intention de poursuivre le projet, d'autant que ses voyages ont été écourtés par la pandémie de Covid-19. Elle avait prévu de visiter le département de mathématiques de l'université de Cambridge, jusqu'à ce qu'elle apprenne que les tableaux noirs y avaient tous été remplacés par des tableaux effaçables à sec et par des tableaux numériques. «Je suis très attirée par la nature analogique du travail sur un tableau noir, explique-t-elle. J'ai remarqué que, dans beaucoup d'endroits, on se débarrassait de ces types de tableaux, et j'ai ressenti une urgence à documenter cela.» ■



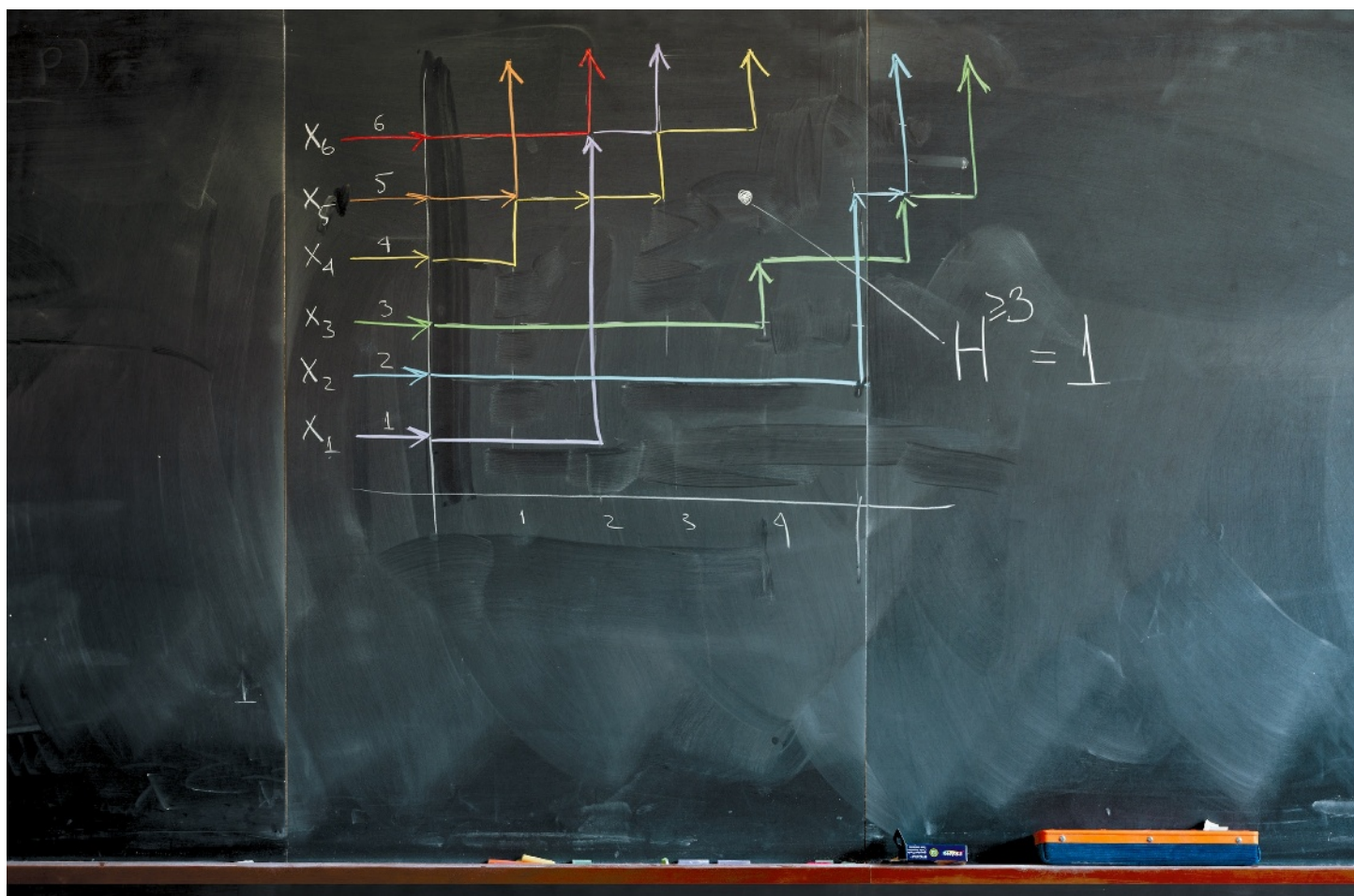
GAUSSIENNES MÉLANGÉES

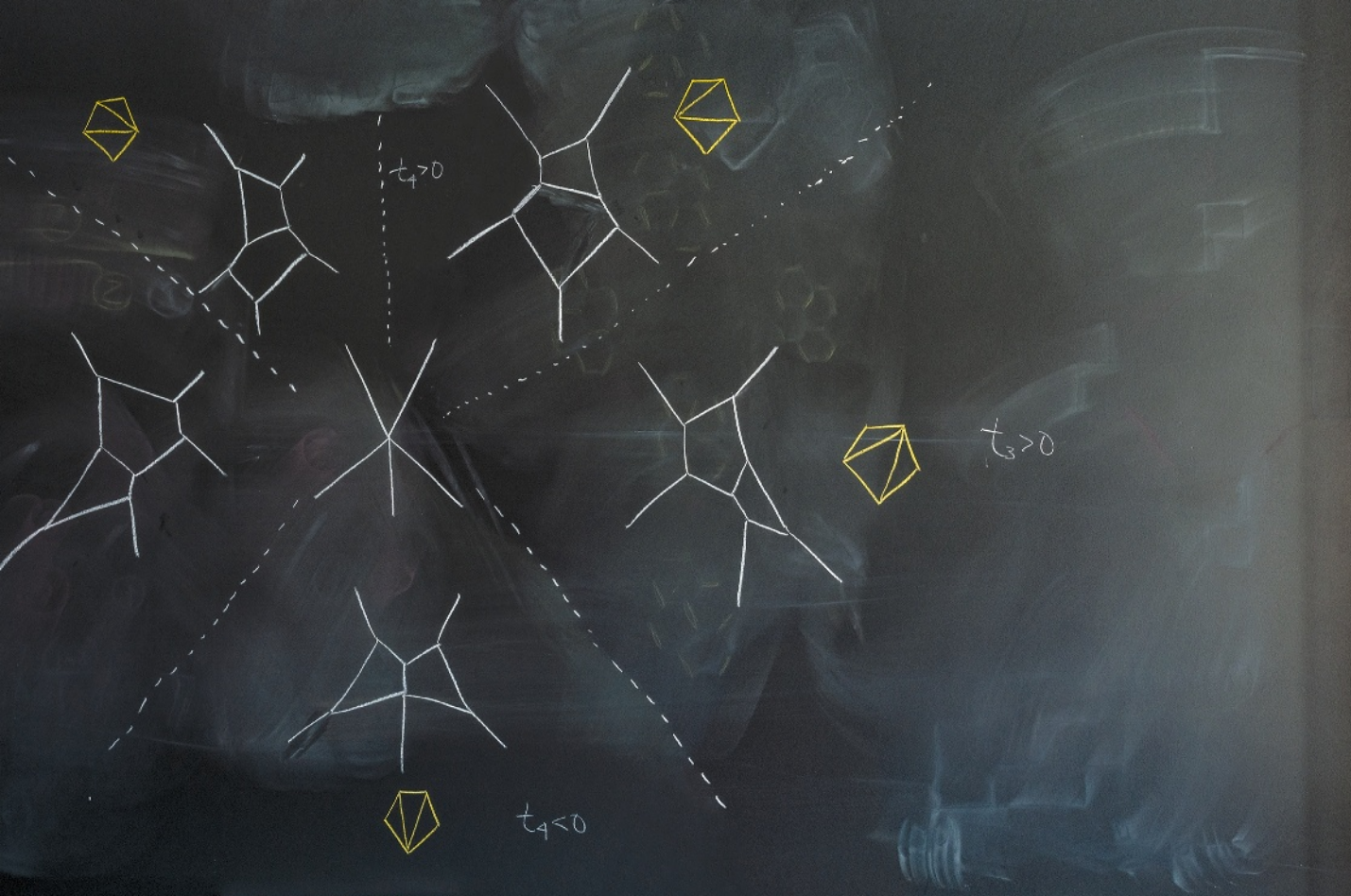
Les mesures physiques (telles que la taille de femmes choisies au hasard dans une population) produisent généralement une distribution appelée «gaussienne», un tracé ayant l'allure d'une cloche. Les algorithmes d'apprentissage automatique sont souvent nourris avec des données hétérogènes (par exemple, les hauteurs de femmes et d'hommes choisis au hasard), et l'un des défis consiste à séparer les mesures relatives à un mélange en deux composantes ou davantage. Ankur Moitra, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), et ses collègues ont découvert un moyen de séparer les courbes qui ne nécessite que les six premiers «moments», des grandeurs caractéristiques de la distribution observée. «Ce que j'ai dessiné sur le tableau noir est la preuve clé de notre article, explique Ankur Moitra. Il s'avère que c'est équivalent à pouvoir prendre deux mélanges différents, les soustraire, et montrer que la fonction résultante croise l'axe des zéros six fois au plus.»

ONDES RAMIFIÉES

Ces diagrammes en forme de bâtonnets représentent des instantanés de l'évolution d'ondes. Les lignes blanches codent les positions des pics d'une configuration de vagues en eau peu profonde à un instant donné. « Ces vagues ont des interactions intéressantes », explique Lauren Williams, mathématicienne à l'université Harvard. « Par exemple, deux vagues peuvent se rencontrer et ne former qu'une seule vague à la sortie, et, si on laisse le temps varier, on voit que les vagues interagissent selon différents motifs. »

Lauren Williams et son collaborateur Yuji Kodama, de l'université d'État de l'Ohio, se sont servis de ces diagrammes pour étudier les solutions de l'équation dite « de Kadomtsev-Petviashvili » (KP) décrivant le comportement d'un certain type d'ondes. Ils ont découvert que les motifs ondulatoires qui découlent d'une des classes de solutions peuvent être classés à l'aide des triangulations d'un polygone (en jaune). « Si l'on modifie légèrement les paramètres des solutions, ces motifs ondulatoires peuvent dégénérer et former, par exemple, le motif blanc en étoile de mer représenté au centre », explique-t-elle. En bas à gauche, on voit ce que Yuji Kodama et Lauren Williams nomment un « diagramme-go », du nom du jeu de go joué avec des pierres noires et blanches, jeu qu'ils utilisent pour étudier certaines solutions de l'équation KP.



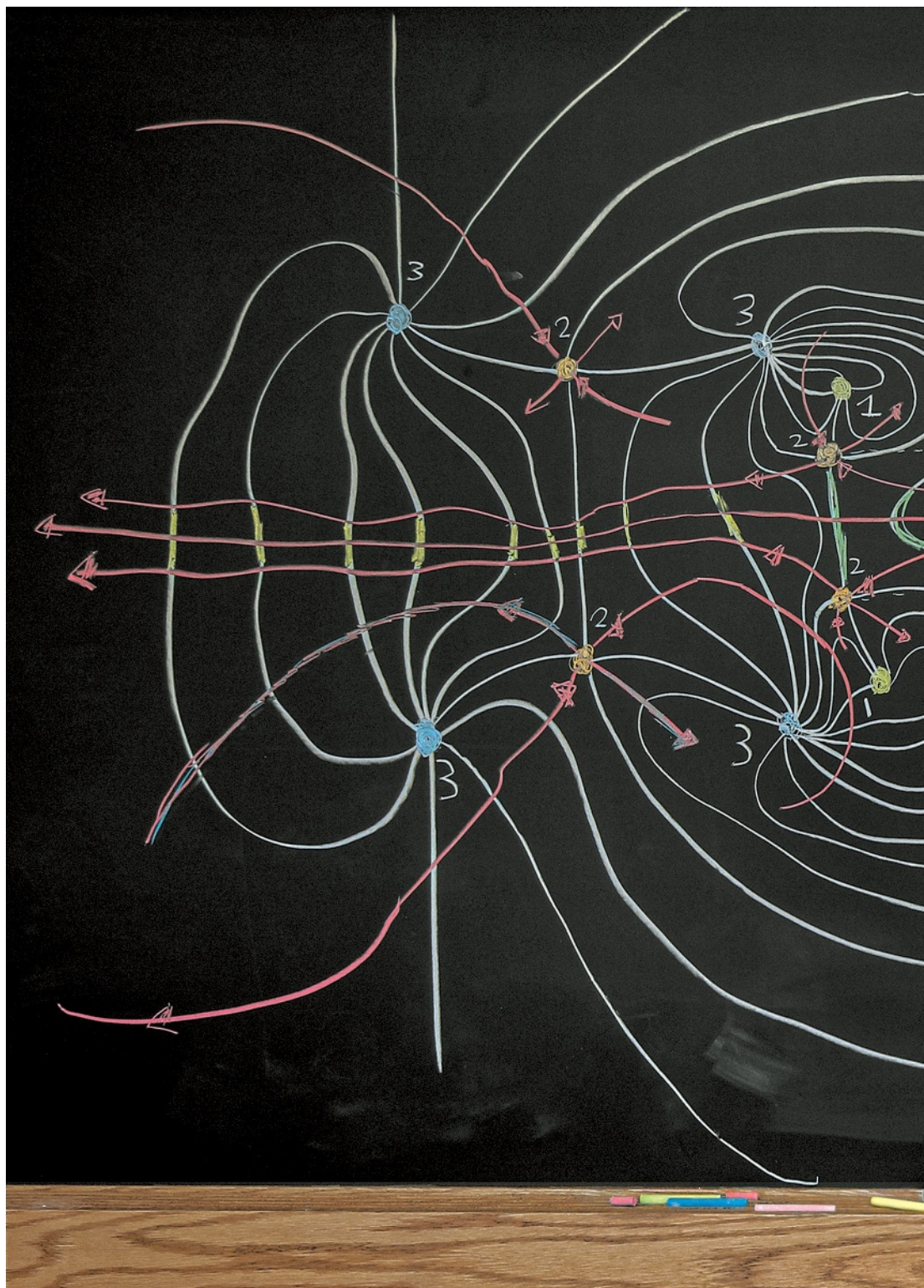


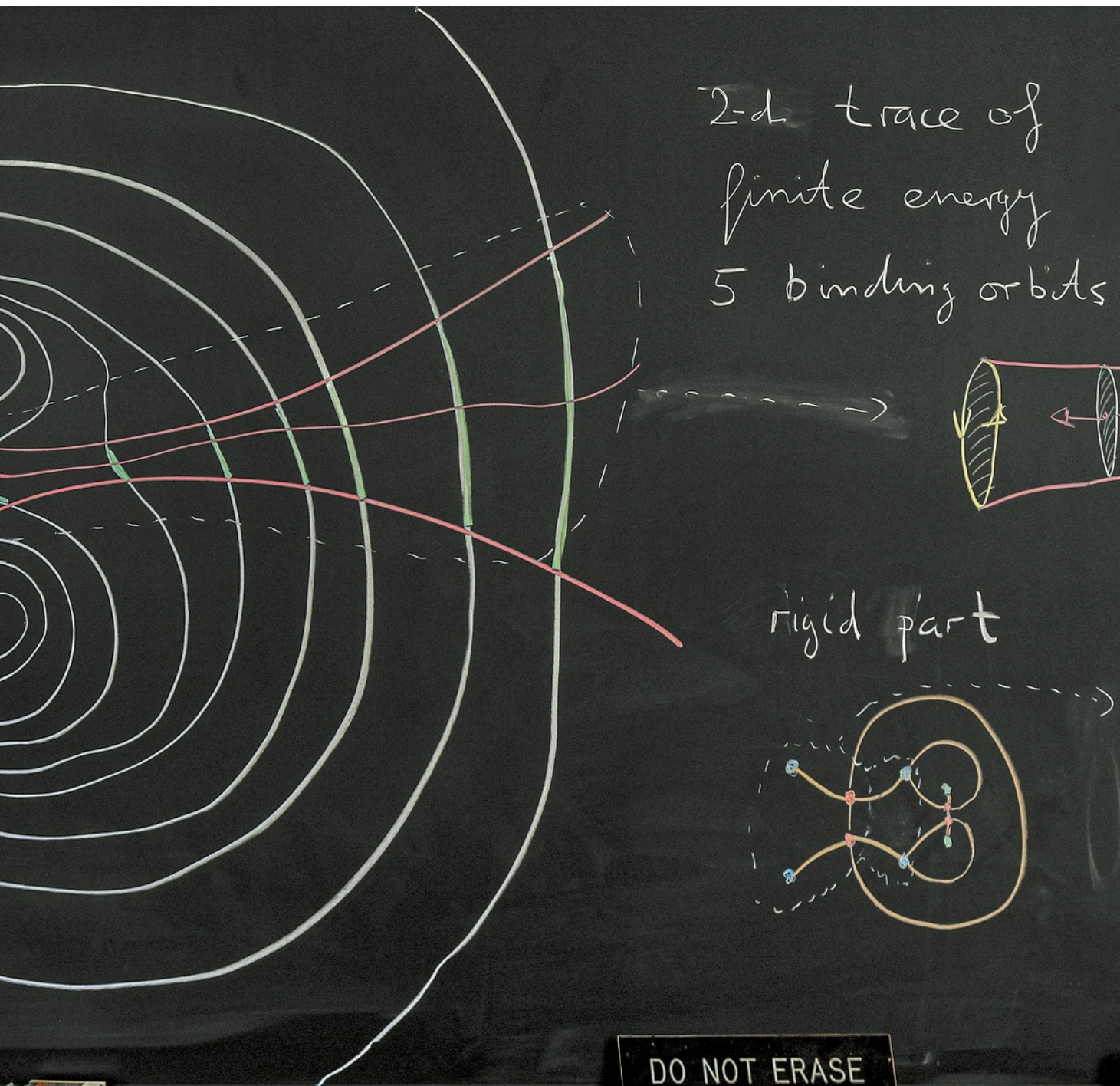
EN MARCHÉ

Dans ce « modèle à sommets », chaque ligne colorée représente le chemin qu'emprunte un piéton contraint à se déplacer sur un réseau carré (un quadrillage). Les chemins des marcheurs ne peuvent pas se chevaucher, de sorte que lorsque deux d'entre eux se rencontrent, ils doivent décider de la direction que chacun prendra. La décision peut être biaisée ; par exemple, les marcheurs de couleur froide peuvent être plus enclins à aller vers l'est que vers le nord par rapport aux marcheurs de couleur chaude. « Malgré la simplicité apparente du modèle, le comportement à grande échelle est complexe et étroitement lié à un certain nombre de phénomènes mathématiques et physiques », explique Alexei Borodin, mathématicien au MIT. Les modèles à sommets peuvent être étendus pour inclure beaucoup plus de marcheurs et beaucoup plus de couleurs. « La combinaison d'une simplicité trompeuse, d'une profondeur cachée et de l'efficacité des mathématiques dans l'analyse constitue pour moi l'attrait de ce système. » Alexei Borodin précise qu'il apprécie également « le facteur esthétique ».

DU CHAOS ORGANISÉ

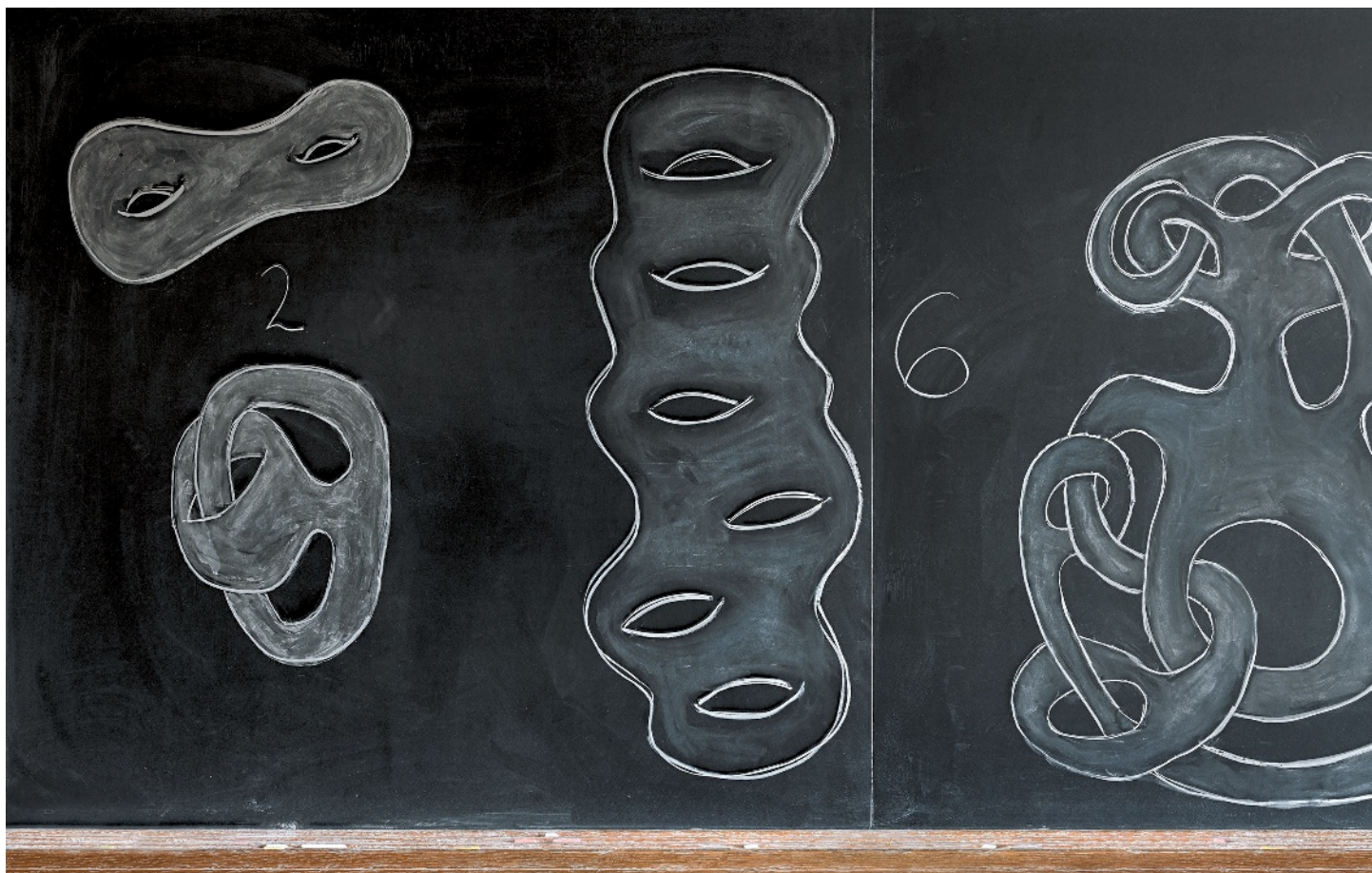
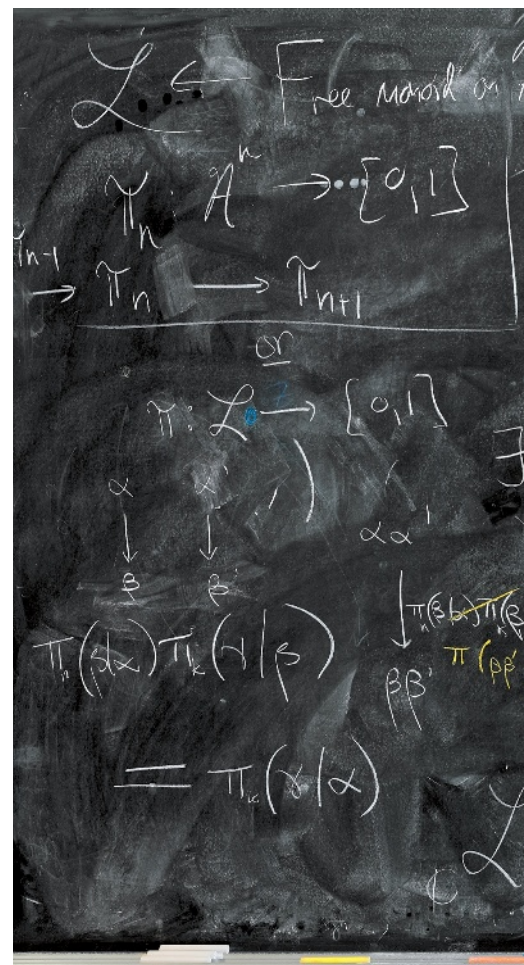
Il peut y avoir de l'ordre dans le chaos. Entre 1999 et 2003, Helmut Hofer, de l'institute for Advanced Study de Princeton, et ses collègues ont développé un domaine nommé « dynamique symplectique », qui permet d'étudier cet ordre. Le tableau de Helmut Hofer représente des « feuilletages d'énergie finie » (*lignes blanches*) – des outils permettant de caractériser le chaos dans un système dynamique, par exemple un satellite se déplaçant entre la Terre et la Lune. Ce système complexe de surfaces est lié à l'évolution de la position et de la quantité de mouvement d'un satellite soumis à la gravité des deux corps planétaires. Helmut Hofer espère que « cette bien meilleure compréhension du chaos aura finalement des applications dans la conception des missions spatiales ». Par exemple, on a dans le passé utilisé les connaissances sur les systèmes chaotiques pour économiser le carburant lors des missions spatiales, mais au prix d'une plus longue durée de voyage. Helmut Hofer suggère que ces nouveaux travaux pourraient aider à économiser encore plus de carburant, sans allonger la durée d'une mission.

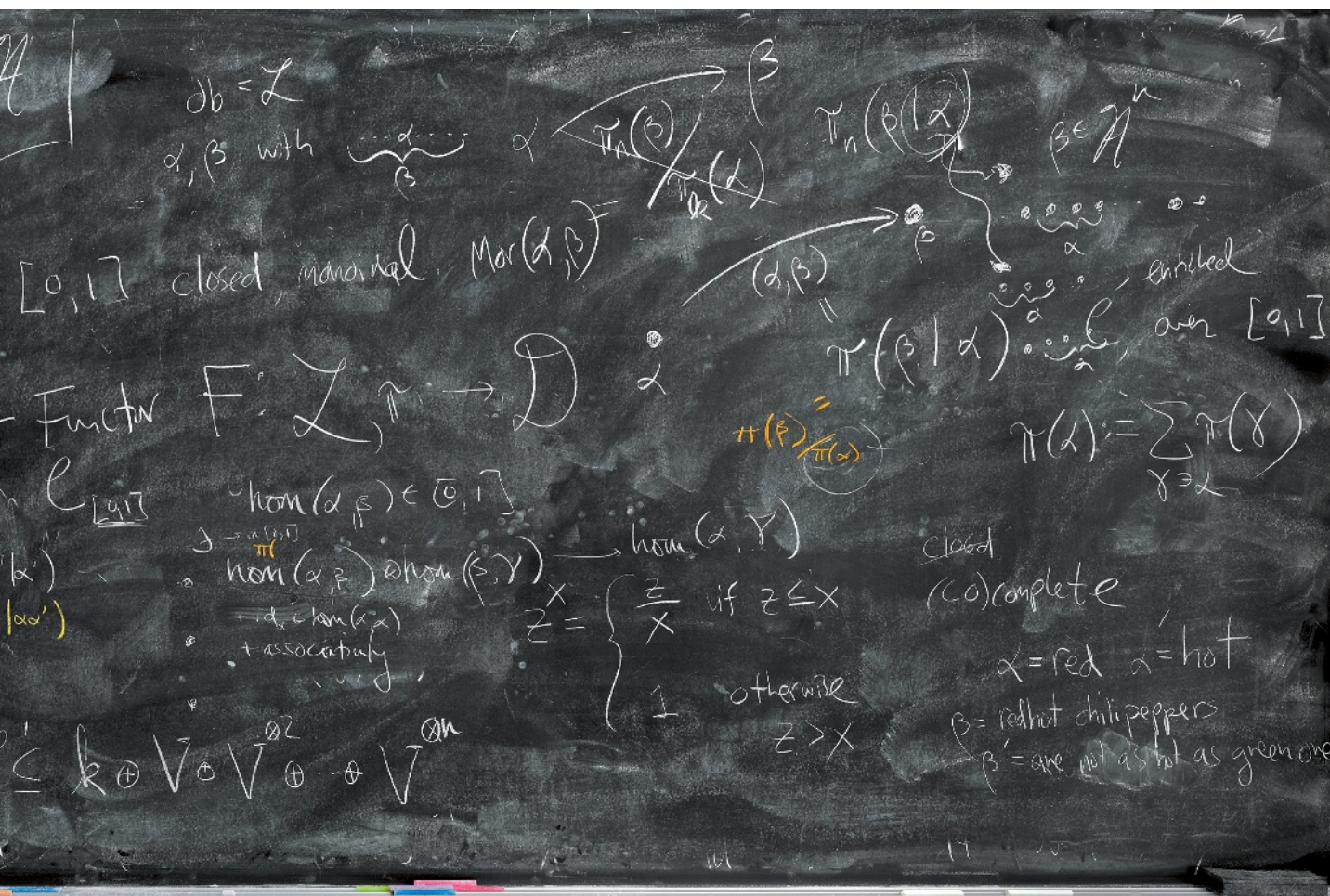




UNE COLLABORATION

Les tableaux noirs sont souvent les meilleurs outils pour les collaborations entre mathématiciens. Ce sont des endroits visuels et tactiles où les idées et les intuitions de deux personnes peuvent se rejoindre. John Terilla, du Queens College, à New York, et Tai-Danae Bradley, chez X – The Moonshot Factory (anciennement Google X), tentaient de comprendre la structure mathématique cachée à l'œuvre dans le langage naturel. « C'était la première fois que nous parlions de formaliser cette structure d'une façon particulière, raconte John Terilla. Tai et moi travaillions ensemble au tableau, sur lequel figurent nos deux écritures. Le grand "∃ Functor F" [il existe un foncteur F], par exemple, est de moi; le "hom(α, β) ∈ [0, 1]" en dessous est de Tai. » Cette recherche fait partie d'une quête générale de John Terilla, qui cherche « ce qui est à l'œuvre en coulisses pour comprendre ce qui se passe ». « Monter d'un cran en abstraction pour expliquer quelque chose, c'est un peu comme faire un détour pour grimper sur une colline et regarder autour de soi – c'est utile en recherche, car cela peut indiquer la direction à suivre lorsqu'on est en territoire inconnu. »





DES FORMES QUI SE CORRESPONDENT

Une tasse à café et un beignet «doughnut» ont la même forme du point de vue de la topologie, qui classe les surfaces en fonction du nombre de trous qu'elles comportent. Parce que la tasse et le beignet ont tous deux un seul trou et parce qu'on peut les courber et les étirer en obtenant la même forme sans faire de déchirures ou de perforations, ces objets sont topologiquement équivalents. De la même façon, les deux surfaces étiquetées «2» sont topologiquement équivalentes, tout comme les surfaces étiquetées «6». «Ces objets sont très amusants», confie Nancy Hingston, mathématicienne au TCNJ (The College of New Jersey, aux États-Unis), qui étudie les trajectoires sur de telles formes dans le cadre de ses travaux de géométrie différentielle.

BIBLIOGRAPHIE

J. Wynne, **Do Not Erase. Mathematicians and Their Chalkboards**, Princeton University Press, 2021.

La fabuleuse découverte de l'insuline

Il y a cent ans, dans un petit laboratoire de Toronto, quatre universitaires firent une découverte qui a changé la vie de millions de diabétiques.

L'insuline. Rarement une découverte a été tant attendue. Avant la mise en évidence du rôle de cette hormone et son utilisation comme traitement, il n'y avait aucun espoir de survie pour les patients atteints de diabète de type 1. Rarement, sauf peut-être pour les vaccins à ARN contre le Covid-19, une recherche a abouti si rapidement à un produit disponible pour les patients. Jamais le prix Nobel de physiologie ou médecine n'a été décerné si vite après une découverte, comme ce fut le cas en 1923 pour l'insuline. L'un de ses découvreurs, le Canadien Frederick Banting, reste toujours le plus jeune récipiendaire de ce prix prestigieux. Jamais avant Banting et son confrère écossais John Macleod, un lauréat n'avait renoncé à recevoir son prix à Stockholm, le 10 décembre, jour de l'anniversaire d'Alfred Nobel, comme c'est la tradition. Sans compter les nombreuses innovations dont l'insuline a été la source. C'est la fascinante histoire de cette découverte, dont nous célébrons cette année le centième anniversaire, que nous présentons ici.

Le diabète est une pathologie connue depuis l'Antiquité, et dont la forme sévère – aujourd'hui nommée « diabète de type 1 », mais appelée « diabète juvénile » auparavant, car elle touche plus fréquemment les enfants et les jeunes – était fatale jusqu'à la découverte de l'insuline. C'est une pathologie dont la prévalence est en pleine expansion, cause de comorbidité. On estime que 463 millions d'adultes âgés de 20 à 79 ans dans le monde ont un diabète (types 1 et 2 confondus), soit une personne sur 11, selon l'Atlas 2019 de la Fédération internationale du diabète. Et le nombre de personnes diabétiques pourrait atteindre 700 millions en 2045.

UNE PATHOLOGIE ANCIENNE QUI SUCRE LES URINES

Tous les textes médicaux retrouvés dans diverses civilisations rapportent une description des principaux symptômes du diabète : une soif intense, une fréquente envie d'uriner et un

Charles Best et Frederick Banting dans leur laboratoire en 1921, sur une peinture de Robert Thom réalisée vers 1952.



L'ESSENTIEL

> Fin 1920, un jeune chirurgien canadien, Frederick Banting, se prend de passion pour le diabète.

> Si, depuis l'Antiquité, cette maladie est caractérisée par la présence de sucre dans les urines, le mécanisme sous-jacent demeure énigmatique, mais au tournant du xx^e siècle, plusieurs chercheurs établissent un lien avec le pancréas.

> Banting convainc un spécialiste des sucres de l'université

de Toronto, John Macleod, de le laisser étudier le diabète chez des chiens. Macleod lui assigne un étudiant, Charles Best.

> En 1921, Banting, Best, Macleod, ainsi qu'un éminent biochimiste, James Collip, isolent et purifient l'insuline, l'hormone du pancréas qui régule la glycémie.

> Le traitement par cette molécule sauve vite des millions de vies.

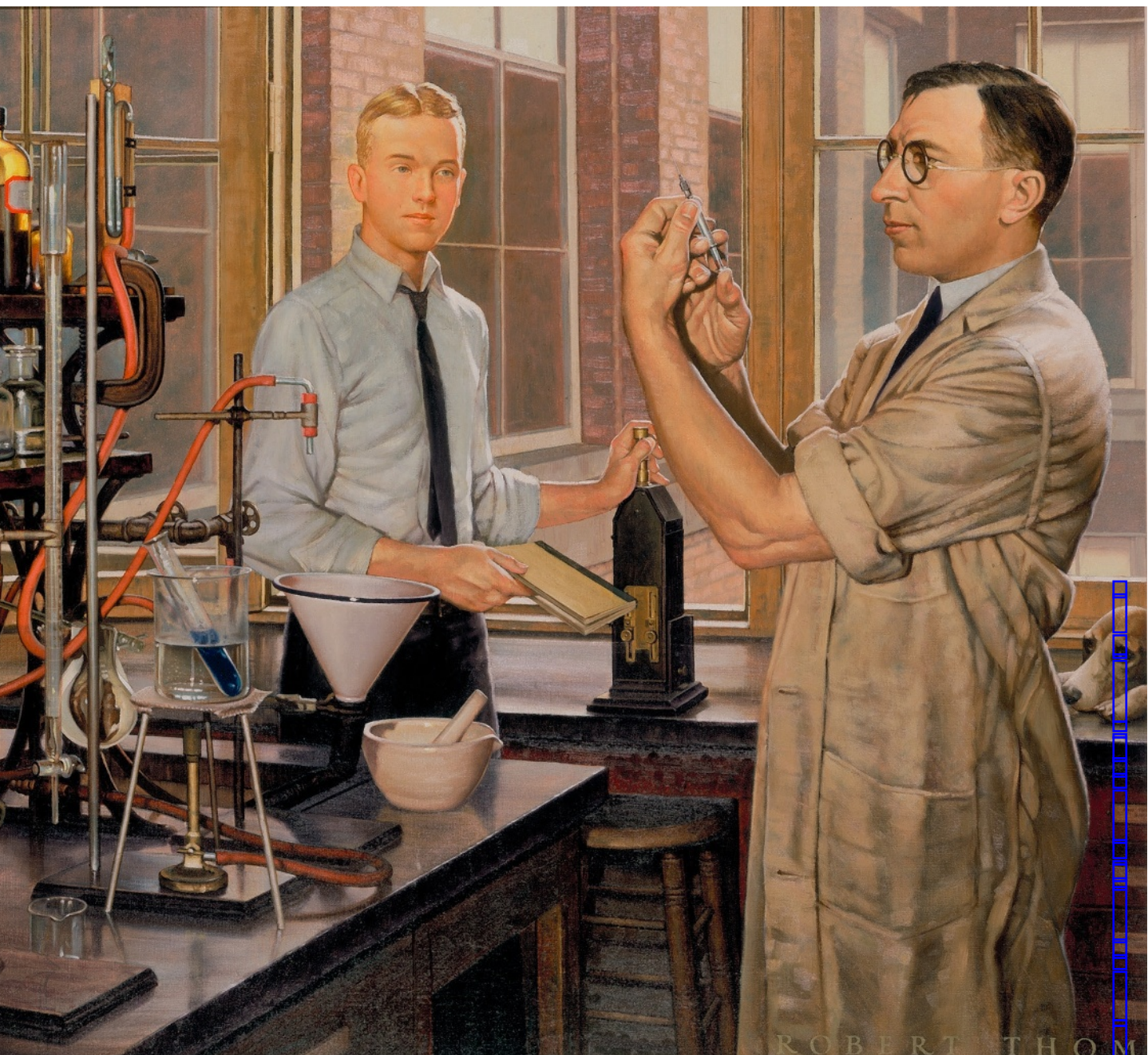
LES AUTEURS



WILLIAM ROSTÈNE
neuroendocrinologiste,
directeur de recherche
émérite de l'Inserm
au sein de l'Institut
de la vision, à Paris



PIERRE DE MEYTS
médecin endocrinologue
et biochimiste, professeur
invité à l'institut Duve,
à Bruxelles, en Belgique



© From the collection of Michigan Medicine, University of Michigan, Gift of Pfizer, Inc., UMHS.43



Les quatre protagonistes de la découverte de l'insuline : de gauche à droite, Frederick Banting (1891-1941, ici en 1922), Charles Best (1899-1978, ici en 1921), John Macleod (1876-1935, ici vers 1923) et James Collip (1892-1965, ici vers 1920).

goût sucré des urines. Les Égyptiens en font état dans un parchemin remontant à 1550 avant notre ère et retrouvé dans un sarcophage à Louxor, ainsi que des écrits de la médecine hindoue et chinoise. Dans les années 1000, des écrits grecs et le *Canon* du médecin persan Avicenne rapportent également des observations de patients diabétiques. Au XVII^e siècle, Thomas Willis, médecin du roi Charles I^{er} d'Angleterre, distingue les différents types de diabète. Mais c'est au XIX^e siècle que commence véritablement la connaissance scientifique de cette pathologie.

En 1815, le chimiste français Michel-Eugène Chevreul identifie le sucre présent dans les urines des personnes diabétiques comme

médecine consacrée à l'étude anatomique du pancréas, un jeune Allemand travaillant à Berlin, Paul Langerhans, caractérise des amas de petites cellules dans cet organe, sans toutefois en comprendre la fonction.

C'est en 1889 à l'université de Strasbourg, grande université allemande à cette époque, que deux chercheurs travaillant dans le laboratoire de Bernhard Naunyn – Oskar Minkowski et Joseph von Mering – réalisent l'expérience fondamentale ayant permis une avancée majeure. Ils réussissent l'ablation du pancréas chez un chien, ce qui provoque une intense glycosurie – une forte augmentation de la concentration de glucose dans les urines. En reproduisant l'expérience chez d'autres chiens, Minkowski confirme que la suppression du pancréas crée un modèle du diabète. De plus, lorsqu'après l'ablation de l'organe, on en greffe un bout dans l'abdomen du chien, la glycosurie disparaît. Ainsi, le pancréas contient une substance capable de diminuer la concentration de glucose élevée observée chez le diabétique.

Cependant, Minkowski et von Mering ne savaient pas quelles cellules produisaient cette substance dans le pancréas. Ce n'est que quelques années plus tard, en 1893, qu'Édouard Laguesse, professeur à la faculté de médecine de Lille, suggère que les «îlots de Langerhans» sont la source de cette «sécrétion interne» du pancréas, sécrétion se déversant dans le sang et qui pourrait réguler la concentration de glucose dans les urines et le sang. On doit également à Laguesse le terme «endocrine» pour ce type de sécrétion interne.

La substance libérée par les îlots de Langerhans est nommée «insuline» pour la première fois en 1909 par un physiologiste belge, Jean De Meyer. En ce début du XX^e siècle, plusieurs chercheurs sont proches de sa découverte, soit parce qu'ils réussissent à obtenir des extraits pancréatiques capables de

étant le même que celui du raisin, bientôt nommé «glucose». En 1855, Claude Bernard montre que le foie peut fabriquer du glucose à partir d'un précurseur, le glycogène. Quatorze ans plus tard, en 1869, dans sa thèse de

La substance libérée par les îlots de Langerhans est nommée «insuline» pour la première fois en 1909

diminuer la concentration de glucose dans les urines ou le sang, soit parce qu'ils tentent des expériences chez l'humain. Parmi eux se distinguent notamment le Français Eugène Gley, l'Allemand George Zuelzer, les Américains Ernest Scott, Israël Kleiner ou John Raymond Murlin – le découvreur en 1923 de l'autre hormone pancréatique, le glucagon – et un Roumain, Nicolas Paulesco, qui a travaillé à Paris dans le laboratoire du diabétologue Étienne Lancereaux. Mais parce que leurs extraits n'étaient pas assez purifiés ou étaient accompagnés de sérieux effets secondaires, les premières études chez l'humain ne donnaient pas de résultats.

LA SAGA DE TORONTO

Rien n'indiquait que la découverte viendrait du Canada. Tout aussi surprenante fut la rapidité de cette découverte (neuf mois) par des chercheurs qui n'étaient pas diabétologues et dont les plus jeunes n'avaient encore jamais fait de recherche. Cette fabuleuse histoire est celle de Frederick Banting, Charles Best, John Macleod et James Collip.

Frederick Banting est né dans une ferme à 90 kilomètres au nord-ouest de Toronto. Il fait ses études de médecine à l'université de Toronto et, volontaire durant la Première Guerre mondiale, il est affecté en 1918 dans un hôpital derrière les tranchées à Cambrai où il exerce la chirurgie d'urgence avant d'être blessé en septembre 1918 par un éclat d'obus dans le bras. De retour au Canada, il ne trouve pas de poste à l'hôpital à Toronto et décide de s'installer à London, où se trouve l'université Western Ontario. Il n'a pas suffisamment de patients et prend en parallèle un poste d'enseignant à temps partiel dans le laboratoire de Frederick Miller.

Le 30 novembre 1920, Banting doit donner un cours sur le métabolisme des hydrates de carbone (les sucres). Il se plonge dans la lecture d'un article de synthèse de Moses Barron, pathologiste américain de l'université du Minnesota, récemment paru dans le journal *Surgery, Gynecology & Obstetrics*, sur les relations entre les îlots de Langerhans et le diabète, qui fait un rappel des données obtenues chez l'animal et chez l'humain sur la régulation de la glycémie. Après son cours, fasciné par cet article, Banting demande à Miller s'il peut travailler sur ce sujet dans son laboratoire. Le diabète n'étant pas son thème de recherche, Miller lui propose de s'adresser à un professeur écossais arrivé en 1918 à l'université de Toronto, John Macleod, spécialiste des hydrates de carbone.

Ce dernier reçoit sans grand enthousiasme ce jeune chirurgien et finit par accepter, en raison de la pugnacité de Banting, que celui-ci vienne faire un stage dans son laboratoire au cours de l'été 1921. Il lui offre la possibilité d'obtenir l'aide d'un jeune

étudiant, Charles Best, et leur propose un petit espace de travail et douze chiens pour réaliser des ablations du pancréas.

DES ABLATIONS DU PANCRÉAS, ET APRÈS ?

Le 17 mai 1921, Banting et Best commencent à travailler ensemble. Ils doivent d'abord nettoyer le petit laboratoire poussiéreux mis à leur disposition; en outre, il n'y a pas de véritable animalerie avec de bonnes conditions sanitaires pour maintenir des chiens; enfin, pendant l'été 1921, une chaleur torride s'abat sur Toronto. Dans ces conditions, les premiers résultats sont un échec. Les deux jeunes hommes font part de leurs travaux à Macleod, parti pour l'été en Écosse, son pays natal. À son retour en septembre, des discussions animées après quelques résultats encourageants permettent à Banting et Best de poursuivre leur travail. Banting est chargé de la chirurgie et Best de la purification d'extraits pancréatiques.

Le 14 novembre 1921, lors d'une réunion au laboratoire, il est décidé de s'intéresser au



Charles Best et Frederick Banting sur le toit du bâtiment de leur laboratoire à l'université de Toronto, en août 1921, avec un des chiens sur lesquels ils travaillaient.

temps de survie des animaux après l'ablation du pancréas en fonction des extraits pancréatiques qui leur sont administrés. Banting a l'idée d'utiliser des pancréas de veau foetal obtenus à l'abattoir. En effet, outre la «sécrétion interne» des îlots de Langerhans, le pancréas produit une «sécrétion externe» – un suc pancréatique qui rejoint le tube digestif au niveau du duodénum et participe à la digestion des aliments. Or les enzymes de cette sécrétion externe, comme la trypsine, susceptibles de détruire la sécrétion interne des îlots de Langerhans régulant la glycémie, ne sont actives pour la digestion qu'à partir de la naissance. Les pancréas de veau foetal devraient donc permettre d'éviter cette éventuelle destruction.

En utilisant de l'alcool et de l'acide, Best et Macleod apportent une amélioration dans la préparation d'extraits plus actifs, mais pas encore suffisamment purifiés. Cependant, même dans ces conditions, en un mois, ils obtiennent des résultats probants, qui montrent qu'un chien devenu diabétique par ablation du pancréas peut survivre plusieurs semaines lorsqu'on lui administre des extraits pancréatiques purifiés de veau foetal. Ils observent aussi que les enzymes de la sécrétion externe n'empêchent pas les effets de l'insuline et peuvent donc travailler à partir de pancréas de bœuf, plus facile à obtenir.

C'est aussi à cette période qu'arrive dans le laboratoire un biochimiste renommé, James Collip, pour effectuer une année sabbatique. Son apport à la découverte de l'insuline est considérable. Il met en place des tests chez le lapin pour évaluer l'efficacité des extraits, la concentration de glycogène dans le foie et la combustion des hydrates de carbone, et développe de nouvelles méthodes pour mesurer le glucose. Surtout, ses compétences en biochimie conduisent à une amélioration considérable de la purification des extraits pancréatiques et de leur efficacité.

Le congrès de la Société américaine de physiologie a lieu le 30 décembre 1921 à l'université Yale, à New Haven. Banting y présente les premiers résultats obtenus chez l'animal sur la sécrétion interne du pancréas. Sans doute intimidé et n'étant pas un excellent orateur, il ne peut répondre clairement aux questions que lui posent les éminents diabétologues présents dans la salle. En tant que directeur du laboratoire, Macleod pense lui venir en aide en intervenant, mais il utilise un peu trop le mot «nous». Cet épisode est important, car à partir de ce moment, les relations entre Banting et Macleod deviennent déplorables, Banting reprochant à Macleod de ne pas reconnaître son travail, comme le rapporte l'historien biographe de Banting, Michael Bliss.

UN ENFANT SAUVÉ, PUIS SIX

En janvier 1922, soit neuf mois après les premiers travaux de Banting et Best, les extraits pancréatiques de bœuf sont utilisés en clinique chez l'humain. Le 11 janvier, le petit Léonard Thomson âgé de 13 ans, souffrant de «diabète juvénile» (diabète de type 1) en phase terminale, reçoit les premiers extraits préparés par Banting et Best.

Malgré une réduction de la glycémie de 25%, les résultats sont peu convaincants, d'autant que l'injection sous-cutanée provoque des abcès. Macleod demande à Collip de préparer de nouveaux extraits selon la technique que ce dernier a mise au point indépendamment de Best par évaporation de l'alcool. Le 23 janvier, ces extraits sont administrés au jeune garçon et

3:00 P.M. Dog in good condition
Aug. 6th
12 midnight (Aug 6 - Aug 7th)
Blood sugar - .43
Vol. urine from 2 P.M. till
12 midnight - 175 cc.
(the last 30 cc being catheter specimen)
(separate sugar estimation)
10 hour total sugar - 3.36g.
" " nitrogen - 1.20g
" " G : N ratio - 2.8
① 8 cc Isletin given
1 A.M.
Blood sugar - .37.
urine obtained by catheter
Dog about same - able to
stand up + walk, has not
vomited since yesterday aft.
② 8 cc Isletin given.
2 A.M. Blood Sugar .33
③ 8 cc urine obtained
3 A.M. Blood Sugar .29
④ 8 cc Isletin
no urine obtained

Extrait du cahier de laboratoire de Frederick Banting daté des 6 et 7 août 1921. Le jeune chirurgien et Charles Best administrent régulièrement de l'extrait pancréatique de veau foetal (nommé «isletin» pour la première fois sur cette page) à un chien privé de pancréas et y consignent leurs observations.

c'est la stupéfaction. Rapidement, la glycémie chute et atteint une concentration normale, les hydrates de carbone sont brûlés et le garçon reprend de la vigueur. Très vite, six autres enfants sont traités de la même façon avec la même réussite. Les médias relaient l'information et Banting fera même la une du *Time Magazine* en août 1923.

Désormais, des demandes d'extraits à l'équipe de Toronto proviennent du monde entier. Il faut donc considérer rapidement la commercialisation et la distribution de l'insuline. Le laboratoire Connaught, lié à l'université de Toronto, est chargé de sa production et un accord avec l'entreprise Eli Lilly and Co est conclu pour son développement aux États-Unis. Des brevets sont pris, mais, en tant que médecins, Banting et Macleod refusent toute indemnité, cette découverte devant être pour le bien de l'humanité; le brevet canadien sera au nom de Best et Collip, mais le nom de Banting sera ajouté au brevet américain.

Un événement fâcheux, cependant, a lieu au printemps 1922 et freine l'équipe de Toronto dans son élan: alors que la demande d'insuline devient de plus en plus pressante, Collip n'arrive plus à en produire en quantité suffisante. Il faut attendre plusieurs semaines avant que Connaught et Eli Lilly and Co mettent en place de nouveaux appareils évaporateurs autorisant la production importante d'extraits.

De son côté, Banting, fâché de ne pas avoir pu directement participer, en tant que médecin, aux essais cliniques à l'hôpital des enfants malades de Toronto, crée sa propre clinique sur le diabète avec son ami d'enfance Joe Gilchrist, médecin et diabétique lui-même. Best prend en charge la production d'insuline dans le laboratoire Connaught. Collip, quant à lui, retourne à l'université d'Alberta et se détourne de l'insuline.

À l'automne 1922, des personnalités importantes rendent visite à Macleod. D'une part, le directeur du département de biochimie et de pharmacologie de l'Institut britannique pour la recherche médicale, Henry Dale (qui recevra le prix Nobel en 1936 pour la découverte de la transmission chimique des impulsions nerveuses); d'autre part, le Danois August Krogh, lauréat du prix Nobel en 1920 pour sa découverte du mécanisme de régulation des capillaires sanguins dans les muscles, et dont l'épouse et collaboratrice vient d'être diagnostiquée diabétique. Ni Banting ni Best ne se rendent compte de l'importance de ces visites. Dale et Krogh sont fascinés par cette prouesse clinique sauvant la vie à des enfants autrement condamnés.

Le 26 octobre 1923, Banting rentre de la ferme de ses parents à Alliston, où il a passé la fin de semaine. Il apprend ce matin-là par un coup de téléphone d'un ami que le prix Nobel



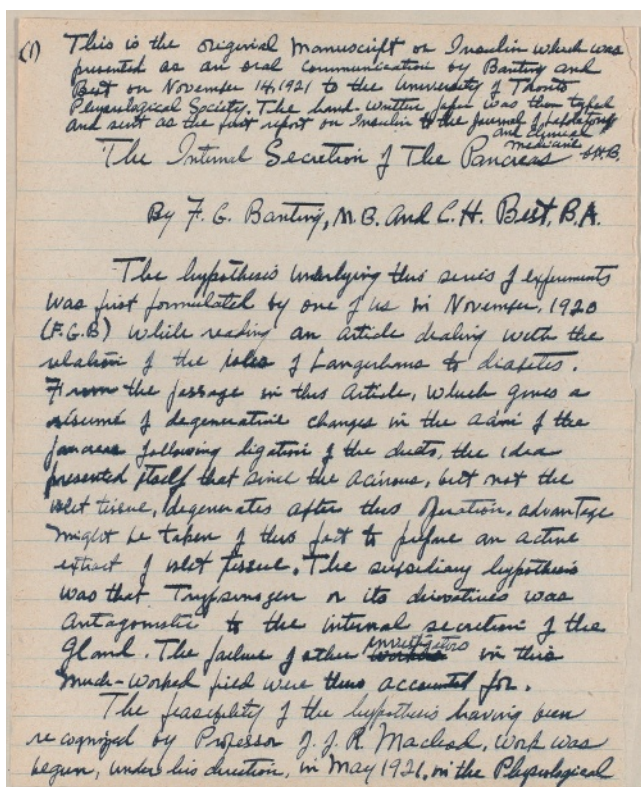
Un des premiers flacons d'insuline produits par le laboratoire Connaught en 1923.

de physiologie ou médecine lui est décerné ainsi qu'à Macleod pour la découverte de l'insuline. Banting est fou de rage; il envoie un télégramme à Best, qui donnait un cours à des étudiants de l'université Harvard, pour lui dire qu'il partage son prix avec lui. De son côté, Macleod en fait de même avec James Collip.

Banting a 32 ans; il est toujours le plus jeune récipiendaire de ce prix. Ni Banting ni Macleod, en raison de leur animosité mutuelle – connue du comité Nobel –, ne viendront chercher leur prix à Stockholm lors de la cérémonie officielle. Ils feront séparément leur conférence Nobel en 1925 à l'université Karolinska.

DES QUERELLES DE PRIORITÉ

Les concurrents de l'équipe de Toronto n'ont pas attendu bien longtemps pour manifester leur désaccord sur le choix des deux récipiendaires. C'est en particulier le cas de George Zuelzer et Nicolas Paulesco. Il est vrai que le comité Nobel aurait pu décerner le prix à un troisième chercheur et pourquoi pas à Oskar Minkowski, qui était toujours vivant. Surtout, il aurait dû préciser que le prix était décerné non seulement pour la découverte de l'insuline, mais aussi pour ses retombées cliniques.



La première page manuscrite du premier article de Frederick Banting et Charles Best sur leurs travaux. L'article est paru en février 1922 dans le *Journal of Laboratory and Clinical Medicine* et fut auparavant, en décembre 1921, l'objet d'une présentation au congrès de la Physiological Society à New Haven.

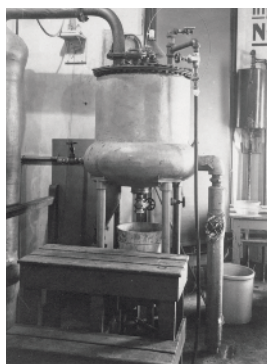
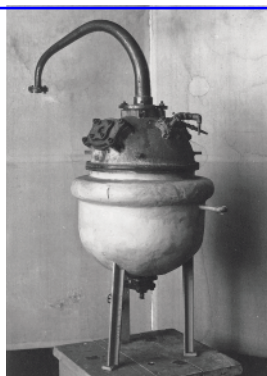
Ces événements ont aussi laissé des traces au sein même de l'équipe de Toronto. Banting se désintéresse de l'insuline et se tourne – sans succès – vers des recherches sur le cancer, avant d'accéder, en tant que héros canadien, à la direction de la recherche biomédicale au sein du Conseil national de recherches du Canada. Il y joue un rôle déterminant dans la mise en place de nouvelles technologies en particulier aéronautiques, mais aussi biomédicales dans le cadre de la guerre biologique que veut mettre en place l'Allemagne nazie pendant la Seconde Guerre mondiale. Mais au cours d'une visite

qu'il devait faire à Henry Dale et à Churchill, le bombardier dans lequel il voyageait s'écrase à Terre-Neuve, le 21 février 1941.

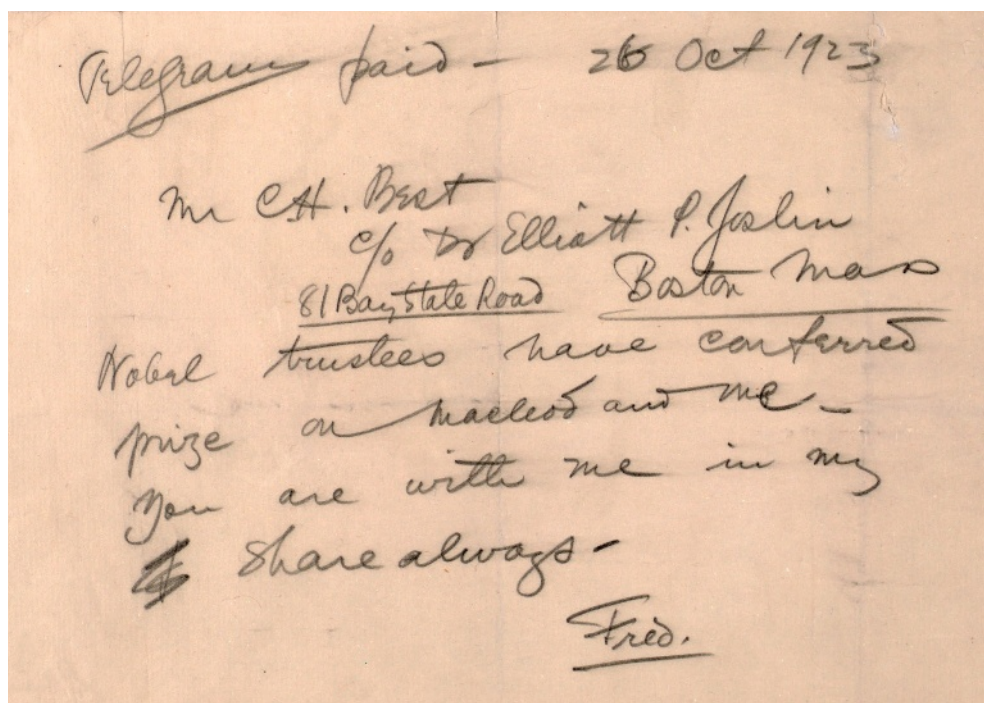
Effet du hasard, Collip lui succède. Il sera le maître d'œuvre du développement de la recherche au Canada en mettant en place de véritables structures. Collip aura aussi une carrière scientifique remarquable puisqu'on lui doit l'isolation de l'hormone parathyroïdienne, ainsi que de l'ACTH et de la TSH, deux hormones produites dans l'hypophyse et impliquées d'une part dans la réponse au stress, d'autre part dans la régulation de la thyroïde, ainsi que l'isolation d'œstrogènes – de noms commerciaux Emmenin, extrait de placenta humain, et Prémarin, extrait d'urine de juments gravides –, utilisés pendant des années dans le traitement substitutif de la ménopause. Après avoir été président de l'université Western Ontario, il décédera en 1965.

Macleod, souffrant, termine sa vie en Écosse et meurt en 1935. Best, le plus jeune de tous, va maintenir le mythe de la découverte de l'insuline. Mais il aura aussi une activité scientifique importante puisqu'on lui doit la découverte de deux neurotransmetteurs (des molécules qui assurent la communication entre les neurones), la choline et l'histamine, ainsi que celle de l'histaminase – l'enzyme qui dégrade l'histamine –, et d'un anticoagulant, l'héparine. Il décédera en 1978 après avoir reçu

L'insuline a été la première protéine à être fabriquée à partir d'ADN recombinant, en 1979



Les équipements utilisés au laboratoire Connaught vers 1923 pour produire l'insuline en grande quantité.



Le brouillon du télégramme que Frederick Banting envoya à Charles Best, le 26 octobre 1923, pour lui annoncer qu'il partagerait « financièrement » le prix Nobel avec lui.

plusieurs prix, mais pas le Nobel, bien que son nom ait été en lice.

DE L'INSULINE HUMAINE DE SYNTHÈSE

L'insuline reste le traitement pharmacologique essentiel du diabète, en particulier le diabète de type 1. La génétique et la biologie moléculaire ont conduit à plusieurs innovations à partir de cette molécule. La première a consisté à remplacer l'insuline d'origine animale par une molécule d'insuline humaine « recombinante », c'est-à-dire produite dans une bactérie : en effet, en 1979, pour la première fois, Arthur Riggs et Keiichi Itakura, du Centre médical américain à City of Hope, en Californie, en collaboration avec l'entreprise de biotechnologie Genentech tout juste fondée par le biologiste moléculaire Herbert Boyer, ont réussi à introduire le gène humain de l'insuline dans des bactéries et à faire produire la protéine par ces dernières. La technologie sera licenciée à l'entreprise Eli Lilly and Co et l'insuline humaine « recombinante » ainsi obtenue sera sur le marché dès 1982. Par la suite, les efforts de l'industrie pharmaceutique (Eli Lilly, Sanofi, Novo Nordisk) se porteront vers l'obtention d'analogues de l'insuline aux propriétés pharmacodynamiques ou pharmacocinétiques améliorées (action plus rapide ou prolongée).

L'insuline a aussi été une merveilleuse source de progrès pour la recherche fondamentale. Cette molécule a été la première protéine cristallisée – en 1926 par John Abel ; la première

protéine séquencée – en 1955 par Frederick Sanger (l'une des rares personnes à avoir reçu deux prix Nobel, l'un en 1958 pour son travail sur la structure des protéines, en particulier l'insuline, et l'autre en 1980 pour ses contributions au séquençage de l'ADN) ; la première protéine à être synthétisée (en 1963-1965) ; la première protéine à être mesurée dans le sang par dosage radio-immunologique (par Solomon Berson et Rosalyn Yalow, laquelle obtint le prix Nobel en 1977 pour le développement de cette technique de dosage) ; enfin, la première protéine à être fabriquée à partir d'ADN recombinant comme évoqué plus haut. Par ailleurs, le récepteur de l'insuline a été caractérisé et amplement étudié à partir du début des années 1970.

L'insuline a donc beaucoup contribué aux progrès de la biologie et au développement de l'endocrinologie. Elle reste le traitement indispensable face à l'accroissement du nombre de cas de diabète dans le monde. Les dernières améliorations portent sur les conditions d'administration de l'hormone au moyen de pompes et, ces dernières années, à l'aide de systèmes connectés. Grâce à ces systèmes, le glucose lui-même régule la libération d'insuline par une pompe, d'où leur nom de « pancréas artificiels ». Et encore aujourd'hui, diverses équipes mènent des recherches cliniques sur la greffe d'îlots de Langerhans et l'utilisation de cellules souches. Aucun doute, l'insuline mérite bien que l'on fête le centenaire de sa découverte ! ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Bliss, **The Discovery of Insulin (Centenary edition)**, The University of Toronto Press, 2021.

W. Rostène, **Les Caprices du Nobel : À la découverte du diabète et du stress**, L'Harmattan, 2013.

H. B. M. Best, **Margaret and Charley : The Personal Story of Dr Charles Best, the Co-discoverer of Insulin**, Dundurn Press, 2003.

F. G. Banting et al., **The effects of pancreatic extract (insulin) on normal rabbits**, *Am. J. Physiol.*, vol. 62, pp. 162-176, 1922.

F. G. Banting et C. H. Best, **The internal secretion of the pancreas**, *J. Lab. Clin. Med.*, vol. 7, pp. 256-271, 1922.

F. G. Banting et al., **Pancreatic extracts in the treatment of diabetes mellitus**, *Can. Med. Assoc. J.*, vol. 12, pp. 141-146, 1922.

R

ENDEZ-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

LES DÉLICATS PARADOXES DE BERRY ET DE SKOLEM

Pour contourner les paradoxes de la définissabilité, il est nécessaire de distinguer théorie et métathéorie.

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)



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

Lorsque nous formulons une définition, nous risquons d'être victimes d'un paradoxe. L'exemple le plus simple reste le paradoxe de Berry, présenté par Bertrand Russell en 1906. Considérons : «Le plus petit entier positif non définissable par une expression en français ayant moins de dix-neuf mots.»

Tout semble clair. En utilisant les mots de la langue française, qui sont en nombre fini, disons 60000, et en s'imposant d'en utiliser au plus 18, on ne peut définir qu'un nombre fini d'entiers positifs (moins de $60000 + 60000^2 + \dots + 60000^{18} \approx 10^{86}$). Comme il y a un nombre infini d'entiers, il existe donc des entiers positifs non définissables par une expression de moins de 19 mots. Il y en a un plus petit défini par l'expression donnée plus haut entre guillemets. Hélas, là réside la difficulté : cette expression comporte 18 mots et définit donc en moins de 19 mots un entier positif non définissable par une expression de moins de 19 mots ! Absurdité.

SE PROTÉGER DES PARADOXES

Heureusement, les logiciens ont su se prémunir contre les contradictions qui résulteraient en mathématiques de définitions de ce type. De telles définitions «autocontradictoires» contamineraient tout, puisqu'une seule contradiction entraîne une infinité et rend inutile tout raisonnement. Pour cela, la méthode axiomatique fixe précisément les

termes que nous pouvons utiliser quand nous traitons de nombres ou d'ensembles. Le terme «définissable» ne fait pas partie du langage de base de la majorité des théories car, le plus souvent, nous n'en avons pas besoin pour faire des mathématiques. Il n'est donc pas possible, au sein des systèmes axiomatiques habituels comme l'arithmétique de Peano ou de la théorie des ensembles ZFC (pour Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix, voir l'encadré 2), de considérer le plus petit entier positif non définissable en moins de 19 mots. Ouf !

Notons quand même que «vu de l'extérieur», on dit de la *métathéorie*, nous pouvons envisager le plus petit entier positif non définissable dans la théorie T en moins de k symboles. Dans le cas de l'arithmétique de Peano, nous pouvons envisager, de ce point de vue extérieur, pour chaque entier k un «plus petit entier positif non définissable en moins de k symboles». Pour k assez petit, par exemple $k = 1$ ou $k = 2$, ce plus petit entier est 0, car aucun entier n'est définissable dans la théorie en moins de 1 ou 2 symboles !

Approfondissons cela en précisant ce que nous entendons par «définition». Prenons un exemple, en définissant le nombre $\sqrt{2}$. Nous dirons que c'est le nombre x positif dont le carré est égal à 2, c'est-à-dire tel que $x^2 = 2$. Si nous omettions la précision que x est positif, la définition n'en serait pas une, car $-\sqrt{2}$ serait

aussi défini par la formule $x^2=2$. Avec cet exemple, nous comprenons qu'une définition $P(x)$ de la théorie T est une formule utilisant la variable x et écrite dans le langage limité de la théorie. La formule $P(x)$ est considérée, par la métathéorie, comme la définition d'un objet précis si la théorie T peut démontrer avec ses axiomes que $P(x)$ n'est vérifié que par un seul élément. Formellement, cela signifie que la théorie démontre que $\forall x \forall y ((P(x) \wedge P(y)) \Rightarrow x=y)$ (pour tout x et pour tout y , si $P(x)$ et $P(y)$, alors $x=y$).

Dans le cas de l'arithmétique de Peano, si pour $P(x)$ on prend « $x=0$ », c'est bien une définition de 0 et elle contient 3 symboles.

Avec cette définition de «définissable» il y a bien, en ce qui concerne la métathéorie, pour chaque entier k un plus petit entier non définissable dans T en moins de k caractères, mais cet entier ne gêne pas la théorie T elle-même car, en quelque sorte, elle ne le sait pas!

PAS DE NOTION ABSOLUE DE LA DÉFINISSABILITÉ

La notion métathéorique de définissabilité dépend du langage de la théorie qu'on considère, car elle dépend des formules $P(x)$ que la théorie peut écrire et de ce que la théorie peut en démontrer: il n'y a pas de notion absolue de définissabilité. La logique mathématique a fait apparaître au xx^e siècle des vérités d'une exceptionnelle profondeur dont on n'avait pas conscience auparavant. Parmi elles, il y en a plusieurs précisant qu'un concept est absolu ou au contraire relatif. Citons trois cas.

A. La notion de «calculable par algorithme» est absolue. C'est ce qui résulte des travaux d'Alonzo Church, Kurt Gödel et Alan Turing dans les années 1930. Toutes les méthodes raisonnables pour définir la notion de fonction calculable par algorithme, à la grande surprise des logiciens, aboutissent à la même notion mathématique, parfois dénommée «fonction récursive», ou «fonction calculable par machine de Turing».

B. La notion de «vérité mathématique démontrable», à l'inverse, est toujours relative à une théorie formelle qu'il faut préciser. C'est l'une des conséquences des théorèmes d'incomplétude de Gödel; ceux-ci montrent que toute théorie intéressante peut formuler des énoncés dont elle ne peut prouver ni qu'ils sont vrais ni qu'ils sont faux. Par exemple, l'énoncé «L'arithmétique de Peano ne produit aucune contradiction» n'est pas démontrable dans l'arithmétique de Peano (sauf si l'on découvre une telle contradiction), mais la théorie ZFC des ensembles, elle, peut le démontrer. Il résulte de cette vérité profonde sur les mathématiques que, pour progresser, il faut non seulement trouver de nouvelles démonstrations – c'est le travail de base du mathématicien –, mais aussi formuler

1

LES PARADOXES SUGGÈRENT DES DÉMONSTRATIONS

Nous allons examiner comment, paradoxalement, les paradoxes amènent des démonstrations.

Pour cela examinons une version analogue du paradoxe de Berry : «Le plus petit entier positif non définissable en français en moins de 100 caractères».

Avec un alphabet de 200 symboles (minuscules, majuscules, chiffres, signes de ponctuation, lettres accentuées, symboles supplémentaires *, \$, €, &, # @, etc.), il y a au plus $200 + 200^2 + \dots + 200^{99} \approx 6 \times 10^{227}$ entiers définissables en moins de 100 caractères.

Il existe donc des entiers positifs non définissables en moins de 100 caractères et donc un plus petit. Le problème est que la phrase de définition n'a que 84 caractères et définit un entier positif non définissable en moins de 100 caractères !

Nous tirerons de ce paradoxe une démonstration produisant un résultat intéressant, dont voici le détail.

Nous nous fixons un langage de programmation, par exemple Python ou C++ et c'est aux programmes dans ce langage que nous nous référerons. Si, pour un entier n , il existe un programme de k caractères qui produit n comme résultat, nous dirons que « n est programmable en k caractères».

Nous allons démontrer que «la fonction $n \rightarrow K(n)$ qui à tout entier n associe la taille $K(n)$ du plus court programme produisant cet entier comme résultat n'est pas une fonction programmable».

Supposons le contraire.

Soit P le programme calculant K . Pour tout entier k donné, on sait grâce à P trouver le plus petit entier n_k non programmable en moins de k caractères. Pour ce faire, nous calculons $K(0)$, puis $K(1)$, etc. jusqu'à trouver le premier entier n tel que $K(n) > k$.

Puisque K est programmable, cette méthode donne un programme P' qui, quand nous lui donnons k , calcule n_k . Le programme P' , qui dépend du paramètre k , donne pour chaque k un programme P'_k calculant n_k , qui est le

même que P' , sauf que k est spécifié, par exemple dès le début du programme.

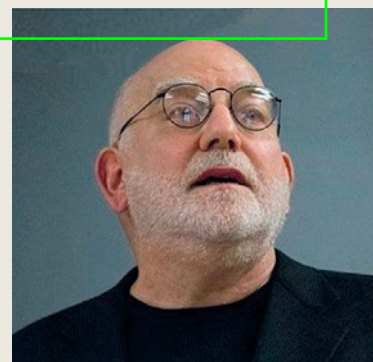
Dans le programme P'_k , l'entier k n'est présent qu'une fois (on écrit par exemple $k = 32\,431$ au début). On peut supposer qu'on écrit la valeur de k en notation décimale. La longueur du programme P'_k est de la forme $\lfloor \log_{10}(k) \rfloor + C$, car, pour écrire un entier en décimal, il suffit d'utiliser $\lfloor \log_{10}(k) \rfloor + 1$ caractères où $\lfloor m \rfloor$ désigne la partie entière de m . La constante C est la longueur de ce qui, dans le programme P'_k , n'est pas l'écriture de k .

Nous savons que $(\lfloor \log_{10}(k) \rfloor + C)/k$ tend vers 0 quand k tend vers l'infini. Donc pour un k_0 assez grand, $(\lfloor \log_{10}(k_0) \rfloor + C)/k_0$ est inférieur à 1, d'où $\lfloor \log_{10}(k_0) \rfloor + C < k_0$.

C'est absurde car, pour un tel k_0 , le programme P_{k_0} a pour longueur $\lfloor \log_{10}(k_0) \rfloor + C$, qui est strictement inférieur à k_0 , et calcule n_{k_0} , qui, par définition, est un entier non calculable par un programme de longueur inférieure à k_0 .

Conclusion : la fonction $n \rightarrow K(n)$ n'est pas une fonction calculable par programme.

Cette utilisation du paradoxe de Berry a été découverte par Gregory Chaitin, qui a aussi proposé une démonstration alternative à celle de Gödel utilisant le paradoxe de Berry pour démontrer le théorème d'incomplétude (voir G. J. Chaitin, *The Berry paradox, Complexity*, vol. 1, pp. 26-30, 1995).



Gregory Chaitin

de nouveaux axiomes, qui augmentent le pouvoir déductif des théories utilisées et qui conduisent à construire une hiérarchie complexe de théories de plus en plus puissantes.

C. La notion de «définissable» est toujours relative à une théorie. C'est la leçon du paradoxe de Berry, mais c'est aussi un résultat du logicien polonais Alfred Tarski. Confirmant les résultats sur le «démontrable», l'étude de la notion de «définissable» oblige à considérer une hiérarchie de théories de plus en plus puissantes, chacune servant de métathéorie à celles placées sous elles, pour lesquelles elle peut exprimer la notion de définissable.

UTILITÉ DES PARADOXES

Notons que les paradoxes des philosophes ou créés pour le plaisir du jeu, même si on ne peut pas les utiliser pour introduire des contradictions dans les théories mathématiques (du moins jusqu'à présent!), sont malgré tout très importants. Il est souvent arrivé que, en s'en inspirant, les logiciens découvrent de nouveaux procédés de démonstration. Le paradoxe du menteur «Je mens» a donné la formule autoréférentielle «Je ne suis pas démontrable dans la théorie T», qui est l'idée de base de la démonstration des théorèmes d'incomplétude de Gödel. Il se trouve que le paradoxe de Berry, outre qu'il permet de retrouver le théorème d'incomplétude, est aussi l'idée de la démonstration d'un résultat important en théorie de la complexité. Ainsi, d'une variante du paradoxe de Berry (voir l'encadré 1), on déduit une démonstration.

Cette récupération des paradoxes de la langue commune pour en faire des démonstrations est utile et amusante, mais certaines subtilités mises en évidence par les paradoxes introduisent des difficultés plus délicates à circonscrire que celles créées par le paradoxe du menteur ou le paradoxe de Berry. On se trouve en effet parfois confronté à des situations où on a du mal à croire que l'on va s'en sortir et où la solution proposée par les logiciens ne laisse pas totalement intacte la confiance qu'on avait dans certains concepts mathématiques.

Récemment, Joel David Hamkins, professeur à l'université d'Oxford et élève du logicien universellement admiré Hugh Woodin, a insisté sur des exemples troublants de la relativité des concepts et de la nécessité absolue de ne pas confondre les concepts externes (métathéoriques) à une théorie et les concepts analogues qu'elle tente de retrouver en interne. L'impossible coïncidence de la métathéorie et de la théorie est réellement déconcertante. Les remarques et exemples de Joel Hamkins sont liés au théorème de Löwenheim-Skolem et au paradoxe qui en résulte, et en aggravent la portée.

Le théorème de Löwenheim-Skolem a été énoncé en 1915 par le mathématicien allemand

Leopold Löwenheim et démontré de manière complète en 1920 par le mathématicien norvégien Thoralf Skolem. Énonçons-le avant d'explicitier les termes qui le composent :

Si une théorie formulée dans le cadre de la logique du calcul des prédicats du premier ordre possède un modèle infini, alors elle possède un modèle dénombrable, c'est-à-dire dont les éléments constitutifs sont aussi nombreux que les entiers, mais pas plus.

DES MODÈLES D'UNE THÉORIE

Expliquons cela. Un modèle pour une théorie est une structure qui vérifie les axiomes de la théorie. Si, par exemple, on considère la théorie T ayant pour unique axiome A: $\forall x \forall y (x \clubsuit y = y \clubsuit x)$, alors la donnée des entiers $\mathbb{N}$ et de l'addition entre entiers en guise d'opération $\clubsuit$ constitue un modèle de T, car on sait que l'addition entre entiers est commutative. La donnée des nombres réels $\mathbb{R}$ et de la multiplication en guise de $\clubsuit$ est un autre modèle de la théorie T, et il y a encore bien d'autres possibilités. Les formules vraies d'une théorie sont celles vérifiées par tous les modèles de la théorie. Il s'agit d'une notion mathématique parfaitement précise dans la métathéorie, puisque la notion de modèle l'est.

Dans notre exemple, la formule $f: \forall x (x \clubsuit x) \clubsuit x = x \clubsuit (x \clubsuit x)$ est une formule vraie de la théorie T: vous ne trouverez jamais un ensemble et une opération sur cet ensemble qui vérifie l'axiome A mais pas la formule f. En revanche, la formule $g: \forall x \forall y \forall z (x \clubsuit y) \clubsuit z = x \clubsuit (y \clubsuit z)$ n'est pas une formule vraie de la théorie T, car même si elle est vraie dans certains modèles de T, elle ne l'est pas dans tous. Par exemple, la formule g n'est pas vraie en prenant pour modèle la structure définie par les entiers et l'opération $x \clubsuit y = x^2 + y^2$, car $(0 \clubsuit 1) \clubsuit 2 = 1 + 4 = 5$ tandis que $0 \clubsuit (1 \clubsuit 2) = 0 \clubsuit 5 = 25$.

Le «calcul des prédicats du premier ordre» est la logique utilisée pour donner l'exemple ci-dessus de la théorie T avec un seul axiome A. Dans une théorie formulée en calcul des prédicats du premier ordre, on peut utiliser des symboles logiques, des variables, des quantificateurs portant sur les variables, des symboles de prédicats ou d'opérations (comme le $\clubsuit$) ainsi qu'indiqué dans l'encadré 2. Le théorème de complétude de Gödel, démontré par ce dernier en 1929 dans sa thèse de doctorat, indique que la logique du calcul des prédicats du premier ordre est telle que les formules démontrables à partir des axiomes habituels du calcul des prédicats du premier ordre (notion syntaxique) sont les mêmes que les formules vraies de la théorie (c'est-à-dire vraies dans tous les modèles des axiomes).

C'est un résultat central en logique et c'est lui qui justifie qu'on formalise les théories mathématiques en utilisant le calcul des prédicats du premier ordre. Il a en particulier la

2

LANGAGES LOGIQUES

Pour formaliser une théorie mathématique, ce qui est indispensable afin d'éviter les paradoxes comme le paradoxe de Berry, il faut préciser le langage qui permet d'écrire les énoncés de la théorie (hypothèses, théorèmes, démonstrations, etc.). On s'appuie le plus souvent sur le calcul des prédicats du premier ordre que nous allons examiner.

L'arithmétique de Peano utilise un langage dont les symboles sont :

$(\cdot) 0 = s \vee \exists x \vee \cdot \Rightarrow \cdot + x \vee z \dots$

Pour la liste des variables, on peut se ramener à deux symboles si on veut vraiment économiser les symboles : on utilise x et y , et les noms de variables sont $x, x', x'', x''' \dots$. Pour plus de lisibilité, nous garderons $x, y, z \dots$

Voici un exemple de formule de l'arithmétique de Peano, qui est aussi un axiome de cette théorie :

$\forall x (x = 0 \vee \exists y x = s(y))$
Elle signifie : pour tout nombre x , $x = 0$ ou il existe un nombre y tel que x est le successeur de y .

La fonction $s(x)$, « successeur de x », désignera 32 si l'on prend $x = 31$.

Si l'on en reste au langage strict de la théorie, les entiers sont représentés par $0, s(0), s(s(0)), s(s(s(0)))$, etc., mais bien

sûr, en pratique, on introduit des raccourcis de notation et on écrit $0, 1, 2, \dots$

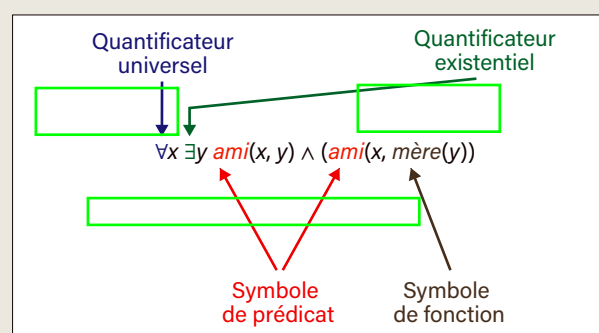
En plus de la définition stricte de ce que sont les formules de la théorie, on fixe aussi les axiomes de la théorie et les règles permettant de déduire de nouvelles formules à partir des axiomes ou de formules déjà démontrées. Ces règles de démonstration sont les mêmes pour toutes les théories exprimées dans le calcul des prédicats du premier ordre.

Venons-en à la notion de prédicat. En logique,

un prédicat est une propriété dont la vérité dépend d'une ou plusieurs variables ; selon les objets qu'on substitue aux variables, elle devient vraie ou fausse.

Dans la figure ci-dessus, le prédicat $ami(x, y)$ sera vrai pour $x = \text{Jean}$ et $y = \text{Jeanne}$ si « Jean est ami de Jeanne ». Le prédicat $nombre\ entier(x)$ sera vrai pour $x = 4$, et sera faux pour $x = \pi$.

Le calcul des prédicats du premier ordre est la logique qui permet de combiner des prédicats et de les manipuler en utilisant des opérations logiques (comme le « et », le « ou » etc.) et des quantificateurs comme $\forall$ (« quel que soit ») et $\exists$ (« il existe »). Le calcul



des prédicats du premier ordre permet aussi, à l'aide de symboles de fonction, de transformer des objets.

La fonction $\text{mère}(x)$ pour $x = \text{Jeanne}$ désignera Lucie si « Lucie est la mère de Jeanne ». L'exemple de formule du calcul des prédicats du premier ordre donné sur la figure est :

$\forall x \exists y \text{ami}(x, y) \wedge \text{ami}(x, \text{mère}(y))$

La formule signifie : « Pour tout x , il existe un y tel que x est ami de y , et x est ami de la mère de y ». Il n'est pas certain que la phrase soit vraie !

Le calcul des prédicats du second ordre est plus général

et permet de quantifier sur les prédicats comme dans l'exemple de formule vraie suivante :

$\forall P \forall x \forall y (x = y \wedge P(x)) \Rightarrow P(y)$

qui signifie que pour tout prédicat P , pour tout x et pour tout y , $(x = y \wedge P(x))$ entraîne $P(y)$.

Dans le cas de la théorie des ensembles ZFC

(pour « Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix »), les symboles de base sont les mêmes sauf que $0, s$ et $+$ sont remplacés par $\emptyset$ et $\in$.

Une formule de la théorie des ensembles est par exemple :

$\forall x (x = \emptyset \vee \exists y y \in x)$, ce qui signifie : pour tout ensemble x , soit x est l'ensemble vide $\emptyset$, soit il existe un élément y appartenant à l'ensemble x .

Le langage de la théorie des ensembles ZFC permet de traduire toutes les formules de l'arithmétique de Peano et les axiomes de ZFC permettent de retrouver tous les axiomes de l'arithmétique de Peano.

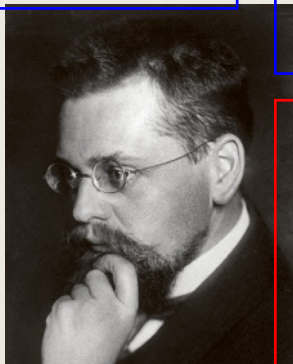
Cette théorie des ensembles permet cependant de traiter de l'infini et de le manipuler, ce que l'arithmétique de Peano ne permet pas directement. Comme pour l'arithmétique, on utilise toutes sortes de raccourcis et de symboles ajoutés pour disposer d'un langage praticable. Dans l'absolu, cependant, toutes les mathématiques peuvent s'exprimer uniquement avec le langage réduit énuméré ici pour ZFC.



Giuseppe Peano
(1858 - 1932)



Abraham Fraenkel
(1891 - 1965)



Ernst Zermelo
(1871 - 1953)

3

SÉMANTIQUE ET SYNTAXE

En logique, chaque théorie comporte deux faces, l'une dite « sémantique », l'autre dite « syntaxique ».

Une théorie est définie par des formules dénommées « axiomes » que l'on décline vraies. Ces formules sont des suites de symboles envisageables sous deux aspects.

1) On peut interpréter les axiomes comme les propriétés des objets et des structures traitées par la théorie.

Exemple. Considérons deux prédicats $P(x)$ et $I(x)$ et une fonction $s(x)$. $P(x)$ signifierait « x est pair » et $I(x)$ « x est impair ». La fonction $s(x)$ pourrait désigner l'entier qui vient après x , c'est-à-dire $x + 1$. Pour que la théorie soit utile, il faut indiquer des propriétés reliant les prédicats et les fonctions. Dans notre exemple, prenons les axiomes : $\forall x P(x) \Rightarrow I(s(x))$ et $\forall x I(x) \Rightarrow P(s(x))$.

Si les objets de la théorie sont les entiers et les interprétations de $P(x)$ et $I(x)$ sont les propriétés « être pair » et « être impair », et celle de la fonction $s(x)$ est la fonction « successeur », alors les axiomes sont vrais. Un modèle possible de la théorie est une telle interprétation des symboles de la théorie compatible avec les axiomes.

Malheureusement, d'autres interprétations sont compatibles avec les deux axiomes envisagés. Si l'on prend les nombres réels non nuls pour objets, que l'on considère que $P(x)$ signifie « x est positif », et $I(x)$ « x est négatif », et que pour $s(x)$ on prend $s(x) = -x$, alors les axiomes sont encore vrais pour cette structure.

Nos axiomes ne sont pas assez nombreux pour forcer l'interprétation qu'on avait

envisagée. Réfléchir aux interprétations possibles d'une théorie est l'objectif de la théorie des modèles, qui est le côté sémantique de la logique mathématique.

2) On peut aussi regarder les axiomes comme de simples suites de symboles et, en utilisant des règles de manipulation entre suites de symboles, on peut essayer de déduire d'autres formules des axiomes. De $A \Rightarrow B$ et $B \Rightarrow C$, on déduira par exemple $A \Rightarrow C$ sans avoir à chercher à comprendre ce que cela signifie.

Dans l'exemple donné plus haut, en utilisant les règles de déduction du calcul des prédicats, on déduira par exemple que : $\forall x P(x) \Rightarrow P(s(s(x)))$.

Lier le côté sémantique et le côté syntaxique de la logique est un objectif central. Si l'on parvient à le faire, cela ramène des affirmations sur des structures à des affirmations sur des symboles et des manipulations de symboles, ce qui est moins abstrait et même presque matériel.

Dans le cas du calcul des prédicats du premier ordre, Kurt Gödel a établi que les formules qui sont vraies dans tous les modèles des axiomes d'une théorie sont exactement les mêmes que les formules qu'on peut déduire des axiomes. Il y a équivalence entre sémantique et syntaxe.

Cette propriété de complétude du calcul des prédicats du premier ordre a pour conséquence que, le plus souvent, on soumet formaliser les théories dans ce cadre logique. Aussi bien l'arithmétique de Peano que la théorie ZFC des ensembles sont effectivement modélisées dans ce cadre.

conséquence qu'une théorie est contradictoire si et seulement si elle ne possède aucun modèle. « Être non contradictoire » et « posséder des modèles » sont équivalents. Ce théorème met en relation une notion qualifiée de « sémantique », la notion de formule vraie, et une notion liée seulement à la manipulation de symboles, la notion de « démontrable à partir des axiomes et des règles usuelles de manipulations des formules », qui est une notion « syntaxique ».

Le calcul des prédicats du second ordre permet d'envisager des formules où l'on quantifie sur les prédicats comme dans cette formule :

$$\forall P \forall x \forall y (x = y) \Rightarrow (P(x) \Leftrightarrow P(y))$$

Malheureusement, il n'existe pas de théorème de complétude pour cette logique du second ordre ; autrement dit, on ne connaît pas de systèmes d'axiomes logiques qui captent « syntaxiquement » la notion de formule vraie de cette logique élargie et on démontre même qu'il ne peut pas en exister. Pour cette logique, on ne fera jamais correspondre la notion sémantique de formule vraie avec une notion syntaxique de formule démontrable.

Seule la logique du calcul des prédicats du premier ordre est donc vraiment satisfaisante pour servir de fondement aux diverses théories mathématiques et en particulier à la théorie des ensembles ZFC, qui est une théorie formulée dans le cadre du calcul des prédicats du premier ordre, comme l'est aussi l'arithmétique de Peano.

UN PARADOXE VRAIMENT TROUBLANT

Une fois admise la nécessité de formuler les théories mathématiques dans le calcul des prédicats du premier ordre, survient un problème gênant provenant du théorème de Löwenheim-Skolem. Ce problème porte le nom de « paradoxe de Skolem » ; le voici. La théorie des ensembles ZFC démontre qu'il existe des ensembles non dénombrables (d'un type d'infini plus gros que celui des entiers) et que l'ensemble des nombres réels est un tel infini non dénombrable. Comment cela est-il possible puisque le théorème de Löwenheim-Skolem nous dit que si ZFC possède des modèles (et l'on espère bien que c'est le cas car, sinon, elle est contradictoire et inutile), alors ZFC possède des modèles dénombrables ?

Pour un tel modèle dénombrable de ZFC, les éléments de base du modèle peuvent être numérotés sans répétition $e_0, e_1, \dots, e_n, \dots$ et sans en oublier aucun. Les objets qui représentent des nombres réels dans le modèle sont ceux d'une sous-liste de cette liste et constituent donc un ensemble dénombrable. Est-ce une contradiction avec l'affirmation qu'on démontre dans ZFC que l'ensemble des nombres réels n'est pas dénombrable ? Non,

car la notion d'ensemble dénombrable interne à ZFC n'est pas celle de la métathéorie. Quand le théorème de Löwenheim-Skolem affirme que ZFC possède des modèles dénombrables, la notion de dénombrable dont il s'agit est celle de la métathéorie. Quand on affirme que ZFC démontre que les nombres réels ne sont pas dénombrables, il s'agit de la notion interne à ZFC. Les deux notions ne coïncident pas ! La notion de dénombrabilité n'est pas absolue.

Ainsi, cette opposition entre deux notions de dénombrabilité n'en est pas une au sens strict : on n'en tire aucune contradiction si on fait la distinction entre théorie et métathéorie. Il faut cependant admettre que c'est un peu ennuyeux. La relativité du concept d'ensemble dénombrable ne fait-elle pas douter de la solidité générale du concept d'ensemble non dénombrable ? Cela a-t-il un lien avec le fait qu'en physique la notion d'ensemble non dénombrable ne joue jamais un rôle direct et important ? Bien sûr, les philosophes se sont intéressés à ces problèmes. De nombreux articles ont été publiés et continuent à l'être sur le sujet, dont par exemple une thèse soutenue en 2000 consacrée au paradoxe de Skolem à l'université de Californie à Los Angeles (voir la bibliographie).

UN RAISONNEMENT TROP FACILE

Joel Hamkins rappelle que la notion de définissabilité est une notion métathéorique et que l'oublier conduit à des énoncés injustifiés. Le raisonnement suivant n'est pas correct :

« Puisque les nombres réels sont non dénombrables et qu'il n'y a qu'une infinité dénombrable de définitions possibles avec un alphabet fini (ce qui est le cas de la théorie des ensembles), alors c'est qu'il existe des nombres réels non définissables ».

Rien n'est faux dans les prémisses du raisonnement, mais la conclusion n'est pas justifiée car elle assimile deux notions de dénombrabilité, la notion interne (pour affirmer que les nombres réels sont non dénombrables) et la notion externe (pour affirmer que les définitions possibles sont dénombrables).

On ne peut pas prouver aussi simplement que, dans tout modèle de la théorie des ensembles, il y a des nombres réels non définissables avec les formules de la théorie des ensembles. Et d'ailleurs, c'est faux : il existe des modèles de la théorie des ensembles où tous les nombres réels, et même tous les ensembles, sont définissables dans le sens expliqué plus haut : à chaque nombre réel r du modèle considéré correspond une formule $P(x)$ qui est vérifiée par r et dont ZFC démontre qu'il est le seul à la vérifier.

Joel Hamkins ne prétend pas être le premier à noter l'existence de tels modèles, et

La notion de dénombrabilité n'est pas absolue

rappelle que le logicien britannique John Myhill a démontré dès 1952 un résultat dans ce sens. Myhill terminait son article par la remarque lucide montrant qu'il comprenait très bien la portée des résultats de son travail : « On entend souvent dire que, puisqu'il y a un nombre non dénombrable d'ensembles et seulement une infinité dénombrable de noms, il doit donc y avoir des ensembles sans nom. Cet argument est fallacieux, selon ce qu'on vient de voir. »

LES FONCTIONS INVISIBLES

Précisons un peu ce qui se passe dans le cas des modèles dénombrables de ZFC. Quand on affirme que l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels n'est pas dénombrable dans ZFC, on affirme qu'il n'existe pas de bijection entre $\mathbb{N}$ et $\mathbb{R}$. Quand on affirme « $\mathbb{R}$ est dénombrable dans un certain modèle de ZFC », cela signifie que pour la métathéorie il existe une bijection entre $\mathbb{N}$ et les réels du modèle.

Qui a raison ? C'est la métathéorie : les réels du modèle sont bien dénombrables, et si la théorie en interne ne le voit pas, c'est parce qu'il lui manque des fonctions, et en particulier celle qui établit une bijection entre $\mathbb{N}$ et $\mathbb{R}$. La théorie est aveugle à certaines fonctions. Le plus extraordinaire dans une telle situation est que la façon dont le modèle ignore l'existence de cette fonction et de bien d'autres objets que la métathéorie connaît, est qu'elle le fait d'une façon totalement cohérente et compatible avec tous les axiomes de ZFC. Le modèle dénombrable de ZFC est une sorte de faux univers ensembliste, mais il simule tellement bien le véritable univers ensembliste de la métathéorie qu'il vérifie tout ce qu'on attend et qui est formulable dans les termes du vocabulaire de ZFC.

Il se produit bien d'autres choses de cette nature confirmant que, pour éviter les contradictions liées à la notion de définissabilité et dont le paradoxe de Berry nous avertit du danger, il faut soigneusement ne pas mélanger théorie et métathéorie, même si cela amène à soupçonner que certaines notions des mathématiques liées à l'infini, en particulier la notion d'ensemble non dénombrable, n'ont pas la clarté que les mathématiques usuelles prétendent. ■

BIBLIOGRAPHIE

- J. Patarin, **Théorie des ensembles et logique mathématique. Des infinis mathématiques aux théorèmes de Gödel**, Ellipse, 2020.
- J. D. Hamkins et C. Leahy, **Algebraicity and implicit definability in set theory**, *Notre Dame Journal of Formal Logic*, vol. 57(3), pp. 431-439, 2016.
- T. Bays, **Skolem's Paradox**, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2014 - <https://plato.stanford.edu/entries/paradox-skolem/>
- J. D. Hamkins et al., **Pointwise definable models of set theory**, *Journal of Symbolic Logic*, vol. 78(1), pp. 139-156, 2013.
- T. Bays, **Reflexion on the Skolem's Paradox**, thèse, UCLA, 2000 - <https://www3.nd.edu/~tbays/papers/pthesis.pdf>
- J. Myhill, **The hypothesis that all classes are nameable**, *PNAS*, vol. 38(11), pp. 979-981, 1952.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

LE DÉSIR BLEU DU JARDINIER SATINÉ

L'un des jardins éphémères du domaine de Chaumont-sur-Loire s'inspire d'un oiseau australien et de son étrange habitude de collecter les objets bleus.

L'exemple le plus connu est le Velcro, contraction de «velours» et «crochet», dont l'idée serait venue en 1948 au Suisse George de Mestral à la vue de boules de bardane accrochées à ses vêtements. Mais le biomimétisme, c'est-à-dire s'inspirer du vivant pour innover et résoudre des problèmes, est plus ancien: ainsi, les machines volantes imaginées par Léonard de Vinci sont calquées sur l'anatomie des oiseaux. C'est que depuis près de quatre milliards d'années, le vivant, par le biais de la sélection naturelle, a eu le temps de peaufiner des solutions particulièrement efficaces et économes pour s'adapter et perdurer. Par exemple, pour la bardane, il s'agit de

s'assurer du transport de ses graines par des animaux.

Ce «laboratoire géant» qu'est la Terre offre une formidable source d'idées pour les chercheurs et les ingénieurs. Il l'est tout autant pour les jardiniers et paysagistes invités à s'emparer du thème du biomimétisme à l'occasion du Festival international des Jardins, au domaine de Chaumont-sur-Loire: vingt-quatre équipes internationales (Italie, Pays-Bas, Mexique, Suède, Chine, République tchèque...) y présentent leurs créations.

Les visiteurs découvriront comment les fils d'araignées, l'architecture des termitières, les racines du lierre, les rayures des zèbres, les feuilles de lotus, la peau



Le jardin «Bleu désir».

des caméléons et bien d'autres choses encore s'interprètent dans un jardin. Attardons-nous dans celui nommé «Bleu désir», conçu par Robin Abel Flosi, Johanna Bonella, Jean Robaudi, Ken Novellas et Adèle Justin. L'inspiration est le jardinier satiné (*Ptilonorhynchus violaceus*), un oiseau australien noir aux reflets bleutés, qui est l'une des vingt espèces de passereaux dits «jardiniers».

Jardinier? C'est que lorsqu'il s'agit de séduire, le mâle déploie des trésors d'énergie et de créativité. Dans une zone dégagée des forêts qu'il habite, il confectionne ce que les ornithologues appellent un «berceau». D'abord, avec des brindilles fines et longues, l'oiseau érige une



sorte de tonnelle, un corridor qu'il « peint » avec un mélange de salive et de composés végétaux. Autour de cet édifice, il dispose de nombreux éléments piochés dans les alentours, et parfois chez les voisins de la même espèce: baies, fleurs, coquilles d'escargots, mais aussi détritiques ou objets chapardés comme des capuchons de stylo, des capsules, des boutons... Tous ces trophées qui constellent le berceau sont violets, jaunes ou verts, mais le plus souvent bleus, et ce d'autant plus que le volatile est âgé. Peut-être est-ce parce que cette couleur fait mieux ressortir son plumage. Les femelles visiteront plusieurs berceaux et choisiront, après plusieurs

phases, de s'accoupler avec le mâle qui aura fait le plus sensation.

DU RECYCLAGE...

Le jardin Bleu désir a été constitué de la même façon. Ses concepteurs ont réuni dans un cercle-berceau une myriade de matériaux bleus artificiels, collectés dans les environs du domaine de Chaumont-sur-Loire, et les ont associés à diverses essences aux teintes bleutées. On parvient au cœur du jardin en suivant une étroite allée qui concentre l'attention, ce qui nous met presque dans la peau d'une femelle. Au fond de l'installation, un grand treillage de bois et de métal rappelle la tonnelle du jardinier satiné. Ce

faisant, l'équipe de jardiniers paysagistes souhaite attirer l'attention du visiteur sur la profusion d'objets que nous abandonnons dans la nature et sur l'idée essentielle de recyclage, puisqu'en définitive c'est ce que fait l'oiseau. Libre à vous de tenter de séduire avec sa méthode... ■

Festival international des Jardins,
du 22 avril au 7 novembre 2021,
au domaine régional de Chaumont-sur-Loire,
41150 Chaumont-sur-Loire.
<http://bit.ly/38DL6cS>

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

MANIER LE LASSO, UN ART SUBTIL

Une corde faisant une boucle de taille variable:
quoi de plus simple qu'un lasso? Pourtant, même les
figures les plus élémentaires sont difficiles à réaliser.
Un peu de physique aidera les débutants...

Les cow-boys expérimentés et des artistes de cabaret ou de cirque réussissent des figures impressionnantes avec leurs lassos, à l'exemple de Kevin Fitzpatrick, champion du monde de maniement du lasso. Facile? Malgré des essais innombrables, avec divers types de corde, nous-mêmes n'avons jamais réussi à réaliser la moindre de ces figures! Une étude de 2014 sur la physique du lasso permet de comprendre les subtilités de cet art. Si elle ne nous a pas permis de progresser dans le maniement de la corde, au moins aide-t-elle à mieux comprendre les erreurs de débutants commises au cours de nos tentatives.

Les *rope tricks*, les «tours de corde», ont pour origine la pratique des cow-boys pour attraper les animaux selon les techniques héritées des *vaqueros*. Ils sont

réalisés avec un lasso, formé en passant l'une des extrémités d'une corde à travers une petite boucle nommée «honda», située à l'autre extrémité.

Point important, la corde doit pouvoir coulisser librement à travers le honda, qui n'est donc pas un nœud. En conséquence, si vous tenez la corde sans lui donner de mouvement, elle va pendre verticalement depuis votre main et, si vous avez formé une boucle, cette dernière va rétrécir sous l'effet de son propre poids, jusqu'à disparaître. Ainsi, seul un mouvement approprié de la main et du bras du *roper* permet à la boucle de conserver sa taille.

Nous allons nous concentrer sur l'analyse du tour de corde le plus simple: la boucle plate (*flat loop*). Dans cette figure, la boucle du lasso forme un cercle horizontal maintenu en rotation autour d'un axe vertical passant par son centre

Les figures réalisées avec un lasso par des cow-boys ou des artistes sont spectaculaires. Elles nécessitent beaucoup de dextérité et d'expérience...

grâce à un léger mouvement de main du *roper*. Commençons par suivre les conseils de Carey Bunks, l'un des experts du sujet, dans son ouvrage *The Lasso. A Rational Guide to Trick Roping*.

UNE CORDE DE LA BONNE LONGUEUR ET UNE BOUCLE ASSEZ GRANDE

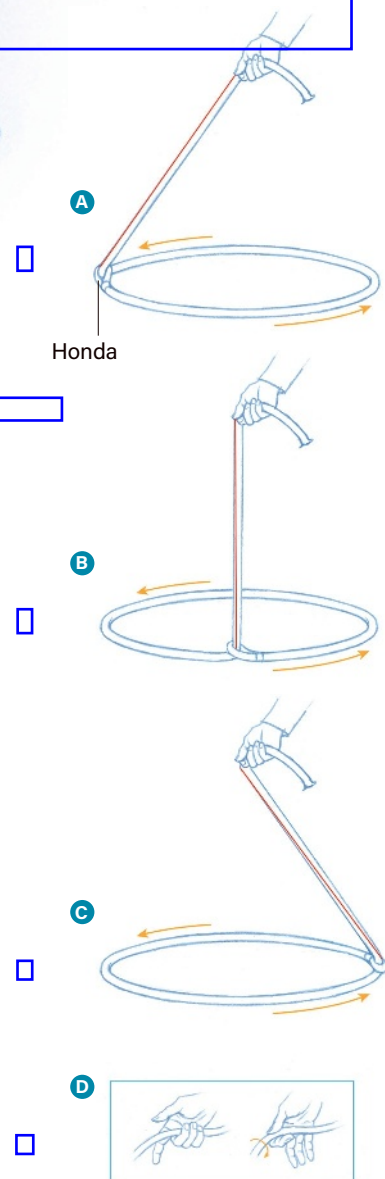
Tout d'abord, la longueur idéale d'une corde pour ce tour est bien définie: 4,6 mètres (15 pieds) pour une personne de taille moyenne. Les 8 derniers centimètres de la corde sont repliés pour former le honda. Il est fortement conseillé d'utiliser un œillet métallique: il permet au honda de garder son diamètre, de laisser coulisser la corde sans difficultés et d'éviter l'usure qui en résulte.

Ensuite, le plus difficile avec ce tour est de... commencer! Il faut démarrer



UNE CORDE QUI TOURNE ET SE TORD

Dans la figure de la boucle plate, où la boucle du lasso est horizontale, la main tient la corde par le haut et lui imprime un mouvement circulaire, de façon que la boucle effectue une rotation autour de l'axe vertical passant par son centre. En raison de cette rotation, le honda tourne aussi et la partie verticale de la corde subit donc une torsion, visualisée ici par le filet rouge, qui est rectiligne au début de la rotation **A**, mais torsadé ensuite **B C**. Pour éviter cette torsion, la main doit simultanément faire pivoter la corde autour d'elle-même **D**.



avec une boucle suffisamment grande: celle-ci doit comprendre entre 75% et 80% de la longueur totale de la corde. Les deux mains impulsent alors un mouvement de rotation horizontal, puis la main qui tient la corde entretient la figure en effectuant un simple mouvement circulaire. Point besoin d'effectuer de grands mouvements: il suffit, en maintenant l'avant-bras fixe, d'une rotation du poignet comme celle que l'on effectue pour remuer une soupe avec une cuillère de bois.

ÉVITER LA TORSION DE LA CORDE

Que l'on réussisse ou pas à entretenir le mouvement, on se rend vite compte d'un premier problème. Progressivement, la corde se tord sur elle-même et se met à s'entortiller. Pourquoi?

Le haut de la corde, tenu par la main, effectue un mouvement de translation circulaire, c'est-à-dire qu'il se déplace selon un cercle mais ne tourne pas sur lui-même. En revanche, l'ensemble formé par le bas de la corde, la boucle, effectue un mouvement de rotation autour d'un axe vertical. Le point de jonction entre la corde libre et cet anneau effectue donc un mouvement de rotation sur lui-même, contrairement à l'extrémité tenue par la main: il en résulte une torsion de la corde qui augmente de tour

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



en tour (voir l'encadré page précédente). Pour éviter cette torsion et la compenser, les *ropers* font rouler le haut de la corde entre leurs doigts.

Cet aspect maîtrisé, nous pouvons reprendre les tentatives pour exécuter la figure. Nouveau problème: la boucle fond jusqu'à disparaître. Pourquoi? Parce que dans le tour de la boucle plate, la corde est soumise à deux forces antagonistes: son poids, qui la fait pendre verticalement et réduit le diamètre de la boucle, et la force centrifuge, qui écarte la corde de l'axe de rotation, la tend et augmente le diamètre de la boucle. Pour maintenir constante la taille de la boucle, il faut donc assurer un équilibre entre ces deux forces. Est-ce aisé? Pour le comprendre, comparons le poids de la boucle et la tension dans la corde.

FORCE CENTRIFUGE, TENSION ET POIDS

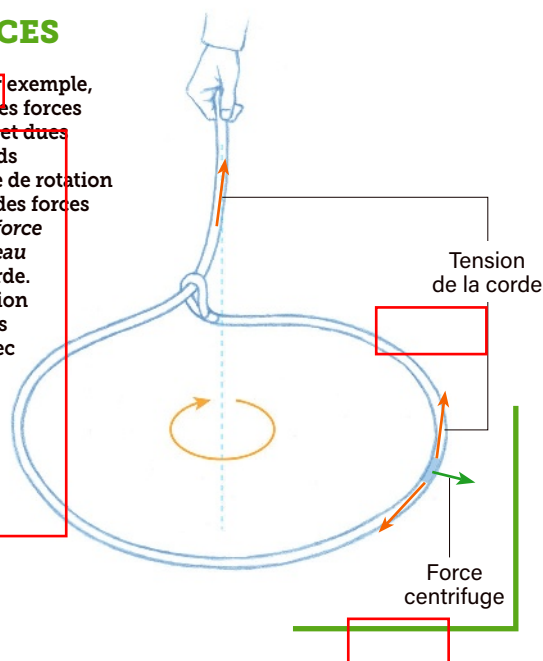
En étudiant l'équilibre dans un anneau de corde en rotation, on montre que la tension de la corde est égale au produit de la masse par unité de longueur de la corde et du carré de sa vitesse linéaire. Le poids de l'anneau de corde est égal au produit de sa masse par l'accélération de la pesanteur. En exigeant l'équilibre de ces deux forces, on estime la vitesse de rotation de la corde en fonction du rayon de la boucle. Pour la corde de 4,6 mètres de long dont la boucle en occupe 80%, on obtient une vitesse de rotation de 1,6 tour par seconde. Un chiffre que confirment les simulations numériques effectuées sur un modèle complet de la corde.

Cette vitesse minimale nécessaire, déjà significative, augmente lorsqu'on réduit le diamètre de la boucle et nécessite alors un bon contrôle du mouvement du poignet. Cela explique l'erreur majeure de tous les débutants, qui commencent avec une boucle trop petite. La tentation est alors grande de travailler avec une boucle de taille fixe en empêchant la corde de glisser dans le honda. Ce dispositif, que nous n'osons pas appeler «lasso», a été riche en enseignement, comme l'a montré l'étude de Pierre-Thomas Brun et ses collègues, physiciens à l'université Paris-Sud et à Sorbonne Universités, en 2014.

Les simulations et les expériences réalisées avec un robot montrent un comportement intéressant nommé «bifurcation». À très faible vitesse, la corde reste pendue selon la verticale. À partir d'une certaine vitesse de rotation, cette solution devient instable. Selon la longueur de la boucle, deux formes peuvent alors

ÉQUILIBRE DE FORCES

Dans le tour de la boucle plate, par exemple, il doit s'établir un équilibre entre les forces centrifuges agissant sur la boucle et dues à sa rotation sur elle-même, le poids de la corde et sa tension. La vitesse de rotation de la boucle détermine l'intensité des forces centrifuges (on a représenté ici la force centrifuge s'exerçant sur un morceau de corde), donc la tension de la corde. Et au niveau de la main, cette tension doit quasiment compenser le poids de la corde. On calcule ainsi qu'avec une corde longue de 4,6 mètres et dont la boucle représente 80%, la vitesse de rotation à imprimer à la boucle est d'environ 1,6 tour par seconde.



émerger. Pour les boucles courtes, la corde prend une forme incurvée, dite «coudée», où la boucle demeure fermée mais se redresse dans le plan horizontal. Lorsque la boucle est plus grande, la corde prend la configuration dite «cintre», le bout de corde libre étant vertical et la boucle s'ouvrant selon une forme ovale dans le plan vertical. Quelle que soit la forme prise, si l'on augmente encore la vitesse de rotation, on obtient *in fine* la figure de la boucle plate.

Quelles sont les conséquences de la libération de la corde au niveau du honda? Il subsiste un peu de frottement de la corde sur elle-même, qui permet justement de stabiliser la taille de la boucle. Cependant, comme il s'agit d'un frottement solide, il y a un effet de seuil, comme lorsqu'on pousse une caisse sur le sol: il y a mouvement uniquement si l'on exerce une force horizontale suffisante.

La prise en compte de cela a des conséquences importantes sur la réalisation d'une boucle plate. Si la boucle est trop petite, moins de 73% de la longueur de la corde, il est impossible de la stabiliser quelle que soit la vitesse de rotation: elle rétrécit systématiquement. Si la boucle est bien grande (plus de 80% de la longueur de la corde), la stabilisation est possible, mais dans un domaine assez étroit de vitesses de rotation, typiquement entre 1,4 et 1,7 tour par seconde. Ces deux éléments viennent confirmer que la maîtrise du lasso est effectivement une tâche difficile! ■

BIBLIOGRAPHIE

P.-T. Brun, N. Ribe et B. Audoly, **An introduction to the mechanics of the lasso**, *Proceedings of the Royal Society A*, vol 470, article 20140512, 2014.

C. Bunks, **The Lasso. A Rational Guide to Trick Roping**, 1996 (<http://www.juggling.org/books/lasso/>).

L'ORDINATEUR QUANTIQUE

Promesses et réalité

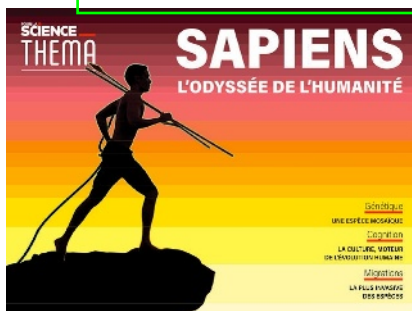
- Une sélection d'articles rédigés par des chercheurs et des experts
- Une lecture adaptée aux écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



<https://boutique.groupepourlascience.fr>

L'AUTEUR



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

LA BOTTE SECRÈTE DE L'ALEURODE

Ce minuscule insecte ravageur des cultures est un champion de la course aux armements. Sa dernière trouvaille ? Anéantir les défenses de ses plantes hôtes en utilisant leurs propres armes...

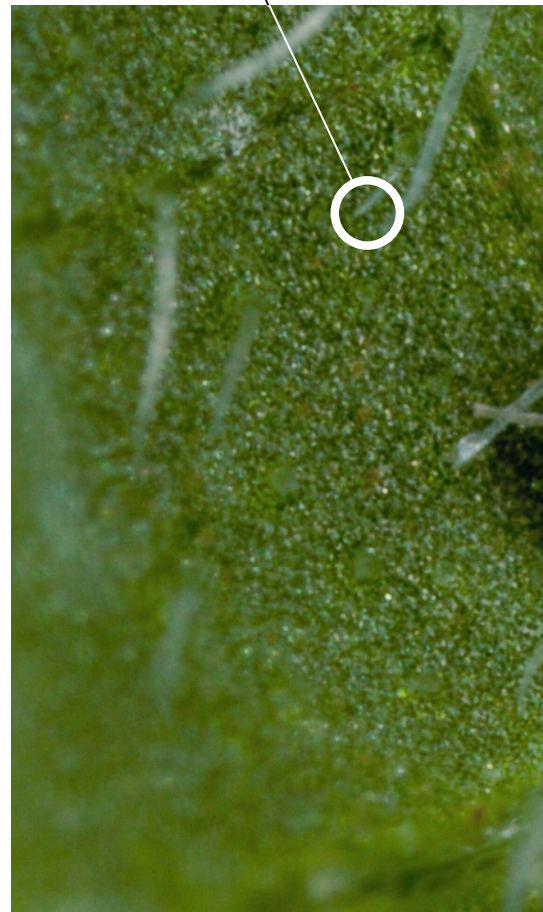
Pour illustrer la lutte pour la vie chère à Darwin, on puise souvent des exemples dans les relations proie-carnivore ou hôte-parasite en laissant de côté celles entre les plantes et les herbivores. Il est vrai que, dans les premiers cas, les dynamiques de chasse ou les tentatives d'infection sont plus faciles à suivre et à comprendre. Au contraire, chez les plantes, à part quelques caractères évidents comme la présence d'épines ou de poils urticants, la plupart des défenses relèvent de la guerre chimique : contre les insectes, les métabolites secondaires – en particulier les glucosides phénoliques – sont leurs meilleures armes. Ces molécules sont des produits de la plante non essentiels à la vie des cellules (contrairement aux métabolites primaires) et interviennent dans les rapports de la plante avec son

environnement, notamment dans la lutte contre les agents pathogènes.

D'un point de vue évolutif, les relations biochimiques entre plantes et insectes herbivores se retrouvent ainsi à la source d'une course aux armements relevant de l'hypothèse de la reine rouge, inspirée du livre *De l'autre côté du miroir*, de Lewis Carroll, où la Reine rouge explique à Alice qu'au pays des Merveilles, il faut courir pour rester au même endroit. Les plantes aussi doivent évoluer sans cesse pour survivre. Elles synthétisent des métabolites secondaires qui repoussent les insectes. Puis ces derniers les maîtrisent, par exemple en les métabolisant. Les plantes alors synthétisent de nouvelles molécules... Cette coévolution paraît sans fin.

Depuis longtemps, biologistes et chimistes se penchent sur ces métabolites

Si ces deux spécimens se nourrissent sur une feuille de melon d'eau, les plantes hôtes de prédilection de l'aleurode du tabac sont le cotonnier, le haricot, le tournesol, l'aubergine, la pomme de terre, le poivron, le tabac, la tomate, les agrumes et diverses plantes ornementales.



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

EN CHIFFRES

30

Bemisia tabaci s'est révélé être non pas une seule espèce, mais un complexe d'au moins 30 espèces, voire peut-être une centaine.

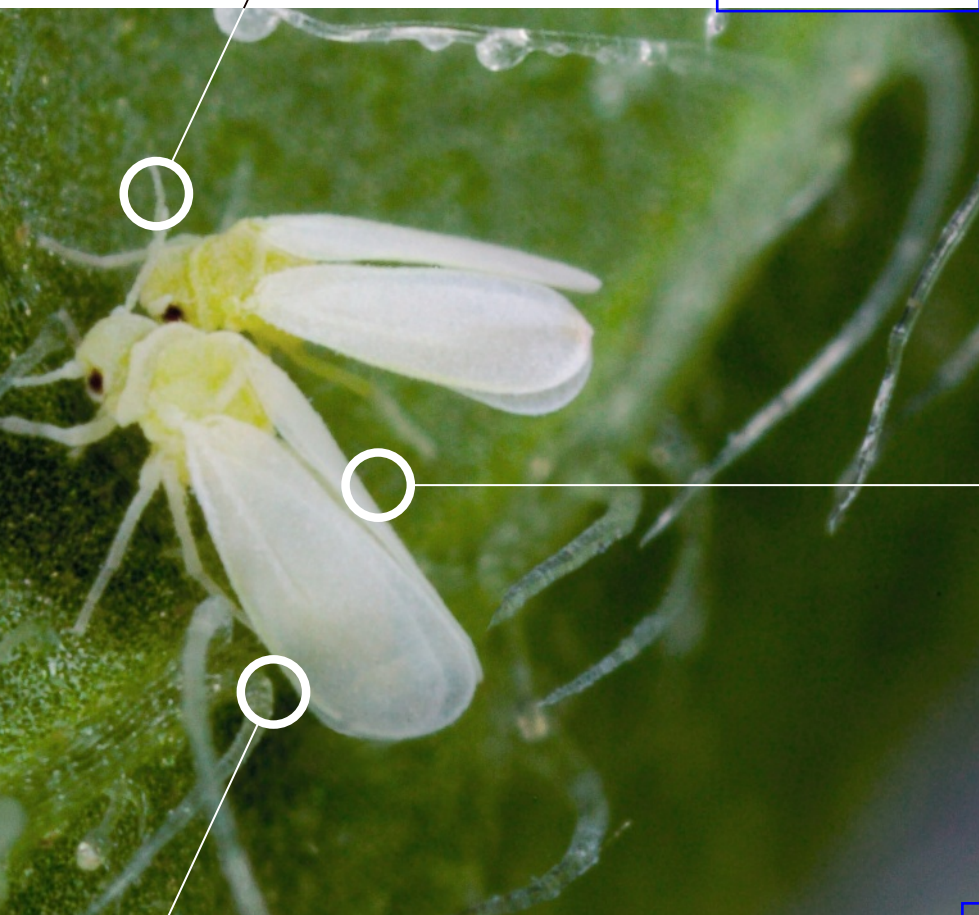
86 MILLIONS

Le transfert horizontal du gène d'une plante vers *B. tabaci* s'est produit après la divergence entre *B. tabaci* et ses proches parents, les insectes du genre *Trialeurodes*, qui date d'il y a 86 millions d'années.

600

B. tabaci parasite au moins 600 espèces de plantes, dont le tabac, la tomate, la pomme de terre...

L'aleurode du tabac est un insecte de l'ordre des hémiptères, comme les punaises, les pucerons et les cigales.



Le gène que cet insecte a acquis d'une plante s'exprime à tous les stades de son développement – larvaire, nymphal, imaginal –, principalement dans le tube digestif. Des conditions spatiotemporelles qui favorisent sa protection vis-à-vis des défenses chimiques de la plante.

Cet insecte peut produire 9 à 15 générations par an.



Aleurode du tabac (*Bemisia tabaci*)

Taille: env. 1 mm

secondaires, d'autant plus que certains intéressent le monde médical. On pensait donc avoir fait le tour de la question. Or une équipe internationale rassemblée par Youjun Zhang, de l'Institut des légumes et des fleurs, à Beijing, en Chine, vient de découvrir la stratégie d'un insecte herbivore qui, tout simplement, se déttoxifie grâce à un gène emprunté aux plantes et qui leur sert... à se déttoxifier.

UN INSECTE RAVAGEUR

En 1889, l'agronome grec Panagiotis Gennadius décrit l'aleurode du tabac (*Bemisia tabaci*), un insecte qu'il remarque se nourrissant sur un plant de tabac. Cet

insecte, les Anglo-Saxons l'appellent l'«aleurode de la patate douce», et les Indiens l'«aleurode du cotonnier»... Bref, c'est une peste polyphage à répartition mondiale, qui, en suçant la sève des plantes, leur inocule différents virus pathogènes, ce qui entraîne des dégâts considérables.

En réalité, en 2011, Paul De Barro, du centre CSIRO à Brisbane, en Australie, et ses collègues ont montré que *B. tabaci* est non pas une seule espèce avec plusieurs sous-types, mais un complexe d'espèces indistinguables par leur morphologie, trouvées sur plusieurs centaines de plantes différentes de par le monde. À la différence d'autres ravageurs, on n'assiste pas à une spécialisation sur une plante hôte particulière, mais plutôt à une spéciation d'ordre géographique. Dès lors, comment cet insecte résiste-t-il aux

divers métabolites secondaires de ces multiples plantes cibles? L'équipe de Youjun Zhang semble avoir résolu l'énigme: les aleurodes ont acquis un gène de détoxification des plantes particulièrement efficace.

Car les plantes aussi se détoxifient: par différentes opérations chimiques, elles modifient les molécules xénobiotiques (c'est-à-dire qui leur sont étrangères), toxiques pour elles, en molécules neutres qu'elles stockent ensuite dans les vacuoles de leurs cellules. Parmi les principales modifications, on compte des hydroxylations, des glycosylations, des acétylations, des sulfonylations... Il y a une dizaine d'années, l'équipe de Gorō Taguchi, à l'université Shinshū, au Japon, attirait l'attention sur l'importance de la réaction de malonylation pour modifier les glucosides phénoliques xénobiotiques auxquels les plantes sont soumises, qu'ils proviennent de plantes, d'animaux ou de bactéries. Dans cette réaction, une enzyme, la malonyltransférase, catalyse l'ajout d'un radical malonyl $\text{CH}_2(\text{COO}^-)_2$ au glucoside phénolique. L'étude montrait que ce système de détoxification était largement répandu parmi les plantes, dont le tabac.

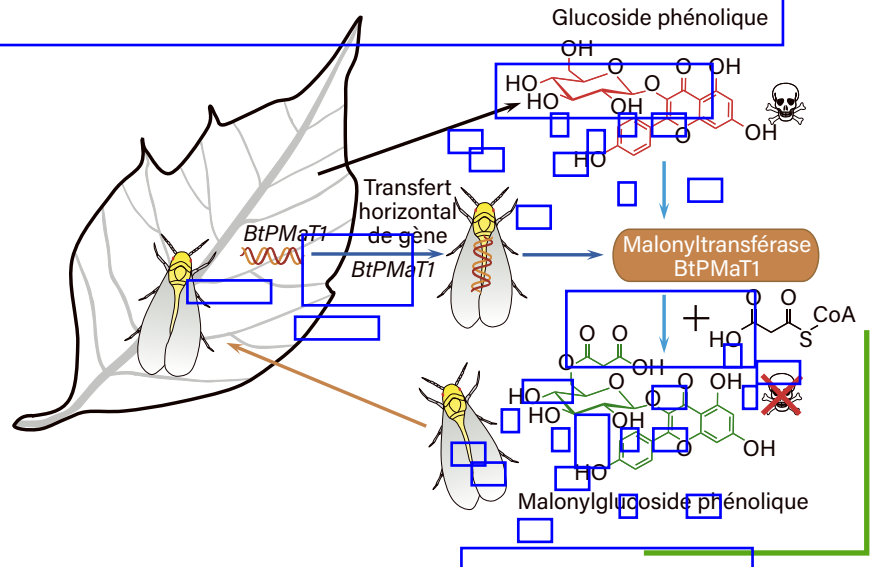
Ainsi, les plantes peuvent se détoxifier facilement de glucosides phénoliques exogènes, car elles possèdent le gène codant la malonyltransférase. Or l'équipe de Youjun Zhang vient de trouver un tel gène dans le génome de l'aleurode du tabac... Donc l'insecte peut agir comme la plante, c'est-à-dire se détoxifier des glucosides phénoliques exogènes pour lui, dont ceux que la plante qu'il parasite produit pour se défendre. Par ce tour de passe-passe, les plantes ont ainsi perdu leur principale défense contre ces ravageurs...

UN GÈNE RÉCUPÉRÉ D'UNE PLANTE

Mais comment cet animal s'est-il trouvé d'un coup pourvu d'une telle enzyme? Par transfert horizontal à partir du monde végétal: l'insecte a directement intégré le gène d'une plante dans son génome sans le recevoir d'un ancêtre. La démonstration de l'équipe de Youjun Zhang est éclatante. Tout d'abord, quand elle a comparé la séquence du gène de l'insecte et de ceux des plantes vertes par phylogénie moléculaire, elle a observé que le gène de l'insecte se trouve dans le sous-arbre des gènes de plantes à fleurs, signe qu'il est d'origine végétale. Puis des analyses fonctionnelles avec la tomate comme plante hôte ont validé le rôle du gène (voir l'encadré ci-dessous).

TEL EST PRIS...

Les aleurodes ont trouvé une parade efficace contre les défenses chimiques de leurs plantes hôtes. Ces insectes ont acquis un gène des plantes, *BtPMT1*, qui code une enzyme, la malonyltransférase *BtPMT1*, laquelle neutralise les glucosides phénoliques que les plantes produisent pour se défendre (ci-dessous). Pour le montrer, l'équipe de Youjun Zhang a transformé génétiquement des tomates produisant des glucosides phénoliques létaux pour les aleurodes à haute dose, de façon que les feuilles expriment des ARN interférentiels qui inhibent l'expression du gène *BtPMT1*. Les insectes se sont nourris de la sève de la plante. Après quelques jours, l'expression du gène était considérablement réduite et la mortalité des insectes fortement accrue: les tomates transgéniques étaient devenues résistantes à ces ravageurs.



S'agit-il d'une originalité? Pas sûr. Suivant une récente étude d'une équipe internationale dirigée par Lingrang Kong, de l'université d'agriculture de Shandong, en Chine, des végétaux en sont aussi bénéficiaires. Ainsi, le chiendent allongé (*Thinopyrum elongatum*), une poacée proche du blé tendre avec lequel il peut s'hybrider, a acquis par transfert horizontal le gène *Fhb7* à partir d'un champignon parasite des épis de poacées – une espèce du genre *Epichloe*. Or ce gène code une enzyme qui rend la plante résistante aux espèces de *Fusarium*, autres champignons proches des *Epichloe* et responsables de fusarioses, des maladies provoquant la brûlure de l'épi et la fonte des semis.

Ainsi, dans la dynamique de la reine rouge, les transferts de gènes semblent jouer leur rôle. Certains agronomes voudraient entrer dans la danse. L'équipe de Youjun Zhang propose la construction d'OGM (artificiels) de tomates exprimant des ARN interférentiels pour les protéger de l'attaque d'un insecte OGM (naturel). Celle de Lingrang Kong souhaite faire passer le gène *Fhb7* au blé tendre par hybridation afin de le rendre résistant aux fusarioses. Un jeu qui ne plaira probablement pas à tous... ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Xia et al., **Whitefly hijacks a plant detoxification gene that neutralizes plant toxins**, *Cell*, vol. 184(7), pp. 1693-1705.e17, 2021.

H. Wang et al., **Horizontal gene transfer of *Fhb7* from fungus underlies *Fusarium* head blight resistance in wheat**, *Science*, vol. 368, article eaba5435, 2020.

P. J. De Barro et al., ***Bemisia tabaci*: a statement of species status**, *Annu. Rev. Entomol.*, vol. 56, pp. 1-19, 2011.

G. Taguchi et al., **Malonylation is a key reaction in the metabolism of xenobiotic phenolic glucosides in *Arabidopsis* and tobacco**, *Plant J.*, vol. 63, pp. 1031-1041, 2010.

ABONNEZ-VOUS À

Pour la
Science

OFFRE ÉTÉ

1 AN

3 MOIS OFFERTS
en plus de
votre abonnement
1 an !

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros + 3 offerts

Le magazine en version numérique 12 numéros + 3 offerts

Le hors-série papier 4 numéros + 1 offert

Le hors-série en version numérique 4 numéros + 1 offert

Accès à pourlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 103,50€

79€

Au lieu de 143€

99€

Au lieu de 218€

43 %

de réduction *

45 %

de réduction *

55 %

de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnements Pour la Science – 56, rue du Rocher – 75008 Paris – Courriel : serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG213NO



OUI, je m'abonne
pour 15 mois à

Pour la
Science

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE
PAPIER

• 15 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 103,50€

1-F-PAP-P-15N-59€

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE

• 15 n° du magazine papier
• 5 Hors-série papier

79€

Au lieu de 143€

1-F-HSPAP-P-15N-79€

☐ FORMULE
INTÉGRALE

• 15 n° du magazine
(papier et numérique)
• 5 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 218€

1-F-INT-P-15N-99€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Courriel : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science



Pour un paiement par carte bancaire, rendez-vous sur
boutique.groupepourlascience.fr/offres-3NO-PLS

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 15 mois. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

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

L'AUTEUR



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

PAILLETTES ET LAMPES À LAVE EN CUISINE

Des expériences classiques de physicochimie inspirent
de jolies préparations culinaires.

La chimie n'est pas de la cuisine, et la cuisine n'est pas de la chimie : la première est une science de la nature, la seconde est une technique et un art. Pour autant, pourquoi se priver de transférer des beautés d'un champ à un autre ?

Dans l'expérience de la « pluie d'or », des paillettes dorées sédimentent lentement dans la masse d'une solution limpide. L'effet, fascinant, s'obtient en dissolvant de l'iodure de plomb dans de l'eau, en chauffant cette dernière ; lors du refroidissement, l'iodure de plomb recristallise en plaquettes dorées. On peut à l'infini chauffer, laisser recristalliser, chauffer...

On se gardera bien de consommer cette solution toxique, mais l'expérience nous inspire. Partons de sel de Chypre qui cristallise sous la forme de pyramides creuses à base carrée et dorées. Plaçons ces cristaux dans une huile parfumée : ils sédimentent lentement. Quand nous retournons le système, comme ces boules ou une fausse neige tombe sur des reproductions de monuments, nous observerons le même type de pluie d'or, mais comestible.

Pouvons-nous ralentir la chute, pour une beauté plus durable ? Un modèle simple, qui prend en compte la pesanteur, la poussée d'Archimède et la force de frottement, indique que la vitesse de sédimentation devient rapidement constante et inversement proportionnelle à la viscosité du liquide où le solide est suspendu, mais proportionnelle au carré du rayon des particules. En agissant sur ce dernier paramètre – en sélectionnant avec une passoire les cristaux de sel de Chypre les plus petits –, on peut ralentir la chute.

Par ailleurs, les « lampes à lave », où de grosses gouttes colorées montent et

Dans une lampe à lave, le liquide dont sont constituées les grosses gouttes a presque la même densité que le liquide environnant. Rien n'empêche d'utiliser des liquides alimentaires pour obtenir les mêmes effets...

descendent très lentement, sont également fascinantes. Le mécanisme est simple : les gouttes sont faites d'un liquide non miscible au liquide où elles sont suspendues, et elles sont à peine plus denses que ce dernier, de sorte que leur lente sédimentation les amène dans la partie inférieure du cylindre. Là, elles sont chauffées par la lampe qui est à la base du cylindre. Leur densité diminuant avec leur dilatation, elles remontent alors, en se refroidissant, pour ensuite redescendre, et ainsi de suite.

AJUSTER LES DENSITÉS

En cuisine, il faut évidemment des liquides comestibles, qui peuvent être une solution aqueuse et une huile (parfumée : il faut du goût). Pour ajuster les densités, souvenons-nous que si la densité de l'huile est inférieure à celle de l'eau, la densité de l'éthanol est inférieure à celle de l'huile. Autrement dit, si l'on s'y prend bien, on peut faire trois couches dans un verre en y mettant d'abord de l'eau, puis de l'huile, puis en versant très doucement de l'alcool très concentré sur l'huile. Quand on ajoute ensuite de l'eau à l'éthanol de la couche supérieure, la densité du mélange hydro-alcoolique augmente, jusqu'à devenir égale à celle de l'huile, de sorte que des gouttes d'un liquide sont suspendues dans l'autre sans sédimentation.



Reste à faire de la véritable cuisine. L'eau ? Ce peut être un jus de fruit, de légume, un bouillon, du thé, du café, du vin... Pour l'huile, on utilisera une huile qui aura du goût, telle une belle huile d'olive où l'on aura macéré un ingrédient susceptible d'y laisser se dissoudre des composés odorants. L'alcool ? Les eaux-de-vie et alcools habituels sont déjà trop denses, mais ils feront une bonne base, pour y ajouter un alcool très concentré, de qualité alimentaire évidemment. ■



SUSPENSION AU CAFÉ

- 1 Faire griller de la poudre d'amandes et la faire macérer une semaine dans de l'huile d'olive.
- 2 Dans un verre, faire un fond de gel, à partir de café où l'on a dissous de la gélatine.
- 3 Quand le gel est pris, verser dessus de l'eau-de-vie de poire sur une épaisseur de 2 cm environ.
- 4 Déposer dessus de l'huile macérée, sur une épaisseur de 2 cm. Puis, à la pipette ou à la seringue, en plongeant dans l'eau-de-vie de poire, ajouter un alcool très concentré (Absinthe 45, Rhum Stroh 80...) jusqu'à ce que la densité soit égale à celle de l'huile : cela correspond à une force en alcool d'environ 60°.
- 5 Quand l'effet de suspension est obtenu, déposer sur le dessus du système une mousse de café, obtenue en fouettant du café avec du blanc d'œuf.

ABONNEZ-VOUS À

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

Pour la
Science

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

29 %
de réduction *

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Pour la Science – 56 rue du Rocher – 75008 Paris – serviceclients@groupepouirlascience.fr

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

PAG21STD

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

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

4,90€
PAR MOIS
-29 %

1-F-PAP-N-PVT-4,9€

☐ FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE

• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

6,50€
PAR MOIS
-31 %

1-F-HSPAP-N-3PVT-6,5€

☐ FORMULE
INTÉGRALE

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

8,20€
PAR MOIS
-43 %

1-F-INT-N-3PVT-8,2€

2/ Mes coordonnées

Nom :
Prénom :
Adresse :
Code postal : Ville :
Tel. :
Courriel :@.....
(indispensable pour la formule intégrale)
J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3/ Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

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

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

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

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

4/ MERCI DE JOINDRE
IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

p.24

VACHE

Le hasard des attributions aléatoires de lettres d'identification donne parfois de jolis noms aux événements astronomiques transitoires. C'est ainsi qu'en 2018, le nom cow («vache» en anglais) a été donné à une émission 10 à 100 fois plus brillante qu'une supernova ordinaire, détectée à 200 millions d'années-lumière. Elle porte bien son nom : ses caractéristiques étaient tellement inattendues qu'elle a surpris tous les astronomes. La vache !

p.44

POPULATION Y

C'est le nom d'un ancien groupe humain apparenté aux Australasiens (Aborigènes, Maoris...). Des études génétiques suggèrent que quelques populations actuelles de l'Amazonie auraient des ancêtres issus de ce groupe.

p.20

Les milliers de milliards de dollars des plans de relance post-Covid allègent les réglementations environnementales et reconduisent les subventions néfastes accordées aux secteurs carbonés

CATHERINE AUBERTIN économiste de l'environnement à l'IRD

p.12

Z

À la fin des années 1970, dans les eaux douces des faubourgs de Leningrad, des biologistes russes ont isolé un curieux virus de bactérie. L'ADN est habituellement constitué de quatre «lettres» A, T, G, C. Mais chez le bactériophage, tous les A sont remplacés par des Z.

p.80

PARADOXE DE BERRY

L'énoncé «le plus petit entier positif non définissable par une expression en français ayant moins de dix-neuf termes» est une autocontradiction. Le nombre de mots en français étant fini, le nombre de combinaisons de dix-huit mots l'est aussi. Et le nombre d'entiers étant infini, il existe donc des entiers non définissables en moins de dix-neuf mots, dont un plus petit. Or l'énoncé ci-dessus le définit... en dix-huit mots !

p.92

ALEURODE

En 1889, l'agronome grec Panagiotis Gennadius décrit l'aleurode du tabac, un insecte remarqué sur un plant de tabac. Les Anglo-Saxons l'appellent l'«aleurode de la patate douce», et les Indiens l'«aleurode du cotonnier»... Et pour cause, c'est une peste polyphage qui, en suçant la sève des plantes, cause des dégâts considérables.

p.54

17

Tous les dix-sept ans, dans le nord-est des États-Unis, des milliards de cigales sortent de terre, muent une dernière fois et deviennent adultes. Elles passent ensuite leurs derniers jours à chercher un partenaire en «chantant» et à s'accoupler. C'est le cas en ce moment, avec une génération qui a vu le jour en 2004.

Diplômes d'Université de l'Observatoire de Paris

EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS

Licence 1

Formation en présentiel ou à distance
Cours magistraux filmés et retransmis
en direct ou en différé

Acquérir un panorama des connaissances
actuelles en astronomie et
astrophysique auprès d'astronomes
professionnel·le·s

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)

[http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/
DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/](http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/)

contact.duecu@obspm.fr

LUMIERES SUR L'UNIVERS

Licence 1 à Master 1

Formation en ligne
Tutorat personnel et individualisé
Cours thématiques avec de
nombreux exercices

Acquérir des bases solides en astrophysique
à travers les parcours thématiques proposés

Se spécialiser grâce aux exercices suivis
et corrigés à distance par un·e astronome
professionnel·le

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

[http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/
LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/](http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/)

contact.dulu@obspm.fr

Niveau

Suivi

Objectifs

Contenu

Pages Web

Contact

Dates limites d'inscription

5 septembre 2021

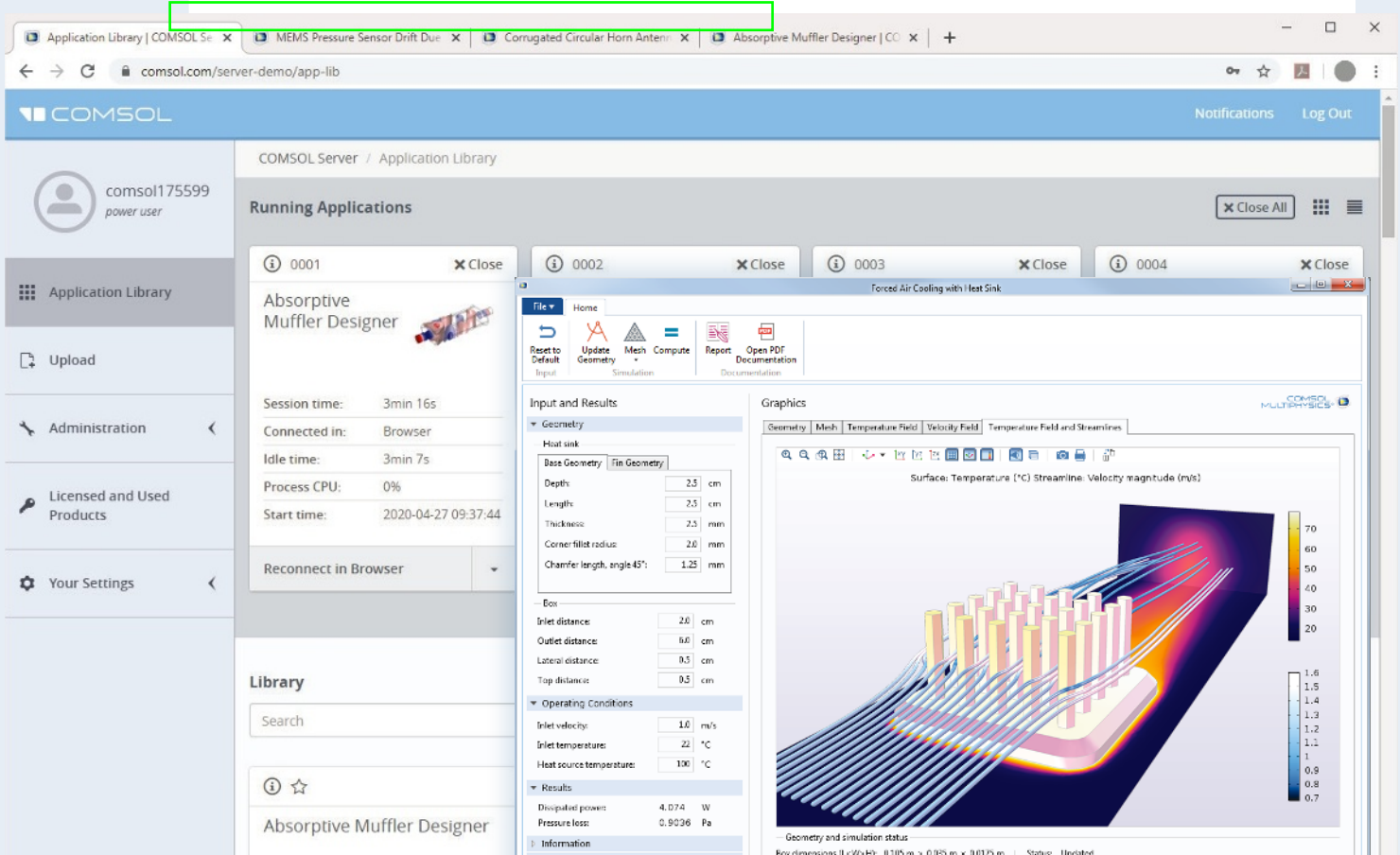
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

ÉTUDE DE CAS

Accélérez et améliorez le développement de vos produits.

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

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/product-development



Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.