

MATHÉMATIQUES

À LA DÉCOUVERTE
DES NOMBRES
TRANSCENDANTS

ARCHÉOLOGIE

LIRE LES PAPIRUS
CARBONISÉS
D'HERCULANUM

NEUROSCIENCES

LES ROULEUX
CÉRÉBRAUX
DE L'AGRESSIVITÉ

M 02687 - 512
JUN 2020
P 512

LA PREMIÈRE MOLÉCULE DE L'UNIVERS

Une découverte
longtemps attendue



ÉVOLUTION
POURQUOI AVONS-NOUS
AUTANT DE PROBLÈMES
DENTAIRES ?

Universités d'Université Observatoire de Paris

COMPRENDRE

LUMIERES SUR L'UNIVERS

L'UNIVERS

Licence 1

Formation en présentiel ou à distance
Cours magistraux filmés et retransmis
en direct

Acquérir un panorama des connaissances actuelles en astronomie et astrophysique auprès d'astronomes professionnels

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/>

contact.duecu@obspm.fr

Niveau

Suivi

Objectifs

Contenu

Pages Web

Contact

Dates limites d'inscription

3 septembre 2020

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

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 astronome professionnel

Des parcours triennaux 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/>

contact.dulu@obspm.fr

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique:

Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique:

Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,

Ingrid Leroy

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-Vilal

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Lestienne

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

El Hassan Bencherif, François Bernier, Jérémie Boitier,

Olivier Bonnerot, Maud Bruguère, Eric Buffetaut, Gaëtan

Burgaud, Jean-Marie Cheylan, Pauline Colinet, Silvina

Condomi, Catherine Dupont, Sophie Duquesne, Francesco

d'Errico, Patrick Forterre, Lucas Gierczak, Bernard Lours,

Alain Marty, Alain Queffelec, Sophie Violette

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Macleod

susan.macleod@pourlascience.fr – Tél. 03 55 43 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <https://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél. 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements –

Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Trocard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réabonnement:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting editor in chief: Curtis Brainard

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 », dans la revue « Scientific American », dans

« Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75014 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction,

d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque

et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de

Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire

intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de

l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue

des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 20 %

Impact sur l'eau: P_{tot} 0,007 kg/tonne



10-31-1282

Certifié PEFC

Ce produit est issu

de forêts gérées

durablement et de

sources

contrôlées.

pefc-france.org

**É
DITO**



**MAURICE
MASHAAL**

Rédacteur
en chef

LUMIÈRE SUR LES MOLÉCULES DU COSMOS



Qu'y a-t-il dans l'espace lointain? Tout ce que nous savons des étoiles, exoplanètes, galaxies et autres objets astronomiques repose en très grande partie

sur une entité physique qui paraît d'une grande banalité tant on la côtoie au quotidien: la lumière.

Et cela pas juste en observant le ciel à l'œil nu.

Quand on regarde le ciel à l'œil nu, on ne voit que la lumière qui nous parvient par le biais du télescope. C'est en fait grâce à la spectroscopie, c'est-à-dire l'analyse fine du rayonnement

lumineux (et plus généralement électromagnétique), que l'on

peut extraire des informations précieuses sur la matière présente dans

le cosmos et les phénomènes qui s'y déroulent.

La découverte récente que l'astrochimiste Ryan Fortenberry relate dans ce numéro (voir pages 28-32) ne fait pas exception, et illustre même de façon éclatante le rôle capital de la spectroscopie en

astronomie. Il s'agit de la mise en évidence de l'ion d'hydrure d'hélium,

HeH⁺, dans une lointaine nébuleuse. La découverte est d'importance.

En effet, depuis plusieurs décennies, les théoriciens supposent avec de

bonnes raisons que cet ion inexistant sur Terre, très instable et quelque

peu exotique – il comporte un atome d'hélium, élément chimiquement

inerte qui ne réagit qu'exceptionnellement avec d'autres – a été la

première molécule formée dans l'Univers peu après le Big Bang. Et que

cette molécule a favorisé certains processus chimiques qui se sont

déroulés ensuite, orientant donc la cosmochimie.

L'hydrure d'hélium s'ajoute ainsi aux quelque 200 autres molécules

identifiées dans l'espace. Et c'est à Ryan Fortenberry, l'auteur de

notre article, que nous remercions de nous expliquer que parmi ces molécules, certaines repérées assez

récemment, éclairent une énigme tenace de l'astrophysique, celle

des « bandes interstellaires diffuses ». Encore une histoire de spectres!

D'autres sujets passionnants vous attendent dans ce numéro :

Le rôle du hasard dans le vivant, un mélangeur inventé grâce

à la géophysique... De quoi penser à autre chose que les questions

relatives au Covid-19, une actualité sur laquelle *Pour la Science*

vous propose depuis le mois de mars de nombreux articles en ligne

et en accès libre (sur www.pourlascience.fr). ■

S

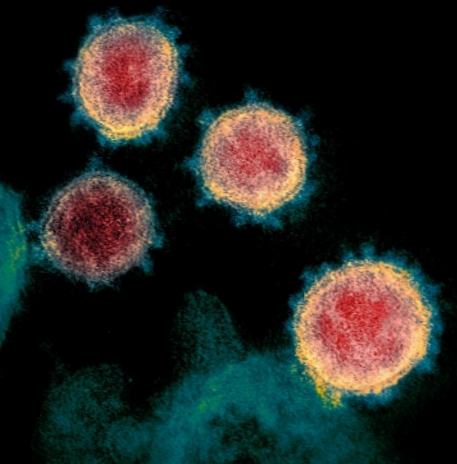
OMMAIRE

N° 512 /
Juin 2020

COVID-19

RETROUVEZ TOUS
NOS ARTICLES RELATIFS
À LA PANDÉMIE
DE COVID-19
EN ACCÈS LIBRE SUR
NOTRE SITE INTERNET :

**WWW.
POURLASCIENCE.FR/
TAGS/COVID-19**



ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

- Rétablissement de l'ozone: des effets sur le climat
- Une nouvelle enzyme recycle les bouteilles PET
- L'exotisme des anyons se confirme
- Comment la fleur évite la polyspermie
- Des traces de dinosaures au plafond
- Un arsenal de gènes métaboliques dans les virus géants
- L'aversion au risque de la fourmi
- Quand *Homo erectus* côtoyait les paranthropes
- La pluie impliquée dans une éruption?

P. 16

LES LIVRES DU MOIS

P. 18

HOMO SAPIENS INFORMATICS

L'école aux prises avec la fracture numérique

Gilles Dowek

P. 20

QUESTIONS DE CONFIANCE

Covid-19: confusion entre politique et science

Virginie Tournay



En couverture :
© Mondolith Studios

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. 36

ÉVOLUTION

AUX RACINES DE NOS PROBLÈMES DENTAIRES

Peter Ungar

Dans les populations humaines d'aujourd'hui, les dents sont souvent cariées, mal alignées et à l'étroit dans les mâchoires. Principal suspect: l'alimentation moderne.



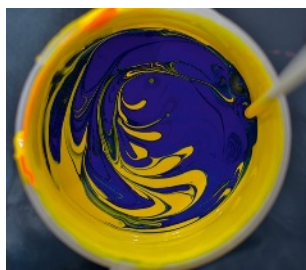
P. 50

BIOLOGIE

CE QUE LE VIVANT DOIT AU HASARD

Hervé Le Guyader

Quelle est la place du hasard en biologie? Soulevée dès l'aube de la biologie moléculaire, cette question reçoit depuis quelques années de nouvelles réponses à toutes les échelles du vivant.



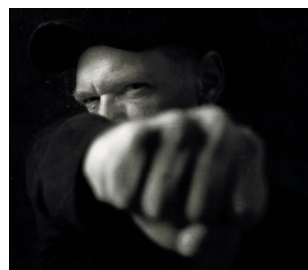
P. 44

TECHNOLOGIE

MÉLANGER EN S'INSPIRANT DU MOUVEMENT DE LA TERRE

Patrice Meunier

Comment mélanger un liquide avec efficacité? À partir de leurs recherches fondamentales, des géophysiciens ont breveté un procédé étonnamment simple: faire tourner le récipient sur lui-même en l'inclinant légèrement!



P. 58

NEUROSCIENCES

DANS LES ROUAGES CÉRÉBRAUX DE L'AGRESSIVITÉ

R. Douglas Fields

Au-delà de la morale, toute action violente présente un risque pour l'individu. Quels mécanismes neuronaux peuvent alors la déclencher? Les chercheurs ont des pistes.



P. 68

ARCHÉOLOGIE

LIRE DES PAPYRUS CARBONISÉS ?

Hannes Hoffmann

Au XVIII^e siècle, la fouille d'une villa d'Herculaneum a livré quelque 1800 rouleaux de papyrus carbonisés datant de l'Antiquité. Les tentatives de les dérouler en ont détruit beaucoup. Mais avec le développement de méthodes d'imagerie non destructives, l'espoir de les lire renaît.



P. 76

HISTOIRE DES SCIENCES

DU FLAIR DE WATERTON À L'ODORAT DES OISEAUX

Benoît Grison

Les vautours repèrent-ils les carcasses à l'odeur ? En 1826, cette question fut le point de départ d'une controverse qui ne trouva son dénouement que ces dernières années.



P. 22

ASTROCHIMIE

LA PREMIÈRE MOLÉCULE DE L'UNIVERS

Ryan C. Fortenberry

Depuis longtemps, les chercheurs pensaient que l'ion d'hydrure d'hélium, HeH^+ , avait été la première molécule à se former dans le cosmos. Mais cet ion restait impossible à détecter dans l'espace. Jusqu'à tout récemment...

RENDEZ-VOUS

P. 82

LOGIQUE & CALCUL

À LA RECHERCHE DES NOMBRES TRANSCENDANTS

Jean-Paul Delahaye

Les nombres irrationnels, qu'ils soient algébriques ou transcendants, se laissent approcher plus ou moins difficilement par des suites de nombres rationnels. La mesure de cette difficulté permet de les classer.

P. 88

IDÉES DE PHYSIQUE

Comment volent les insectes

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Sur les traces des poissons des glaces

Hervé Le Guyader

P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Un bon goût de fraises

Hervé This

P. 98

À PICORER

CAHIER PARTENAIRE

Fukushima
Que devient le césium
radioactif dans les forêts ?

Commandité par **IRSN**

pages I à III

A

CTUALITÉS

P.6 Échos des labos

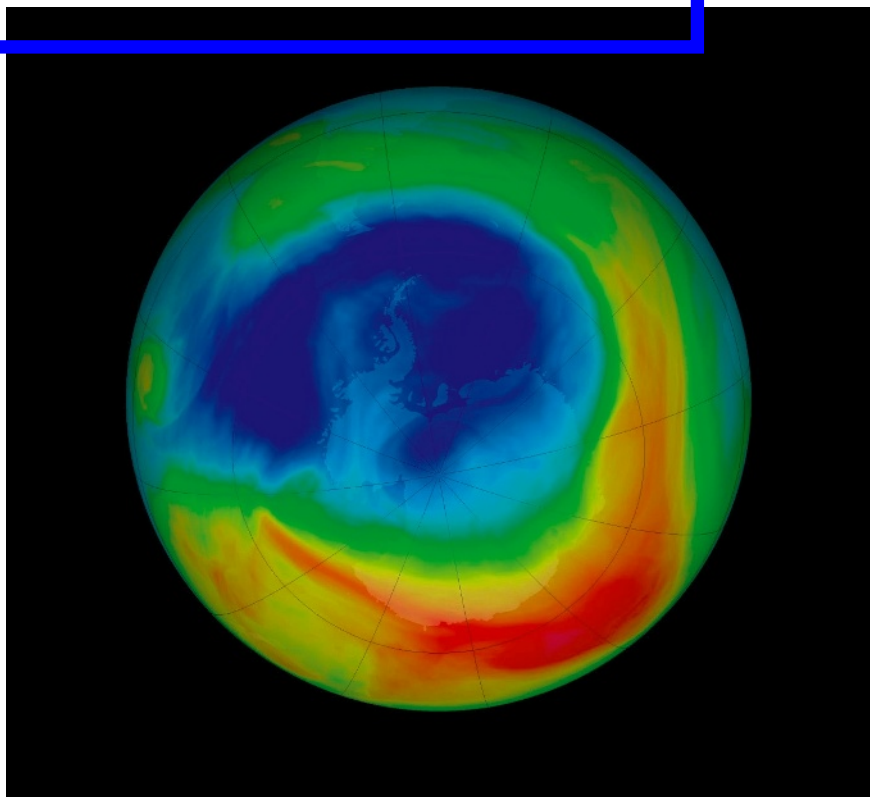
P.16 Livres du mois

P.18 *Homo sapiens informaticus*

P.20 Questions de confiance

RÉTABLISSEMENT DE L'OZONE: DES EFFETS SUR LE CLIMAT

Le trou dans la couche d'ozone
au-dessus de l'Antarctique tel
qu'il était le 6 septembre 2019.
Il se résorbe lentement
avec les années.



**L'appauvrissement de la couche d'ozone
atmosphérique avait altéré le climat de l'hémisphère Sud.
Mais avec le rétablissement de cette couche,
le phénomène marque une pause.**

Les chlorures de fluorure (CFC) et autres espèces chimiques qui détruisent le trioxygène (ou ozone, O_3) ont aminci la couche d'ozone dans l'atmosphère. Au point qu'au début des années 1980, on a découvert dans cette couche stratosphérique un trou au-dessus de l'Antarctique. En 1977, un accord multilatéral, le protocole de Montréal, a banni l'usage des composés qui détruisent le trioxygène et, progressivement, des signes de rétablissement

ont été observés. Toutefois, le trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique a eu d'autres conséquences : il a modifié toute la circulation atmosphérique de l'hémisphère Sud, en resserrant autour du pôle Sud le vortex polaire – un grand courant circumpolaire troposphérique (donc sous la stratosphère), aussi nommé jet-stream.

Or Antara Banerjee, de l'université du Colorado, et ses collègues viennent d'extraire des données une information encourageante : depuis 2000, les

modifications de la circulation atmosphérique de l'hémisphère Sud, dont le resserrement du jet-stream autour du pôle, marquent une pause – ce qui est la conséquence des décisions du protocole de Montréal!

Le fait qu'un changement dans la stratosphère perturbe des vents troposphériques est surprenant. En effet, la stratosphère ne représentant que 15% de la masse atmosphérique, ses mouvements ont une capacité d'entraînement moindre que ceux de la troposphère qui est en dessous. Pour autant, tant les modèles que les observations confirment la sensibilité du vortex polaire à l'évolution des vents stratosphériques due aux effets thermiques de la raréfaction de l'ozone.

Afin d'étudier les tendances à l'origine de ces phénomènes, Antara Banerjee et ses collègues ont compilé les mesures de trois grandeurs depuis 1980: la position de deux courants atmosphériques des latitudes moyennes; la position du vortex polaire à la latitude du bord sud de la cellule climatique tropicale. En déterminant les moyennes de ces grandeurs très variables, ils ont dégagé leurs tendances et mis en évidence une pause depuis 2000.

Toutefois, de multiples facteurs agissent simultanément sur la circulation atmosphérique. Afin de démêler cet écheveau, l'équipe américaine a procédé à de nombreuses simulations informatiques à l'aide de puissants programmes: d'une part, le CanESM2 (Canadian Earth system model version 2), un modèle climatique à base physique, d'autre part, des modèles de type CCM (Chemistry climate models), qui ajoutent la chimie et la physique de l'atmosphère. Les chercheurs ont d'abord simulé le changement climatique observé en tenant compte de tous les facteurs connus: augmentation des concentrations de gaz à effet de serre, changement des niveaux atmosphériques d'ozone et des composés qui la détruisent, éruptions volcaniques...

Ces simulations reproduisent fidèlement les variations climatiques observées, y compris le resserrement du jet-stream autour du pôle, puis l'arrêt de ce phénomène. Les chercheurs ont ensuite repris ce travail de simulation en n'introduisant qu'un seul, ou seulement quelques-uns, des facteurs à prendre en compte. Il en ressort que seules les simulations tenant compte de l'évolution des concentrations en gaz néfastes à l'ozone reproduisent correctement l'évolution de la circulation atmosphérique.

Ces résultats montrent qu'au cours des vingt dernières années, la reconstitution de l'ozone a agi suffisamment sur la circulation troposphérique pour contrebalancer l'influence contraire que l'augmentation des gaz à effet de serre a sur elle. Rien ne garantit toutefois que cela se poursuivra, car, à mesure que les niveaux d'ozone continueront à se rétablir, leur influence sur le climat deviendra plus faible que celle des gaz à effet de serre, les quels domineront de plus en plus les changements futurs de la troposphère... ■

FRANÇOIS SAVATIER

A. Banerjee et al., *Nature*, vol. 579, pp. 544-548, 2020

Une nouvelle enzyme recycle les bouteilles PET

Avec une production annuelle mondiale de 70 millions de tonnes, le recyclage du plastique PET est un enjeu environnemental majeur. Une équipe de chercheurs industriels et académiques a développé une nouvelle enzyme avec une efficacité inégalée. Vincent Tournier, de la société Carbios, nous présente ce résultat.

Propos recueillis par SEAN BAILLY



VINCENT TOURNIER
Responsable ingénierie
enzymatique de Carbios

Quelles améliorations
avez-vous réalisées ?

Grâce à la collaboration entre la société Carbios à Clermont-Ferrand, et le Toulouse Biotechnology Institute (un centre mixte de recherche sous la tutelle de l'Insa Toulouse, de Inrae et du CNRS), nous avons modifié la séquence d'acides aminés de l'enzyme LCC pour adapter au mieux la forme tridimensionnelle du site actif de l'enzyme au PET. Nous avons identifié 11 cibles potentiellement intéressantes dans la séquence et avons testé les 209 variantes possibles. Puis nous avons combiné les solutions les plus efficaces. La protéine LCC résultante se fixe alors plus efficacement aux molécules du plastique et a un pouvoir de coupe plus rapide, ce qui se traduit par un gain de vitesse de la réaction. Nous avons aussi amélioré la stabilité thermique de l'enzyme pour qu'elle soit efficace et stable à plus haute température (72 °C), quand les chaînes de PET sont plus mobiles et donc plus accessibles à l'enzyme.

Cette enzyme est 100 fois plus efficace que les autres, et dépolymérise 90 % de déchets de PET en seulement 10 heures. Elle décompose le PET en ses deux monomères de base, l'acide téréphthalique et le monoéthylène-glycol. Nous avons ensuite utilisé l'acide téréphthalique obtenu pour refabriquer des bouteilles en PET : ses propriétés sont équivalentes à une production de novo. Ce qui montre la possibilité d'établir une économie circulaire dans le secteur du plastique PET.

Êtes-vous proches
d'une application industrielle ?

Nous avons conçu le procédé complet avec, comme unité de base, un réacteur pilote de 1 mètre cube avec lequel nous avons obtenu ces résultats. Nous sommes en train de travailler sur un démonstrateur 20 fois plus grand pour améliorer les performances du procédé en conditions industrielles réelles. L'objectif est de commercialiser la licence pour des usines dès 2022. ■

V. Tournier et al., *Nature*, vol. 580, pp. 210-217, 2020

Dans quel contexte s'inscrit
la production de PET ?

On estime la production mondiale de plastique à 359 millions de tonnes par an, dont 70 millions de tonnes de PET (polyéthylène téréphthalate). Ce dernier sert à la fabrication d'emballages, de bouteilles (500 milliards chaque année) et à la confection de fibres textiles (on parle alors de polyester). Le plastique PET est l'un des mieux collectés : on en récupère 70 % à l'échelle mondiale, mais on n'en recycle que 10 %. Le reste est enfoui, incinéré ou finit dans la nature. Il n'y a cependant pas de dégradation naturelle : le PET est broyé et réduit en toutes petites particules, mais il ne disparaît pas complètement. C'est un plastique non biodégradable, extrêmement résistant et stable.

En quoi consiste actuellement
son recyclage ?

Une approche thermomécanique consiste à refondre le plastique, mais le matériau se dégrade à chaque cycle et perd en qualités mécaniques. On est davantage dans une logique de prolongement de vie que dans un vrai recyclage. On connaît aussi des enzymes capables de dégrader le PET, mais leur efficacité est relativement faible et insuffisante pour une application commerciale.

Nous nous sommes donc intéressés à une nouvelle enzyme, une cutinase nommée « 200 », découverte en 2012 par une équipe japonaise dans un compost de feuilles. Cette enzyme s'attaque à la cutine, un biopolymère lipidique intégré à la cuticule protégeant la surface des feuilles végétales, en coupant des liaisons ester. Or le PET est un polyester et nous avons constaté d'une évaluation comparative que la LCC est la plus efficace de toutes les enzymes connues pour dépolymériser le PET.

PHYSIQUE

L'EXOTISME DES ANYONS SE CONFIRME

Grâce à un collisionneur d'électrons miniature, des physiciens ont mis en évidence le comportement collectif particulier des anyons, des entités quantiques intermédiaires entre fermions et bosons.

S lors d'une partie de jeu d'échecs, un trouble-fête échange un pion blanc avec un pion noir, il change radicalement la situation sur le plateau. En revanche, l'inversion de deux pions noirs identiques n'a aucune incidence. À l'échelle des particules et des lois quantiques qui les régissent, on trouve une situation un peu semblable : l'échange de deux bosons identiques, par exemple des photons, ne modifie rien, contrairement à l'échange de deux fermions identiques, des électrons, par exemple. Il en résulte des comportements collectifs différents : bosons et fermions obéissent à des lois statistiques distinctes. Ainsi, deux fermions identiques ne peuvent pas adopter le même état quantique et tendent donc à se repousser : c'est le « principe d'exclusion de Pauli ». Les bosons, eux, n'y sont pas soumis et peuvent très bien se regrouper.

Cette division en deux classes s'applique en trois dimensions, mais les physiciens prévoient que dans des systèmes bidimensionnels, l'existence d'« anyons », au comportement intermédiaire entre celui des fermions et celui des bosons, est possible. Or Gwendal Fève, à l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues viennent de mettre en évidence la statistique quantique exotique de ces entités.

De quel genre d'objets s'agit-il ? Les anyons ne sont pas des particules fondamentales comme les électrons ou les photons, mais des quasiparticules, c'est-à-dire des formes d'excitation collective des particules dans la matière (à l'instar des phonons, qui sont les quanta de vibrations dans un solide). Des anyons sont par exemple produits dans des dispositifs présentant l'effet Hall quantique. Celui-ci se manifeste à une température proche du zéro absolu dans un matériau conducteur bidimensionnel soumis à un champ magnétique intense. L'effet se traduit par une conductance (l'inverse de la résistance électrique) quantifiée : quand on augmente le champ magnétique, elle croît par paliers, déterminés par un nombre entier ou fractionnaire noté ν .

En 1983, l'Américain Robert Laughlin a expliqué le phénomène où ν est fractionnaire en invoquant des anyons. Cependant, la signature de la statistique des anyons restait à

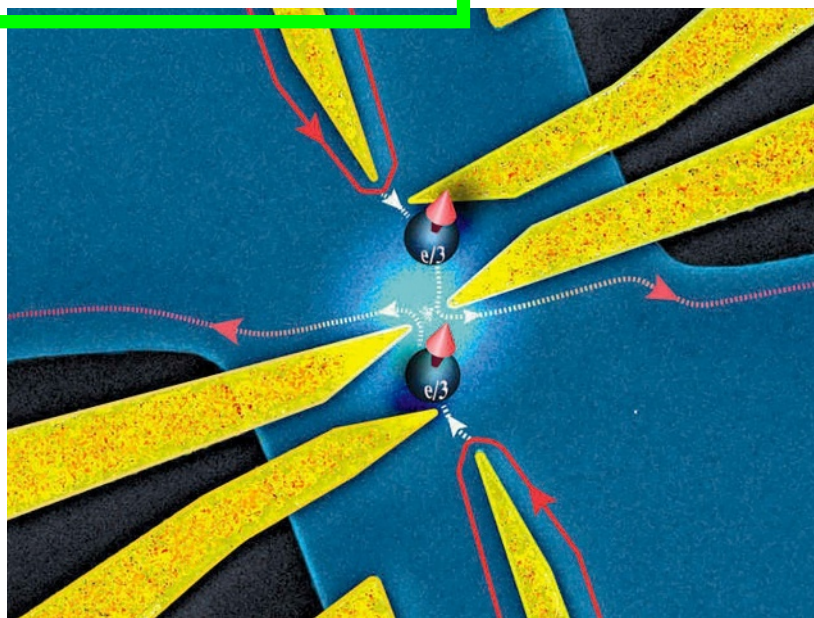


Image au microscope électronique (en fausses couleurs) du collisionneur d'anyons. Le gaz bidimensionnel d'électrons est représenté en jaune et soumis à un champ magnétique intense de 13 teslas. Les quasiparticules se déplacent le long des canaux de bord (en rouge). Les deux paires d'électrodes (couleur or, en haut et en bas) les orientent pour entrer en collision au centre. Les deux électrodes (à gauche et à droite du point de collision) canalisent les anyons après la collision afin de mesurer les courants (en pointillés).

mettre au jour. Pour y parvenir, Gwendal Fève et ses collègues ont mis en œuvre un collisionneur d'anyons dans un gaz d'électrons bidimensionnel à l'intérieur d'une boucle électronique longue de quelques micromètres, fabriquée au Centre de nanosciences et de nanotechnologies, à Palaiseau. Les chercheurs ont placé leur dispositif dans un régime d'effet Hall quantique fractionnaire ($\nu=1/3$). Les anyons produits ont alors été amenés à entrer en collision. Ils ne se repoussent pas systématiquement (comme le feraient des fermions) et peuvent se regrouper (comme des bosons).

En mesurant les corrélations entre les courants produits après la collision, Gwendal Fève et ses collègues ont constaté un bon accord entre les prédictions théoriques et leurs mesures. Ils ont ainsi mis en évidence la statistique intermédiaire entre celle des fermions et celle des bosons. L'équipe espère maintenant produire des anyons avec d'autres valeurs de ν , qui pourraient se révéler utiles dans la conception d'ordinateurs quantiques. ■

S. B.

H. Bartolomei et al., *Science*, vol. 368, pp. 173-177, 2020

ÇA DÉCOIFFE SUR UNE NAIN BRUNE

En combinant des mesures dans les domaines radio et infrarouge, il est possible de mesurer la vitesse des vents sur Jupiter : de l'ordre de 360 kilomètres par heure. Katelyn Allers, de l'université Bucknell, aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé la même technique pour une naine brune (notée 2MASS J1047 + 21), un astre plus massif qu'une planète mais trop petit pour déclencher les processus de fusion nucléaire qui en auraient fait une étoile. Résultat : 2 290 kilomètres par heure !

Science, 9 avril 2020

LA POUSSIÈRE REJUE À LA HAUSSE

La poussière minérale grossière (d'un diamètre supérieur à 5 micromètres) joue un rôle important dans le climat. Elle interagit notamment avec les nuages et contribue au réchauffement. Adeyemi Adebisi et Jasper Kok de l'université de Californie à Los Angeles, ont réévalué la quantité de cette poussière présente dans l'atmosphère. Leur estimation s'élève à 17 millions de tonnes, soit quatre fois la valeur généralement utilisée dans les modèles climatiques...

Science Advances, 8 avril 2020

LA SENTINELLE DES RHINOCÉROS

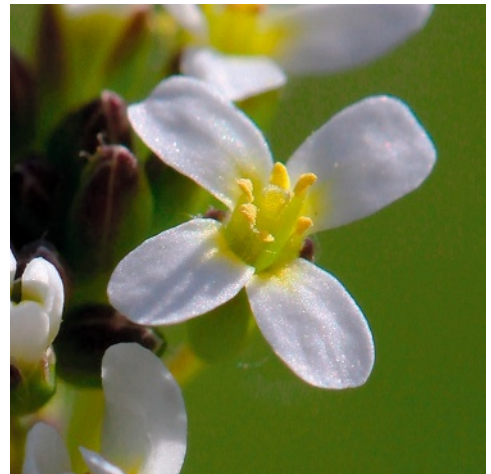
Dans la savane, les oiseaux pique-bœufs se nourrissent de parasites d'autres animaux. On les trouve souvent perchés sur le dos de grands mammifères. Roan Potz et Wayne Linklater, de l'université Nelson Mandela, en Afrique du Sud, ont constaté que les rhinocéros noirs, animaux connus pour leur mauvaise vue, détectent mieux des humains s'approchant s'ils étaient accompagnés de pique-bœufs. Le mammifère interpréterait les cris de l'oiseau, cris qui le mettraient alors en alerte.

Current Biology, 9 avril 2020

COMMENT LA FLEUR ÉVITE LA POLYSPERMIE

La reproduction sexuée chez les végétaux est soumise à une contrainte majeure : les cellules reproductrices mâles, contenues dans les grains de pollen, n'ont pas de mobilité propre. Une fois déposés par le vent ou des insectes sur une fleur, les grains de pollen germent et forment un tube qui croît dans le pistil, où la fécondation a lieu. Fait étonnant, si généralement plusieurs grains de pollen germent sur un même pistil, les ovules ne laissent entrer qu'un seul tube pollinique et les cas de polyspermie (fécondation multiple de l'ovule) sont rares. Alice Cheung, de l'université du Massachusetts à Amherst, aux États-Unis, et son équipe se sont intéressées aux mécanismes qui empêchent la polyspermie chez l'arabette des dames. Elles avaient déjà observé que de multiples tubes polliniques pénétraient dans les ovules chez des mutants ne produisant pas une protéine nommée « Feronia ». Leur nouvelle étude révèle que cette protéine induit la mise en place d'une barrière à la fois mécanique et chimique après l'entrée du premier tube pollinique dans l'ovule.

Chez les végétaux, l'ovule comporte plusieurs cellules, dont deux « synergides » qui constituent le point d'entrée pour le tube



Chez l'arabette des dames, la protéine Feronia évite une fécondation multiple des ovules.

pollinique. La paroi des synergides est mal-léable, ce qui permet le passage du tube. Or l'équipe a montré que Feronia mobilise des molécules fibreuses à la surface des synergides quand un tube pollinique y pénètre. Une barrière mécanique s'établit alors. Par ailleurs, Feronia intervient dans la production d'un gaz qui interrompt l'émission, par l'ovule, de protéines attirant les tubes polliniques. Une double action très efficace contre la polyspermie.

CORALINE MADEC

Q. Duan et al., *Nature*, vol. 579, pp. 561-566, 2020

GEOSCIENCES

UNE LOI POUR LE GLISSEMENT DES GLACIERS

Lucas Zoet et Neal Iverson, des universités du Wisconsin et de l'Iowa, ont modélisé la résistance au mouvement des glaciers glissant sur un lit mou. Ils ont d'abord simulé le phénomène à l'aide d'un appareil faisant tourner des anneaux de glace sur des plateformes de centimètres de sédiments sableux saturés de boue chargés en gravier ou pas. Ils ont constaté que la résistance au glissement augmente avec la vitesse de glissement v_g , jusqu'à une vitesse de transition v^* , pour laquelle la force de cisaillement à l'origine de la déformation du lit mou égale la force de frottement mécanique T , qui est proportionnelle à la pression (loi de Coulomb); au-delà, T domine. Les chercheurs ont traduit ces observations par une loi : la résistance au glissement est égale au produit de T



Un exemple groenlandais de lit mou de glacier libéré par le retrait glaciaire. On note la façon dont les cailloux sont poussés par la glace labourant le lit glaciaire.

par le rapport $v_g/(v_g + v^*)$ élevé à la puissance 0,2. On note également bien l'absence de glissement des glaciers sur lit rocheux. Elle est donc « universelle ». Reste à l'exploiter pour estimer la masse de glace qui se déverse dans les mers polaires.

E.S.

L. K. Zoet et N. R. Iverson, *Science*, vol. 368, pp. 76-78, 2020

PALÉONTOLOGIE

DES TRACES DE DINOSAURES AU PLAFOND

Pendant les 150 millions d'années d'existence d'un leur groupe, les sauropodes, d'imposants dinosaures herbivores, ont laissé de nombreuses traces, notamment sur plusieurs plages fossiles qui allaient devenir françaises. Avec une équipe de l'Association paléontologique des hauts plateaux du Languedoc, Jean-David Moreau, de l'université de Bourgogne, vient de découvrir de telles traces en ronde-bosse... sur le plafond de la grotte de Castelbouc, en Lozère!

Trois pistes de sauropodes sont visibles, dont la plus longue mesure 18 mètres. Elles datent du Bathonien (166 à 168 millions d'années), un étage du Jurassique moyen. De 1,25 mètre de diamètre, les plus grandes traces correspondent, ont calculé les chercheurs, à un sauropode haut de plus de 2,5 mètres à la hanche.

Les larges empreintes se sont d'abord imprimées sur une plage boueuse, puis un dépôt carbonaté les a remplies et recouvertes. La solide strate calcaire résultante est restée en place après que la circulation des eaux souterraines eut achevé d'emporter la couche argileuse issue de la plage, moins résistante. Ce processus d'érosion explique la formation, sous le causse Méjean, un haut plateau faisant partie du bassin des Causses, d'une salle dont le plafond est orné de contre-empreintes de sauropodes. Avant d'être soulevé au cours de la surrection alpine, ce grand bassin sédimentaire, qui s'étend de Mende à Montpellier, a reçu pendant le Jurassique pas moins de 1000 mètres de sédiments qui se sont déposés au fond de mers où, manifestement, des îles étaient foulees par des sauropodes. ■

F. S.

J.-D. Moreau et al., *Journal of Vertebrate Paleontology*, en ligne le 25 mars 2020



© Rémi Flament



VIROLOGIE

UN ARSENAL DE GÈNES MÉTABOLIQUES DANS LES VIRUS GÉANTS

Hors de leurs hôtes, les virus géants ne produisent pas d'activité métabolique.

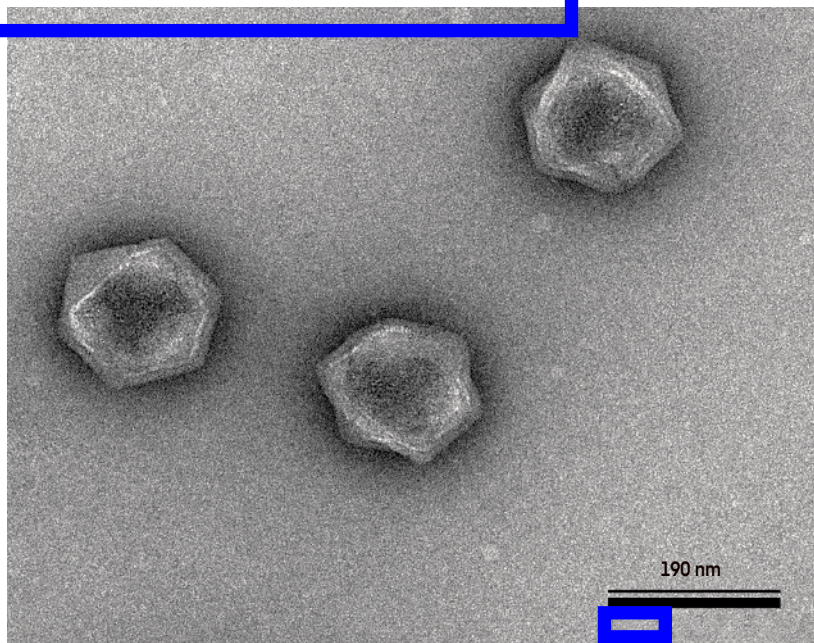
Ils arborent néanmoins de nombreux gènes susceptibles d'intervenir dans les cycles métaboliques de leurs hôtes.

Depuis la découverte des virus géants en 2003, plus d'une centaine ont été isolés. Mais ces virus intriguent toujours autant. De la taille d'une bactérie, leurs virions (la forme sous laquelle ils se propagent) encapsulent un génome d'une longueur considérable, comportant parfois jusqu'à 2,5 millions de paires de bases (soit seulement deux fois moins que la bactérie *Escherichia coli*). Surtout, une part importante des génomes de ces virus ne ressemble à rien de connu. Pour en savoir plus sur ces mystérieux « géants » et explorer leur diversité, Mohammad Moniruzzaman et ses collègues, au Virginia Tech, à Blacksburg, aux États-Unis, ont effectué une étude métagénomique de virus géants issus d'environnements variés. Ils ont ainsi mis en évidence chez nombre d'entre eux une diversité insoupçonnée de gènes impliqués dans le métabolisme.

Pour ce faire, l'équipe a reconstitué, en s'appuyant sur une centaine de génomes de référence, quelque 500 génomes de virus géants à partir des données de plus de 1 500 métagénomiques d'échantillons variés récoltés sur toute la planète, principalement en mer et dans les eaux douces, mais aussi dans le sol, des bioréacteurs, des usines de traitement de l'eau ou des gisements de pétrole. Puis les chercheurs ont construit l'arbre phylogénétique de ces virus et comparé leurs génomes avec des bases informatiques de gènes impliqués dans le métabolisme des cellules.

Précédemment, diverses équipes avaient déjà observé que des virus géants étaient capables de moduler le métabolisme de leurs hôtes (principalement des organismes eucaryotes unicellulaires aquatiques comme des amibes et des microalgues), et décelé la présence de tels gènes dans leur génome. Mais cette nouvelle étude révèle que les virus géants arborent tout un arsenal de séquences semblables à des gènes d'enzymes intervenant dans des processus variés comme la transformation de nutriments, la collecte de lumière, le métabolisme de l'azote, ou encore des voies métaboliques centrales du carbone comme la glycolyse.

De plus, plusieurs de ces séquences se retrouvent, avec plus ou moins de variations,



Avec ses 370 000 paires de bases, le virus Aav, qui infecte l'algue brune *Adreococcus anophage*, fait partie des petits virus géants. Dans son génome, 377 séquences sont susceptibles de coder des protéines.

chez de nombreux virus géants, même de familles éloignées, ce qui suggère que ces gènes ont été acquis par un ou plusieurs ancêtres communs de ces familles, peut-être par transfert de gènes avec leur hôte. Ils se seraient alors intégrés à leur génome et auraient évolué au sein des familles virales – une vision bien éloignée du virus se contentant de voler à son hôte le matériel dont il a besoin pour se multiplier.

En 2011, le microbiologiste Patrick Forterre, à l'institut Pasteur, à Paris, a introduit le concept de « cellule virale » pour désigner la cellule infectée et souligner le fait que sa fonction première est devenue la production de nouvelles particules virales. Les gènes du métabolisme mis au jour chez les virus géants renforcent cette idée, car ils sont autant d'indices suggérant que ces virus sont capables de compléter les chaînes métaboliques de leurs hôtes à leur avantage. Et vu l'abondance des virus géants dans les milieux aquatiques, de tels détournements pourraient jouer un rôle non négligeable dans l'écologie de ces habitats.

MARIE-NEIGE GORDONNIER

M. Moniruzzaman et al., *Nature Communications*, vol. 11, article 1710, 2020

NEANDERTAL PÊCHEUR

Lors de fouilles de la grotte en bord de mer de Figueira Brava, au Portugal, João Zilhão, de l'université de Lisbonne, et une équipe internationale d'archéologues ont découvert des amas coquilliers riches en restes de mollusques, de crabes et de poissons dans le plancher stalagmitique de la caverne, une couche de calcite qui se forme au fil des ans par le ruissellement de l'eau.

Grâce à la datation du site, ils estiment que ces vestiges sont âgés de 86 000 à 106 000 ans, une période à laquelle le site était habité par *Homo neanderthalensis*. La consommation de produits de la mer, riches en oméga-3, aurait contribué au développement du cerveau de l'homme de Néandertal et pu accroître ses capacités cognitives. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

J. Zilhão et al., *Science*, vol. 367, eaaz7943, 2020

ASTROPHYSIQUE

LA COMÈTE VENUE DU FROID

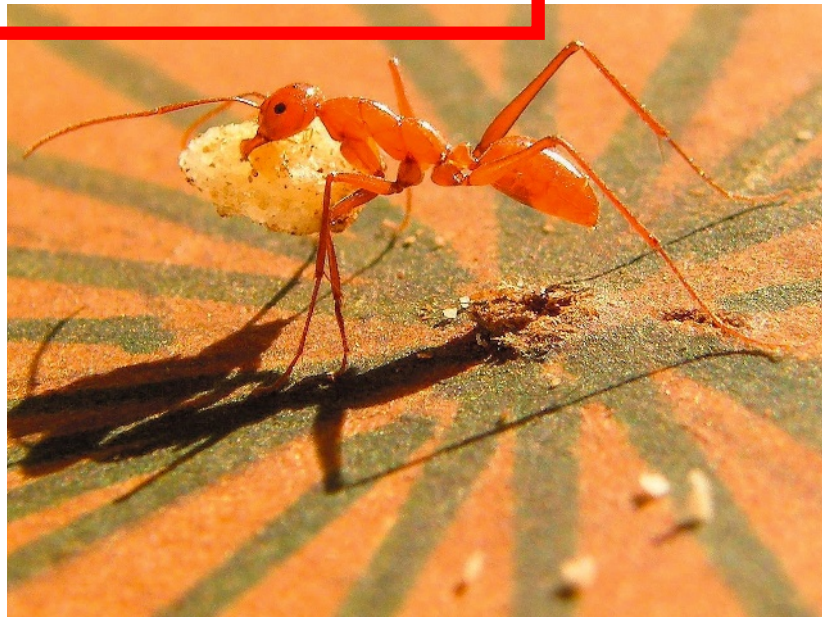
Décelée en 2019, la comète Borissov est le deuxième objet connu (après 'Oumuamua) à traverser le Système solaire en provenance d'un autre système planétaire. Grâce au télescope spatial *Hubble*, Dariusz Bodewits, de l'université d'Albany aux États-Unis, et ses collègues ont estimé la quantité de monoxyde de carbone émise par la comète.

Surprise: ce gaz était plus abondant que l'eau d'au moins 50%, ce qui est trois fois plus que la moyenne des comètes du Système solaire. Très volatil, le monoxyde de carbone passe facilement de l'état solide à l'état gazeux. Dans le voisinage du Système solaire, il ne fait assez froid pour qu'il reste à l'état solide qu'à trois fois la distance Soleil-Pluton de notre étoile. D'après les chercheurs, cela indique que Borissov s'est formée dans un environnement très froid, comme le disque de débris glacés entourant une étoile naissante rouge, le type d'étoile le plus fréquent dans la Voie lactée. ■

S. B.

D. Bodewits et al., *Nature Astronomy*, en ligne le 20 avril 2020

L'AVERSION AU RISQUE DE LA FOURMI



La fourmi *Melophorus bagoti* utilise sa mémoire visuelle pour retrouver son chemin.

Les fourmis sont capables de mémoriser un trajet long de 100 mètres même dans un environnement complexe pour accéder à une source de nourriture. Chez certaines espèces, cette capacité à reconnaître son chemin repose principalement sur la vision de l'insecte. Les chercheurs comprennent relativement bien comment cette mémoire visuelle sert à la fourmi. Ce qui est beaucoup moins connu, c'est le mécanisme d'apprentissage d'un nouveau chemin. Antoine Wystrach, chercheur du CNRS au Centre de recherches sur la cognition animale, à Toulouse, et ses collègues ont étudié le cas de fourmis confrontées à un obstacle (un trou) rajouté sur leur chemin habituel. Au premier passage, les fourmis tombaient dedans, mais au bout de vingt-quatre heures, elles s'arrêtaient à l'approche du piège et scrutaient leur environnement. Elles déviaient alors de leur chemin pour contourner l'obstacle.

Il semble donc que dans les secondes qui précèdent l'arrivée sur l'obstacle, les souvenirs visuels sont associés à l'épisode de la chute. Ces éléments mémorisés agissent comme un stimulus négatif qui incite les fourmis à changer de chemin pour éviter la zone de danger. « L'apprentissage aversif se passe de façon rétrospective, explique Antoine Wystrach. L'expérience négative de tomber dans le piège incite les fourmis à former une aversion vis-à-vis des scènes visuelles perçues quelques secondes avant la chute, c'est-à-dire les scènes visuelles qui prédisent le piège imminent! » Une fois le piège retiré, les fourmis qui contournaient l'obstacle ont continué à suivre ce chemin alors qu'il est plus long. Cette observation montre que ce n'est pas la vision du piège qui incitait les fourmis à le contourner, mais bien les souvenirs visuels de leur nouvelle route. ■

S. B.

A. Wystrach et al., *Current Biology*, vol. 30, pp. 1-7, 2020

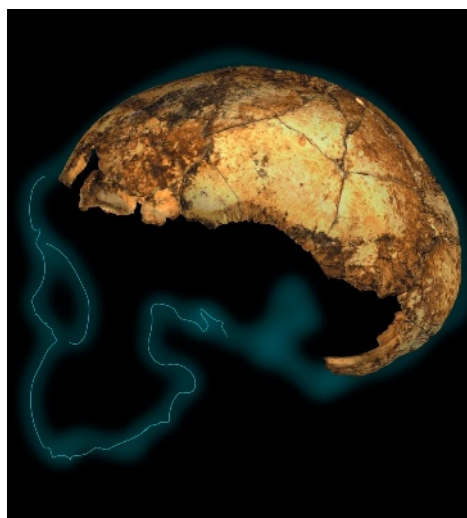
PALÉOANTHROPOLOGIE

QUAND HOMO ERECTUS CÔTOYAIT LES PARANTHROPES

Nous sous-estimons depuis toujours la biodiversité passée des hominides. Avec des collègues, Andy Herries, de l'université La Trobe, en Australie, a obtenu la preuve directe qu'*Homo erectus* était déjà apparu avant la disparition des australopithèques.

Entre 2015 et 2018, les chercheurs ont mis au jour, dans une strate nommée DMQ (*Drimolen main quarry*) de la carrière de Drimolen, en Afrique du Sud, les crânes fossiles d'un jeune *H. erectus* et d'un *Paranthropus robustus*. Les paranthropes – dont le nom signifie « autour de l'humain », et que l'on appelait autrefois « australopithèques robustes » – étaient spécialisés dans les ressources végétales coriaces.

Les chercheurs ont utilisé un mélange de datations radiométriques (uranium/protactinium appliqué à un plancher stalagmitique), par résonance paramagnétique électronique des dents et par le paléomagnétisme pour établir que la strate DMQ s'est constituée très vite entre 2,05 et 1,95 million d'années. Or cette période précède de très peu l'âge du fossile d'*Australopithecus sediba*, que son découvreur, Lee Berger, de l'université du Witwatersrand,



Ce fossile est la calotte crânienne d'un jeune *Homo erectus* de 2 à 3 ans.

présenta en 2010 comme un possible ancêtre d'*Homo*. Conclusion sans appel : *Homo* n'est pas issu d'*A. sediba* et le site de Drimolen tend d'au moins 100 000 ans vers le passé l'existence d'*H. erectus*, une forme humaine très évoluée (capacité crânienne de 900 à 1 200 centimètres cubes), qui foulait déjà l'Afrique avant le déclin des australopithèques et des paranthropes. ■

R.S.

A. Herries et al., *Science*, vol. 368, eaw7202, 2020 ; S. Antón, *ibid.*, pp. 34-35

EN BREF



LA FICELLE DE NÉANDERTAL

L'équipe de Marie-Hélène Moncel, du Muséum de Paris, a mis au jour une curieuse torsade dans l'abri néandertalien du Maras, en Ardèche. L'examen au microscope de ce cordage vieux de plus de 40 000 ans – le plus ancien connu – a révélé que trois faisceaux de fibres ont d'abord été filés selon une torsion horaire, puis torsadés ensemble dans le sens antihoraire. Un tel tissage est encore pratiqué de nos jours, parce qu'il accroît la résistance des cordes.

Scientific Reports, 9 avril 2020



TOMBE ÉTRUSQUE D'EXCEPTION

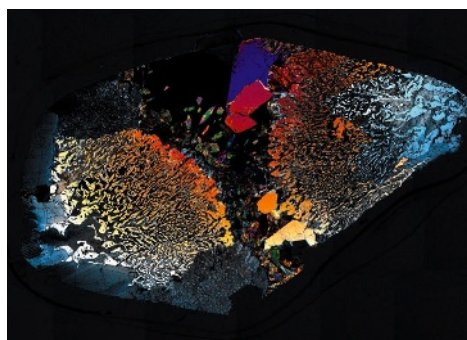
La fouille par l'inrap de la deuxième grande nécropole de la capitale étrusque de la Corse – la nécropole d'Aléria-Lamajone – reste spectaculaire, puisqu'une sépulture féminine vient d'y livrer 200 objets. Outre ses bijoux, la défunte était entourée d'une quarantaine de céramiques (gobelets, cruche, oenochés...) dont certaines peintes en Étrurie au IV^e siècle avant notre ère. Pour éviter des erreurs, les chercheurs ont tomographié le contenu de 22 de ces objets avant de les fouiller.

www.inrap.fr

MICROBIOLOGIE

UNE VIE EXTREME SOUS LE FOND MARIN

En étudiant des roches issues de forages réalisés dans l'océan indien, entre 1 000 et 1 750 mètres sous le plancher océanique, Jiangtao Li, de l'université Tongji, en Chine, et ses collègues ont observé des formes de vie microbienne et étudié leurs stratégies de survie. Leur nombre s'élevait entre 130 et 1 660 organismes par centimètre cube de roche. C'est très peu par rapport aux habitats classiques comme l'eau de mer ou le sol. Mais la présence de ces êtres vivants est remarquable vu les conditions extrêmes qui règnent à cet endroit : la pression subie par les roches s'élève jusqu'à 300 atmosphères environ. Les chercheurs ont montré que ces microorganismes se sont adaptés pour utiliser au maximum le peu de molécules organiques qui leur parviennent. L'apport énergétique est donc très faible, avec comme conséquence un train de vie



C'est dans des veines semblables à celle-ci que les chercheurs ont découvert des microorganismes : bactéries, champignons, archées.

pour le moins frugal et un métabolisme extrêmement lent. De ce fait, la longévité de ces organismes pourrait atteindre des centaines voire des milliers d'années... ■

LUCAS GIERCZAK

J. Li et al., *Nature*, vol. 579, pp. 250-225, 2020

DU SOLAIRE SOUS-MARIN

Pour Jason Röhr et ses collègues, de l'université de New York, certaines cellules photovoltaïques sont aujourd'hui sûres pour servir de principale source d'énergie à des véhicules sous-marins. Pourtant, les conditions sous l'eau se heurtent à un problème majeur : l'eau arrête ou diffuse le rayonnement rouge et infrarouge exploité par les cellules en silicium. D'après les chercheurs, certains composés cristallins du gallium ou des semi-conducteurs organiques de type polymère, constitués essentiellement de carbone, fonctionneraient jusqu'à 50 mètres de profondeur. Ces panneaux solaires sous-marins produiraient environ 5 milliwatts par centimètre carré, assez pour alimenter un véhicule évoluant sous l'eau. ■

MARTIN TIANO

J. R. Röhr et al., *Nature*, vol. 579, pp. 840-845, 2020

LA PLUIE IMPLIQUÉE DANS UNE ÉRUPTION?



Coulée de lave d'une faille active lors de l'éruption de 2018 du volcan Kilauea.

UN VIEIL OISEAU MODERNE

Découvert dans une carrière de calcaire, le fossile d'oiseau moderne surnommé « Wonderchicken », un crâne en presque parfait état de conservation, se démarque par son ancienneté. Il date d'il y a 66,7 millions d'années, soit 1 million d'années avant l'extinction des dinosaures, survenue à la fin du Crétacé. Daniel Field, de l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont analysé la morphologie du crâne. Il réunit des caractéristiques distinctives de plusieurs groupes d'oiseaux modernes ; d'abord des galliformes, comme les poules actuelles, mais aussi des ansériformes, comme les canards actuels avec, entre autres, une projection vers l'avant du relief osseux situé au-dessus des orbites. Ces observations indiquent que l'espèce à laquelle appartient le fossile était très proche, sur le plan évolutif, de l'ancêtre commun de ces oiseaux. ■

W. R. P.

D. J. Field et al., *Nature*, vol. 579, pp. 397-401, 2020

L'un des volcans les plus actifs de la planète, est entré en forte éruption. Jamie Farquharson et Falk Amelung, de l'université de Miami, suggèrent que cet événement a été déclenché par les précipitations exceptionnelles qui ont eu lieu durant les mois précédents. En s'infiltrant à travers le massif de basalte, les pluies auraient augmenté la pression de l'eau dans les pores de la roche et diminué de ce fait certaines contraintes : le magma aurait alors pu s'infiltrer plus facilement dans des fractures pour remonter à la surface. Grâce à des données de pluviométrie enregistrées au sol et depuis l'espace par satellite, Jamie Farquharson et Falk Amelung ont élaboré un modèle qui reproduit la pression de l'eau dans les pores de la roche. Ils ont conclu que cette pression n'avait jamais été aussi élevée depuis quarante-sept ans en raison des fortes précipitations.

Mais les variations de pression en jeu sont extrêmement faibles et il est difficile de vérifier ce mécanisme faute de données sur la pression de l'eau en profondeur. Pour appuyer leur scénario, Jamie Farquharson et Falk Amelung ont étudié l'historique des éruptions du Kilauea depuis 1790, et ont montré que 60 % des éruptions se sont déroulées pendant la saison des pluies.

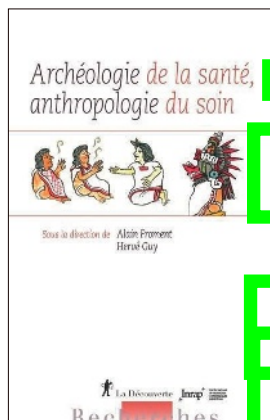
Les précipitations, déjà connues pour être un facteur de déclenchement de séismes, seraient donc peut-être aussi à l'origine d'éruptions volcaniques. Ce résultat plaide pour un meilleur suivi des propriétés hydrogéologiques autour des systèmes volcaniques. D'autant plus qu'avec le réchauffement climatique, certaines régions ayant déjà une activité volcanique importante pourraient aussi subir une hausse de la pluviométrie. ■

S. B.

J. I. Farquharson et F. Amelung, *Nature*, vol. 580, pp. 491-495, 2020

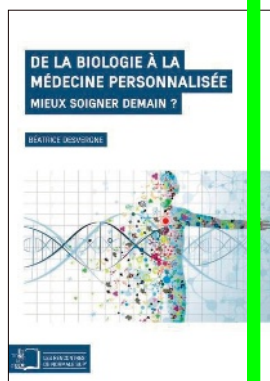
ARCHÉOLOGIE

MÉDECINE-BIOLOGIE



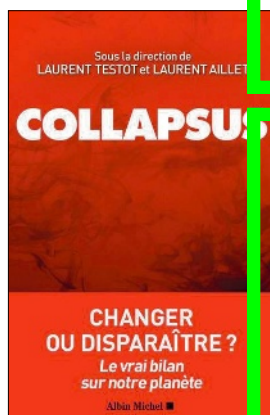
ARCHÉOLOGIE DE LA SANTÉ, ANTHROPOLOGIE DU SOIN

Alain Froment et Hervé Guy
La Découverte, 2019
336 pages, 23 euros



DE LA BIOLOGIE À LA MÉDECINE PERSONNALISÉE

Béatrice Desvergne
Rue D'Ulm, 2019
184 pages, 14 euros



Qu'est-ce que nous des soins du corps dans la préhistoire? En s'appuyant sur l'étude des traces des traumatismes et des malformations sur les ossements, deux anthropologues biologistes – les directeurs de cet ouvrage collectif – partent de l'hypothèse que la survie des invalides s'explique par une protection de l'entourage. Dès lors, la compassion pour ses semblables a dû exister dans le passé. Il devient alors vraisemblable que des individus différents des autres n'aient pas toujours entraîné le rejet. Du reste, la notion de monstre a fluctué au cours des millénaires, longtemps avant que des religieux hésitent à baptiser les bébés nouveau-nés mal formés ou encore les débats de Valladolid (1580) sur la présence d'une âme chez les Indiens.

Les auteurs appréhendent les pathologies propres à chaque stade évolutif d'*Homo sapiens*, qui étaient liées à de nouveaux modes de vie et d'alimentation, et se reflétaient par exemple dans la stature ou la denture (par des caries par exemple). Ils réévaluent l'histoire des grandes épidémies, qui seraient apparues de plus en plus longtemps qu'admis. Un dossier passionnant qui apporte beaucoup grâce aux recherches génétiques sur l'ADN des microbes et des individus, et à l'étude des anticorps et des microbiotes. Il donne la mesure des chantiers de fouilles en cours dans les nécropoles du monde entier, ouvrant une fenêtre sur la façon dont les hommes se sont adaptés de tout temps en essayant d'échapper aux contraintes de la sélection darwinienne.

Point bienvenu, l'ouvrage rappelle l'importance des opérations de sauvetage archéologique lors des travaux sur un site se révélant archéologique. On le ferme avec des doutes lancinants sur l'irréversibilité du progrès moral de l'humanité inauguré dans la préhistoire, sans être nié par tant d'atrocités qui continuent sous nos yeux.

ANNE-MARIE MOULIN
LABORATOIRE SPHÈRE, PARIS

Un constat s'impose: la pure biologie moléculaire, sur laquelle se sont surtout fondés les progrès de la médecine des dernières décennies, atteint des limites. Face à l'extrême complexité des pathologies, une médecine plus efficace, plus préventive et prenant mieux en compte la spécificité de l'individu est souhaitable. L'autrice, médecin et biologiste, spécialiste de génomique, nous propose une analyse pertinente de la transition majeure que traversent actuellement la recherche médicale et ses applications: associés aux données massives et à l'intelligence artificielle, les nouveaux outils puissants d'exploration du génome changent la stratégie thérapeutique. Leurs usages ont fait émerger de nouveaux concepts, permis l'essor de la biologie des systèmes et la modélisation du vivant. Même si elles sont encore balbutiantes, ces techniques ouvrent des perspectives vertigineuses.

Toutefois, entre promesses et leurs espoirs et risques de « Bio Brothers », les problèmes philosophiques et légaux de la médecine personnalisée sont immenses: consentement éclairé et restitution des résultats au patient, partage et confidentialité des données (assurances), intrusion des opérateurs de l'internet dans la santé... Si les avancées sont inéluctables, une réflexion éthique et sociétale doit accompagner ce changement de paradigme. Ce livre nous aide à comprendre ces enjeux, à mesurer les risques et, finalement, à fonder un espoir raisonnable dans ces nouvelles technologies.

BERNARD SCHMITT
CERNH, LORIENT

COLLAPSUS

Laurent Testot et Laurent Aillet (dir.)

Albin Michel, 2020,
352 pages, 19,90 euros

Depuis le début du siècle, les progressistes se moquent des prophètes de malheur qui s'inquiètent de l'avenir des sociétés : ils les confondent avec les imminentistes qui, depuis la nuit des temps, annoncent la fin du monde. Le réchauffement climatique, la chute de la biodiversité, les méga-incendies australiens, la fonte des glaces jusqu'en Antarctique, les inondations et cyclones croissants, les pollutions diverses, maintenant les maladies émergentes (dues à des déplacements d'espèces sauvages avec leurs parasites), font moins sourire. Mieux que les alertes scientifiques, les canicules répétées et extrêmes sont en train de convaincre les climatocceptiques... Le succès international du livre *Effondrement* (NRF, 2006) du biologiste et géographe Jared Diamond puis, chez nous, des « collapsologues » Pablo Servigne et Raphaël Stevens (*Comment tout peut s'effondrer*, Seuil, 2015) montre que la société s'intéresse au sujet et parfois même est saisie d'inquiétude.

Ce gros livre, qui se présente comme la première synthèse sur le danger d'effondrement de notre civilisation, réunit sous la tutelle d'un journaliste connaissant bien le sujet et d'un expert en risques une collection stimulante d'articles et entretiens avec 42 écologistes... mais aucun écologiste, c'est-à-dire de professionnel de l'écologie scientifique ! Ce n'est pas une erreur éditoriale, mais la preuve de la confusion actuelle dans les médias entre les deux écologies. Rappelons que l'écologie scientifique, qui étudie les lois régissant l'ensemble des êtres vivants, a précédé d'un siècle l'écologie politique, qui s'interroge sur notre espèce. Bien qu'anthropocentrée, cette somme impressionnante de témoignages variés n'en reste pas moins utile pour faire le point sur une inquiétude réactualisée.

PIERRE JOUVENIN
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS

LES RÉVOLUTIONS

DE LA BIOLOGIE

ET LA CONDITION HUMAINE

Patrice Debré

Odile Jacob, 2020
304 pages, 22,90 euros

En quelques dizaines d'années, la biologie a effectué des progrès si considérables qu'ils menacent la condition même de l'espèce humaine. Des avancées permanentes et vertigineuses de la génétique laissent envisager des modifications du capital génétique humain, en bien comme en mal. Les chimères humain-animal posent des questions sur les limites mêmes de l'espèce. Et, à titre d'exemples, les greffes d'organes effectuées à partir de donneurs en état de mort cérébrale, ou parfois à partir de patients pauvres qui vendent leurs organes, voire, à leur insu, à partir de condamnés à mort, conduisent à de nombreuses interrogations éthiques.

L'homme peut se transformer directement lui-même. Il peut aussi le faire en bouleversant l'environnement naturel auquel il est profondément lié. Il peut aussi se fourvoyer dans un développement du numérique qui viendrait concurrencer, voire remplacer le vivant : « Par hybridation entre biologie et numérique, les transhumanistes proposent d'augmenter nos capacités conscientes et inconscientes. » L'évolution technologique humaine va « plus vite que l'homme », au risque de provoquer de dangereux dérapages.

Les réponses à tous ces enjeux ne peuvent se trouver, selon l'auteur, que dans la parfaite compréhension, par tous, des processus biologiques impliqués, et c'est justement le but et le grand mérite de ce livre : faire clairement comprendre, au lecteur non averti, ce que permet de nos jours la biologie qui, finalement « requiert le débat public ». Avec rigueur et souci pédagogique, Patrice Debré, immunologiste et membre de l'Académie nationale de médecine, expose le détail des divers travaux scientifiques et les conséquences précises qu'ils pourraient avoir sur l'espèce humaine.

GEORGES CHAPOT THIERY
DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRIT AU CNRS

LA MATHÉMATIQUE,

UNE VOCATION PROBLÉMATIQUE

MICHAEL HARTIS

Cassini, 2020
520 pages, 23 euros

Chaque voile que l'on soulève ne fait jamais qu'en révéler une autre. Ce livre tend vers cette constatation, celle que l'on voit d'après l'autre.

D'un mathématicien. D'un haut niveau de culture mathématique, alternant anecdotes et réflexions personnelles avec des morceaux de vulgarisation mathématique (le titre d'un chapitre est : « Comment expliquer la théorie des nombres dans un dîner en ville »), cet ouvrage d'un très français mathématicien américain sera un régal pour ceux qu'animent les mathématiques... euh, non, pardon, la mathématique !

LE TRÉSOR DES ONDES

GRAVITATIONNELLES

JACQUE ESPAGNOL

CNRS, 2020
216 pages, 25 euros

Avez-vous déjà entendu parler de GW150914 ? La première détection d'une onde gravitationnelle est un événement scientifique considérable,

sur l'Univers. Professeur de physique dans une école d'ingénieurs, l'auteur, qui a déjà une œuvre considérable de vulgarisation, explique ici dans un style clair les mille et une facettes du « trésor » scientifique que représentent ces ondes prédites par Einstein il y a environ un siècle.

LE PARFUM DU ROUGE

ET LA COULEUR DU Z

LAURENT COHEN

Odile Jacob, 2020
240 pages, 20,90 euros

Les histoires vécues, racontées et commentées ici par un neurologue de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, sont spectaculaires, car elles concernent le cerveau. Leur auteur les conte dans un style léger et efficace, ce qui les rend particulièrement faciles à appréhender, et en profite pour nous renseigner sur les « rouages » du cerveau qui sont perturbés. Ainsi ce Monsieur O qu'une rupture d'anévrisme a transformé en voleur compulsif de voitures, ou cette vieille dame qui, à 90 ans, révèle sa synesthésie à ses proches...



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

L'ÉCOLE AUX PRISES AVEC LA FRACTURE NUMÉRIQUE

Durant le confinement, les réseaux de télécommunication ont joué un rôle essentiel. Pourtant, une fraction importante de la population n'y a pas accès. Un volet capital du défi posé à l'école par le numérique.



Grâce aux outils numériques, les enseignants ont pu suivre des cours durant le confinement. Mais tous n'y ont pas accès.

La légende raconte que la période la plus productive d'Isaac Newton fut entre 1655 et 1666, alors qu'il s'était confiné à la campagne pour échapper à une épidémie de peste, qui tua un habitant de Londres sur cinq. L'idée de confinement n'est donc pas nouvelle. En revanche, l'ampleur de celui que nous avons mis en place pour nous protéger du SARS-CoV-2 l'est sans doute, puisque plus de la moitié de la population mondiale s'est confinée tout en maintenant, tant bien que mal, l'activité de l'industrie, des services, de la presse, des écoles, etc.

Que nous nous en réjouissons ou que nous le déplorions, ce confinement inédit a été rendu possible par les réseaux informatiques, qui n'existaient pas à l'époque de Newton et qui nous ont permis de rester en contact les uns avec les autres : en confinement de cette ampleur, sans aucune communication avec l'extérieur sans même la possibilité de savoir si le

confinement est achevé ou non, aurait été très dur sur le plan psychologique et sans doute impossible sur le plan pratique.

De ce fait, ce confinement a été beaucoup plus difficile pour ceux qui sont exclus de ces réseaux, sans pouvoir travailler ou étudier à distance, informés seule-

En France, 12% de la population n'a pas accès à internet depuis son domicile

ment par la radio et la télévision, coupés de leur famille et même sans possibilité d'accéder à des attestations de déplacement dérogatoire ou de les imprimer.

En France, 12% de la population n'a pas accès à internet depuis son domicile et cette crise sanitaire nous montre à

nouveau, l'importance de faire de cet accès au réseau un droit fondamental (voir ma chronique dans *Pour la Science* de novembre 2017). Mais il ne suffit pas d'avoir un accès au réseau, il faut aussi savoir l'utiliser et, selon l'Insee, 43% des personnes de 16 à 74 ans ont une capacité numérique «nulle ou faible», ce qui constitue un défi à relever pour l'école, avant la prochaine épidémie.

Relever ce défi est possible car l'école a été, pendant cette crise, au cœur de ces transformations des moyens de communication. Les enseignants, de la maternelle au doctorat, ont, comme d'autres, fait d'énormes efforts pour continuer au mieux leurs missions : rester en contact avec leurs élèves ou étudiants, faire cours en vidéo ou en visioconférence, donner des devoirs et ramasser les copies par courrier électronique, etc. Ils ont mis en pratique, à grande échelle, des méthodes jusqu'alors expérimentées à une échelle moindre, dans les cours en ligne, tels les MOOCs (voir ma chronique de mai 2014). Il est établi que ces modalités pédagogiques sont moins efficaces que l'enseignement en présentiel, surtout avec les élèves les plus jeunes, dont la motivation fluctue. Mais, en temps de crise, elles permettent une salutaire continuité pédagogique.

Ce confinement a donc transformé, pour un temps au moins, le rapport de l'école aux objets informatiques. Rappelons-nous qu'il y a juste deux ans, le 7 juin 2018, les députés votaient une loi interdisant l'utilisation, par un élève d'un téléphone mobile ou de tout autre équipement terminal de communications électroniques, dans les écoles maternelles, les écoles élémentaires et les collèges. Loi qui avait, à l'époque, trouvé, dans la communauté enseignante, beaucoup d'opposants, mais aussi beaucoup de partisans.

Il est paradoxal que ces équipements, hier encore bannis de l'école, lui soient permis, pendant cette période de confinement, de continuer à exister. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria, enseignant à l'école normale supérieure et pilote d'éthique du numérique.

ALLIANCE URGENCES

UNIS FACE À L'URGENCE



© Toby Madden pour Action contre la Faim

URGENCE CORONAVIRUS

6 ONG 1 CLIC 1 DON

ALLIANCEURGENCES.ORG

Pour venir en aide aux victimes en un seul clic, Alliance Urgences rassemble les forces de 6 ONG.





LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

COVID-19 : CONFUSION ENTRE POLITIQUE ET SCIENCE

Pour bénéficier de la confiance des citoyens, les gouvernants doivent éviter de parler au nom de la science.



La communication autour du Covid-19 affiche un partenariat étroit entre le décideur public et les spécialistes des maladies infectieuses. Cette alliance visible du politique et de l'expert est-elle un gage de confiance pour les Français? Rien n'est moins sûr. Une démarcation nette entre ces deux ordres de rationalités s'avère essentielle pour que les gouvernés consentent au pouvoir des gouvernants.

Les travaux de sciences sociales se sont accumulés pour nous avertir que la décision politique n'est pas de nature scientifique. Ainsi, la connaissance des paramètres de l'épidémie renseigne sur son évolution et les techniques de biologie moléculaire assurent la mise au point de tests sérologiques ou autres. Pour autant, ces outils ne déterminent pas les mesures de confinement et de dépistage: celles-ci reposent sur des arbitrages socioéconomiques. Évidemment, la prise en compte des données de la science est un impératif moral, voire constitutionnel puisqu'elle est garante de l'intérêt général

sanitaire, mais l'élaboration des politiques publiques ne s'y réduit pas.

Le corollaire de cette distinction est double. Si les scientifiques ne peuvent pas décider de la manière de contrôler l'épidémie, la communication gouvernementale ne peut, elle, représenter la science ni parler au nom de celle-ci.

La politique publique ne se réduit pas aux considérations de science

Souvent négligée, cette dernière dimension est pourtant le nerf de la confiance. Le malaise des citoyens s'est accentué lorsque nos gouvernants se sont exprimés scientifiquement sur l'arrivée possible du Covid-19 en France, le port du masque, la contagiosité des enfants ou la fragilité des seniors. Ainsi, l'urgence mondiale de la crise sanitaire

a incité les pouvoirs publics à mobiliser les expertises, parfois jusqu'à confondre les deux registres.

De plus, la survenue de la pandémie pose des querelles interprétatives empreintes de biais cognitifs qui la sortent du registre de la science. Ainsi, un quart des Français considèrent que le virus est apparu en laboratoire, et 17 % de la population plaide pour une fabrication intentionnelle de cet agent (Conspiracy Watch, 28 mars 2020). Intervient ici le biais «d'agentivité» consistant à prêter aux entités collectives, qu'il s'agisse des scientifiques, des pathogènes, de la nature, des étrangers, etc. une faculté d'action volontaire sur le monde, biais cognitif qui alimente maintes théories complotistes.

Par exemple, certaines de ces théories attribuent au virus du Covid-19 une origine humaine, chinoise notamment, tandis qu'on a vu des figures écologistes associer la pandémie à une révolte de la «Nature». Comparable à la punition divine de la Bible, ce langage métaphorique fait de cette dernière une force animée d'une intention.

Dans l'histoire des épidémies, la recherche des causes se joint souvent au dérèglement des mœurs ou du climat. Depuis l'Église amenée à pardonner les péchés des croyants frappés par le coronavirus jusqu'à la personnification d'une nature meurtrière, la saisie du phénomène épidémique comme objet de science est entravée. Elle l'est d'autant plus que la distinction entre la production des données et leur représentation politique tend à s'effacer. Livrées chaque soir, les statistiques de l'infection et de la mortalité sont des indicateurs à la fois épidémiologiques et de l'action gouvernementale. La pandémie en tant qu'objet de science n'est pourtant pas la pandémie saisie comme objet politique qui affecte tous les pans de la société. Aussi, la communication politique des aléas reste une gageure. Difficile alors de ne pas y accoler un bouc émissaire ou un châtement de la Nature... ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET
15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE



ABONNEZ-VOUS AU PODCAST  DE L'ÉMISSION

L'ESSENTIEL

Avec des conditions de température et de pression très différentes de celles régnant sur Terre, il se forme dans l'espace des molécules inconnues des chimistes, ou qui n'ont été synthétisées qu'en laboratoire.

L'étude des débuts de l'Univers suggère aux astronomes que l'ion d'hydrure d'hélium, HeH⁺, a probablement été la première molécule à se former dans le cosmos.

Ce n'est que récemment, grâce à de nombreux progrès dans l'analyse du rayonnement émis par des objets astrophysiques, que les chercheurs ont découvert HeH⁺ dans le milieu interstellaire.

Les scientifiques ont aussi éclairci l'origine des « bandes interstellaires » en mettant en évidence d'autres molécules présentes dans ce milieu.

L'AUTEUR



RYAN C. FORTENBERRY
maître de conférences de chimie physique à l'université du Mississippi, aux États-Unis

La première molécule de l'Univers

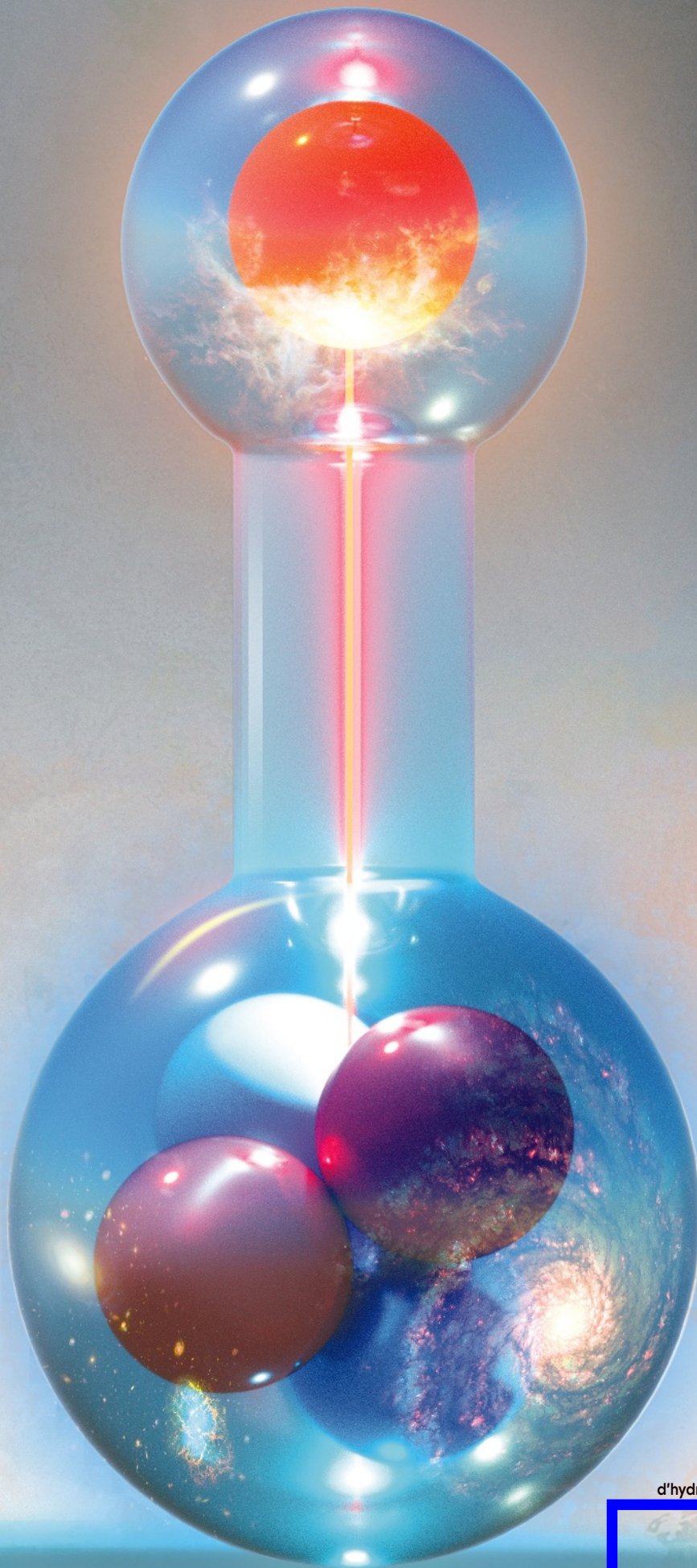
Depuis longtemps, les chercheurs pensaient que l'ion d'hydrure d'hélium HeH⁺, avait été la première molécule à se former dans le cosmos. Mais cette ion-molécule était impossible à détecter dans l'espace. Jusqu'à tout récemment...

Lors de la naissance de l'Univers, le Big Bang a libéré une quantité considérable d'énergie qui s'est transformée en une soupe extrêmement chaude de particules fondamentales, notamment les électrons, les photons et les constituants élémentaires des noyaux atomiques, les quarks. Ce milieu a évolué rapidement, mais l'apparition des atomes et des molécules a été plus tardive. Si l'histoire de la formation des atomes est bien comprise et confirmée aujourd'hui par diverses observations, celle des premières molécules est plus incertaine. Quelle molécule s'est formée en premier? Pour les astrochimistes, il est très probable que ce fût l'hydrure d'hélium, composé d'un atome d'hydrogène et d'un autre d'hélium. Mais pour confirmer cette hypothèse, il était nécessaire de retrouver cette molécule dans le milieu interstellaire. Cette quête n'a abouti que très récemment.

Pour comprendre pourquoi l'hydrure d'hélium s'est formé en premier, il faut se replonger dans la soupe primordiale de l'Univers. Dès sa naissance, le cosmos était animé d'une dynamique d'expansion spatiale entraînant une

baisse rapide de sa température. Ce refroidissement a permis la formation de nouveaux édifices. En moins d'une microseconde après le Big Bang, les quarks se sont associés grâce à l'interaction forte pour donner naissance aux protons et aux neutrons. Et dans les minutes qui ont suivi, ces protons et neutrons ont commencé à se combiner et former les noyaux atomiques les plus simples: ceux d'hydrogène (un simple proton), de deutérium (un proton et un neutron), d'hélium (deux protons et deux neutrons) et plus rarement de lithium (trois protons et trois ou quatre neutrons).

En s'appariant avec autant d'électrons qu'ils ne contiennent de protons, les noyaux forment des atomes, électriquement neutres. Mais parce que la température de la soupe était encore trop élevée, les photons très énergétiques arrachaient instantanément les électrons de ces associations. La soupe est restée un plasma de constituants électriquement chargés: des noyaux et des électrons, pendant des centaines de milliers d'années. Les photons, en interaction permanente avec ces particules chargées, ne pouvaient pas se propager librement sur de longues distances. Conséquence: l'Univers est resté opaque pendant près de 380 000 ans. Puis, >



Vue d'artiste de la molécule
d'hydruure d'hélium avec son atome
d'hydrogène en bas et celui
d'hélium en haut.

> à cette époque, la température a assez baissé pour que les premiers atomes neutres se forment durablement, ce qui a permis aux photons de se propager et de s'échapper, constituant un rayonnement dont on observe encore aujourd'hui le vestige, le « fond diffus cosmologique ».

Parmi tous les noyaux atomiques en compétition pour capter des électrons, l'hélium a été le premier à former des atomes neutres. Pourquoi l'hélium et pas l'hydrogène ou le lithium? L'hélium, premier élément inerte, ou « gaz noble » (ou « gaz rare »), du tableau périodique des éléments, est particulièrement stable lorsqu'il comporte deux électrons. Autrement dit, il faut fournir beaucoup plus d'énergie pour lui arracher un électron qu'il n'en faut, par exemple, pour l'hydrogène. Cette stabilité s'explique par la structure en couches des électrons dans les atomes. Quand une couche est remplie, l'assemblage est plus stable; or la première couche électronique contient deux places. Dans l'atome d'hydrogène, qui n'a qu'un seul électron, cette première couche n'est pas remplie, contrairement à l'hélium.

UNE CHASSE AUX ÉLECTRONS

Dans la première seconde de l'Univers, quand les noyaux d'hélium ont commencé à rencontrer des électrons, ils ont donc rempli la première couche de leur nuage électronique sans que les noyaux d'hydrogène puissent rattraper leur retard dans ce processus de capture d'électrons, et bien avant que les noyaux de lithium soient même présents pour récolter, chacun, les trois électrons nécessaires pour devenir des atomes neutres.

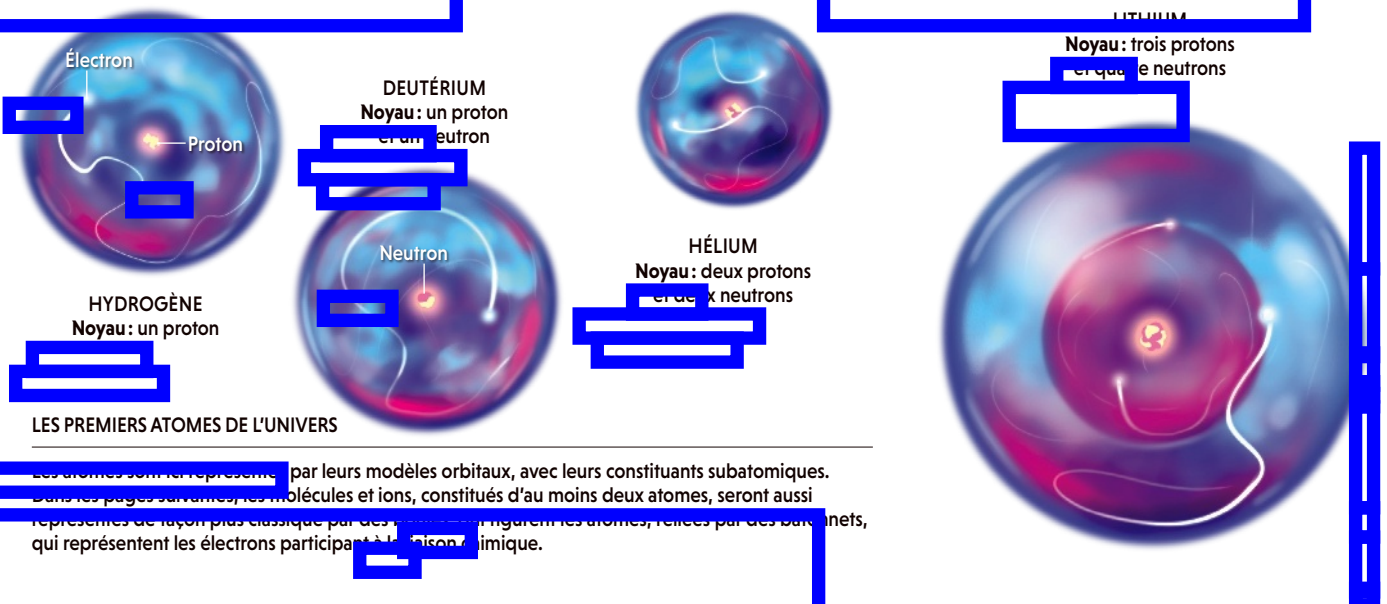
Pendant une brève période, l'Univers a contenu des atomes d'hélium neutres et une grande majorité de noyaux d'hydrogène (des protons seuls), dont la charge électrique a commencé à jouer un rôle important dans

l'évolution cosmique. Avec le refroidissement du milieu, les protons ont ainsi peu à peu ralenti et ont été d'autant plus attirés par des entités chargées négativement. Mais comme l'hélium avait déjà capté une bonne partie des électrons, les électrons libres étaient plus rares et les rapprochements directs entre un proton et un électron étaient d'autant plus exceptionnels.

En revanche, les protons étaient attirés par les électrons présents dans les atomes d'hélium nouvellement formés. Bien que l'hélium perde difficilement ses électrons, certains atomes d'hélium ont fini, à force de collisions fréquentes, par mutualiser leurs deux électrons avec des noyaux d'hydrogène. C'est ainsi que se sont formées les premières liaisons chimiques, donnant naissance à une espèce chimique constituée d'hélium et d'hydrogène, nommée « hydrure d'hélium » ou encore « hélonium ». De formule chimique HeH^+ , cet ion moléculaire – on s'autorise dans la suite le terme « molécule » qui, en toute rigueur, désigne une structure électriquement neutre – aurait donc été le premier composé complexe présent en quantité significative dans l'Univers.

Le fait que l'hélium ait été le premier élément à former des liaisons chimiques nous paraît surprenant, car nous considérons d'ordinaire l'hélium comme l'élément le moins susceptible de se lier à d'autres, les atomes de ce gaz noble ayant un nombre d'électrons qui garantit une très grande stabilité. Mais dans l'Univers primitif, la situation était en fait très particulière: l'hélium était l'unique « banque à électrons » disposée à en « prêter » aux charges positives, les protons.

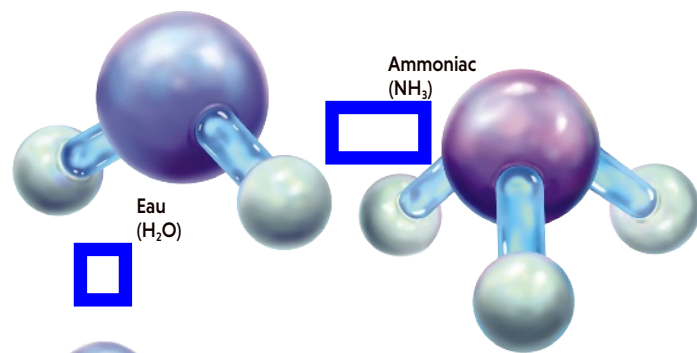
Ce scénario est solidement étayé par des arguments théoriques depuis plusieurs décennies, mais il manquait encore des observations concrètes pour le corroborer. La molécule



HeH⁺ est particulièrement évasive. Elle ne peut pas se former sur Terre, hormis dans des conditions spéciales en laboratoire. Elle est aussi passée inaperçue dans l'espace pendant très longtemps; mais en 2019, Rolf Güsten, de l'Institut Max-Planck de radioastronomie, à Bonn,

QUELQUES EXEMPLES DE MOLÉCULES DÉTECTÉES

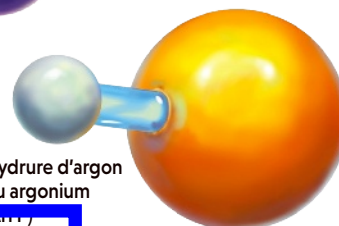
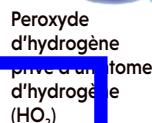
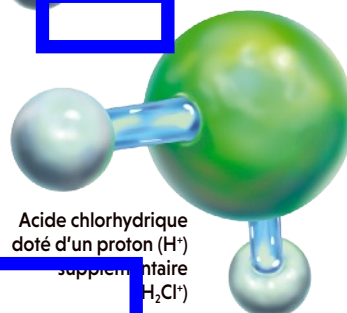
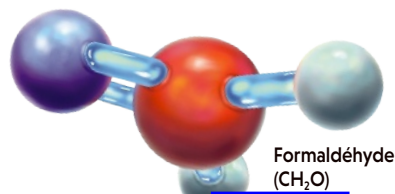
DANS L'ESPACE



HYDRURE D'HÉLIUM OU HÉLONIUM HeH⁺

Représentation par un modèle boules et bâtonnets

Représentation inspirée des orbitales moléculaires et de la densité de probabilité de présence des électrons



en Allemagne, et son équipe ont annoncé l'avoir observée pour la première fois, tant dans la nébuleuse planétaire engendrée par la mort d'une étoile. Des recherches entamées quarante ans auparavant avaient enfin porté leurs fruits et comblé un vide dans notre connaissance des premiers instants de l'Univers.

PLUS DE 200 «ASTROMOLÉCULES»

La molécule HeH⁺ est donc ajoutée à la liste des molécules extraterrestres connues; à ce jour, les scientifiques ont détecté plus de 200 espèces chimiques dans l'espace. L'astrochimie, le domaine d'études qui s'intéresse aux structures et phénomènes chimiques en dehors de la Terre, vise à déterminer quelles molécules et ions moléculaires sont présents dans l'espace, comment ces composés se forment, et ce que leur évolution apporte à l'astrophysique, d'un point de vue tant théorique qu'observationnel. Parmi les «astromolécules» connues, nombreuses sont celles qui, comme l'eau (H₂O), l'ammoniac (NH₃) ou le formaldéhyde (CH₂O), sont répandues sur Terre. D'autres sont très inhabituelles, tels H₂Cl⁺, obtenu en ajoutant un proton à l'acide chlorhydrique (HCl), et HO₂, assimilable au peroxyde d'hydrogène ou «eau oxygénée» (H₂O₂) privé d'un atome d'hydrogène.

Parmi les bizarreries observées figurent des molécules chargées, assemblages comportant des électrons non appariés, et des configurations étranges de molécules plus communes. Les scientifiques ont même repéré des molécules formées avec des éléments inconnus, comme ArH⁺, qui contient de l'argon, ainsi que HeH⁺, la nouvelle venue.

La plupart des domaines de la chimie voient des applications destinées à nous rendre le

monde plus efficace, plus agréable ou plus sûr. L'astrochimie, elle, s'intéresse aux propriétés les plus fondamentales des molécules: comprendre les liaisons chimiques ou la stabilité des molécules et déterminer pourquoi certaines espèces chimiques sont plus répandues que d'autres.

En étudiant la chimie à l'œuvre dans des environnements si différents de la Terre – mettant en jeu des températures, des pressions et des ingrédients disponibles inhabituels –, les scientifiques découvrent des molécules qui bouleversent leurs représentations familières des interactions atomiques et approfondissent ainsi leur compréhension de la chimie. En définitive, les astrochimistes espèrent comprendre comment les phénomènes chimiques dans l'espace ont conduit aux ingrédients qui se sont retrouvés sur les planètes du Système solaire et qui ont finalement permis l'apparition de la vie sur Terre.

En 1925, dans son laboratoire de l'université de Californie à Berkeley, aux États-Unis, le

ENQUÊTE SPECTRALE DANS UNE NÉBULEUSE

Les astronomes utilisent principalement la lumière et, plus généralement, le rayonnement électromagnétique, pour étudier les objets célestes. Par exemple, en analysant le spectre en fréquence (ou en longueur d'onde) de ce rayonnement, ils sont en mesure d'identifier les molécules présentes dans l'espace.

Quand une molécule a un moment dipolaire non nul, c'est-à-dire une répartition non égale des charges positives et négatives –, elle présente plusieurs états d'excitation dite « rotationnelle », « vibrationnelle » ou « électronique », qui dépendent des conditions énergétiques comme la température ou la densité de la phase gazeuse.

La transition entre deux états est possible grâce à un apport d'énergie, l'absorption d'un photon par exemple. Typiquement, les transitions rotationnelles impliquent des photons dans les domaines des longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques ; les transitions vibrationnelles dans le domaine infrarouge ; les transitions électroniques, enfin, dans les domaines visible, ultraviolet et X. Lorsque les chercheurs analysent le rayonnement, ces phénomènes de transition se traduisent par des raies spectrales qui peuvent être observées en absorption ou en émission, ou avoir des structures très complexes avec des parties en absorption et d'autres en émission.

Pour observer des raies d'émission, il faut que les conditions nécessaires (de densité de gaz et de température) soient réunies : dans certains cas, les transitions rotationnelles sont présentes à des dizaines de fréquences différentes. Pour des raies d'absorption – comme dans le cas de

bandes interstellaires diffuses –, il faut une source émettant un rayonnement puissant, comme une étoile, et l'objet étudié est généralement un nuage interstellaire qui absorbe alors la lumière de l'étoile aux fréquences de transition des molécules étudiées. Enfin, dans certains cas, le spectre est composé de raies d'émission venant de l'étoile (ou de son environnement immédiat), et de raies d'absorption dues aux nuages moléculaires présents dans le champ de vue.

Dans le cas de l'hydrogène d'hélium HeH^+ , qui a un fort moment dipolaire, la transition rotationnelle fondamentale (de l'état de rotation noté $J=0$ à l'état $J=1$) se produit à 2 010 gigahertz. Depuis que les scientifiques ont synthétisé en laboratoire cet ion moléculaire, on connaissait en outre un nombre de ses transitions vibrationnelles dans l'infrarouge et l'on avait prédit qu'il s'était formé dans l'Univers primitif. Une longue recherche de HeH^+ dans l'espace a finalement porté ses fruits en 2016, lorsque l'équipe

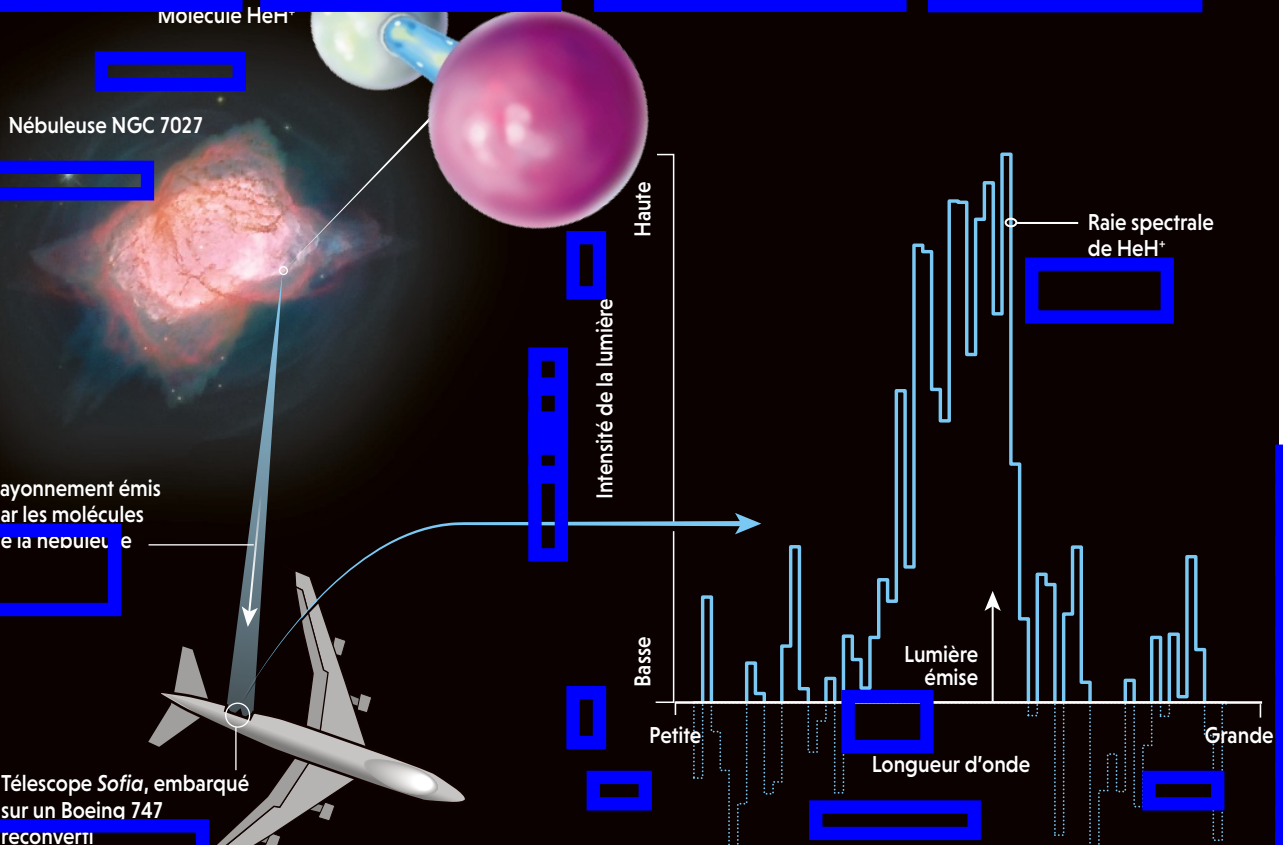
dirigée par Rolf Güsten, dont je faisais partie, a repéré

la transition rotationnelle fondamentale pour la première fois, à l'aide de l'observatoire *Sofia*, un télescope infrarouge monté sur un avion de ligne réaménagé. Dans la nébuleuse planétaire NGC 7027, le gaz a une température et une densité suffisantes pour exciter la molécule et conduire à des transitions assez fréquentes des niveaux d'énergie $J=1$ vers $J=0$, ce qui permet alors de détecter la raie en émission.

Cette tâche avait été rendue très difficile jusque-là, voire impossible, par la présence

d'un doublet de raies spectrales du radical méthylidyne CH , doublet écarté de seulement quelques centaines de mégahertz de la raie de HeH^+ . Les précédentes observations avec des spectroscopes spatiaux n'avaient pas la résolution spectrale nécessaire pour distinguer les raies les unes des autres. Contrairement au cas de *Sofia*.

CHRISTOPHE RISACHER
Institut de radioastronomie
millimétrique (IRAM), Grenoble



> chimiste Thorfin Hogness et son assistant Edward Lunn ont découvert qu'un mélange gazeux d'hélium et d'hydrogène enfermé dans une chambre à vide en présence d'un arc électrique engendrait des ions divers, de masses différentes. Afin de les identifier, ils ont utilisé la spectroscopie de masse qui mesure le rapport masse/charge des ions produits; la mise en œuvre de cette technique, alors nouvelle et aujourd'hui très courante, a montré que ce rapport valait 5 pour certains ions.

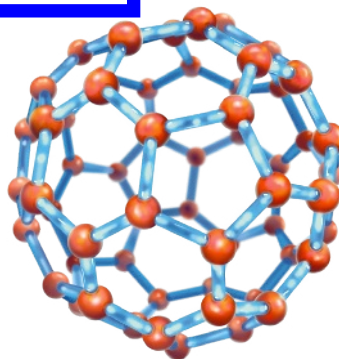
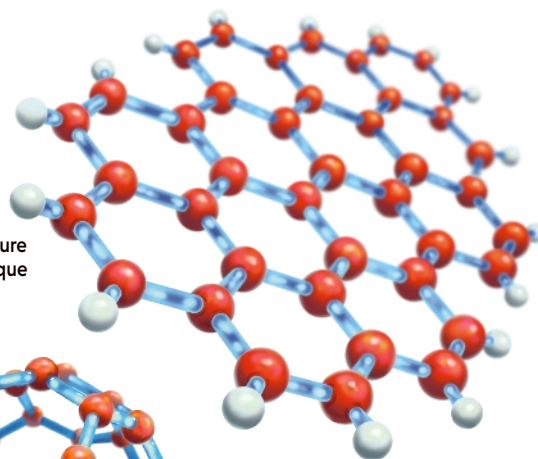
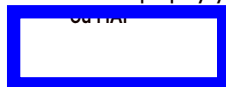
Hogness et Lunn, grâce aux données dont ils disposaient, en ont conclu de manière certaine qu'ils avaient synthétisé l'ion moléculaire HeH^+ . De fait, celui-ci compte cinq protons ou neutrons, et sa masse vaut donc cinq fois la masse élémentaire d'un proton (les masses du proton et du neutron sont très proches, tandis que la masse des électrons est négligeable en comparaison). Sa charge, quant à elle, vaut une fois la charge élémentaire du proton. Ainsi, le rapport masse/charge est bien 5 dans ces unités.

Cependant, HeH^+ , «molécule» très instable et incluant un élément inerte, s'est révélé extrêmement difficile à étudier, même dans des conditions de laboratoire finement contrôlées. Dans l'Univers jeune, HeH^+ était probablement encore plus instable, car cet ion moléculaire avait tendance à perdre son proton H^+ au moindre choc avec un autre atome. Dans cet assemblage, l'hélium met en commun ses deux électrons, alors que l'hydrogène n'en apporte aucun. Ce type de liaison chimique inhabituelle, nommé «liaison covalente de coordination», est plus faible et donc plus fragile qu'une liaison covalente classique, dans laquelle les deux atomes contribuent à la mise en commun d'électrons de façon plus symétrique.

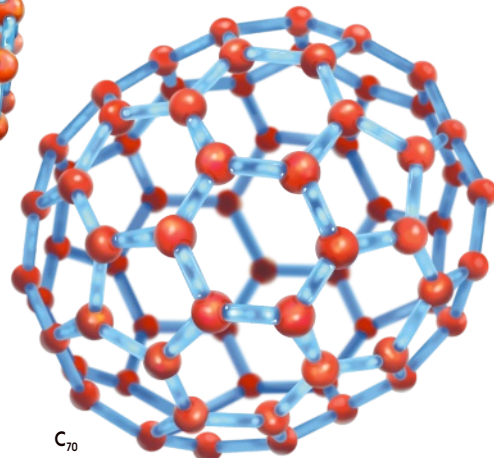
En 1978, John Black, alors à l'université du Minnesota, a été le premier à défendre l'idée que HeH^+ puisse être encore présent dans l'espace malgré sa grande instabilité. Il a de plus suggéré que les nébuleuses planétaires, ces nuages de gaz et de poussière très chauds expulsés par des étoiles massives en fin de vie, étaient de bons endroits où chercher la molécule. Dans ces nuages de forme sphérique dont le centre est occupé par leur étoile, on trouve en effet généralement une mince couche d'hélium ionisé (et donc chargé), en présence d'atomes d'hydrogène neutres; la forte attraction exercée par l'hélium ionisé sur des électrons rendrait l'ion susceptible d'«emprunter» un électron à l'hydrogène (la situation quasi inverse de celle de l'Univers primordial). Cet électron partagé créerait ainsi une liaison.

C'est pourquoi, depuis la fin des années 1970, des astronomes, en collaboration avec des chimistes, ont recherché l'ion moléculaire HeH^+ dans de nombreux endroits des

Exemple d'hydrocarbure aromatique polycyclique



C_{60}
(footballène)



C_{70}

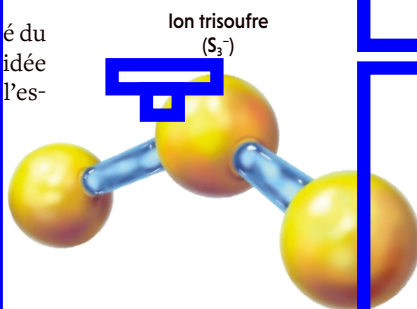
confins de l'Univers jusqu'au voisinage d'étoiles supermassives. Mais pendant plusieurs décennies ces recherches n'ont rien donné, ce qui a poussé certains à douter du rôle réel joué par HeH^+ dans la chimie primordiale du cosmos. L'hélium a-t-il vraiment formé des liaisons avec H^+ ? Il semblait que cela devait être le cas, puisqu'il n'y avait rien d'autre avec quoi former des liaisons chimiques en ces temps reculés. Mais si HeH^+ s'est bien formé, où est-il?

DES SIGNATURES MOLÉCULAIRES

Pendant que certains astrochimistes cherchaient HeH^+ sans succès, les astrochimistes ont découvert dans l'espace de nombreuses autres molécules auxquelles ils ne s'attendaient pas.

Pour certaines, ils n'arrivaient même pas à les identifier. Cette histoire-ci a commencé en 1919, lorsque Mary Lea Heger, à l'observatoire Lick de l'université de Californie, scrutait le comportement d'un système binaire d'étoiles (semblables aux soleils de Tatooine dans la saga *Star Wars*). Ses observations ont donné des résultats surprenants.

Comme une molécule d'une espèce chimique donnée présente un arrangement d'atomes et d'électrons bien spécifique, elle absorbe la lumière d'une façon qui lui est propre. Cela lui confère une signature unique. Grâce à la spectroscopie, technique consistant à décomposer la lumière en ses différentes composantes différant par leurs longueurs d'onde, les astronomes font apparaître des raies, ou des bandes, plus sombres. Ces >



> «bandes d'absorption» correspondent aux longueurs d'onde absorbées par les molécules constituant le milieu traversé par la lumière analysée. Ainsi, l'analyse du spectre permet d'identifier les molécules.

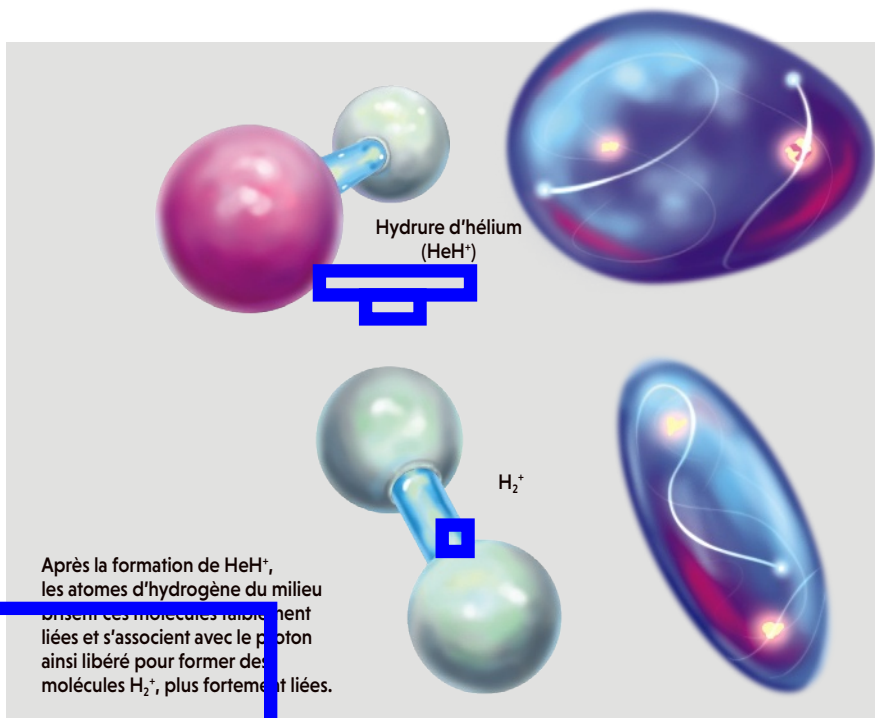
Dans le cas des étoiles étudiées par Mary Lea Heger, comme les deux astres tournaient autour de leur centre de gravité commun, les caractéristiques spectrales de la lumière provenant de l'atmosphère de chacune des étoiles subissaient des variations dans leurs longueurs d'onde par l'effet Doppler: pour chaque étoile, les raies spectrales se décalaient vers le bleu quand l'étoile se rapprochait de nous et vers le rouge quand elle s'éloignait.

Mais l'astronome américaine a aussi remarqué des signatures moléculaires étranges: des bandes qui restaient fixes malgré le mouvement des étoiles. En observant un autre système binaire, le même schéma s'est reproduit. D'autres astronomes ont ensuite montré que ces bandes immobiles étaient aussi présentes lorsqu'ils pointaient leurs télescopes vers des étoiles simples. Ils en ont déduit que ces marqueurs devaient être ceux de molécules situées non pas dans l'atmosphère des étoiles elles-mêmes, mais dans les vastes régions froides qui les séparent. Le fait le plus étonnant était que ces signatures étaient pratiquement identiques pour toutes les étoiles observées, et même pour des observations extragalactiques.

Ces marqueurs, nommés «bandes interstellaires diffuses» (BID), étaient omniprésents. Les scientifiques ont alors passé au crible les signatures des molécules connues des chimistes, qu'elles soient présentes à l'état naturel sur Terre, synthétisées en laboratoire ou observées dans l'espace grâce à des radiotélescopes. Aucune ne correspondait aux BID: ces dernières provenaient donc de molécules inconnues.

William Klemperer, de l'université Harvard et l'un des pionniers de l'astrochimie, a suggéré que les BID étaient la marque de l'ion S_3^- , formé à partir de la molécule de trisoufre S_3 . Lorsque les chercheurs ont écarté cette piste, William Klemperer était tellement accablé qu'il a écrit: «Il n'y a pas de meilleur moyen de perdre sa réputation scientifique que de spéculer sur l'origine des bandes [interstellaires] diffuses.» Plusieurs hypothèses quant à l'origine des BID ont circulé pendant des décennies, mais aucune n'a tenu: on a considéré cela comme l'énigme la plus impénétrable de la spectroscopie.

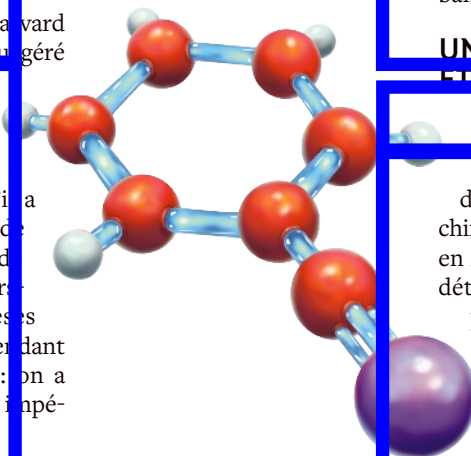
L'une des hypothèses les plus intrigantes avançait que les bandes interstellaires diffuses proviennent d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, ou HAP. Ces molécules, constituées de feuillets d'atomes de carbone formant des hexagones, sont les principaux composants



de la suie, de l'asphalte et du graphite. Elles sont peu susceptibles de réagir avec d'autres molécules, mais ont tendance à se coller à elles. Pour les astrochimistes, le problème des HAP est qu'ils présentent de très nombreuses variétés assez semblables dont les marqueurs spectroscopiques sont quasiment impossibles à distinguer les uns des autres. Il est donc difficile d'extraire le détail des signatures des HAP à partir d'une mesure d'ensemble. Or il semblait en être de même pour les BID: il était difficile d'extraire des raies d'absorption précises à partir de ces bandes diffuses et complexes. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques expliqueraient-ils donc les bandes interstellaires diffuses?

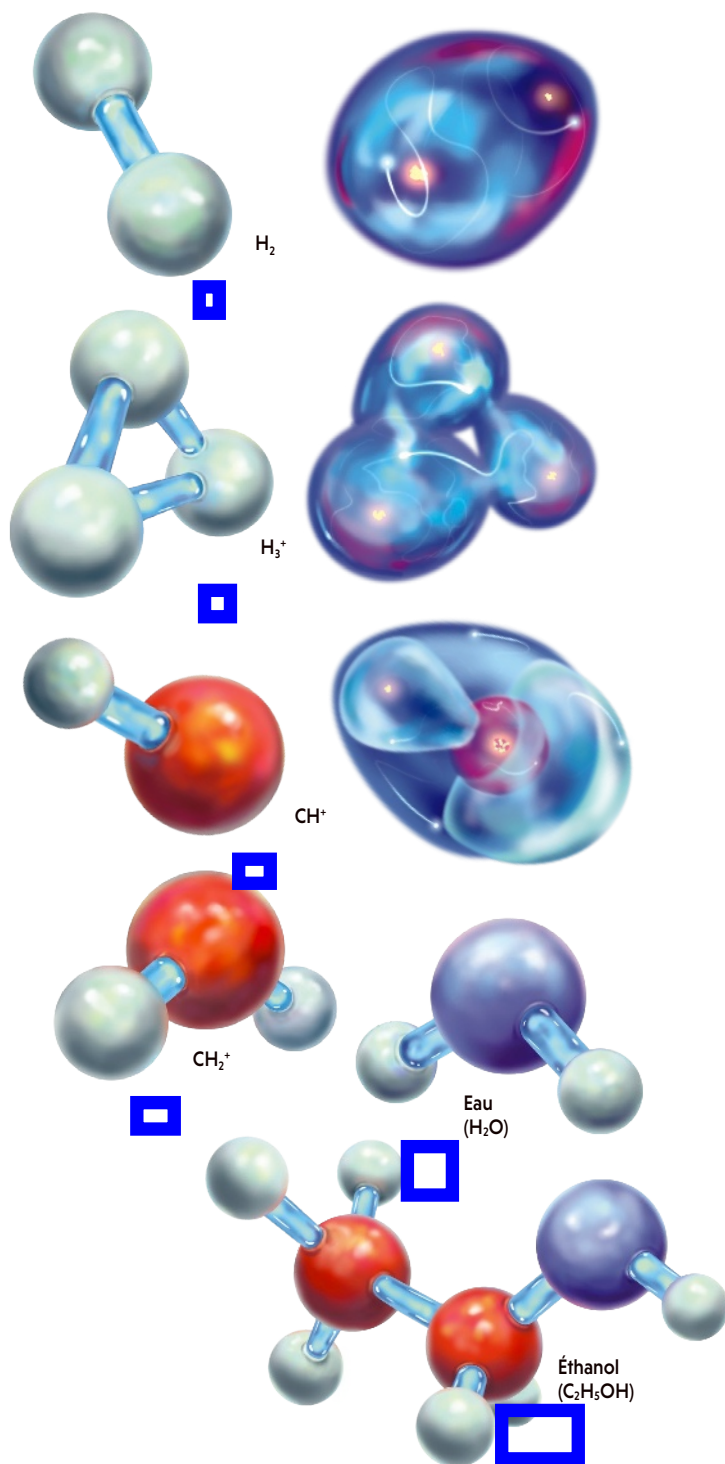
UNE MOLÉCULE ÉTONNANTE ET INATTENDUE

Ce genre d'idées a fait son chemin parmi les astrochimistes à partir des années 1970, mais une expérience en particulier s'est avérée déterminante. Dans les années 1980, le chimiste Harold Kroto, à l'université du Sussex, en Angleterre, travaillait avec son équipe à la détection de nouvelles molécules dans l'espace. Il avait entendu parler d'une expérience réalisée par les chimistes Robert Curl et Richard Smalley, à l'université Rice, aux États-Unis, dans laquelle ils avaient pointé un faisceau laser très puissant sur une surface d'aluminium pour faire s'évaporer une partie du métal. En se solidifiant à nouveau, cette matière avait donné naissance à de nouvelles molécules d'aluminium de grande taille. Harold Kroto proposa aux Américains de remplacer



BENZONITRILE (C_6H_5-CN)

Cette molécule a été découverte en 2003. Elle est constituée d'un anneau cyclique d'atomes de carbone, ce qui la rend plus facile à détecter que les hydrocarbures aromatiques polycycliques.



l'aluminium par du carbone pour voir s'il était possible de former des molécules carbonées observées dans les étoiles géantes rouges.

Une molécule des plus insolites est l'ion C_{60}^{+} formée de soixante atomes de carbone agencés comme un ballon de football. En 1996, Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley ont reçu le prix Nobel de chimie pour avoir découvert la famille des fullerènes contenant, entre autres, cette molécule nommée «footballène» ou «buckminsterfullerène» (en l'honneur de l'architecte américain Buckminster Fuller, connu pour ses dômes géodésiques).

Harold Kroto était convaincu que les fullerènes étaient présents dans l'espace et étaient la source de certaines bandes interstellaires

LA MOLÉCULE HeH^{+} OUVRE LA VOIE

La formation de l'hydrogène HeH^{+} a permis la formation de nombreuses molécules. Sans HeH^{+} , la synthèse de certaines dernières dans l'Univers aurait été plus lente.

diffuses. Peu de scientifiques l'ont suivi, cependant, et il n'a pas persisté dans cette direction.

Mais en 2010, près de vingt-cinq ans après leur découverte en laboratoire, le C_{60} et son cousin le C_{70} ont été observés, dans le domaine infrarouge, dans la nébuleuse planétaire Tc1 de la constellation du Cygne. On ne savait toujours pas si ces molécules étaient liées ou non aux BID en lumière visible. Des travaux théoriques le suggéraient, mais les scientifiques ne disposaient d'aucune confirmation expérimentale.

L'ÉNIGME DES BID S'ÉCLAIRCIT

En 2015, un cation (ion chargé positivement) de fullerène C_{60}^{+} a été synthétisé en laboratoire et sa signature spectrale enregistrée dans le proche infrarouge. Une, puis deux des bandes d'absorption de cet ion ont alors été associées aux longueurs d'onde de bandes interstellaires diffuses connues. Par la suite, les chercheurs ont montré que ces signatures correspondaient à quatre ou cinq BID. Puis, en 2019, grâce au télescope spatial *Hubble*, Martin Cordiner, du Centre Goddard de la Nasa pour le vol spatial, aux États-Unis, et son équipe ont mesuré avec précision les longueurs d'onde de BID visibles dans la direction de onze étoiles, principalement de vieilles géantes rouges. Ils en ont conclu que ces BID correspondaient bel et bien aux données expérimentales concernant C_{60}^{+} , confirmant la contribution de cet ion à certaines BID.

Cette découverte révèle plus globalement qu'au moins un type de molécules laisse, de façon certaine, son empreinte dans l'espace interstellaire. On pense que les fullerènes s'y forment à partir d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, qui devraient être aussi présents dans l'espace. Les premiers indices ont commencé à s'accumuler à partir de 2018, quand des chercheurs ont observé pour la première fois la signature spectroscopique de molécules proches de la famille des HAP. La molécule qu'ils ont détectée, le benzonitrile (C_6H_5-CN), est un hydrocarbure aromatique rare avec un seul cycle d'atomes de carbone, ce qui le rend plus facile à détecter que les HAP. Encore plus récemment, les scientifiques ont détecté des cyanonaphtalènes à deux cycles, ce qui montre que des HAP de plus grande taille sont aussi présents dans l'espace interstellaire.

Malgré toutes ces avancées dans le domaine de l'astrochimie, HeH^{+} est resté invisible dans l'Univers. On pense que les premières molécules ont disparu assez rapidement dans la jeunesse de l'Univers. Alors que celui-ci se dilatait et se refroidissait, les noyaux d'hydrogène résiduels, restés isolés, ont commencé à capturer eux-mêmes des électrons. Ces atomes entraient parfois en collision avec des ions HeH^{+} . Quand cela se produisait, la liaison $He-H$ dans l'ion, relativement faible, se rompait et une liaison beaucoup plus forte

> s'établissait entre les deux atomes d'hydrogène pour former l'ion H_2^+ . L'atome d'hélium, pour sa part, se retrouvait isolé.

Si l'on se conforme à ce scénario, la première existence de HeH^+ aurait peu d'importance dans le cours de l'histoire de l'Univers. Mais c'est loin d'être le cas. D'après les modèles portant sur les réactions chimiques possibles à cette époque, les astrochimistes pensent que, sans la présence de HeH^+ , l'ion H_2^+ , ainsi que la molécule de dihydrogène, H_2 , se seraient formés beaucoup plus lentement : les autres chemins menant à ces composés requièrent plus d'énergie. Puis la formation de H_2 a donné naissance à de nombreuses autres espèces chimiques : l'ion H_3^+ , qui a engendré CH^+ , qui a lui-même produit CH_2^+ et une succession d'autres molécules. Finalement, cette cascade a donné naissance à l'eau (H_2O), à l'éthanol (C_2H_5OH) et à des molécules plus grosses. Toutes ces transformations ont pour origine première la liaison faible et asymétrique dans HeH^+ ; sans cet ion, l'Univers serait bien différent de celui que nous connaissons.

En 2013, les astrochimistes étaient frustrés de n'être toujours pas parvenus à détecter l'ion. Mais cette année-là, une lueur d'espoir est apparue lorsque des chercheurs ont découvert l'ion ArH^+ , contenant de l'argon – un élément inerte comme l'hélium –, dans la nébuleuse du Crabe, un reste de supernova. Les scientifiques ont alors axé leurs recherches de HeH^+ dans ces environnements similaires, très chauds. Un problème majeur s'est toutefois posé. Les traces spectrales permettant d'identifier l'état fondamental de HeH^+ sont très proches de celles de deux transitions, d'un état interne à un autre, de la molécule CH (la toute première molécule jamais observée dans l'espace). Aucun télescope alors en service n'était capable de distinguer leurs signatures spectrales.

UN TÉLESCOPE SUR UN AVION

C'est alors que fut mise à contribution l'Observatoire stratosphérique pour l'astronomie infrarouge (*Sofia*, pour *Stratospheric observatory for infrared astronomy*), le résultat d'une collaboration entre la Nasa et le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR) – l'agence spatiale allemande. Il s'agit d'un télescope infrarouge aéroporté : dans le flanc d'un avion, un Boeing 747 reconverti, une ouverture a été pratiquée pour permettre au télescope de réaliser des observations à haute altitude.

En mai 2016, une équipe internationale a utilisé *Sofia* pendant trois nuits pour sonder l'espace. Le télescope de *Sofia* a une résolution spectrale suffisante pour discerner le marqueur spectroscopique unique de HeH^+ , à une fréquence de 2010,184 gigahertz (dans l'infrarouge lointain). Après une analyse méticuleuse des données récoltées, le résultat a été publié

en 2019 : c'est dans les restes d'une étoile en fin de vie dans la nébuleuse planétaire NGC 7027, dans la constellation du Cygne, que l'équipe de Rolf Güsten a déniché la signature chimique recherchée depuis si longtemps.

Certes, les ions HeH^+ détectés ne sont pas ceux de l'Univers primordial : les composés que Rolf Güsten et ses collègues ont mis en évidence ont sans doute été produits beaucoup plus récemment. Mais cette percée contribue à affiner notre connaissance de cette espèce chimique. Elle fournit des indices sur les conditions qui régnaient dans l'Univers primordial quand HeH^+ était le seul composé présent dans l'espace. Cette découverte est également susceptible de fournir des informations sur les endroits où trouver HeH^+ dans l'espace aujourd'hui : les scientifiques chercheront dans d'autres nébuleuses planétaires, ou dans des régions de l'Univers visible si lointaines que leur observation constituerait un immense bond dans le passé.

DES QUESTIONS TOUJOURS PLUS DIFFICILES

Nous vivons une ère passionnante pour l'astrochimie. Trois questions majeures viennent de trouver une réponse concluante en peu de temps. Les scientifiques ont observé la première molécule qui s'est formée dans l'Univers, ont identifié pour la première fois certaines signatures chimiques des mystérieuses bandes interstellaires diffuses et, enfin, ils détectent des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'espace.

En outre, de nouvelles reconstitutions en laboratoire des conditions physiques interstellaires montrent comment les bases azotées et les acides aminés, les briques de base respectivement de l'ADN – ou ARN – et des protéines, ont pu se former. Des télescopes aéroportés comme *Sofia* ou spatiaux tels *Hubble* ou encore le futur *James-Webb*, en s'affranchissant des pertes liées à l'atmosphère terrestre, offrent des perspectives prometteuses dans l'étude spectrale d'objets stellaires susceptibles de présenter de nouvelles signatures chimiques.

Maintenant que de nouvelles découvertes ont fourni une réponse à un certain nombre de questions, d'autres interrogations surgissent. Les astrochimistes espèrent en effet répondre à des questions plus difficiles, comme : « À quels composés correspondent les autres BD ? » « Quelles sont les origines moléculaires de la vie ? », ou encore « Quelles sont les conditions chimiques nécessaires à la formation de planètes telluriques plutôt que de géantes gazeuses ». Le partage d'électrons entre l'hydrogène et l'hélium a engendré la matière telle que nous la connaissons. Lorsque nous comprendrons mieux ces processus chimiques, nous aurons une conception plus fine de l'astrophysique et de l'histoire globale de l'Univers. ■

BIBLIOGRAPHIE

- R. Güsten et al., *First physical detection of the helium hydride ion HeH^+* , *Nature*, vol. 568, pp. 357-359, 2019.
- A. Loiseau, *Les fullerènes, nouvelle forme du carbone*, *Pour la Science*, n° 481, novembre 2017.
- D. A. Williams et J. W. Manthey, *The Cosmic Chemical Bond : Chemistry from the Big Bang to Planet Formation*, Royal Society of Chemistry, 2013.
- L. d'Hendecourt et F. Oudon, *Entre les étoiles et la vie : des origines ?*, *Dossier Pour la Science*, n° 60, juillet-août 2018.

1 AN

POUR LA

SCIENCE

FORMULE PAPIER

**FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE**

FORMULE INTÉGRALE

actus, dossiers, archives depuis 1990

59 €

Au lieu de ~~82,80 €~~

79 €

Au lieu de ~~114,40 €~~

99 €

Au lieu de ~~174,40 €~~

29 %

de éduca- tion

31 %

de l'édu-tion

43 %

de Sdu tion *

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

PAG20STD

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

☐ / l'indique mes coordonnées

☐ M ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Co e postar vine

[illegible]

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

~~Le Par cheque a l'ordre de Pour la Science~~

☐ Carte bancaire

Nº

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

Signature obligatoire:

L'achat de vos photos est soumis à la vente en ligne des photos aux archives nationales.

Le règlement doit être versé dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021

France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données personnelles 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 <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.

U N



N E M E U R T

J A M A I S .

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

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits



Fukushima

Que devient le césium radioactif dans les forêts ?

CONTEXTE :

> Les accidents nucléaires graves de Tchernobyl et Fukushima ont dispersé des éléments radioactifs sur de vastes territoires. Passé la phase d'urgence de gestion de crise et de protection des populations vivant la problématique de la contamination de l'environnement et de ses effets à plus long terme sur l'homme et les écosystèmes. Si la gestion des surfaces agricoles et

urbanisées est maintenant assez bien connue, celle des forêts, plus complexe, nécessite une connaissance fine des mécanismes de contamination et de recyclage de la radioactivité. A ce titre, les forêts japonaises particulièrement impactées par l'accident de la centrale de Fukushima en 2011 font l'objet d'un programme de recherche.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsn.fr

Neuf ans après l'accident nucléaire de Fukushima, que sait-on du niveau de radioactivité dans les forêts environnantes ? Les nombreuses études de terrain ouvrent la voie à une modélisation fiable des mécanismes de recyclage du césium-137 au sein de l'écosystème forestier, qui permet d'expliquer et de prédire l'évolution de la contamination.

Le 11 mars 2011, un mégaséisme localisé à 80 kilomètres à l'est de Niihau, au Japon, et le tsunami qu'il déclenche endommagent la centrale nucléaire de Fukushima. Trois jours plus tard, la catastrophe a dispersé une énorme quantité d'éléments radioactifs dans l'atmosphère, environ 7 milliards de milliards de becquerels [1]. La plus grande partie est retombée dans l'océan, mais 20 % de ces éléments environ se sont déposés sur le sol japonais. Et 75 % des zones terrestres les plus contaminées sont des forêts, qui, contrairement aux zones urbaines et agricoles, ne seront pas décontaminées. Aujourd'hui que sait-on du niveau de radioactivité de ces territoires forestiers ?

La réponse à cette question passe d'abord par une connaissance précise de l'évolution et du devenir du césium radioactif dans cet environnement. En effet, parmi les

radionucléides relâchés lors de l'accident, la plupart se sont déjà désintégrés du fait de leur courte période radioactive. Seul est persévérant le cas du césium-137, qui à ce jour persiste en raison de sa demi-vie de l'ordre de trente ans. Mais, depuis l'accident, comment a-t-il été recyclé par la forêt ? Où se trouve-t-il exactement et en quelles concentrations ?

Dans le cadre du projet AMORAD*, programme lancé en 2013, les chercheurs de l'IRSN se sont fixé un objectif : développer un outil de simulation des transferts du césium-137 au sein de tous les compartiments de l'écosystème forestier le plus précis possible pour mieux comprendre l'évolution de la contamination. Et ce en le confrontant à des mesures *in situ*, suivies dans le temps. Ainsi entre 2013 et 2018, Frédéric Coppin, géochimiste et Pierre Hurtevent, agronome, spécialistes de l'écosystème forestier à l'IRSN, ont mené cinq campagnes de mesures avec leurs partenaires japonais d'AMORAD sur trois sites emblématiques des forêts de >

► Fukushima situés à Kawamata. « Grâce à la collaboration avec nos collègues Yuichi Onda et Hiroaki Kato, de l'université de Teikyo, nous avons pu évaluer les retombées de césium-137 en juillet 2011. Deux parcelles de forêts de conifères : des cryptomères japonais (*Cryptomeria japonica*). Et une forêt de chênes (*Quercus serrata*) qui jouxte l'école élémentaire du village Yamakiya », précise Pierre Hurtevent. Sur ces parcelles, on évalue les retombées à partir des mesures aéroportées de 2011 entre 420 et 450 kBq/m².

ÉCHANTILLONNAGE DE TOUS LES COMPARTIMENTS

Les chercheurs de l'IRSN complètent alors l'échantillonnage des composantes clés de la forêt pour être en mesure de décrire très finement tout le cycle biogéochimique du césium. Aux mesures permettant de caractériser les transferts du césium-137 de l'arbre vers le sol, en raison du lessivage des feuilles et des troncs par les pluies et de la chute de feuilles et de branches, déjà réalisées par leurs collègues japonais entre 2011 et 2013, ils ajoutent un examen minutieux de chaque compartiment.

Dans les arbres, ils mesurent la contamination de l'écorce,

des branches, de l'écorce, du bois et des racines. Dans le sol, ils prélèvent systématiquement deux couches dans la partie dite « organique » : la litière — c'est-à-dire la couche superficielle de feuilles et de branches tombées dans l'année — et l'humus — la couche sous-jacente plus dégradée. Et en dessous, dans la partie dite « minérale » du sol, ils analysent trois autres niveaux, jusqu'à 20 centimètres de profondeur.

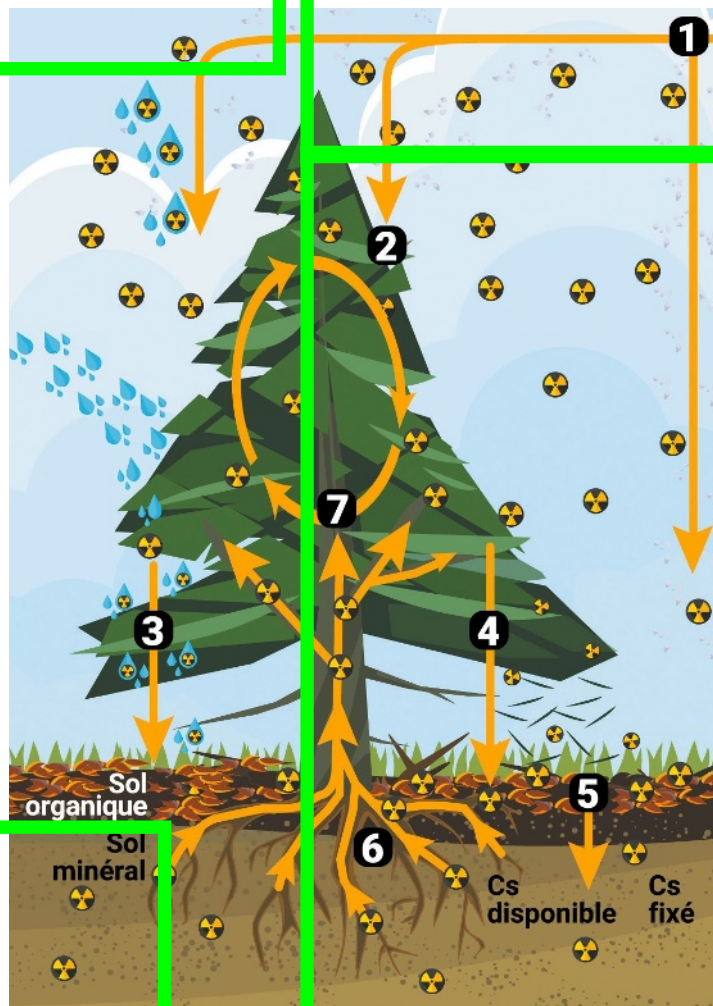
La précision de l'échantillonnage est déterminante. Les cryptomères japonais renouvellent en moyenne leur feuillage tous les quatre à cinq ans. « Tout dépend du climat », précise Pierre Hurtevent.

une aiguille de trois ans en novembre 2013 a reçu directement le dépôt radioactif alors que ce n'est pas le cas de celle de deux ans ou de celle de l'année. Si ces dernières contiennent du césium-137, c'est qu'il vient de l'intérieur de l'arbre ou du lessivage des aiguilles plus anciennes. Quand vous faites une

mesure globale des aiguilles vous perdez toutes ces informations», explique Frédéric Coppin. Cet inventaire précis a permis de mieux comprendre les processus de recyclage du césium-137 entre l'arbre et le sol mais aussi au sein même de chacun de ses compartiments. Il a permis en particulier de quantifier certains phénomènes de translocation, c'est-à-dire de transfert via les flux de sève, entre les aiguilles et les différents organes de l'arbre. Tout comme ont été évaluées la fraction de césium-137 retournée au sol par les chutes d'aiguilles et de branches et son temps de résidence dans les sols organiques.

Autant de données qui n'existent pas pour les forêts contaminées par l'accident de Tchernobyl puisque les premières mesures n'y ont été réalisées qu'à partir de 1992, soit six ans après la contamination. Les premiers modèles élaborés suite à cet accident ont souffert de ce manque d'informations et sont restés longtemps rudimentaires. Aujourd'hui, grâce à toutes les données acquises dans les forêts de Fukushima entre 2011 et 2017, les modélisateurs ont affiné leur outil. En confrontant résultats des simulations et observations, Marc-André Gonze, spécialiste de modélisation et Philippe Calmon, radio-écologiste, en charge du développement de l'outil, ont amélioré le modèle de l'IRSN : le modèle TREE4 (Transfer of Radio-nuclides and External Exposure in FOREst systems) « C'est le seul modèle qui intègre les transferts physiques, chimiques et biologiques au sein de tous les compartiments, en tenant compte à ce niveau de détail des caractéristiques physiologiques de l'arbre », précise Marc-André Gonze.

TREE4 tient compte en effet de l'ensemble des transferts de césium à différentes échelles : il calcule l'interception du césium-137 atmosphérique par la canopée, le transfert vers le sol via le lessivage et la chute de litière, l'écoulement sur les tiges et l'écorce. À l'intérieur de l'arbre, il modélise l'incorporation du césium-137 par les processus physiologiques des parties externes vers les parties internes (du feuillage vers le tronc) et, inversement, il quantifie aussi



LE RECYCLAGE DU CÉSIMUM RADIOACTIF

Les retombées de césium-137 **1** sont interceptées en majeure partie par le feuillage **2**. Ce dépôt atteint ensuite le sol, soit lessivé par les pluies **3** soit via la chute d'aiguilles ou de branches **4**. Puis, il migre dans le sol **5**. De là, une partie du césium-137 disponible remonte dans l'arbre par les racines **6** et se répartit dans le tronc, les branches et les feuilles par transfert interne **7**.

la rediffusion, due au recyclage du césium-137 disponible dans le sol, lors de la croissance de l'arbre. Pour cela, il faut quantifier les transferts et la mobilité du césium dans les couches organiques et minérales du sol.

Pour tester leurs simulations sur un jeu plus large de données, les chercheurs viennent de compiler l'ensemble des données disponibles (1993-2013) sur les arbres contaminés par le césium-137. Ils ont ainsi réuni plus d'une soixantaine d'articles. Forts de leur nouveau modèle et de cette méta-analyse, ils sont aujourd'hui à même de décrire ce qu'il est advenu du césium-137 depuis l'accident, dans une forêt typique de cèdres ou de cyprès.

UN SCÉNARIO EN TROIS PHASES

Le modèle TREE4 confirme un scénario en trois phases : à la fin mars 2011, le césium-137 rejeté dans l'atmosphère est déposé sur la forêt. La contamination captée dans le bois représente 80 % de ce dépôt initial, principalement par les branches et les aiguilles, le sol en ayant reçu directement 20 %. Au cours des six premiers mois, les pluies qui lessivent la canopée et la chute des aiguilles et des branches font diminuer rapidement cette contamination dans les arbres et l'augmentent dans le sol. Ainsi au bout d'un an, en mars 2012, la répartition de l'inventaire s'est inversée puisque 80 % de la contamination se retrouve dans le sol. Elle a culminé au début de l'automne 2011 dans la couche organique pour migrer ensuite dans les premiers centimètres de la couche minérale, où le césium-137 s'est fixé, préférentiellement sur les argiles.

On entre ensuite dans une deuxième phase plus lente – qui peut durer une quinzaine d'années après l'accident. La décontamination de la canopée se poursuit peu à peu. En 2018, il ne reste que 5 % du dépôt initial dans les arbres, contre 80 % dans le sol, le reste ayant disparu par désintégration radioactive. Pendant toute cette période, le bois du tronc protégé par l'écorce se contamine progressivement par deux voies. Les flux de sève descendants transportent une part de césium de la canopée et des feuilles vers le bois puis les racines. Et au premier temps, par les flux ascendants, ce sont les racines qui remobilisent des nutriments pour la croissance du bois, des branches et des nouvelles feuilles, captant le césium-137 du sol. En 2018, la concentration dans le bois reste néanmoins dix fois inférieure à celle du feuillage. Mais en raison de leur biomasse relative, l'inventaire en césium-137 de ces deux compartiments est presque équivalent. Côté sol, les concentrations sont un peu près identiques dans la couche organique et le premier horizon minéral et environ dix fois moindres dans les couches plus profondes. L'ensemble n'évolue plus beaucoup depuis 2013, une part du césium étant fixée.

Lors de la troisième phase décrite par TREE4, on atteint un certain régime d'équilibre. Le transfert racinaire devient la principale voie de contamination pour le bois de l'arbre. C'est vers cet état que tendent actuellement les forêts de Fukushima.

*AMORAD – Amélioration des MOdèles de prévision de la dispersion et d'écotoxicité des radionucléides – a été financé par le Programme Investissements d'Avenir, piloté par l'IRSN en partenariat avec le CNRS, l'INRAE, l'ONF et l'ANR. Les travaux de cet article.

NOTES

[1] Le biovolume (Bv) est l'unité de mesure de l'activité d'un organisme. Elle correspond au nombre de désintégrations par seconde.

QUID DES FORÊTS FRANÇAISES?

En France, comment anticiper l'impact de retombées radioactives sur nos forêts?

Transposer le modèle TREE4, calibré pour les forêts japonaises, à l'environnement français exige de collecter trois différents types de données spécifiques : les paramètres écophysologiques qui ont trait à la forêt et aux essences qui la composent (croissance, biomasse, surface foliaire, etc.), les paramètres liés au site (nature du sol, climat, cycle de l'eau, etc.) et enfin les paramètres de transfert, propres au césium-137 dans ce contexte forestier. Pour constituer cette base de données, l'IRSN a lancé un travail de thèse qui s'appuiera à la fois sur les observations du réseau RENECOFOR – une centaine de sites forestiers permanents –, géré par l'ONF, et sur l'échantillonnage de sites sélectionnés pour l'évaluation des paramètres de transfert du césium-137 entre les compartiments du système sol-arbre.

À partir du modèle TREE4, qu'indiquent les simulations à plus long terme ? Selon les calculs, après quinze à vingt ans, la contamination du sol va continuer à diminuer par décroissance radioactive, mais continue de diminuer par décroissance radioactive. « Au bout de trente ans, la part du dépôt radioactif initial qui persisterait serait de l'ordre de 2 % dans les arbres et de 48 % dans le sol », explique Marc-André Gonze. Le reste ayant définitivement disparu par désintégration radioactive. Mais sur les prédictions au-delà de quinze ans, il reste prudent car des incertitudes subsistent notamment sur la localisation précise des racines et sur la part de césium-137 mobilisable qui influeraient sur le transfert racinaire.

Outre cet aspect prédictif, le modèle permet aussi de tester en amont des stratégies de gestion des zones contaminées. Une hypothèse de décontamination par décapage, par exemple, enlever la quasi-totalité de la couche organique contaminée, une hypothèse un temps avancée, aurait-il été pertinent ? Les simulations montrent aujourd'hui qu'en enlevant cette couche après l'automne 2011 on aurait au mieux divisé le niveau de contamination par un facteur deux, tout en créant une masse considérable de déchets. Les avantages que pourraient procurer une telle solution apparaissent donc modestes en comparaison des conséquences écologiques auxquelles elle conduirait. ■

RÉFÉRENCES

> Site AMORAD : www.irsn.fr/amorad

> J. J. Oppin et al., Radiocaesium partitioning in Japanese cedar forests following the "early" phase of Fukushima fallout redistribution, *Sci. Rep.* 6, 37618, 2016.

> M.-A. Gonze et al., Meta-analysis of radiocaesium contamination data in Japanese forest trees over the period 2011–2013, *Science of the Total Environment*, 601, 301-316, 2017.

L'ESSENTIEL

Contrairement aux autres animaux vertébrés et à nos ancêtres, nous souffrons souvent de maux de dents.

> Un appareil de mastication unique et précis est le résultat de centaines de millions d'années d'évolution.

> Les dents humaines ont évolué dans des environnements très différents de celui que produit l'alimentation moderne. C'est là l'origine de la plupart de nos problèmes dentaires.

L'AUTEUR



PETER UNGAR
paléontologue et anthropologue dentaire
à l'université de Virganie, aux États-Unis

Aux racines de nos problèmes dentaires

Dans les populations humaines d'aujourd'hui, les dents sont souvent cariées, mal alignées et à l'étroit dans les mâchoires. Principal suspect : l'alimentation moderne.

Assis dans la salle d'attente d'un chirurgien-dentiste, j'attends ma fille. Autour de moi, des patients qui semblent tous être vêtus, résignés, pour se faire enlever leurs dents de sagesse à la chaîne, comme dans une usine. Je les vois un à un repartir la tête entourée d'un pansement spécialement conçu pour intégrer des poches de glace, et bardés d'un T-shirt ouvert, d'un imprimé décrivant les soins nécessaires à domicile et, naturellement, de généreuses prescriptions de médicaments, d'antibiotiques et d'analgésiques.

Aux États-Unis aujourd'hui, l'extraction des troisièmes molaires ou dents de sagesse chez les jeunes adultes ressemble à un rite de passage. De mon point de vue, c'est là une mauvaise tradition. Anthropologue dentaire et biologiste évolutionniste, j'ai passé les trois dernières années à étudier les dents humaines actuelles et fossiles et celles de nombreuses autres espèces, et j'en ai conclu une chose : nos problèmes dentaires n'ont rien de normal !

La plupart des autres vertébrés n'ont pas les mêmes problèmes dentaires. Ils ont rarement des dents de travers ou des caries. Quant à nos ancêtres fossiles, ils n'avaient pas de

dents de sagesse abîmées, et il semble que leurs gencives étaient la plupart du temps saines.

La dentition des humains modernes est une profonde contradiction en soi. Parties les plus dures de notre corps, les dents sont cependant très fragiles. Alors que celles des fossiles restent préservées pendant des millions d'années, les nôtres semblent ne pas pouvoir tenir à l'intérieur de la bouche plus de quelques dizaines d'années ! Les dents ont permis à nos ancêtres mammifères de dominer la nature, mais pour garder les nôtres, il nous faut les entretenir quotidiennement.

L'ORIGINE ANCIENNE DES DENTS

Cette contradiction est nouvelle. Elle concerne avant tout les populations de l'ère industrielle. Elle s'explique par la différence entre les régimes alimentaires actuels et ceux en fonction desquels nos dents ont évolué. Les paléontologues ont depuis longtemps compris que nos dents sont profondément enracinées dans notre histoire évolutive. Les cliniciens et les dentistes commencent à s'en rendre compte aussi...

Les biologistes de l'évolution soulignent souvent la merveille que constituent les dents, mais, pour moi, ces organes ne le cèdent



> rien aux dents. Au cours d'une vie, celles-ci broient en effet des aliments des millions de fois sans se briser, alors qu'elles sont fabriquées à partir des mêmes matériaux que ce qu'elles écrasent. Les ingénieurs ont sans doute beaucoup à en apprendre...

Leur remarquable solidité est le résultat de leur structure, qui leur confère à la fois la dureté et la résistance nécessaires pour empêcher que des fissures ne se forment et se propagent. Ces propriétés découlent d'une combinaison de deux éléments: une couche externe d'émail très dure, presque entièrement composée de phosphate de calcium, et une couche interne de dentine contenant des fibres organiques qui lui confèrent de la souplesse.

UNE MICROSTRUCTURE REMARQUABLE

C'est la microstructure de l'émail qui explique les extraordinaires performances des dents. L'émail des dents est en effet constitué de minuscules «prismes», des bâtonnets regroupant des milliers de cristallites, parfois monocristallins dont chacun est 1000 fois plus fin qu'un cheveu humain (lequel fait 0,1 millimètre). Individuellement, les cristallites sont aussi cassantes qu'un spaghetti sec, mais regroupées en faisceaux, elles forment des prismes nettement plus résistants. Regroupés à leur tour par dizaines de milliers par millimètre carré, souvent entrecroisés, les prismes constituent le substrat de la couche d'émail. Disposés parallèlement, ils vont de la surface de la dent à la dentine sous-jacente, formant un entrelacs au sein duquel ils se tordent et se retordent d'une façon qui confère à l'émail son impressionnante résistance.

Cette structure n'est pas apparue du jour au lendemain: l'ingénieur nature y a travaillé pendant des centaines de millions d'années. Grâce aux avancées récentes de la paléontologie, de la génétique et de la biologie du développement, les chercheurs ont reconstitué l'évolution de la structure des dents depuis l'apparition des vertébrés.

Les premiers vertébrés étaient des «poissons» sans mâchoires apparus il y a plus d'un demi-milliard d'années, au Cambrien. Ces animaux – des vertébrés nageurs aquatiques ancêtres des poissons à écailles actuels – n'avaient pas de dents, mais beaucoup de leurs descendants ont acquis une queue écailleuse et une tête blindée par des plaques de phosphate de calcium ressemblant à des dents. Chaque plaque comportait une surface extérieure de dentine, parfois durcie sur le dessus par une couche minéralisée, et une cavité intérieure – la chambre pulpaire – abritant des vaisseaux sanguins et des nerfs.

La bouche de certains de ces animaux était bordée de plaques comportant de petits crocs

ou des pointes aidant à s'alimenter. D'après la plupart des paléontologues, c'est la sélection de ce genre d'écailles au cours de l'évolution qui est à l'origine des dents. De fait, les écailles des requins actuels ressemblent tellement à des dents que nous plaçons ces structures dans la catégorie des odontodes, c'est-à-dire des «objets en forme de dents»; et de nombreux poissons ont le corps tapissé d'odontodes. Par ailleurs, les biologistes du développement ont montré que les écailles et les dents des requins se développent à partir de tissu embryonnaire en suivant le même programme, et des analyses moléculaires ont confirmé que les mêmes groupes de gènes président à leur développement.

Les premières dents définitives sont apparues bien plus tard avec les poissons à mâchoires. Il s'agissait pour la plupart de simples structures pointues servant à capturer et à immobiliser des proies ou encore à gratter, à fouiller, à saisir et à mordre tous types d'organismes. Par exemple, certains acanthodiens, des poissons à épines fossiles apparentés aux requins ancestraux, avaient déjà des dents il y a 430 millions d'années, au Silurien. Mais aucune couronne hyperminéralisée ne recou-

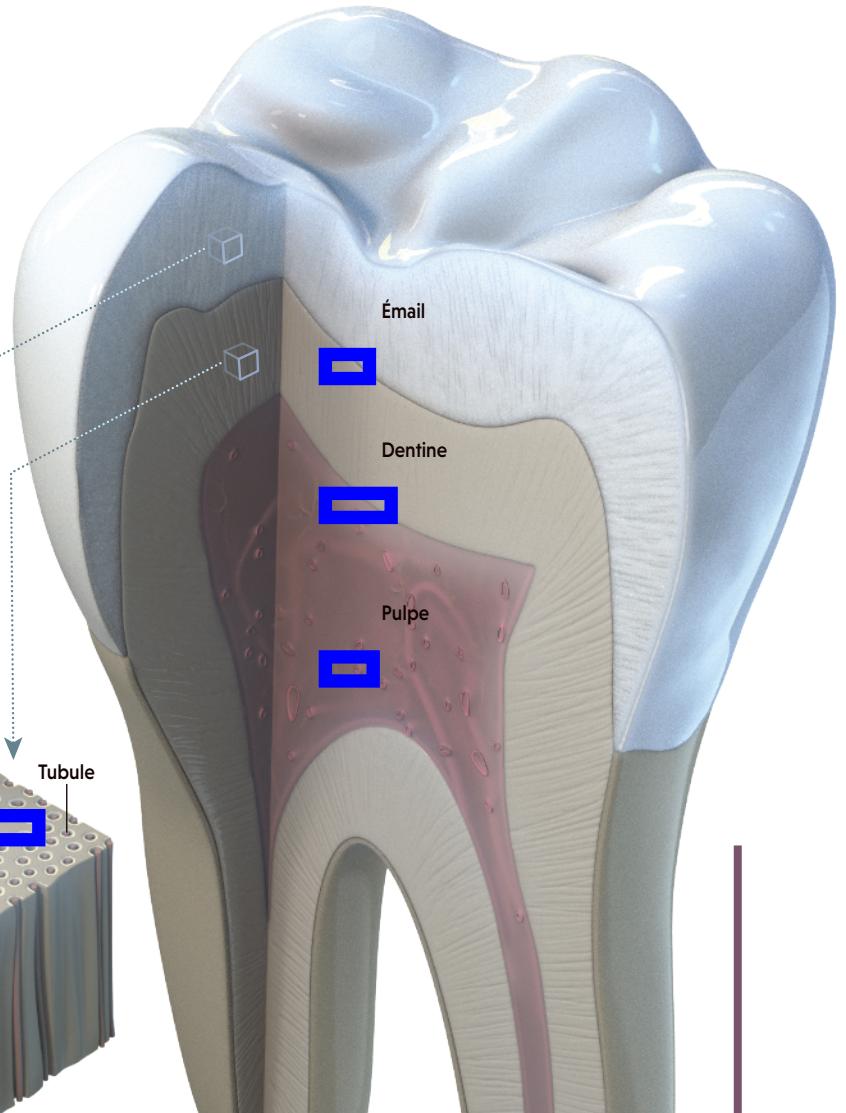
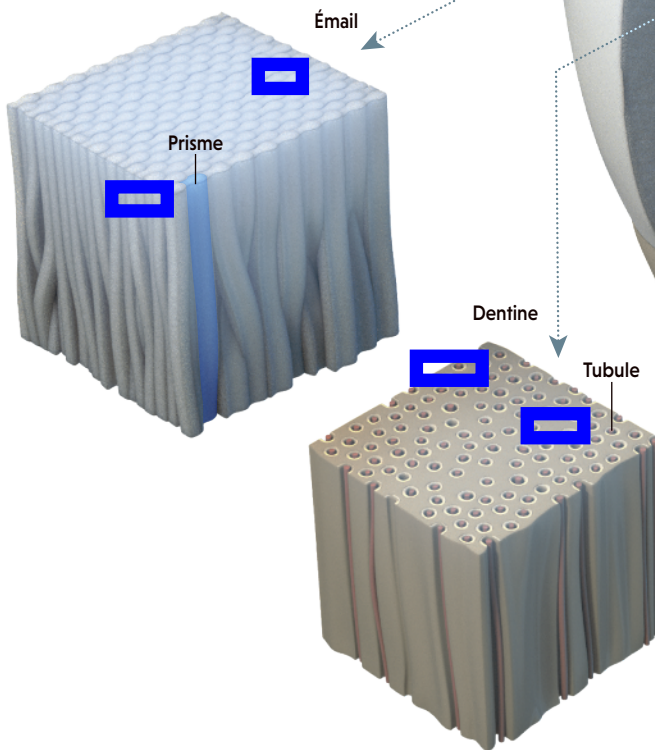
L'émail est apparu il y a environ 415 millions d'années, au sein des sarcoptérygiens

...vait la dentine de leurs dents, qui, même si elles n'étaient ni perdues ni remplacées, n'en étaient pas moins des dents. Certains avaient des écailles sur les lèvres et les joues qui ressemblaient d'autant plus à des dents qu'elles étaient proches de la bouche; c'est là un argument de poids en faveur d'un passage évolutif continu depuis certaines écailles aux dents. Même dans leurs formes les plus archaïques, les dents représentaient certainement un avantage, et elles se sont donc répandues dans les lignées des organismes des océans primitifs.

Une fois les dents en place, de nombreuses innovations ont suivi, notamment dans leur forme, leur nombre, leur répartition, leur remplacement et leur fixation à la mâchoire. C'est il y a environ 415 millions d'années, à la limite du Silurien et du Dévonien, que l'émail apparaît au

CONSTRUITES POUR DURER

Comme celles des autres mammifères, les dents humaines sont remarquablement résistantes grâce à une couronne en émail dur recouvrant la dentine, qui est robuste mais plus souple. À l'échelle microscopique, des cristallites (de petits mono-cristaux) sont disposés de façon à renforcer la couronne d'émail sa dureté. La résistance et la souplesse de la dentine proviennent en grande partie des fibres de collagène qui emplissent les espaces entre des structures dénommées tubules.



sein des sarcoptérygiens. Ce groupe de «poissons» a donné les poissons à nageoires charnues – dotés des paires de nageoires pectorales et ventrales dont les os et les muscles ressemblent à ceux des membres – et les tétrapodes modernes, c'est-à-dire les amphibiens, les reptiles et les mammifères. Les autres poissons n'ont pas le groupe de gènes codant pour les protéines nécessaires à la fabrication de l'émail, dont ils sont par conséquent dépourvus. L'émail était initialement limité aux écailles, ce qui suggère que, comme les dents, il est issu de structures de la peau avant de devenir partie intégrante de structures buccales.

FAVORABLES À L'ENDOTHERMIE

Les dents ont joué un rôle important dans l'évolution des mammifères parce que, comme nous allons l'expliquer, elles favorisent l'endothermie (le fait d'avoir le sang chaud). Un organisme capable de créer sa propre chaleur corporelle a de nombreux avantages: il peut

vivre dans des climats froids et dans ceux aux températures variables; il peut aussi maintenir des vitesses de déplacement plus grandes et ainsi exploiter des territoires plus vastes; il aura aussi plus d'endurance dans la recherche de nourriture, l'évitement des prédateurs et les soins parentaux.

L'endothermie a toutefois un grand coût énergétique: un mammifère brûle dix fois plus d'énergie au repos qu'un reptile de taille similaire. Les mammifères doivent donc sans cesse alimenter un véritable fourneau métabolique, ce qui a induit une grande pression sélective sur la bouche: si les dents des autres vertébrés servent à capturer, à maintenir et à tuer leurs proies, celles des mammifères ont en plus pour fonction de mâcher afin d'extraire le plus possible de calories des aliments.

Les dents des mammifères guident les mouvements de mastication en dirigeant et dissipant les forces mises en œuvre, tout en positionnant, en maintenant, en fracturant et >

> en fragmentant les aliments. Pour que les dents fonctionnent bien pendant la mastication,

leurs surfaces opposées doivent être alignées à une fraction de millimètre près. La nécessité d'une telle précision explique pourquoi, contrairement aux poissons et aux reptiles, chez la plupart des mammifères il n'y a pas de repousse de nouvelles dents tout au long de la vie, à mesure que les dents anciennes s'usent ou se cassent. C'est dans le cours de l'adaptation de la mastication que les mammifères ancestraux ont perdu cette capacité.

Les prismes d'émail font partie du même ensemble adaptatif. La plupart des chercheurs pensent qu'ils sont apparus parce qu'une meilleure résistance des dents, adaptée à la mastication, était avantageuse. La question de savoir si l'apparition évolutive des prismes s'est produite une fois ou plusieurs fois indépendamment est débattue, mais dans tous les cas, la structure de base des dents de mammifères – une couronne de dentine recouverte d'émail prismatique – était déjà en place au Trias, il y a environ 250 millions d'années. Les myriades de formes de molaires de mammifères, y compris les nôtres, qui s'en sont ensuivies, sont de simples ajustements du même plan général.

DÉSÉQUILIBRE MICROBIEN

Phylogénie évolutive de nos dents explique non seulement leur résistance, mais aussi leurs défaillances. A cet égard, l'idée essentielle est que les structures biologiques évoluent pour fonctionner au sein d'un éventail spécifique de conditions environnementales. Dans le cas de nos dents, il s'agit de la présence dans la bouche de certaines substances chimiques et de certaines bactéries, ainsi que de la pression et de l'abrasion. La modification de ces conditions peut donc constituer une menace. C'est bien ce que fait l'alimentation moderne, si différente de toutes celles qui l'ont précédée dans l'histoire de la vie humaine. Le désaccord qui en résulte entre notre biologie et notre comportement explique nos caries dentaires, les dents de sagesse abîmées et les autres problèmes orthodontiques qui nous affligent.

La carie dentaire est la maladie chronique la plus courante et la plus répandue dans le monde.

Elle touche près de huit Français sur dix et des milliards de personnes dans le monde entier. Pourtant, au cours des trente dernières années, j'ai étudié des centaines de milliers de dents d'espèces fossiles et d'animaux vivants et n'ai pratiquement jamais observé de caries dentaires.

Pour comprendre pourquoi les dents des humains modernes sont si sujettes aux caries, il nous faut considérer le milieu buccal naturel. Une bouche saine fourmille de vie: elle est peuplée de milliards de microbes comprenant jusqu'à 700 espèces différentes de bactéries. La plupart d'entre elles sont bénéfiques. Elles

combattent les maladies, aident à la digestion et régulent diverses fonctions corporelles. D'autres

sont nuisibles, tels les lactobacilles et *Streptococcus mutans* (ou streptocoques mutans, ainsi nommés car leurs cellules passent souvent d'une forme de coque à celle de courts bâtonnets). Le métabolisme de ces bactéries produit de l'acide lactique, qui attaque l'émail. Mais leurs concentrations sont en général trop faibles pour entraîner des dommages permanents. Leur nombre est en effet contrôlé par les populations de streptocoques *mitis* (*Streptococcus mitis*) et *sanguinis* (*Streptococcus sanguinis*). Ces bactéries produisent des bases – ce qui réduit l'acidité – et des protéines antimicrobiennes – qui inhibent la croissance des espèces nuisibles.

Par ailleurs, la salive tamponne la bouche, c'est-à-dire qu'elle maintient constant son pH (niveau d'acidité), ce qui limite les attaques acides; et, comme elle contient du calcium et du phosphate en solution, elle reminéralise aussi la surface des dents. Un équilibre entre déminéralisation et reminéralisation se maintient depuis des centaines de millions d'années dans les bouches des mammifères, de sorte que des bactéries bénéfiques et nocives cohabitent dans les microbiomes buccaux de l'ensemble des mammifères. Nous avons coévolué en maintenant une communauté stable de microbes, ou, comme le formule Kevin Foster, de l'université d'Oxford, en «tenant l'écosystème en laisse».

Les caries apparaissent quand la laisse se rompt. Les régimes riches en glucides nourrissent les bactéries productrices d'acide, ce qui réduit le pH buccal. Les *Streptococcus mutans* et les autres espèces cariogènes se développent dans l'environnement acide qu'ils produisent, et finissent par noyer par leur nombre les bactéries bénéfiques, ce qui réduit encore le pH. Cette chaîne d'événements conduit à ce que les cliniciens nomment la «dysbiose», un changement d'équilibre dans lequel quelques espèces nuisibles supplantent celles qui dominent normalement le microbiome buccal.

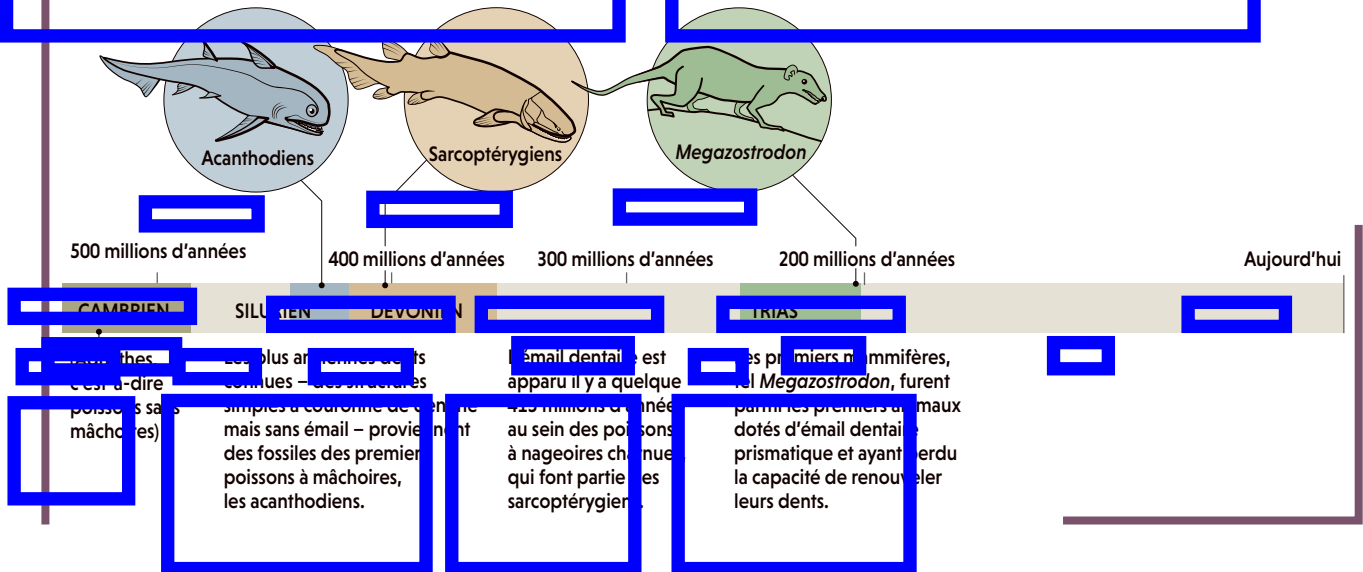
Dans ces situations, la salive ne peut plus reminéraliser l'émail assez vite pour compenser la déminéralisation, et l'équilibre entre perte de

Les caries apparaissent quand l'écosystème bactérien de la bouche est déstabilisé

DES RACINES PROFONDES

Nos dents sont le produit de centaines de millions d'années d'évolution. Les fossiles des premières formes de poissons et la biologie du développement suggèrent qu'elles proviennent d'une adaptation de certaines écailles spécialisées de poissons. Les propriétés qui les rendent si résistants sont

dentaires qui affectent la plupart de nos contemporains sont en grande partie dus à l'inadéquation de notre appareil masticateur à la nourriture moderne, constituée de beaucoup d'aliments mous, transformés et riches en sucres, un régime alimentaire très différent de celui de nos ancêtres chasseurs-cueilleurs.



masse et réparation est rompu. Le saccharose – sucre très commun – est particulièrement problématique. Les bactéries nocives l'utilisent pour former la plaque dentaire, un film épais qui les colle aux dents, et pour stocker de l'énergie entre les repas, ce qui signifie que l'exposition aux attaques acides est prolongée.

Les archéologues ont depuis longtemps suggéré un lien entre les caries et le passage au Néolithique, il y a environ 10 000 ans, du mode de vie de chasseurs-cueilleurs à celui d'agriculteurs-éleveurs. En effet, les bactéries productrices d'acide consomment les glucides fermentables, qui abondent dans le blé, le riz et le maïs. Les recherches menées par exemple par Clark Larsen, de l'université d'État de l'Ohio, ont révélé que l'incidence des caries avait plus que sextuplé avec l'adoption et la propagation de la culture du maïs le long de la côte préhistorique de la Géorgie américaine.

Le lien entre carie dentaire et agriculture n'est cependant pas si simple : chez les premiers agriculteurs, le taux de caries varie dans le temps et l'espace, et les dents de certains chasseurs-cueilleurs, ceux par exemple qui ont une alimentation riche en miel, peuvent être aussi criblées de caries.

En fait, la fréquence des caries a surtout augmenté avec la révolution industrielle, car elle a généralisé le saccharose et les aliments hautement transformés. Ces dernières années, des chercheurs ont effectué des études génétiques sur des bactéries piégées dans le tartre de dents anciennes, lesquelles documentent la transition

qui s'est ensuivie dans les communautés microbiennes. Les aliments transformés sont plus mous et plus propres, d'où des conditions très favorables aux caries, à savoir moins de mastication susceptible de détruire la plaque dentaire et moins d'abrasifs alimentaires en mesure d'atteindre les recoins où se réfugient les bactéries.

L'ÉMAIL NE REPOUSSE PAS

Malheureusement, à cause de la façon dont se forment les couronnes de nos dents, l'émail ne repousse pas comme la peau ou les os. Cette limitation a été établie dès l'apparition de l'émail chez des poissons à nageoires charnues. Les améloblastes, les cellules qui fabriquent l'émail, migrent depuis l'intérieur de la dent vers la surface à venir de la couronne, laissant des traces d'émail – des prismes – derrière elles. Si nous ne pouvons resécréter de l'émail, c'est parce que les cellules qui le fabriquent sont arrachées et perdues une fois la couronne complète.

Pour la dentine, c'est une autre histoire. Les odontoblastes, les cellules qui la produisent, commencent leur travail dos à dos avec les améloblastes, mais migrent vers l'intérieur, pour finalement venir tapisser la chambre pulpaire. Elles continuent à produire de la dentine tout au long de la vie d'un individu et peuvent réparer ou remplacer des tissus usés ou blessés. Les lésions plus graves nécessitent que des cellules nouvellement formées fabriquent de la dentine pour tapisser la chambre pulpaire et protéger la dent.

Cependant, à mesure que les caries se développent, elles submergent ces défenses >

> naturelles, infectent la pulpe et finissent par tuer la dent. D'un point de vue évolutif, quelques siècles sont un intervalle de temps trop bref pour que nos dents aient eu le temps de s'adapter au changement majeur de notre environnement buccal dû à l'introduction du sucre de table et des aliments transformés.

QUAND LES CONTRAINTES MÉCANIQUES MANQUENT

Les troubles orthodontiques ont également atteint au cours de l'histoire des niveaux épidémiques. Neuf personnes sur dix ont des dents imparfaitement alignées ou souffrent de malocclusion dentaire, c'est-à-dire un mauvais positionnement des dents les unes par rapport aux autres. Les trois quarts d'entre nous ont des dents de sagesse qui n'ont pas assez de place pour pousser correctement. En deux mots, nos dents n'arrivent pas à tenir sur nos mâchoires. Comme dans le cas des caries, la cause en est le déséquilibre dû à un nouveau milieu buccal, très différent de celui dans lequel baillaient les dents de nos ancêtres.

Dès les années 1920, un célèbre orthodontiste australien, «Tick» Begg (Raymond Begg), a relevé cette étonnante indigence de nos dents. Il a remarqué que les Aborigènes, des chasseurs-cueilleurs, perdaient moins leurs dents que ses patients européens. Ils avaient aussi des arcades dentaires parfaites; leurs dents de devant étaient droites et leurs dents de sagesse sorties et fonctionnelles. Begg en déduisit que la nature «s'attend» à ce que l'usure entre dents adjacentes réduise les besoins d'espace dans la bouche. Il pensait que la longueur des mâchoires était pré-programmée par l'évolution pour tenir compte de cette usure. Alors que nos dents ont évolué pour mâcher des aliments durs dans un environnement abrasif, notre régime alimentaire moderne et propre a perturbé l'équilibre entre taille des dents et longueur des mâchoires. D'où ce décalage de (dé)montage que j'ai vu à l'œuvre dans le cabinet du chirurgien-dentiste évoqué plus haut: que ce soit par usure ou par extraction, la masse dentaire doit disparaître!

Cette logique à l'esprit, Begg développa ce qui resta longtemps la référence en matière de redressement des dents. Pour créer de l'espace sur la mâchoire, il imagina extraire les premières prémolaires, puis attacher un fil à des crochets fixés sur les dents restantes afin de donner un bon profil à l'arcade dentaire tout en refermant les espaces. Auparavant, d'autres orthodontistes utilisaient des fils pour redresser les dents de travers, mais ils n'extraient pas les premières molaires, et par conséquent les dents redressées reprenaient souvent une position en biais.

De nombreux dentistes ont d'abord refusé l'idée d'extraire des dents saines pour bien reformer l'arc dentaire, mais la technique de Begg marchait bien et durablement. Begg est

même allé jusqu'à suggérer que les enfants mâchent du chewing-gum contenant de la poussière abrasive de carbure de silicium afin d'user leurs dents et ainsi d'éviter complètement tout traitement orthodontique...

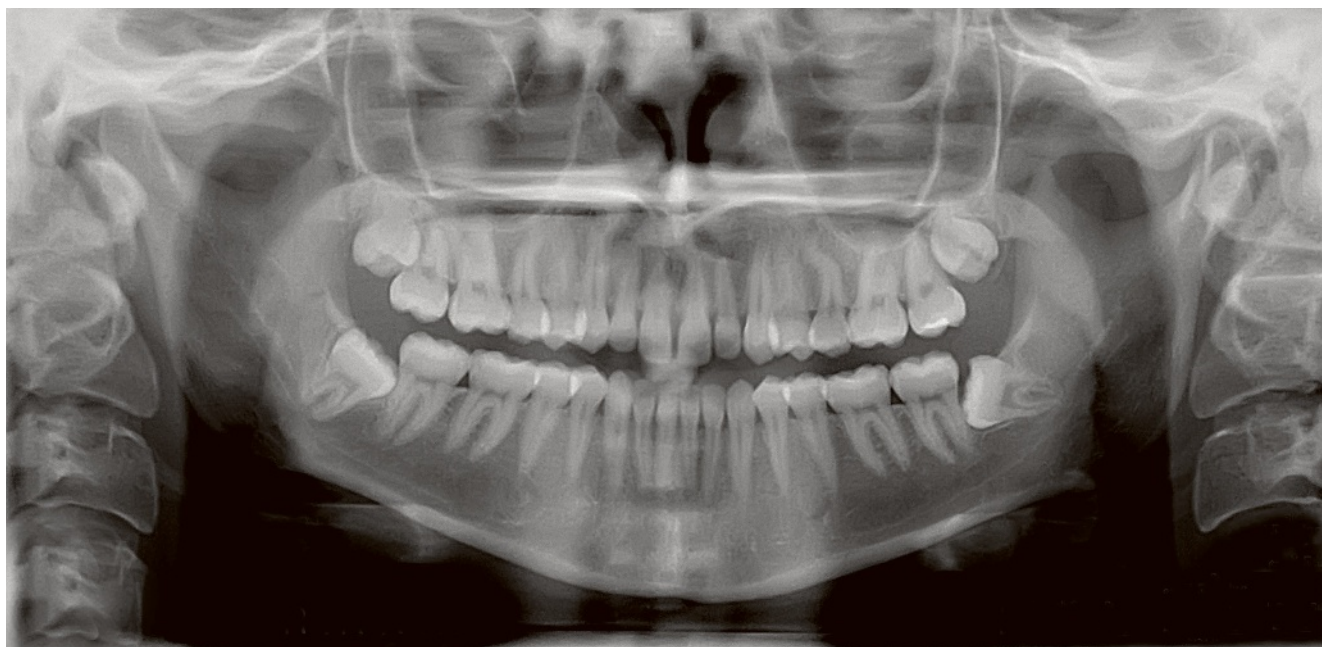
Begg avait raison quant au décalage entre les dents et les mâchoires, mais il s'est trompé sur les détails. Selon l'anthropologue Robert Corruccini, de l'université d'Illinois du Sud, le changement clé ne concernait pas l'environnement abrasif, mais plutôt les contraintes mécaniques auxquelles étaient soumises les dents lors de la mastication des aliments. Et ce ne sont pas les dents qui sont trop grandes, mais la mâchoire qui est trop petite!

Charles Darwin avait déjà, dans *La Filiation de l'homme* (*The Descent of Man*, 1871), fait le lien entre contraintes mécaniques et taille de la mâchoire. Robert Corruccini fut toutefois l'un des premiers à apporter la preuve définitive du problème que représente l'absence de ces contraintes. Il venait de commencer à enseigner à l'université du sud de l'Illinois lorsqu'un étudiant issu d'une communauté

Chez la plupart des gens, les dents de sagesse n'ont pas assez de place pour bien pousser

campagnarde du Kentucky lui expliqua que les personnes âgées y avaient été nourries dans leur enfance avec des aliments difficiles à mâcher, tandis que leurs enfants et petits-enfants profitaient d'un régime alimentaire plus raffiné et plus élaboré.

L'étude de cette communauté rurale révéla qu'en effet, ses anciens mâchaient mieux que les jeunes, et ce malgré l'absence presque totale, à leur génération, de soins dentaires professionnels. Robert Corruccini expliqua cette constatation par la consistance des aliments consommés autrefois. Ainsi, les différences constatées entre les dentitions des diverses générations ne sont pas d'origine génétique, mais environnementale. Robert Corruccini découvrit ensuite de nombreux autres exemples du même phénomène, notamment chez les Pimas de l'Arizona avant et après leur accès aux aliments achetés en magasin, ou entre les



Les dents de sagesse n'ont pas la place de pousser correctement lorsque la mâchoire est trop petite, ce qui est le cas lorsque les enfants sont nourris d'aliments plus faciles à mâcher que ceux de nos ancêtres.

ruraux et les citadins de la région de Chandigarh, en Inde, les premiers se nourrissant de millet grossier et de légumes durs, et les seconds de pain mou et de purée de lentilles.

Selon Robert Corruccini, la taille des dents est préprogrammée pour s'adapter à une mâchoire soumise, pendant la croissance, aux contraintes mécaniques d'un régime alimentaire naturel d'enfant. Si, par la suite, l'appareil masticateur ne connaît pas la stimulation nécessaire au cours de son développement, les dents s'accumulent en trop grand nombre vers l'avant de la mâchoire et s'abîment vers l'arrière. Une théorie qu'il a confirmée par des travaux expérimentaux sur des singes : une alimentation à base de nourritures molles tendait à rapetisser leurs mâchoires et à dégrader leurs dents.

DENTISTERIE DARWINIENNE

Considérer les dents dans une perspective évolutive révèle que nos troubles dentaires sont la conséquence d'un changement écologique. Ce nouveau point de vue commence à aider les chercheurs et les cliniciens à s'attaquer aux causes profondes des maladies dentaires.

Des matériaux de scellement (plus connus sous leur nom anglais de *sealants*) des scellements dentaires (une mince couche de résine fluide) protègent nos couronnes et le fluorure renforce et reminéralise l'émail. Pour bénéficier qu'elles soient, ces techniques ne changent rien aux conditions responsables des caries. Les bains de bouche antiseptiques tuent les bactéries qui causent les caries, mais ils tuent aussi les souches bénéfiques qui gardent les bactéries nocives sous contrôle. Inspirés par les récentes innovations dans le domaine des thérapies microbiennes, les chercheurs

commencent à se concentrer sur le remodelage de la communauté de la plaque dentaire. Et des probiotiques oraux, des antimicrobiens ciblés et des transplantations de microbiote se profilent à l'horizon.

Nous pouvons aussi avoir à l'esprit la nécessité d'un environnement buccal naturel lorsque nous réfléchissons aux traitements orthodontiques. Les dentistes et les orthodontistes se rendent compte que les aliments pour bébés hautement transformés et ramollis modifient les contraintes mécaniques sur le visage et les mâchoires. Les contraintes induites par la mastication stimulent la croissance normale de la mâchoire et du milieu du visage chez les enfants. La consommation d'aliments pour bébés, en purée, laisse ces parties du corps chroniquement sous-développées. Cette réalité a des implications qui vont au-delà de l'encombrement des dents : certains experts suggèrent que la constriction des voies respiratoires qui en résulte est responsable de l'apnée du sommeil, un trouble assez fréquent de nos jours.

Personne ne veut que les tout-petits s'étouffent en mangeant, mais il existe peut-être de meilleures solutions de sevrage que la purée de pois ! Au cours des dernières années, une nouvelle industrie s'est développée qui se concentre sur la croissance des mâchoires pour ouvrir les voies respiratoires et adapter les dents en fonction de ce que la nature a prévu. Les traitements efficaces vont d'extenseurs palatins amovibles et autres appareils de guidage de la croissance à la chirurgie. Mais peut-être que si, comme nos ancêtres, nous donnions à nos enfants, dès leur plus jeune âge, des aliments nécessitant une vigoureuse mastication, nous leur épargnerions les ennuis dentaires et de tels traitements. ■

BIBLIOGRAPHIE

- P. S. Ungar, **Le vrai régime**, *pour la science*, n° 454, décembre 2013.
- P. S. Ungar, **Evolution's Diet and Human Origins**, Princeton University Press, 2017.
- P. Sharpe et C. Young, **Des dents en éprouvette**, *Pour la science*, n° 456, octobre 2005.
- R. Corruccini, **How Anthropology Informs the Orthodontic Diagnosis of Malocclusion's Causes**, Edwin Mellen Press, 1999.

L'ESSENTIEL

De nombreux secteurs industriels ont besoin d'appareils mélangeurs efficaces.

> Il y a une trentaine d'années, les mélangeurs sans pales ou hélices sont apparus sur le marché.

> Inspiré par des travaux de géophysique, l'auteur

a proposé un nouveau concept de mélangeur sans pales, bien plus simple que les dispositifs existants.

> Ce mélangeur a plusieurs avantages qui le rendent intéressant pour, notamment, des applications aux biotechnologies.

L'AUTEUR



PATRICE MEUNIER
directeur de recherche du CNRS
à l'Institut de recherche sur les phénomènes
hors équilibre (Irphé), Aix-Marseille
Université-CNRS-École centrale de Marseille

Mélanger en s'inspirant du mouvement de la Terre

Comment mélanger avec efficacité une préparation liquide, par exemple un colorant dans un pot de peinture ? À partir de leurs recherches fondamentales, des géophysiciens ont breveté un procédé étonnamment simple : faire tourner le récipient sur lui-même en l'inclinant légèrement !

De nombreux secteurs industriels ont besoin d'équipements et de procédés permettant de mélanger rapidement et efficacement des poudres, des liquides des pâtes ou des matériaux granulaires. On peut penser au secteur du bâtiment, avec les peintures, les ciments ou le béton, à l'industrie chimique ou pharmaceutique, à l'industrie agroalimentaire... Le plus souvent, les mélangeurs ou malaxeurs sont des appareils qui accomplissent leur tâche grâce à des pales ou des hélices en mouvement au sein du matériau à homogénéiser. Ces systèmes à intrusion souffrent de plusieurs inconvénients, notamment la nécessité d'ouvrir le récipient et de

nettoyer les pales après usage, opération souvent longue et fastidieuse – comme l'a constaté toute personne qui a mélangé un colorant dans un pot de peinture !

MÉLANGER SANS PALES

Depuis le début des années 1990, plusieurs fabricants ont développé des malaxeurs qui s'affranchissent de pales ou d'hélices. Le principe est simple, bien que techniquement délicat : faire tourner autour de lui-même le récipient contenant le matériau à mélanger, l'axe de cette rotation subissant lui-même un mouvement de rotation afin d'éviter la mise en place d'un écoulement régulier. Dans les appareils commercialisés (voir la photo page 47), le récipient cylindrique, dont la

Les procédés usuels pour mélanger des liquides font appel à des pales ou une hélice en mouvement dans le fluide. L'un des principaux inconvénients réside dans le long nettoyage du dispositif introduit. Il existe aujourd'hui des mélangeurs sans pales, celui conçu par l'auteur repose sur un mouvement particulièrement simple du récipient



> capacité est d'une quarantaine de kilogrammes, tourne autour de son axe à une vitesse d'environ 1 tour par seconde, tandis que cet axe tourne lui-même dans un plan vertical (c'est-à-dire autour d'un axe horizontal), à une vitesse allant jusqu'à environ 150 tours par minute.

REPRODUIRE LA PRÉCESSION TERRESTRE

Qualifiés de malaxeurs biaxiaux, gyroscopiques ou planétaires, ces dispositifs sont un bon exemple de géomimétisme: le mouvement imprimé au récipient imite, par certains aspects, celui de la Terre.

En quoi est-ce une imitation? Notre planète tourne en 24 heures autour de son axe Nord-Sud, lequel est incliné de 23,5 degrés par rapport à l'axe de l'écliptique (c'est-à-dire l'axe perpendiculaire au plan de l'orbite autour du Soleil). Et l'axe de rotation terrestre tourne lui-même très lentement, en environ 26 000 ans, autour de l'axe de l'écliptique: par ce mouvement dit de précession, il décrit ainsi un cône dont le sommet est le centre de la Terre et dont l'angle d'ouverture est de 47 degrés. Si l'on omet sa révolution autour du Soleil, notre

planète a ainsi un mouvement semblable à celui d'une toupie (voir l'encadré ci-dessous).

Ce mouvement de précession est tout à fait similaire à celui du récipient dans un malaxeur biaxial tel que celui décrit plus haut. Les différences résident dans l'ouverture et l'orientation du cône de précession, et dans les vitesses de rotation. Ainsi, dans le malaxeur biaxial évoqué, l'angle d'ouverture du cône de précession est de 180 degrés, c'est-à-dire que ce cône forme un demi-espace, et son axe est horizontal (perpendiculaire à la façade, verticale, du malaxeur).

La précession terrestre est 10 millions de fois plus lente que la rotation propre de la planète. Pourtant, les modélisations des géophysiciens ont montré qu'elle induit un frottement important dans la partie externe, liquide, du noyau de la Terre, et y crée un écoulement turbulent grâce à des phénomènes de résonance et d'instabilités.

Cette source d'énergie a probablement été suffisante pour entretenir l'effet dynamo responsable du champ magnétique terrestre, avant que la partie interne du noyau de notre planète ne se solidifie. De plus, la forte turbulence engendrée par la précession constitue

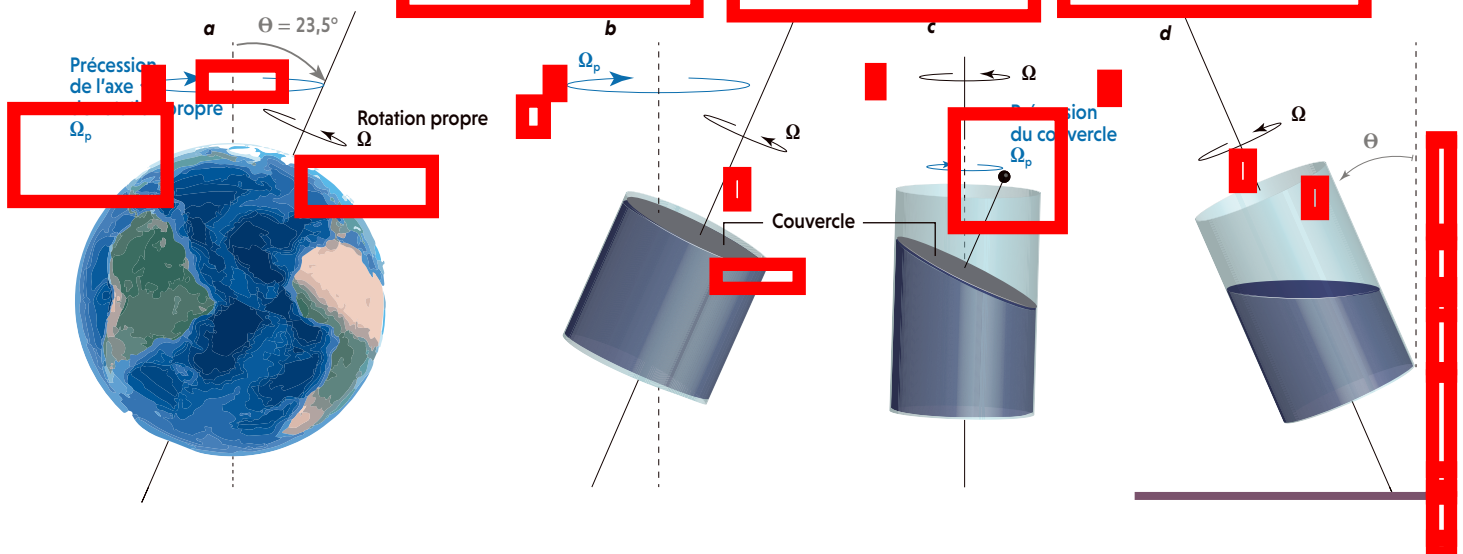
DE LA PRÉCESSION TERRESTRE AU MOUVEMENT D'UN MÉLANGEUR

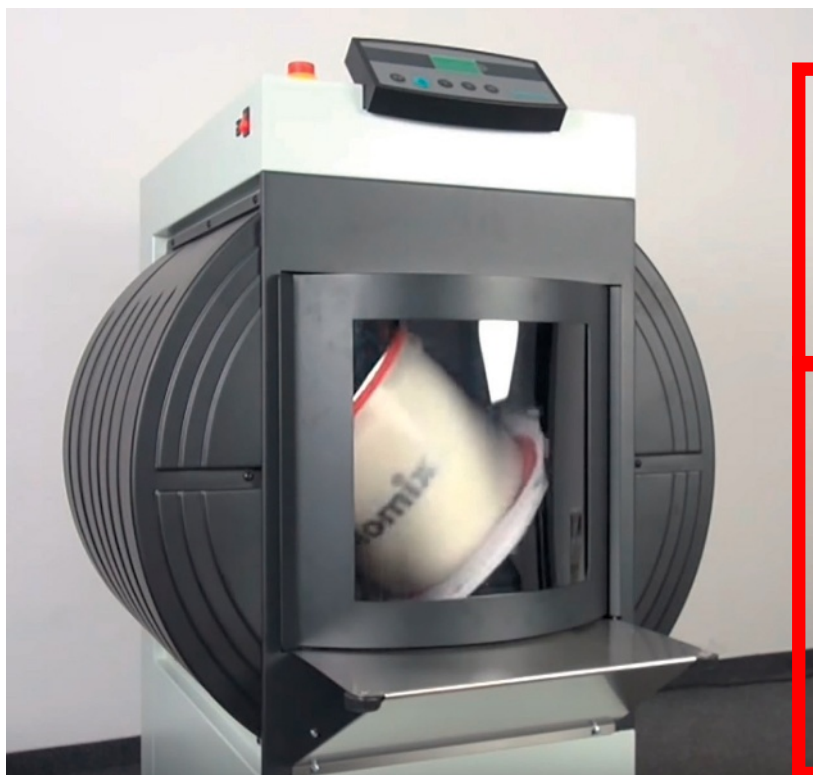
La précession de la Terre (celle d'un cylindre (b)) correspond à une rotation, à la vitesse angulaire Ω_p , de l'axe de rotation propre Ω du cylindre à la vitesse angulaire Ω . Dans le cas de la Terre, Ω vaut 1 tour par 24 heures (ou 2π radians) par 24 heures et Ω_p correspond à environ 1 tour en 26 000 ans. Le mouvement d'un fluide contenu dans un cylindre

en précession est très similaire au mouvement d'un fluide

en rotation sur un axe fixe, le fluide étant recouvert d'un couvercle qui effectue une précession à la vitesse angulaire Ω_p (c). Cette propriété est valable également si l'on tient compte de la pesanteur (verticale sur la figure). Dans la limite où Ω_p est très petit devant la vitesse angulaire Ω de

rotation du cylindre sur lui-même, le couvercle est immobile dans le repère de laboratoire. Cette situation correspond ainsi au mouvement d'un cylindre incliné par rapport à la verticale et en rotation autour de son axe, le liquide ayant sa surface supérieure libre (d). C'est cette configuration très simple, géo-inspirée, qu'utilise le mélangeur conçu par l'auteur.





Dans un malaxeur biaxial, dit aussi «gyroscopique» ou «planétaire» (ici un modèle du fabricant allemand Collomix), le récipient tourne sur lui-même autour d'un axe, lequel tourne lui-même dans un plan vertical, autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la façade de l'appareil. Ce mouvement s'apparente à la précession de l'axe de rotation de la Terre.

un important mécanisme de mélange. Aussi les physiciens ou les géophysiciens ont-ils mené de nombreuses études fondamentales pour comprendre les écoulements au sein d'un liquide contenu dans un récipient en précession, en général de forme sphérique ou cylindrique.

SIMPLIFIER LE MOUVEMENT DE PRÉCESSION

Il y a un peu plus d'une dizaine d'années, je me suis ainsi intéressé avec plusieurs collègues au cas d'un cylindre en précession. Nos travaux nous ont permis d'identifier les mécanismes qui engendrent la turbulence au sein du fluide. Et cela a conduit à l'idée d'un nouveau concept de mélangeur sans pales, pour lequel deux brevets ont été déposés - l'un en 2016 et l'autre en 2019.

Le problème des malaxeurs biaxiaux est leur complexité sur le plan mécanique. La rotation propre du récipient cylindrique est assurée par un moteur qui est lui-même en rotation. Il s'ensuit une limitation importante de la masse du récipient et de son contenu : quelque 40 kilogrammes dans la plupart des appareils commercialisés. Peut-on engendrer avec un mouvement plus simple le même écoulement mélangeant ?

Nos études théoriques et expérimentales ont montré que oui. Il y a quelques années, nous avons établi que dans un cylindre tournant autour de son axe et légèrement incliné par rapport à la verticale, la surface du liquide

étant libre, l'écoulement est à peu près identique à celui qui s'installe dans un cylindre en précession (voir l'encadré page précédente). D'où l'idée d'un mélangeur réalisant cette configuration beaucoup plus simple, et qui a été breveté sous le nom de Soft Mixer («malaxeur doux»). Bien qu'il ne reproduise pas véritablement une précession, ce dispositif est inspiré du mouvement de la Terre et l'on peut donc parler de géo-inspiration.

Un tel appareil paraît, à première vue, trop simple pour qu'il puisse mélanger fortement le liquide, surtout pour de faibles angles d'inclinaison. La surface libre du liquide reste immobile dans le repère du laboratoire et il est donc difficile d'imaginer que le dispositif engendre un écoulement complexe. Pourtant, le chercheur américain Rory Thompson avait observé en 1970 que l'écoulement au sein d'un cylindre incliné en rotation devenait très turbulent pour des valeurs précises du rapport d'aspect (rapport entre la hauteur du liquide dans le cylindre et le diamètre de celui-ci), même pour de très petits angles d'inclinaison.

Cela explique pourquoi, malgré sa simplicité, ce type de mélangeur n'a jamais été construit de manière empirique : il aurait fallu visualiser l'écoulement à l'intérieur du liquide et non à sa surface libre, et avoir la chance de tomber sur le bon rapport d'aspect.

Des études théoriques sur les fluides tournants ont permis de prédire ces rapports d'aspect particuliers pour lesquels une forte turbulence apparaît. Elles s'appuient en particulier sur les travaux pionniers de Lord Kelvin (alias William Thomson), publiés en 1887, qui ont mis en évidence plusieurs façons, ou «modes globaux», dont les particules constituant le fluide dans un cylindre en rotation pouvaient osciller.

On montre que le principal mode global (voir l'encadré page 48) présente un effet de résonance lorsque la hauteur du liquide dans le cylindre est égale à environ 1 diamètre de celui-ci, ou 2 diamètres, ou 3 diamètres, etc. Pour ces valeurs du rapport d'aspect, l'oscillation des particules du fluide s'effectue avec une forte amplitude.

UN MÉLANGE PUISSANT POUR UN FAIBLE CISAILEMENT

La question est maintenant de savoir si cet écoulement est efficace pour mélanger le liquide contenu dans le cylindre, par exemple pour mélanger un colorant dans un pot de peinture. Sur le plan théorique, c'est un problème difficile, car la trajectoire des particules fait apparaître du chaos déterministe (une très grande sensibilité aux conditions initiales, qui rend impossible la prévision des trajectoires). Nous avons donc mesuré expérimentalement l'efficacité de mélange de cet écoulement

> Pour de faibles vitesses de rotation du cylindre, on voit le colorant osciller simplement, en suivant une trajectoire circulaire : l'écoulement n'est pas suffisamment turbulent pour le mélanger efficacement. C'est un effet bien connu pour les vagues à la surface de la mer : une mouette posée sur l'eau n'est pas entraînée par la houle, car elle se déplace dans un sens pendant une demi-période puis en sens inverse pendant l'autre demi-période.

Dans notre mélangeur, le mode global, excité par l'oscillation de la surface libre, dans

le référentiel tournant avec le cylindre), ne produit donc pas de mélange. Il crée simplement des filets de colorant inclinés par rapport à l'axe du cylindre (voir la figure page 49, a).

Cependant, nous avons montré que lorsque la rotation du cylindre est suffisamment rapide, le mode global décrit plus haut devient instable. Pour donner une idée, la rotation seuil est d'environ 1 tour en 3 secondes pour un cylindre faisant 9 centimètres de diamètre et incliné de 1 degré. Deux autres modes globaux d'oscillation entrent alors en jeu et s'amplifient mutuellement par

UN MODE GLOBAL D'OSCILLATION DU LIQUIDE

Dans un cylindre en rotation autour de son axe, les petites perturbations avec un liquide peuvent se propager et former des modes globaux d'oscillation des particules fluides, un « mode » étant constitué de régions du fluide où l'amplitude de l'oscillation est grande (les ventres)

alternant avec des régions où elle est petite (les nœuds).

Le principal mode global, dans le cas d'un cylindre légèrement incliné par rapport à la direction de la pesanteur, est décrit ici.

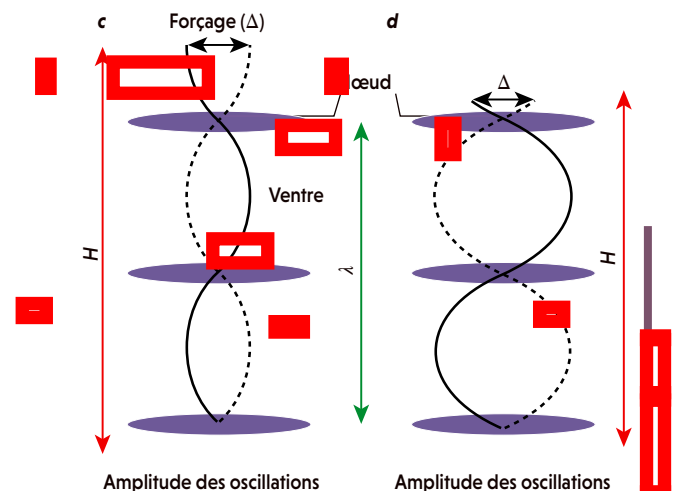
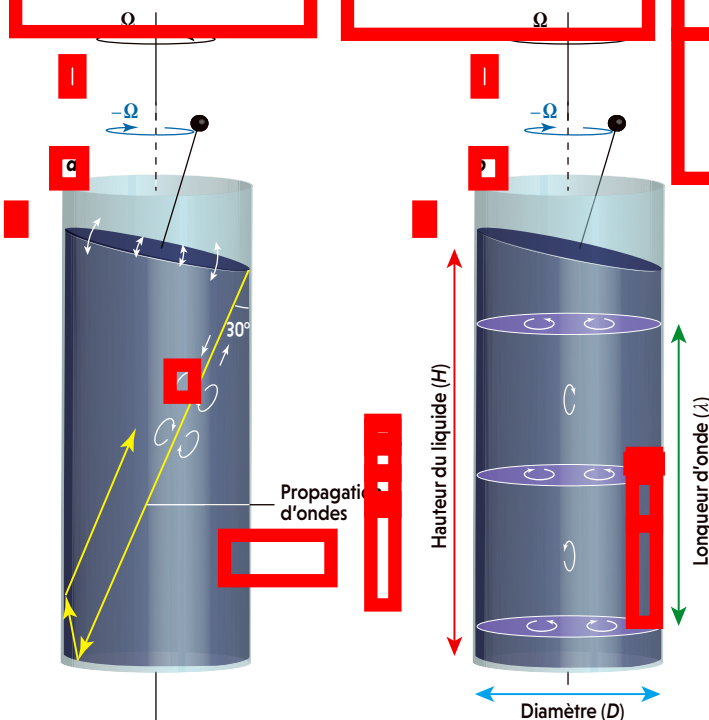
Pour comprendre l'origine et la nature de ce mode global, il est plus commode de se placer dans le repère qui tourne avec le cylindre à la vitesse angulaire Ω (sur la figure, la direction de la pesanteur est oblique, perpendiculaire à la surface du liquide). Dans ce repère, la surface libre (qui est fixe dans le repère du laboratoire) tourne à une vitesse angulaire égale à $-\Omega$, car la direction de la gravité tourne elle-même à cette vitesse $-\Omega$. L'oscillation de la surface libre engendre un cisaillement du fluide au

niveau du contact surface-paroi, et cette perturbation se propage à 3Ω par rapport à l'axe du cylindre. Les particules du fluide étant aussi soumises à la force de Coriolis (liée au fait qu'on est dans un repère en rotation), elles se mettent à osciller en suivant un mouvement elliptique. Ces ondes de mise en mouvement se propagent et se réfléchissent dans tout le cylindre (a). Il résulte de leur interférence un mode global d'oscillation des particules du fluide (b) avec des ventres (oscillations d'amplitude maximale) et des nœuds (oscillations d'amplitude nulle) en fonction de la direction considérée. Dans la direction de l'axe, la longueur d'onde λ de ce mode propre est égale à 1,9898 fois le diamètre du cylindre.

L'amplitude de l'oscillation est faible lorsque l'excitation due au mouvement de la surface libre se produit au niveau d'un ventre du mode (c). En revanche,

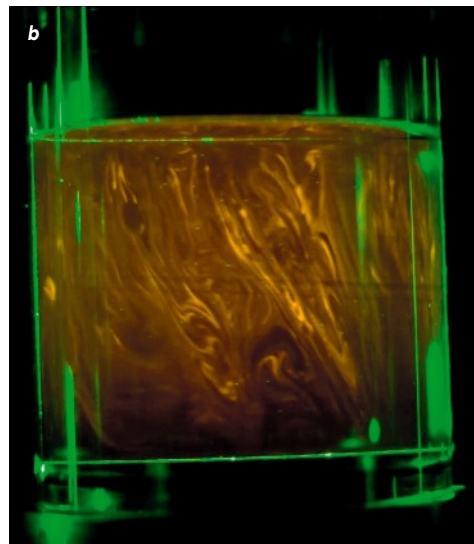
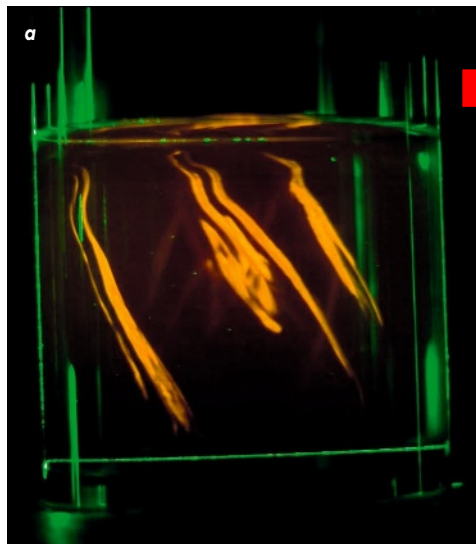
si la même excitation Δ est appliquée à proximité d'un nœud, l'amplitude de l'oscillation devient très grande (d). Le phénomène est similaire à celui d'une corde fixée à un mur et que l'on fait vibrer à son autre extrémité : une très petite vibration appliquée à un nœud du mode propre d'oscillation de la corde induit une réponse de la corde beaucoup plus grande que la même vibration appliquée à un ventre. C'est pourquoi les oscillations du fluide au sein du cylindre sont amplifiées lorsque la hauteur du liquide H est égale à $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$, etc., c'est-à-dire pour $H \approx D$, $2D$, $3D$...

Pour une vitesse de rotation Ω suffisamment rapide, on montre que des autres modes globaux d'oscillation deviennent importants. Leur interaction avec le principal mode global produit une instabilité qui conduit, pour ces valeurs du rapport d'aspect, à un écoulement turbulent, donc fortement mélangeant.



Ces photos montrent le mélange par un Soft Mixer d'un colorant

fluorescent orange dans de l'eau. Pour de faibles vitesses de rotation du récipient, seul le principal mode global d'oscillation est excité, et le colorant ne se mélange pas (a). Pour des vitesses de rotation plus élevées, le mode global se déstabilise et l'écoulement devient suffisamment turbulent pour que les filets de colorant s'étirent et se replient (b). Il en résulte un mélange très efficace : le colorant s'homogénéise dans le cylindre en quelques rotations seulement de celui-ci.



couplage avec le mode global initial. Cela rend l'écoulement beaucoup plus complexe. Les filets de colorant sont fortement étirés puis repliés sur eux-mêmes, d'où un processus de mélange chaotique très efficace. Le colorant se répartit alors de façon homogène dans tout le cylindre en quelques rotations seulement de celui-ci.

Bien qu'il soit de conception très simple, ce mélangeur est aussi efficace que ceux utilisant une hélice en rotation dans le liquide. Il a plusieurs autres avantages. L'absence de pales évite non seulement d'avoir à les nettoyer mais aussi de polluer ou de contaminer les composants à mélanger, ce qui est un gros atout dans les applications en biologie et en médecine.

Enfin, l'écoulement engendré dans notre dispositif est beaucoup plus doux que dans un mélangeur à pales : le cisaillement induit au sein du liquide est environ 20 fois plus faible que celui créé par la pointe d'une pale tournante. Or un faible cisaillement est une propriété très intéressante pour les biotechnologies destinées à produire en grande quantité des cellules animales ou végétales.

DES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

En effet, les cellules vivantes ont besoin d'un apport constant en oxygène (pour les cellules animales) ou en dioxyde de carbone (pour les cellules végétales). Mais ces gaz ne diffusent pas assez vite pour imprégner de grands volumes. Afin d'augmenter l'apport gazeux aux cellules produites, on est donc contraint d'utiliser une pale tournante ou du bullage. Cependant, ces deux procédés produisent un très fort cisaillement qui endommage les cellules fragiles.

Grâce au faible cisaillement, notre procédé de mélange est tout à fait adapté à la production à grande échelle de cellules fragiles. À

partir du Soft Mixer, nous avons donc conçu en 2017, au sein de la jeune entreprise marseillaise Planktovie, un nouveau type de photobioréacteur afin de produire des dinoflagellés, des algues microscopiques sensibles au cisaillement. Les tests effectués dans des petits volumes ont montré que le procédé est très efficace et permet d'atteindre des concentrations plus élevées qu'avec un système de bullage. Un prototype de 150 litres est actuellement en cours d'élaboration.

Ces microalgues sont connues pour contenir de nombreuses molécules intéressantes, aux propriétés anticancéreuses, anesthésiantes, analgésiques, antivirales... La production à grande échelle de dinoflagellés ouvrirait donc de nouvelles perspectives dans le domaine médical. On pourra ensuite adapter ce nouveau type de bioréacteur à des cellules animales qui sont aussi sensibles au cisaillement. Nous sommes actuellement dans une phase de prototypage de ce type de bioréacteur, et leur commercialisation sera probablement possible dans quelques années.

Le principe de notre mélangeur peut être étendu à d'autres domaines. Le faible cisaillement serait un atout majeur pour le mélange de produits pharmaceutiques contenant des molécules fragiles, des anticorps par exemple. De plus, le dispositif est suffisamment simple pour s'appliquer au mélange de fluides visqueux dans des domaines comme l'industrie agroalimentaire. Et l'absence de pales est avantageuse quand il s'agit de mélanger des fluides corrosifs ou rhéoépaississants (c'est-à-dire dont la viscosité augmente avec l'agitation). Bref, ce nouveau type de mélangeur ouvre bien des perspectives dans divers secteurs industriels et technologiques. Une retombée inattendue d'études fondamentales en physique et en géophysique! ■

BIBLIOGRAPHIE

T. Albrecht et al., *Instability mechanisms in precessing cylinder flow*, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 841, R3, 2018.

R. Lagrange et al., *Precessional instability of a fluid cylinder*, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 666, pp. 104-145, 2011.

R. Thompson, *Diurnal tides and their instabilities in a rotating cylinder*, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 40, pp. 737-751, 1960.

W. Thomson (Lord Kelvin), *Vibrations of a cylindrical vortex*, *Philosophical Magazine*, vol. 10, pp. 155-168, 1880.

P. Meunier et R. Manssegh, *Soft Mixer*, Brevet FR2921765 du 1^{er} mai 2016.

P. Meunier et N. Brosse, *Soft Mixer 2*, Brevet FR2970622 du 3 mai 2019.



Che la drosophile, chaque unité de ses yeux à facettes contient des cellules photoréceptrices sensibles à différentes gammes de longueurs d'onde. Un événement aléatoire – l'expression ou non d'un gène lors de la différenciation de ces cellules – détermine à quelle gamme elles seront sensibles.

© Getty Images/Medialia

L'ESSENTIEL

À la fin du xx^e siècle, on a découvert que le hasard joue un rôle clé dans la régulation de l'expression des gènes.

> Toutefois, les techniques d'observation manquaient pour préciser son rôle à l'échelle d'une molécule dans une cellule unique.

> De telles observations sont désormais possibles et révèlent que si le hasard est minime à la biologie, les régulations qu'il engendre le masquent très souvent.

L'AUTEUR



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

Ce que le vivant doit au hasard

Quelle est la place du hasard en biologie ?

Si la biologie a longtemps ignoré le hasard, cette question reçoit depuis quelques années de nouvelles réponses à toutes les échelles du vivant.

Hasard et mutation, hasard et sélection, hasard et peuplement : impossible de comprendre la dynamique de la biodiversité dans l'espace et le temps sans s'interroger sur la place et le rôle de l'aléatoire dans ses principaux moteurs. Aussi affronte-t-on ces questions depuis plus d'un siècle. Mais à mesure de l'avancée de la génétique, de la biochimie et de la biologie cellulaire, l'importance du hasard à l'intérieur même de la cellule a commencé à poser question : comment les molécules se rencontrent-elles dans le cytoplasme ? Comment se passe-t-il lors des rencontres avec des macromolécules, linéaires comme les acides nucléiques (l'ADN, par exemple) ou en plote comme les protéines ? Et, surtout, l'aléatoire a-t-il une importance biologique ou ne doit-on le considérer que comme un processus strictement physicochimique peu pertinent pour la discipline ?

Depuis une vingtaine d'années, nombre de laboratoires se sont penchés sur le sujet, interrogeant l'aléatoire dans tous les mécanismes moléculaires mis en œuvre lors de l'expression du gène – plus de 700 articles référencés en 2019 ! Impossible, bien sûr, de résumer l'ensemble de ces travaux. Néanmoins, un fait essentiel émerge de cette littérature : le modèle le plus pertinent pour comprendre le jeu de l'aléatoire dans le vivant n'est pas l'opéron lactose, celui-là même qui a permis aux biologistes >

> François Jacob et Jacques Monod d'être, en 1961, les premiers à défricher le mécanisme de la régulation de l'expression des gènes.

On peut s'étonner que le hasard soit au cœur même d'un mécanisme de régulation. Pourtant, dès 1957, c'est-à-dire avant la description complète du modèle, on a découvert que l'aléatoire est un élément essentiel du fonctionnement de l'opéron lactose. Et aujourd'hui, on s'aperçoit que des mécanismes similaires sont à l'œuvre à toutes les échelles du vivant.

TROIS GÈNES SOUMIS À UNE MÊME RÉGULATION

Pour comprendre l'importance de l'opéron lactose, il faut remonter au milieu du ^{XX}^e siècle. Depuis 1940, Jacques Monod s'intéressait à l'« induction enzymatique » chez la bactérie *Escherichia coli*. Au début du siècle, des microbiologistes avaient observé qu'en présence d'une nouvelle substance nutritive, les bactéries étaient capables de produire les enzymes dont elles avaient besoin pour « digérer » (métaboliser) cette substance. Par exemple, en présence

de lactose, le sucre du lait, elles se mettaient à produire de la β -galactosidase, une enzyme qui hydrolyse le lactose en glucose et galactose.

De telles enzymes sont dites « inductibles », tandis que celles qui sont toujours produites sont qualifiées de « constitutives ». Monod cherchait à comprendre comment la présence de lactose déclenchait la synthèse de β -galactosidase. Il fallut attendre la fin des années 1950 pour que son équipe, à l'institut Pasteur, montre que la synthèse de l'enzyme dépendait d'au moins deux gènes. L'un, *LacZ*, était responsable de la production de l'enzyme. L'autre, *LacI*, était lié à la régulation de l'enzyme, car, s'il était muté, l'enzyme devenait constitutive.

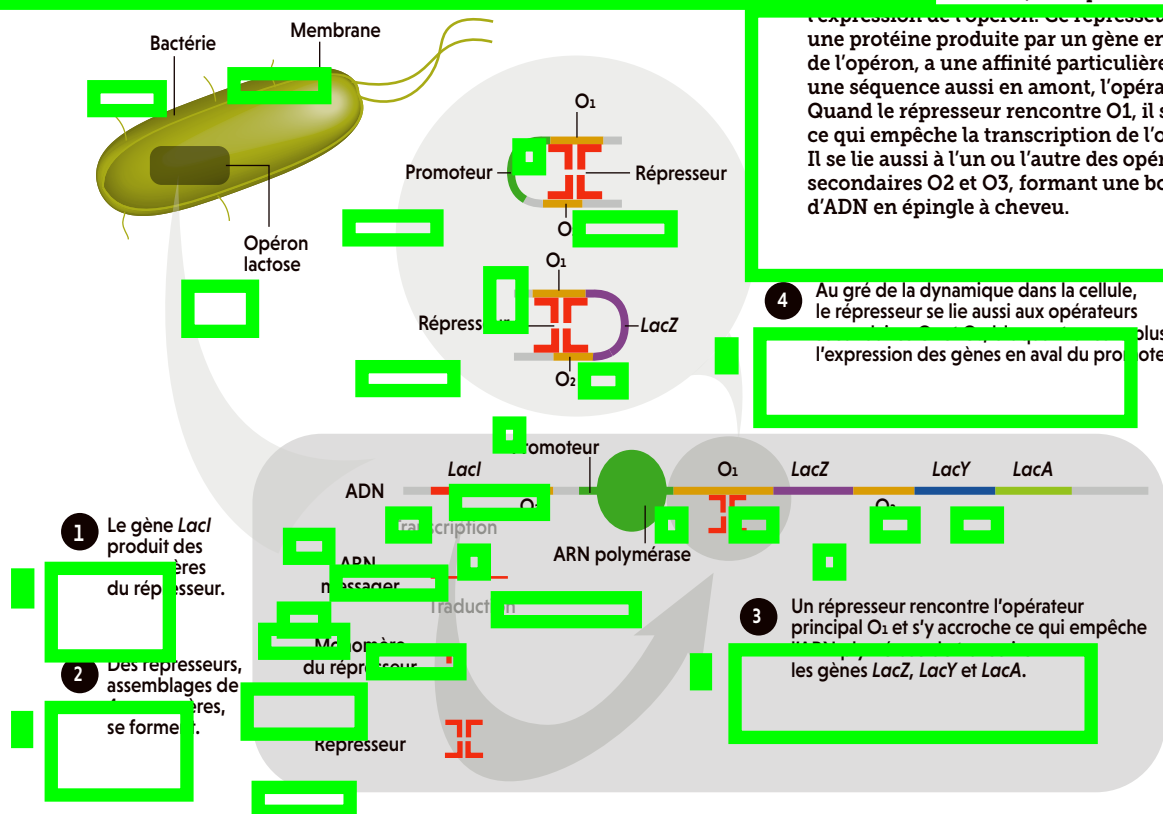
En 1956, l'équipe découvrit la perméase, une enzyme membranaire codée par le gène *LacY* et qui permettait l'entrée et l'accumulation de lactose dans la cellule. Cette enzyme, également inductible, répondait à une régulation qui calquait celle de la β -galactosidase. Et il en était de même pour une autre enzyme découverte trois ans plus tard, la β -galactoside-transacétylease, codée par le gène *LacA*.

LE CONTRÔLE DE L'OPÉRON LACTOSE

L'opéron lactose de la bactérie *Escherichia coli* est un ensemble de trois gènes *LacZ*, *LacY* et *LacA* regroupés et dont l'expression est soumise à une même régulation qui dépend de la présence de lactose en quantité suffisante dans la cellule.

SANS LACTOSE

En l'absence de lactose, un répresseur empêche l'expression de l'opéron. Ce répresseur, une protéine produite par un gène en amont de l'opéron, a une affinité particulière pour une séquence aussi en amont, l'opérateur *O1*. Quand le répresseur rencontre *O1*, il se lie à lui, ce qui empêche la transcription de l'opéron. Il se lie aussi à l'un ou l'autre des opérateurs secondaires *O2* et *O3*, formant une boucle d'ADN en épingle à cheveu.



L'étude de ces trois gènes a révélé qu'ils étaient contigus, formant un « opéron » – un ensemble de gènes regroupés et soumis à la même régulation: après mutation de *LacZ*, les trois enzymes inductibles devenaient constitutives en même temps. Enfin, en 1960, Monod et Jacob comprirent que le gène *LacI* synthétisait une protéine, le répresseur, qui venait se fixer sur une séquence en amont, l'« opérateur ».

En 1961, l'article majeur de Jacob et Monod donna l'explication de l'ensemble du contrôle de l'opéron. En l'absence de lactose, le répresseur se lie à l'opérateur et empêche la synthèse des

trois enzymes. En présence de lactose – « l'inducteur » – le répresseur se détache de l'ADN et autorise ainsi la production des trois enzymes. La β -galactosidase hydrolyse le lactose, tandis que la perméase en permet une entrée massive dans la cellule (voir l'encadré ci-dessous).

Pour la première fois, on comprenait comment l'expression des gènes est régulée. Ou presque. Car dès 1957, deux biologistes de l'université de Chicago, Aaron Novick et Milton Weiner, avaient soulevé une question cruciale pour avoir une compréhension totale de cette régulation: comment, concrètement, l'induction était-elle déclenchée? Cette question en portait une autre, celle du rôle de l'alcétoire dans la régulation de l'expression des gènes.

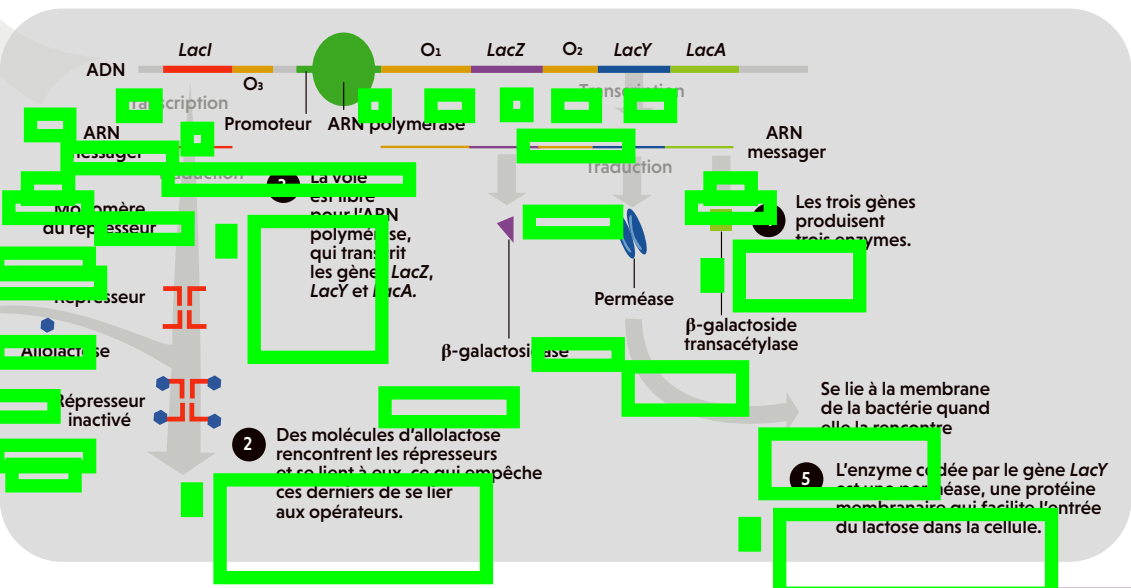
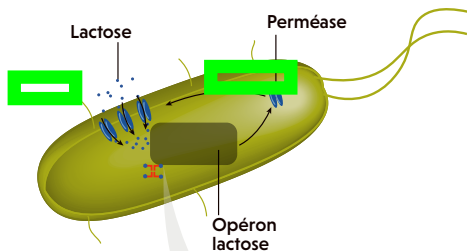
UN PHÉNOMÈNE DE TOUT JOURNIER

Lors d'expériences pour étudier la cinétique de l'induction, l'équipe de Monod avait utilisé comme inducteur non pas le lactose, mais le thio-méthyl- β -galactoside (TMG), un sucre de la même famille qui a l'avantage de ne pas être coupé par la β -galactosidase. C'est ce que Monod a appelé l'induction gratuite, car la molécule ne peut fournir d'énergie à la cellule. Ces >

Pour la première fois, on comprenait comment l'expression des gènes est régulée

AVEC LACTOSE

En présence de lactose, le répresseur se détache de l'ADN, autorisant la transcription de l'opéron, c'est-à-dire la synthèse d'un ARN messager par une enzyme – l'ARN polymérase – qui lit la séquence d'ADN à partir d'une séquence en amont, le « promoteur ». La traduction de l'ARN messager synthétisé donne naissance à trois enzymes. Parmi elles, la β -galactosidase hydrolyse le lactose, tandis que la perméase en permet une entrée massive dans la cellule.



> expériences avaient montré que si l'inducteur était donné à haute concentration, les bactéries synthétisaient vite la β -galactosidase à son taux maximal. Elles avaient aussi révélé que deux processus indépendants étaient impliqués dans l'induction de la synthèse de l'enzyme. D'une part, la concentration de l'inducteur dans les bactéries déterminait la vitesse de production de l'enzyme. D'autre part, la synthèse de la perméase, elle aussi induite par le TMG, augmentait considérablement la concentration de l'inducteur dans les bactéries.

Toutefois, que se passait-il quand l'inducteur était donné à faible concentration? C'est à cette question que Novick et Weiner ont cherché à répondre. On pourrait penser que la production de β -galactosidase croît avec le temps, parce que la concentration interne de l'inducteur augmente au fur et à mesure de la synthèse de la perméase. Or, par des expériences de dilution et de dosage, Novick et Weiner ont constaté qu'une population de bactéries croissant avec une forte concentration d'inducteur est composée de cellules qui soit synthétisent la β -galactosidase à son taux maximum, soit ne synthétisent rien du tout. En d'autres termes, les bactéries sont induites ou non, sans intermédiaire.

LE RÔLE CLÉ DE LA PERMÉASE

Leur explication est la suivante: quand l'inducteur est ajouté au milieu de culture, une bactérie a une probabilité donnée de produire une première molécule de perméase, probabilité peut-être dépendante de la concentration de l'inducteur. Cette perméase entraîne l'augmentation de la concentration interne de l'inducteur. La probabilité de synthèse de la deuxième molécule de perméase devient donc plus élevée. L'induction de la perméase adopte alors un comportement autocatalytique (elle s'autoaccélère) et, peu de temps après la synthèse de la première perméase, la bactérie devient ainsi complètement induite. La transition est si rapide qu'on ne peut trouver de bactéries intermédiaires.

Par ailleurs, la perméase est une protéine membranaire. Ainsi, quand une bactérie induite se divise, les deux cellules filles se partagent les molécules de perméase avec la membrane et restent donc induites. Si l'inducteur disparaît du milieu de culture, l'autocatalyse s'arrête. Comme les bactéries induites croissent plus lentement que celles non induites, elles se diluent dans la culture. De plus, à chaque génération, les perméases membranaires diminuent en nombre jusqu'à disparaître.

L'induction de la β -galactosidase apparaît donc comme un phénomène en tout ou rien, déclenché par un processus aléatoire. La formation de la première molécule de perméase serait l'étape critique: le passage à l'état induit

Un unique événement moléculaire aléatoire détermine le phénotype d'une cellule

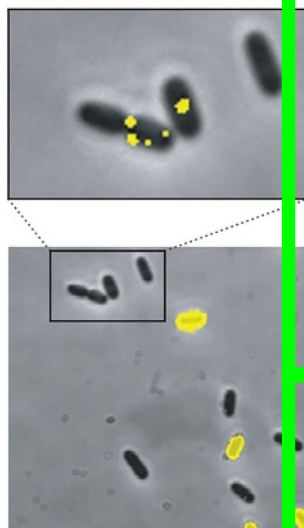
serait la conséquence d'un unique événement moléculaire aléatoire. Une fois induite, la descendance le reste si la concentration de l'inducteur reste à son taux de maintien.

UNE SEULE PERMÉASE

Cependant, il restait une difficulté de taille pour valider le modèle de Novick et Weiner. Toute cette connaissance sur l'expression du gène reposait sur des études de génétique et de biochimie conduites sur de grandes populations de cellules et de molécules purifiées, qui cachaient la nature de l'expression génique d'une seule molécule. Or celle-ci dépend de l'action de macromolécules qui transcrivent l'ADN en ARN messager, lesquelles sont elles-mêmes soumises aux lois du hasard, ce qui signifie que les cellules ne sont pas synchrones. Il est donc indispensable de faire des observations en temps réel dans des cellules isolées.

Pour ce faire, il a fallu attendre la mise au point d'une technique de microscopie offrant la possibilité de détecter une seule protéine dans une cellule unique. Ainsi, ce n'est qu'en 2006 que Sunney Xie, de l'université Harvard, et ses collègues ont repris les études préliminaires de Novick et Weiner. Chez *E. coli*, l'équipe a rendu fluorescente la perméase en fusionnant le gène *LacY* avec celui d'une protéine fluorescente jaune et utilisé une technique lui permettant de détecter et localiser une seule perméase fluorescente. Comme prévu, les chercheurs ont détecté deux phénotypes chez les cellules cultivées avec une concentration élevée d'inducteur. Des cellules – les cellules induites – présentaient des membranes complètement fluorescentes, c'est-à-dire avec un grand nombre de perméases. Les autres étaient celles non induites. Or au lieu de ne porter aucune perméase, plusieurs en présentaient un petit nombre!

Les cellules non induites avaient de zéro à dix molécules, avec une probabilité indépendante de la concentration de l'inducteur. L'hypothèse de Novick et Weiner était-elle

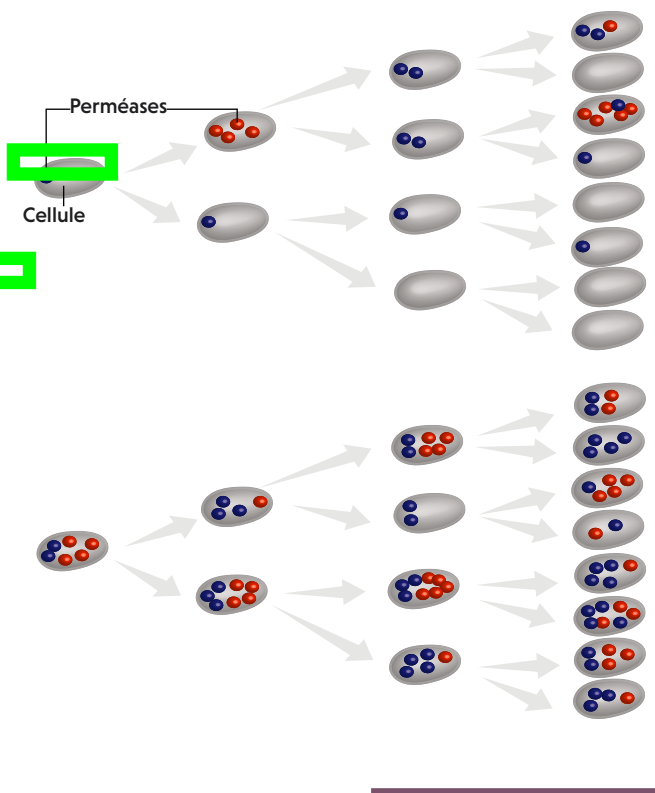


Les techniques actuelles de microscopie permettent de détecter une seule molécule fluorescente dans une cellule. L'équipe de Sunney Xie, à l'université Harvard, a ainsi montré qu'en présence de lactose même des bactéries non induites, c'est-à-dire où l'opéron lactose ne s'est pas exprimé pleinement, portent quelques molécules de l'enzyme perméase (les points jaunes sur le zoom), alors que les induites en ont produit massivement (cellules toutes jaunes).

UN ÉVÉNEMENT ALÉATOIRE, DEUX RÉGIMES

Le modèle de Sunney Xie et ses collègues pour décrire son effet de seuil sur l'induction des bactéries (ci-contre) est très similaire au « test de fluctuation », un test d'origine de la mécanique quantique où l'aléatoire est important : de nouvelles molécules de perméase sont produites par hasard et s'ajoutent à celles déjà présentes (*en bleu*), tandis que chaque division cellulaire dilue leur nombre total. Quand l'opérateur lactose est réprimé, la probabilité de production de nouvelle perméase est faible et les bactéries restent globalement non induites (*en haut*), et inversement (*en bas*). En 1943, le biophysicien Max Delbrück avait utilisé un test de fluctuation similaire pour modéliser des expériences du microbiologiste Salvador Luria visant à trancher entre deux hypothèses sur l'origine des mutations chez les bactéries *E. coli* : étaient-elles induites par le milieu de culture ou spontanées ?

Ce n'est pas le seul parallèle entre les phénomènes d'induction enzymatique et de mutation. Comme Aaron Novick et Martin Weiner l'ont constaté dès 1957, chaque cellule a seulement deux états possibles (induit ou non induit/muté ou non muté). De plus, dans les deux cas, la descendance d'une cellule est dans le même état qu'elle ; enfin, la transition vers l'état induit comme muté est le résultat d'un événement unique aléatoire. Avec une différence majeure, cependant : au contraire de la mutation, l'induction est réversible, car elle nécessite la présence continue de l'inducteur dans le milieu de culture.



mauvaise ? Pour le savoir, l'équipe de Sunney Xie a repris l'ensemble de leur raisonnement, mais en élevant le seuil, c'est-à-dire le nombre de molécules de perméase nécessaires pour passer de l'état non induit à l'état induit. Toutefois, comment déterminer ce seuil tant il est difficile de saisir les rares événements de passage d'un état à un autre ? L'astuce a consisté à partir d'une population de cellules couvrant un large éventail du nombre de perméases. Pour ce faire, l'équipe a induit des bactéries en culture, puis éliminé l'inducteur du milieu. Elle a ensuite attendu six générations, pendant lesquelles les perméases se sont réparties entre les cellules filles au fil des divisions. Puis elle a introduit à nouveau l'inducteur dans le milieu de culture. Résultat : la fluorescence des cellules comportant peu de perméases a continué à décroître. En revanche, celle des bactéries dotées de plus de trois cents molécules s'est mise à augmenter, signe que ces cellules étaient à nouveau induites. Le véritable seuil était donc de trois cents molécules.

LE MYSTÈRE DES VAGUELÈTTES

Avec un tel seuil, cependant, un autre problème émergeait. Comment expliquer à la fois une importante vague d'expression du gène *LacY* pour atteindre le seuil de l'induction, mais aussi des vaguelettes d'une petite dizaine de molécules chez les bactéries non induites ? Pour cela, il a fallu faire appel à toutes les connaissances sur le fonctionnement de l'opéron lactose. Notamment au fait que le

répresseur se fixe non pas à un, mais à deux opérateurs parmi trois, formant une boucle d'ADN (voir l'encadré pages 52-53).

Le raisonnement est alors le suivant. Les vaguelettes seraient le résultat de la dissociation partielle du répresseur et de l'ADN : le répresseur se serait dissocié d'un seul des deux opérateurs. Étant toujours lié à l'autre, le répresseur rétablit rapidement un lien avec celui qu'il a quitté. Par conséquent, la durée de la transcription de l'opéron est brève et peu de perméases sont synthétisées. Au contraire, la dissociation complète du répresseur et de l'ADN serait un événement rare qui déclencherait une importante vague d'expression du gène *LacY*. Le seuil serait alors atteint et la bactérie induite. En effet, un répresseur ayant complètement quitté la molécule d'ADN met beaucoup de temps à rencontrer de nouveau les sites des opérateurs au gré de sa diffusion aléatoire dans la cellule – son « mouvement brownien », puis son glissement le long de l'ADN –, ce qui augmente considérablement la durée de transcription.

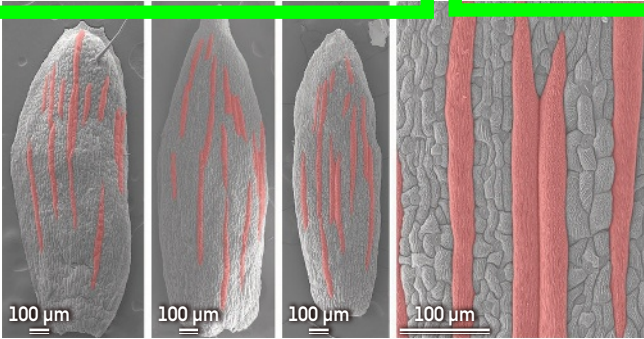
Ainsi, un unique événement moléculaire aléatoire détermine le phénotype d'une cellule. La dissociation partielle du répresseur conduit à de petites vagues d'expression de protéines, tandis que de rares dissociations complètes conduisent à de grandes vagues d'expression de l'opéron. Dans ce modèle, la complète dissociation du répresseur serait l'événement moléculaire aléatoire entraînant le changement de phénotype.

> L'équipe de Sunney Xie a testé ce modèle en 2008. Il lui a suffi d'enlever les séquences des deux opérateurs secondaires. Dans ces conditions, le répresseur ne peut pas organiser de boucle d'ADN et toute dissociation du répresseur et de l'ADN est complète. Comme prévu par le modèle, l'induction a été rapide, même si le nombre de molécules de perméase était inférieur au seuil : enlever la possibilité de boucle d'ADN élimine donc la bistabilité du système.

Dans une deuxième expérience, l'équipe a remplacé le gène *LacY* de la perméase par un gène *Tsr* codant une protéine qui se niche dans la membrane bactérienne, comme la perméase, mais sans en remplir la fonction. De cette même manière, on élimine le rétrocontrôle de la perméase tout en conservant un moyen de

L'épiderme des sépales de la plante *Arabidopsis thaliana* (en bas)

présente de petites cellules (en haut, en gris) et d'autres géantes (en rouge) avec plusieurs noyaux, réparties aléatoirement. L'apparition des cellules géantes dépend de la fluctuation de l'expression d'un seul gène, *ATML1*. Lorsque la production de la protéine qu'il code dépasse un seuil dans une cellule, si celle-ci a engagé une mitose, seul son noyau se divise. Elle devient donc plurinucléée et, corrélativement, géante.



visualiser les vagues d'expression de l'opéron (en fusionnant le gène avec celui d'une protéine fluorescente). Comme attendu, l'équipe a détecté de nombreuses petites vagues de protéines membranaires fluorescentes et de rares grandes vagues.

Enfin, elle a observé le comportement du répresseur – rendu fluorescent lui aussi – quand il rejoint la molécule d'ADN. En revanche, quand il est libre, son mouvement brownien dans la cellule est tel qu'il est impossible de suivre le point de fluorescence. Toutes ces observations lui ont permis de quantifier nombre de paramètres. Par exemple, le temps de recherche de l'opérateur par le répresseur est de l'ordre de 270 secondes, proche des 250 secondes calculées. Chaque petite vague produit un seul ARN messager dont la traduction donne en moyenne entre 16 et 20 monomères de β -galactosidase, soit 4 à 5 enzymes matures (la β -galactosidase est un tétramère).

En 2018, Sunney Xie et ses collègues ont par ailleurs suivi les variations de comportement d'une cellule à l'autre. Ils ont ainsi montré que deux paramètres suffisent pour décrire la dynamique d'un gène : la fréquence des vagues, leur nombre par cycle cellulaire – et la taille de la vague – la moyenne du nombre de molécules produites. Sans oublier bien sûr l'autocatalyse due aux perméases. Ainsi, finalement, leur modèle décrit comment le jeu entre ce rétrocontrôle positif et l'expression aléatoire de l'opéron fait émerger deux états stables, avec une possibilité de transition de l'un à l'autre. La basse fréquence des expressions aléatoires de l'opéron stabilise l'état non induit, tandis que le rétrocontrôle positif stabilise l'état induit.

DE LA CELLULE À L'INDIVIDU

Le plan et le rôle biologique de l'aléatoire dans la dynamique de l'opéron lactose sont donc désormais parfaitement décryptés. Pour cela, il a fallu en avoir la description moléculaire complète. C'est pourquoi l'opéron lactose joue toujours un rôle fondamental. Jacob et Monod concluaient leur article de 1961 par une généralisation de leur modèle au développement et à la différenciation cellulaire des organismes eucaryotes comme les animaux et les plantes. Sunney Xie et ses collègues ont fait le même en postulant que le jeu des régulateurs de transcription lors de l'embryogenèse devait être du même ordre, à savoir des événements aléatoires et des processus de maintien, analogues à l'autocatalyse pour l'opéron lactose. Mais chez les organismes pluricellulaires, ces processus au cours du développement sont plus complexes, puisque les régulations sont spatiotemporelles, alors que pour l'opéron lactose, elles ne sont que temporelles. Or bien plus de systèmes eucaryotes sont décrits avec ce niveau de précision atteint avec l'opéron

En embryologie, jouer avec le temps, c'est aussi jouer avec l'espace

Néanmoins, depuis ces travaux, les études sur l'aléatoire en biologie ont fleuri à toutes les échelles du vivant. Au niveau moléculaire, on s'est ainsi aperçu que des mécanismes similaires à ceux intervenant dans le cas de l'opéron lactose corrélaient l'expression de gènes parfois très éloignés dans le génome. C'est ce qu'ont notamment montré Alain Hénaut, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, et ses collègues, d'abord chez les bactéries *E. coli* et *Bacillus subtilis*, puis chez la bactérie *Sinorhizobium meliloti* en 2008. Ces biologistes expliquent de telles corrélations par les contraintes structurales liées aux processus de compaction et décompaction du chromosome bactérien, lesquelles produisent de grandes boucles d'ADN indispensables pour que la machinerie de la transcription agisse.

À l'échelle cellulaire, d'autres chercheurs tentent d'expliquer le fait que la part d'aléatoire dans l'expression des gènes diffère d'une légende à l'autre. C'est ainsi qu'en 2018, Michael Morgan et John Marioni, de l'université de Cambridge, en Angleterre, ont montré que la composition de la séquence en amont d'un gène (son « promoteur ») influe sur la part d'aléatoire dans son expression : plus les îlots CpG – des suites de deux briques de l'ADN, la cytosine et la guanine – y sont petits, plus l'expression du gène est aléatoire.

À l'échelle de la population de cellules, une piste pour traquer l'aléatoire consiste à regarder ce qui, au cours du développement d'un organisme, peut résulter d'un comportement aléatoire moléculaire. De tels faits ont été relevés autant chez les plantes que chez des animaux. Ainsi, en 2017, une équipe internationale autour de James Locke, de l'université de Cambridge, et Adrienne Roeder, de l'université Cornell, aux États-Unis, s'est intéressée à un étrange problème du développement local d'*Arabidopsis thaliana*, la plante modèle en biologie moléculaire. L'épiderme des sépales présente deux types de cellules. Certaines restent petites, avec un seul noyau, tandis que d'autres deviennent plurinucléées et géantes. Par une

étude très minutieuse, l'équipe a montré que tout dépend de la fluctuation de l'expression d'un gène régulateur de transcription (voir la figure page ci-contre).

On trouve chez la drosophile un phénomène analogue, étudié en 2014 par Robert Johnston et Claude Desplan, à l'université de New York. Pendant le développement de la rétine de l'œil de cet insecte, la fluctuation de l'expression du gène régulateur de transcription *spineless* dans une population de cellules qui se différencient en photorécepteurs détermine à quelles longueurs d'onde ces neurones sensoriels seront sensibles : selon que *spineless* est exprimé ou non, les cellules produisent un type de protéine pigmentaire photosensible ou un autre.

L'EMBRYON. UNE HISTOIRE DE HASARD ET DE TEMPS

Enfin, d'autres chercheurs se demandent comment une organisation peut apparaître, alors que les processus moléculaires sous-jacents sont fondamentalement aléatoires. C'est ainsi qu'en janvier dernier, Chris Wiggins, de l'université Columbia, à New York, et Hernan Garcia, de l'université de Californie à Berkeley, se sont intéressés à la façon dont émerge la segmentation de l'embryon au cours du développement de la drosophile à partir de ce qui se produit dans chaque cellule. Par imagerie et modélisation, leur équipe a montré qu'une bande de cellules est dessinée par le jeu croisé de deux processus moléculaires : l'un module la fréquence des vagues aléatoires de transcription d'un gène régulateur (*even-skipped*), l'autre règle la fenêtre temporelle durant laquelle cette transcription a lieu. Comme pour l'opéron lactose, l'un joue avec l'aléatoire, l'autre sur le moment de la dynamique – et donc sur l'espace puisqu'en embryologie, jouer avec le temps, c'est aussi jouer avec l'espace.

Ainsi un comportement aléatoire des molécules se trouve au cœur des dynamiques cellulaires majeures à toutes les échelles. Mais qu'en est-il à celle des organismes vivants ? On peut penser qu'il en est de même. Toutefois, l'aléatoire est bien plus difficile à déceler à cette échelle. Si parfois on perçoit son rôle dans un processus, dans la majorité des cas, il disparaît derrière les régulations plus ou moins complexes, souvent d'une grande finesse, qu'il a instaurées aux différentes échelles, rendant les phénomènes déterministes.

Il est vraisemblable que les premières entités cellulaires, lors de l'apparition de la vie, étaient sous l'empire du hasard. Mais cette anarchie a été canalisée, régulée, de telle manière que des développements coordonnés répétables ont émergé. Selon l'adage, des chats ne donnent pas des chiens. On touche ici du doigt la clé de toute la biologie : la régulation. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. C. Lammers et al., **Stochastic transcriptional control of pattern formation in embryonic development**, *PNAS*, vol. 117, pp. 836-847, 2020.

H. Ge et al., **Relatively slow stochastic gene state switching in the presence of positive feedback significantly broadens the region of bimodality through stabilizing the uninduced phenotypic state**, *Plos Comput. Biol.*, vol. 14(3), article e1006051, 2018.

A. Riva et al., **Analyzing stochastic transcription to elucidate the mesoderm's organization**, *BMC Genomics*, vol. 9, article 125, 2008.

L. Cai et al., **Stochastic protein expression in individual cells at the single molecule level**, *Nature*, vol. 440(7085), pp. 358-362, 2006.

A. Novick et M. Weiner, **Enzyme induction as an all-or-none phenomenon**, *PNAS*, vol. 43, pp. 553-566, 1957.

L'ESSENTIEL

> Des humains et les autres animaux recourent parfois à la violence pour, notamment, obtenir de la nourriture ou se protéger.

> Une action violente présente un risque pour l'individu. Quels mécanismes neuronaux peuvent alors la déclencher? Les chercheurs ont des pistes.

> Des voies distinctes traitent les menaces immédiates et celles qui nécessitent une réflexion avant de réagir.

> Des anomalies cérébrales apparaissent plus souvent chez les délinquants violents que chez ceux n'ayant pas d'antécédents de violence.

L'AUTEUR



R. DOUGLAS FIELDS
professeur adjoint à l'université du Maryland, aux États-Unis,
et chef de section à l'Institut américain de la santé de l'enfant
et du développement humain, à Bethesda

Dans les rouages cérébraux de l'agressivité

Au-delà de la morale, toute action violente présente un risque pour l'individu. Quels mécanismes neuronaux peuvent alors la déclencher? Les chercheurs ont des pistes.

En 2017, depuis une position embusquée au 32^e étage de l'hôtel Mandalay Bay à Las Vegas, aux États-Unis, un homme isolé a tiré avec de puissantes armes un millier de balles sur une foule de gens allant assister à un concert, tuant 58 personnes et en blessant 869 autres. Après le suicide du meurtrier sur la scène du crime, le cerveau de cet homme a été envoyé à l'université Stanford pour remercier une éventuelle explication biologique à ce drame.

Qu'espéraient trouver les scientifiques lors d'une telle inspection? Aucun test génétique de prédisposition à un comportement de ce type n'est en vue, mais ce type de recherche pourrait aider à mieux comprendre comment le cerveau contrôle la violence. Par ailleurs, en utilisant les mêmes méthodes expérimentales qui ont permis d'identifier des circuits cérébraux responsables d'autres activités humaines complexes, comme la marche, la parole ou la lecture, les neuroscientifiques sont maintenant en mesure de repérer les voies qui sous-tendent les comportements agressifs.

Ces nouvelles découvertes aident à mettre au jour les mécanismes sous-jacents à l'œuvre dans les actes d'extrême violence, comme le massacre de Las Vegas, mais aussi à expliquer l'agressivité au volant, plus courante, et même la réaction instantanée d'une mère à toute menace dirigée vers son enfant.

Dans la nature, la violence physique, parfois mortelle, est au cœur de la lutte pour la survie, et tous les animaux ont acquis une circuiterie neuronale dédiée au comportement agressif.

Lors d'expériences pionnières sur des chats entamées à la fin des années 1940, le physiologiste suisse Walter Hess a découvert au plus profond de l'hypothalamus une région qui, excitée, déclenche une agression violente. Il s'avère que c'est la même région où d'autres pulsions et comportements instinctifs puissants, comme manger, boire ou s'accoupler, sont activés. Lorsque Hess a stimulé cet ensemble de neurones à l'aide d'une électrode insérée dans le cerveau d'un chat docile, le félin s'est instantanément mis dans une grande colère, et a attaqué et tué un autre animal présent dans sa cage.



> Le cerveau humain présente la même structure neurale, appelée «aire d'agressivité hypothalamique». Cette découverte a donné naissance à l'idée largement répandue du «cerveau reptilien», selon laquelle les pulsions primitives chez les humains proviennent d'un noyau neural ancien qui, dans les circonstances appropriées, entraîne un comportement bestial.

DES TECHNIQUES RELATIVEMENT NOUVELLES

Depuis la découverte de Hess, la grande question à laquelle les scientifiques se sont confrontés porte sur les circuits qui alimentent l'aire d'agressivité hypothalamique et qui déclenchent ou répriment une attaque. Des techniques relativement nouvelles – l'optogénétique (une méthode faisant appel à la lumière pour activer ou désactiver des neurones) et des caméras à fibres optiques enfoncées dans le cerveau d'animaux de laboratoire pour observer les neurones qui s'activent lors d'une attaque violente – permettent de répondre à certaines de ces questions. En fait, il est aujourd'hui possible d'identifier les circuits impliqués dans les fureurs et les agressions.

Pour d'évidentes raisons éthiques, une grande partie des travaux sur la circuiterie neuronale des comportements violents ont porté sur les animaux. Il convient d'être prudent dans l'application de la terminologie utilisée dans les études animales aux comportements et aux émotions des humains, mais il existe des parallèles évidents entre la violence chez les humains et chez les autres vertébrés. D'une part, s'engager dans une agression physique est un comportement étroitement régulé qui ne se manifeste qu'en réaction à des types particuliers de menaces perçues.

D'autre part, les humains et les autres animaux adoptent instinctivement des actions violentes, voire mortelles, pour se procurer de la nourriture, protéger leurs petits ou se défendre. Mais pour chacun de ces types d'agression, des connexions neurales distinctes entrent en jeu.

En outre, de nombreuses espèces animales sont très sociales, et l'agressivité a un rôle central dans l'établissement et le maintien de l'ordre social – on peut penser aux bœufs qui luttent en se cognant par la tête pour déterminer lequel d'entre eux s'accouplera avec les femelles. Pour les humains, la peine capitale, l'emprisonnement et le prélèvement forcé de ressources (amendes et révocation de privilèges) sont autant de formes codifiées d'agression visant à maintenir l'ordre social. La défense du territoire, la protection des membres d'un groupe et la compétition sont encore d'autres parallèles qui permettent aux scientifiques d'extrapoler les études portant

sur des animaux de laboratoire et de trouver chez les humains les circuits neuronaux liés aux divers types d'agression.

Sur le plan psychologique, une gamme apparemment infinie de provocations et de motifs peut chez un humain déclencher une agression, mais, du point de vue des neurosciences, seuls quelques circuits cérébraux particuliers sont responsables de ce comportement. Les identifier et comprendre leur fonctionnement est encore une tâche inchevée, mais essentielle: la capacité à agresser violemment, gravée dans notre cerveau par des millions d'années de lutte pour la survie, dysfonctionne trop souvent en réponse à la maladie, aux drogues ou aux désordres psychiatriques, avec des conséquences tragiques.

La décision de recourir à la violence physique est très risquée et, avant qu'une personne ne passe à l'acte, un ensemble de circuits neuronaux complexes s'étendant sur une grande partie du cerveau devient actif.

Pour comprendre la neuroanatomie de l'agression, on peut s'imaginer la structure du cerveau humain comme analogue à celle d'un champignon. La fine peau qui recouvre le chapeau du champignon équivaut au cortex cérébral. Épais d'à peine trois millimètres, le cortex assure les fonctions cognitives supérieures. Il est également impliqué dans l'intégration sensorimotrice (le couplage de perceptions et d'actions) et même dans la

Il est possible d'identifier les circuits neuronaux impliqués dans l'agressivité

conscience elle-même, et il joue un rôle clé dans le comportement ou non.

L'amygdale, structure en forme d'amande située en profondeur sous le cortex cérébral, qui évalue rapidement les entrées sensorielles pour détecter d'éventuelles menaces, serait située au sommet du pied du champignon, là où partent les lamelles qui soutiennent le chapeau. L'amygdale a des liens d'entrée et de sortie très ramifiés qui s'étendent du cortex cérébral à l'hypothalamus. Elle agit comme un



À la fin des années 1920, le Suisse Walter Hess a découvert lors d'expériences sur des chats qu'en excitant avec une électrode une région de l'hypothalamus de leur cerveau, on déclenchait un comportement très agressif.

point de relais central pour les informations sensorielles arrivant au cerveau, ainsi que pour les signaux provenant du cortex cérébral, qui véhiculent les résultats des prises de décision et autres traitements de haut niveau de l'information.

L'hypothalamus, lui aussi situé au sommet du pied, est la région centrale du cerveau qui contrôle inconsciemment les fonctions corporelles automatiques, telles que le rythme cardiaque, la température corporelle, la respiration, les cycles de sommeil, l'attention et la libération d'hormones par l'hypophyse. C'est là que la pulsion émotionnelle prend naissance pour déclencher une attaque. Le tronc cérébral humain, analogue au pied du champignon, est l'endroit où les informations sont transmises du cerveau vers la moelle épinière ou inversement.

Pour représenter cette analogie avec précision, il est important de se rappeler que le cerveau humain a une structure dédoublée, avec des hémisphères gauche et droit séparés. Par exemple, on trouve une amygdale à la fois du côté gauche et du côté droit du cerveau.

De multiples régions qui contrôlent les comportements agressifs permettent au cerveau de réagir rapidement ou plus posément, selon les circonstances, à une menace. La réaction plus posée est cependant la plus complexe des deux, et le cortex préfrontal lui est essentiel.

Dans une étude publiée en 2013, Simone Motta, Newton Canteras et leurs collègues à l'université de São Paulo, au Brésil, ont identifié les détails biologiques de la réaction violente d'une mère lorsque ses petits sont menacés.

Ces chercheurs ont examiné au microscope l'hypothalamus d'une mère ratte juste après qu'un intrus mâle est entré dans la cage où elle se trouvait avec ses petits nouveaux nés, intrusion qui a déclenché une attaque de la part de la ratte. En colorant le tissu cérébral *post-mortem*, Simone Motta et ses collègues ont identifié une protéine nommée « Fos » dans une sous-région de l'aire d'agressivité hypothalamique. Au microscope, cette région semblait marquée à l'encre noire. L'apparition soudaine de Fos, trahie par la coloration noire, était le résultat d'une synthèse rapide de la protéine, sous l'effet des influx nerveux émis par les neurones de l'aire en question.

D'autres équipes de chercheurs ont confirmé ce lien avec le comportement agressif en insérant une caméra à fibre optique dans l'aire d'agressivité hypothalamique chez des souris génétiquement modifiées pour que les neurones émettent des flashes lorsqu'ils s'activent.

Lorsqu'on retirait de l'aire d'agressivité hypothalamique la région en cause, appelée « noyau prémamillaire ventral », avant l'entrée d'un intrus, Simone Motta et ses collègues ont constaté qu'une mère ratte était beaucoup moins susceptible de réagir par une attaque. Mais cela ne modifiait pas les réactions de l'animal à un prédateur tel qu'un chat ou à d'autres menaces.

RÉACTIONS RÉFLÉCHIES OU RÉACTIONS RÉFLEXES

Pour que l'intrusion du mâle active le noyau prémamillaire ventral, l'hypothalamus doit recevoir, traiter et relayer des informations sensorielles sur l'agresseur. Tous les principaux sens entrent dans le cerveau par des voies neurales distinctes : par exemple, les données visuelles arrivent par le nerf optique, l'odorat par le nerf olfactif. Les informations sensorielles entrantes atteignent le cortex cérébral, où elles sont analysées pour extraire les caractéristiques détaillées d'un stimulus, et un signal correspondant à chaque sens est envoyé à une autre région corticale plus spécialisée. Le cortex visuel à l'arrière de la tête, par exemple, va extraire la forme, la couleur et le mouvement d'un objet par rapport au reste du champ visuel, puis transmettre cette information à d'autres régions corticales qui amènent la perception à notre conscience – ce qui permet, par exemple, de reconnaître un visage familier.

Cependant, cette forme complexe de traitement de l'information, qui engage séquentiellement plusieurs régions corticales différentes, comme si l'on construisait une automobile sur une chaîne de montage, prend du temps. Face à une menace soudaine, par exemple un poing serré projeté vers le menton, >

> le temps nécessaire pour traiter l'information visuelle et la percevoir consciemment serait bien trop long pour esquiver le coup.

Aussi, au fil de l'évolution est apparue une voie rapide sous-corticale qui recrute l'amygdale afin de transmettre rapidement les informations sensorielles entrantes aux circuits cérébraux de détection des menaces. Le flux provenant des sens atteint l'amygdale avant qu'il n'arrive au cortex cérébral et à notre conscience, et c'est ainsi que nous pouvons esquiver un ballon de basket perdu qui se retrouve soudainement dans notre champ visuel, pour nous demander ensuite : « Qu'est-ce que c'était ? » Comme un détecteur de mouvement dans un système de sécurité, l'amygdale a détecté un objet qui ne devrait pas être là, et déclenche rapidement une réaction pour faire face à la menace.

Les humains s'appuient fortement sur la vision, mais l'odorat est plus important pour de nombreux animaux. Dans les expériences de Simone Motta, c'est très probablement l'odeur qui alertait chez la mère ratte le néca-

Les sièges neuronaux de la fureur aveugle s'étendent bien au-delà de l'amygdale

nisme de détection de l'intrus mâle, et il est possible que cette information ait été relayée rapidement à l'aire d'agressivité hypothalamique. En examinant l'amygdale au microscope, les scientifiques y ont remarqué deux petites régions clairement colorées indiquant une synthèse de la protéine Fos en réaction à l'intrus. Ces deux endroits de l'amygdale – à l'intérieur du noyau médial – reçoivent des signaux de l'aire olfactive. Or le noyau pré-mammillaire de l'hypothalamus, où est centrée la réaction agressive maternelle, contient des neurones connus pour ne répondre qu'aux odeurs émanant du sexe opposé.

Une autre partie de l'amygdale, le noyau postérieur, présente également de nombreux signes de coloration due à la protéine Fos. Or ses neurones sont dotés de récepteurs d'une hormone, l'aldostérone, dont le stress entraîne la production. Des études sur des rats mâles agressifs ont

montré que ces animaux deviennent dociles lorsqu'on bloque ces récepteurs. Cette observation explique en partie comment divers aspects d'une situation donnée, qu'il s'agisse de stress ou d'autres facteurs, peuvent abaisser le seuil de déclenchement de l'agressivité.

DES EXPÉRIENCES SUR LES HUMAINS

L'objectif de toutes ces études est de déterminer si l'activation ou la neutralisation d'une région particulière du cerveau produit un comportement particulier. Les études sur les animaux, cependant, ne sont pas en mesure de révéler grand-chose sur les sensations ou émotions impliquées dans les comportements observés. Par exemple, stimuler le cerveau d'un rat avec une électrode pourrait induire une douleur entraînant ensuite une réaction violente, et rien n'indiquerait si la réaction résulte directement de l'activation d'un centre cérébral lié à l'agressivité.

Cependant, certaines expériences ont été réalisées sur des sujets humains et ne laissent aucun doute sur le fait que l'amygdale déclenche de violentes émotions. Dans une expérience réalisée dans les années 1960, le neurophysiologiste espagnol José Delgado a stimulé à l'aide d'une électrode l'amygdale droite d'une femme pendant qu'elle jouait paisiblement de la guitare; cette personne a cessé de gratter et de chanter, a jeté l'instrument dans un accès de rage et s'est mise à cogner le mur près duquel elle se trouvait.

Les émotions qui déclenchent un comportement aussi violent l'emportent sur des pulsions contraires comme la peur ou l'humiliation: un attaquant s'expose au risque d'une riposte pouvant le blesser gravement, voire fatalement, tandis que s'il renonce à son agression, il se sentira humilié d'avoir fait face à la menace. De fait, tant chez les rats que chez les humains, les sièges neuronaux de la fureur aveugle, qui déclenchent des comportements violents, font partie d'un vaste réseau neuronal qui s'étend bien au-delà de l'amygdale. Ainsi, sous le cortex, dans le septum – une partie du système limbique –, des chercheurs ont découvert une zone qui s'active lorsqu'une ratte a combattu un intrus afin de protéger ses petits.

Le septum est associé à des réactions émotionnelles intenses, comme une rage explosive, et est également actif durant les rapports sexuels et d'autres activités gratifiantes. Dans les années 1950, les Américains James Olds et Peter Milner ont montré que des rats chez qui on avait implanté des électrodes dans le septum appuyaient jusqu'à épuisement, jusqu'à 5000 fois par heure, sur une barre déclenchant la stimulation électrique des neurones de cette aire cérébrale.

LA NEUROANATOMIE DE L'AGRESSIVITÉ

Amygdale Située en profondeur dans le lobe temporal, cette structure réagit à des événements ayant une forte charge émotionnelle et est impliquée dans la détection des menaces, la peur, l'agressivité et l'anxiété.

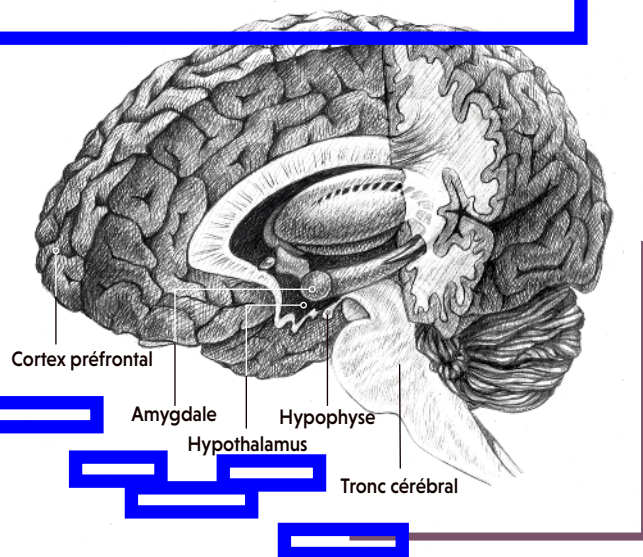
Tronc cérébral Des fibres nerveuses de tout le cerveau et de la moelle épinière passent par cette région. Lors d'un combat, le tronc cérébral contrôle les mouvements réflexes de la tête.

Hypothalamus Ce point de relais de l'information échangée entre le cerveau et la moelle épinière régule la libération d'hormones par l'hypophyse, ce qui maintient les fonctions vitales du corps telles que la régulation de la température, l'alimentation, le comportement sexuel et l'agressivité.

Système limbique Cette région en plein milieu du cerveau relie l'amygdale, l'hypothalamus, l'hippocampe et le cortex cérébral, en fusionnant les émotions, l'apprentissage, la mémoire et la détection des menaces.

Hypophyse Cette structure située au sommet du tronc cérébral et présente en un seul exemplaire libère dans le sang des hormones qui contrôlent la réaction combat-fuite ou l'activité reproductive.

Cortex préfrontal Région du cortex cérébral située à l'avant du cerveau (sous le front), le cortex préfrontal intègre des informations pour prendre des décisions complexes, concentrer l'attention et réguler les pulsions.



Un équivalent de ces expériences a été réalisé avec la participation de sujets humains. Lorsque Delgado stimulait les régions septales de ses patients, ceux-ci étaient soudainement envahis par de fortes émotions sexuelles qui aboutissaient parfois à un orgasme. À tel point qu'une des patientes a même proposé au thérapeute de l'épouser...

Dans des études publiées en 1972 et aujourd'hui considérées comme contraires à l'éthique, le psychiatre Robert Heath, de l'université Tulane, aux États-Unis, a tenté de « guérir » un jeune homme de son homosexualité. Des électrodes implantées dans le septum de ce dernier permettaient aux médecins ou au patient lui-même de fournir une stimulation

neurale qui procurait un plaisir sexuel pendant le visionnage de films pornographiques hétérosexuels ou lors de relations sexuelles avec une prostituée. Heath a rapporté que le sujet s'était stimulé jusqu'à l'euphorie (son orientation sexuelle est toutefois restée inchangée).

Dans la zone du septum qui s'active lors de l'agression d'une mère ratte (le « noyau du lit de la strie terminale »), les neurones présentent des récepteurs de la noradrénaline, un neurotransmetteur impliqué dans les réponses au stress. Cette zone est reliée à l'hypothalamus, où elle contrôle des réponses autonomes et la libération d'hormones telles que l'ocytocine ou la dopamine (un autre neurotransmetteur), lesquelles régulent le stress, l'humeur et l'anxiété; elle reçoit de plus des signaux émis par le cortex cérébral.

LE CORTEX PRÉFRONTAL

PEUT RÉPRIMER UNE PULSION

Car si les circuits de l'agressivité s'activent, ils se réfèrent aussi. Le cortex préfrontal peut inhiber ou stimuler le système limbique, réprimant une pulsion ou déclenchant une action violente fondée sur une réflexion qui s'est construite dans les aires de traitement cognitif de haut niveau. Ce contrôle descendant du cortex préfrontal contraste avec son homologue ascendant, la réaction rapide de type réflexe à un stimulus extérieur soudain, comme lorsqu'on esquivait automatiquement, sans y penser, un ballon perdu. Chez les animaux et les personnes ayant des connexions plus faibles allant du cortex préfrontal au système limbique, le contrôle des pulsions est plus difficile.

Les centres de récompense du cerveau, dont font partie le striatum et le noyau accumbens, où la dopamine agit, constituent un autre élément des circuits de l'agressivité. En effet, de nombreuses drogues entraînant une consommation abusive et de la dépendance, la méthamphétamine et la cocaïne par exemple, augmentent le niveau de dopamine, modulateur de la récompense, et activent ces circuits. De même, lorsqu'un rat mâle réussit à vaincre un intrus pénétrant dans sa cage, l'animal actionne ensuite à plusieurs reprises un levier pour ouvrir le passage à l'intrus et le combattre de nouveau, signe qu'il y a trouvé une certaine récompense. En revanche, si l'on administre une molécule qui bloque l'action de la dopamine, le rat mâle cesse de lancer de nouvelles batailles, ce qui suggère que son agressivité était liée à la récompense ressentie.

L'aspect gratifiant de l'agression, qui englobe notamment les sentiments de supériorité et de domination, sous-tend plusieurs formes de ce comportement, comme l'intimidation ou la violence criminelle psychopathique et brutale. Dans nos sociétés modernes, où nos besoins >

> alimentaires sont fournis par les supermarchés, la gratification qu'il y aurait eue à se procurer soi-même la nourriture (par exemple en le tuant et en tuant une proie) est absente, mais ce manque peut être compensé par le biais d'activités récréatives telles que la chasse et la pêche.

LE SEXE, FACTEUR PRÉDICTIF

Le plus important facteur prédictif d'un comportement agressif est le sexe. Aux États-Unis, selon les statistiques de 2018 du Bureau fédéral des prisons, 93% des détenus sont de sexe masculin. Il existe dans le règne animal une importante corrélation entre l'agressivité et le fait d'être un mâle; la relation entre violence et sexe a un fondement biologique solide. Les influences hormonales sur les circuits neuronaux qui contrôlent le comportement agressif y contribuent fortement, mais la pression sélective exercée sur les mâles, en particulier chez les mammifères sociaux, dont font partie la plupart des primates, a favorisé des attributs qui augmentent la probabilité d'un comportement agressif dans la quête d'un partenaire, d'un statut social élevé, de nourriture et afin de défendre son territoire et son groupe.

David Anderson, de l'institut de technologie de Californie, et ses collègues étudient depuis une dizaine d'années les circuits neuronaux sous-jacents à l'association délicate entre sexe et violence. Leurs recherches ont permis de découvrir une partie du mécanisme qui explique que les mêmes circuits cérébraux puissent être impliqués dans des extrêmes opposés comme l'amour et la haine.

Sur le plan physiologique, plusieurs caractéristiques communes lient l'agression et l'accouplement. Les deux comportements suscitent des états d'intense excitation et, en cas de succès, de puissantes sensations gratifiantes. Dans la nature, agressivité et accouplement sont souvent liés et sont tous deux régis par des conditions environnementales et des états corporels internes similaires. Les animaux mâles, par exemple, sont plus agressifs pendant la saison des amours.

On sait depuis assez longtemps que l'accouplement est également contrôlé par l'axe d'agressivité hypothalamique et que la stimulation par des électrodes placées à cet endroit peut induire une copulation ou une agression. En utilisant la coloration de la protéine Fos pour identifier les neurones très actifs, les chercheurs ont découvert chez la souris que les cellules de l'hypothalamus s'activaient immédiatement après une rencontre agressive ou un accouplement.

Vers 2010, Dayu Lin, qui travaillait dans le laboratoire de David Anderson, avant d'être nommée professeure à l'université de New York, a implanté des microélectrodes dans l'hypothalamus de souris et a découvert que des neurones

s'activaient lors d'un combat ou d'un accouplement: certains neurones s'activaient pendant un comportement et pas dans l'autre, mais certains s'activaient pendant les deux activités. En enfilaient une fibre optique véhiculant de la lumière laser qui activait des neurones génétiquement modifiés à cette fin, Dayu Lin et ses collègues ont incité la souris à attaquer ou à copuler. En faisant varier, grâce au laser, la fréquence d'activation neuronale, ils sont parvenus à basculer d'un comportement à l'autre.

QUEL RÔLE POUR LES ANOMALIES CÉRÉBRALES ?

Peut-on exploiter ces résultats obtenus en laboratoire pour expliquer un massacre? Il s'agit là d'un objectif très ambitieux. Mais un drame qui s'est produit il y a plus de cinquante ans a peut-être déclenché un processus d'investigation susceptible d'éviter, un jour, que de telles situations se reproduisent.

Le 1^{er} août 1966, Charles Whitman, un ancien marin américain souffrant de troubles mentaux, poignarda à mort sa mère et son épouse dans leurs domiciles respectifs avant de se rendre dans une tour de l'université du Texas à Austin, avec une mallette remplie de trois couteaux, sept cents cartouches et sept armes

Physiologiquement, plusieurs traits communs lient agression et accouplement

à feu. Il tua alors 14 personnes et en blessa plus de 30 autres, avant d'être lui-même tué par des policiers. Il laissa une note réclamant que son cerveau soit étudié après sa mort afin de déterminer s'il était mentalement malade.

L'examen médico-légal du cerveau du tueur a révélé une petite tumeur, un glioblastome multiforme, près de l'amygdale. Dans leur rapport, les experts ont concédé: «Il est concevable que la tumeur cérébrale, hautement maligne, ait pu contribuer à son incapacité à contrôler ses émotions et ses actions.» Mais ils n'ont pas été en mesure de déterminer de façon concluante que le cancer avait un lien quelconque avec les meurtres de Whitman ou ses troubles mentaux apparents. >

LES CHEMINS DE LA FUREUR

Dans le cerveau humain, plusieurs voies se croisent, des signaux qui forment

les comportements agressifs

Le « centre d'agressivité hypothalamique » est un centre clé. Elle consiste

en un ensemble de structures où le cerveau reçoit des signaux qui régulent le rythme cardiaque et d'autres réactions

physiologiques précédant un acte violent (A).

A un autre endroit, l'amygdale reçoit des signaux provenant des sens et de l'aire assurant la prise de décision à la surface du cerveau, qui indiquent la présence d'une menace (B).

Le cortex exerce un contrôle sur les pulsions (C).

Les circuits liés à la colère et ceux de la récompense s'interconnectent (D).

Noyau du corps de la strie terminale

Cortex cérébral

Contrôle des pulsions et prise de décision

Cortex préfrontal

Hypothalamus

Hypophyse

Détection de menace

POM

POL

HDM

FM

PM

NA

TO

HP

III

PV

P

PM

HDM

III

HVM

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

Adrénaline et cortisol (réaction combat-fuite)

Fonction régulatoire: rythme cardiaque, pression

combat-fuite

Aire d'agressivité hypothalamique (délimitée par des sillons)

PV

PV

P

PM

HDM

III

HVM

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

III

Hippocampe

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Noyau du corps de la strie terminale

Agmydale

Tronc cérébral

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Glandes surrénales

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Pression artérielle, température corporelle et appétit

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

Hormones de stress

SCHEMATA NEURALES

A Noyau hypothalamique antérieur
F Fornix
FM Noyau préoptique médial
HA Lobe antérieur de l'hypophyse
HDM Noyau hypothalamique dorso-médial

HP Lobe postérieur de l'hypophyse
HVM Noyau hypothalamique ventromédial
M Corps mammillaire
NA Noyau accumbens
NS Noyau supraoptique
P Noyau hypothalamique postérieur

PM Noyau préamillaire
POL Noyau préoptique latéral
POM Noyau préoptique médial
PV Noyau paraventriculaire
TO Tractus optique
III Troisième ventricule

> Après tout, de nombreuses personnes souffrent de lésions ou de tumeurs cérébrales, mais ne deviennent pas pour autant des meurtriers. De plus, des statistiques américaines émanant de l'étude MacArthur sur l'évaluation des risques de violence, publiée en 2001, indiquent que les personnes souffrant de troubles mentaux ne sont pas plus susceptibles que les autres d'être violentes.

Jusqu'à présent, aucune anomalie n'a été signalée dans le cerveau du tueur de masse de Las Vegas, Stephen Paddock, et il est possible que l'on n'en découvrira jamais. Et même si une pathologie se révèle, il sera impossible de prouver une relation de cause à effet entre l'éventuelle anomalie cérébrale et le crime de cet homme. Il est d'ailleurs probable que l'on ne trouvera aucune anomalie dans le cerveau de ce meurtrier.

Les principaux facteurs de risque d'un comportement violent sont la jeunesse, le sexe masculin, la toxicomanie et un statut socioéconomique inférieur. Un tiers des crimes violents commis par des personnes ne souffrant pas de troubles mentaux et sept crimes violents sur dix chez les malades mentaux sont associés à la toxicomanie, selon une étude réalisée en 2003 par Heather Stuart, de l'université Queen's, au Canada. Nos connaissances sur l'altération par l'alcool ou la cocaïne des circuits cérébraux impliqués dans l'agressivité ne laissent guère de doute sur le lien entre la toxicomanie et la violence.

VERS UNE COMPRÉHENSION NOUVELLE

Le comité d'experts ayant examiné le cerveau de Whitman a donné une raison plus large à son incapacité à établir un lien entre la tumeur cérébrale et le crime : tout simplement, on n'en savait pas assez sur le cerveau en 1966. « L'application des connaissances actuelles sur les fonctions organiques du cerveau ne nous permet pas d'expliquer les actions de Whitman le 1^{er} août », note le rapport. « Ce cas illustre de façon dramatique le besoin urgent de mieux comprendre les fonctions cérébrales liées au comportement, et en particulier au comportement violent et agressif. »

L'IRM (imagerie par résonance magnétique) n'existait pas en 1966, et tout le domaine des neurosciences n'en était qu'aux débuts. Des recherches plus récentes utilisant des techniques modernes pour explorer les rouages neuronaux de l'agressivité apportent aujourd'hui des connaissances qui auraient pu aider Whitman à tourner la page de certains aspects de son vécu.

Le psychiatre Bernhard Bogerts, de l'université Otto von Guericke de Magdebourg, en Allemagne, et ses collègues ont utilisé l'IRM et la tomographie par émission de positons pour

Chez les délinquants violents, les anomalies cérébrales semblent plus fréquentes

examiner le cerveau de détenus violents et non violents. Les recherches, publiées en 2013, ont révélé une incidence notablement plus élevée d'anomalies cérébrales chez les délinquants violents que chez les non violents ou dans un groupe de contrôle. Par exemple, 42% des 162 détenus violents présentaient au moins une zone anormale, contre 26% des 125 détenus non violents et 8% des 52 individus du groupe de contrôle. Les anomalies touchaient le cortex préfrontal, l'amygdale ou d'autres régions impliquées dans le contrôle de l'amygdale et de l'hypothalamus.

Les informations recueillies sur les neurocircuits de l'agressivité peuvent offrir une piste vers de nouvelles réponses, mais elles peuvent aussi soulever de nouvelles questions. Tant les gènes que l'expérience vécue guident le développement des circuits neuronaux de façon différente chez chaque individu, ce qui explique la variabilité dans l'intensité et les types d'agressivité observés chez les humains ou les animaux de laboratoire. Le cortex préfrontal n'est pas complètement développé avant l'âge de 20 ans environ chez les humains, et c'est pourquoi la responsabilité pénale des jeunes ne devrait pas être la même que celle des adultes. D'ailleurs, le retard du développement neurologique humain fournit peut-être un début d'explication biologique aux fusillades tragiques qui se déroulent de temps à autre les écoles aux États-Unis (bien que d'autres facteurs, par exemple culturels, interviennent aussi).

Les preuves émergentes d'anomalies neurologiques chez les personnes incarcérées pour comportement violent soulèvent des questions éthiques quant à la culpabilité légale et la nécessité ou non d'inclure, dans l'évaluation psychiatrique des patients, des examens par électroencéphalographie (EEG) et des scanners cérébraux. C'est peut-être ce que recherchait Whitman lorsqu'il a rempli sa mallette et rédigé sa lettre demandant que son cerveau soit examiné après le bain de sang qu'il allait commettre. ■

BIBLIOGRAPHIE

- F. V. Gouveia et al., *Hypothalamus : Historical overview with focus on aggression*, *Neurosurgery*, vol. 85 (1), pp. 11-30, 2019.
- R. D. Fields, *Why We Snap : Understanding the Rage Circuit in Your Brain*, Dutton, 2016.
- K. Schiltz et al., *High prevalence of brain pathology in violent prisoners : A qualitative CT and MRI scan study*, *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, vol. 263, pp. 607-616, 2013.
- S. C. Motta et al., *Ventral premammillary nucleus as a critical sensory relay to the maternal aggression network*, *PNAS*, vol. 110(35), pp. 14438-14443, 2013.
- D. Lin et al., *Functional identification of an aggression locus in the mouse hypothalamus*, *Nature*, vol. 470, pp. 221-226, 2011.

ABONNEZ-VOUS À

POUR LA

SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

3 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER

FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pourlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

4,90€
PAR MOIS

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

-29 %
de réduction*

-31 %
de réduction*

-43 %
de réduction*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

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

PAG20STD

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

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

4,90€
PAR MOIS
-29 %

BPV4E90

☐ FORMULE
PAPIER +
HORS-SÉRIE

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

6,50€
PAR MOIS
-31 %

BPV6E50

☐ 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 %

BPV8E20

2/ Mes coordonnées

Nom :

Prénom :

Code postal : Ville :

Tél. :

E-mail : @
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3/ Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon 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.

Titulaire du compte

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) :

IBAN :

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse – 75006 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 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et 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 communiquées 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 le Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

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

4/ MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Ne rien inscrire

L'ESSENTIEL

À l'époque de notre ère, l'éruption du volcan a enterré les villes de Pompéi et d'Herculanum, faisant disparaître sous des boues volcaniques brûlantes la bibliothèque de papyrus que contenait une riche villa.

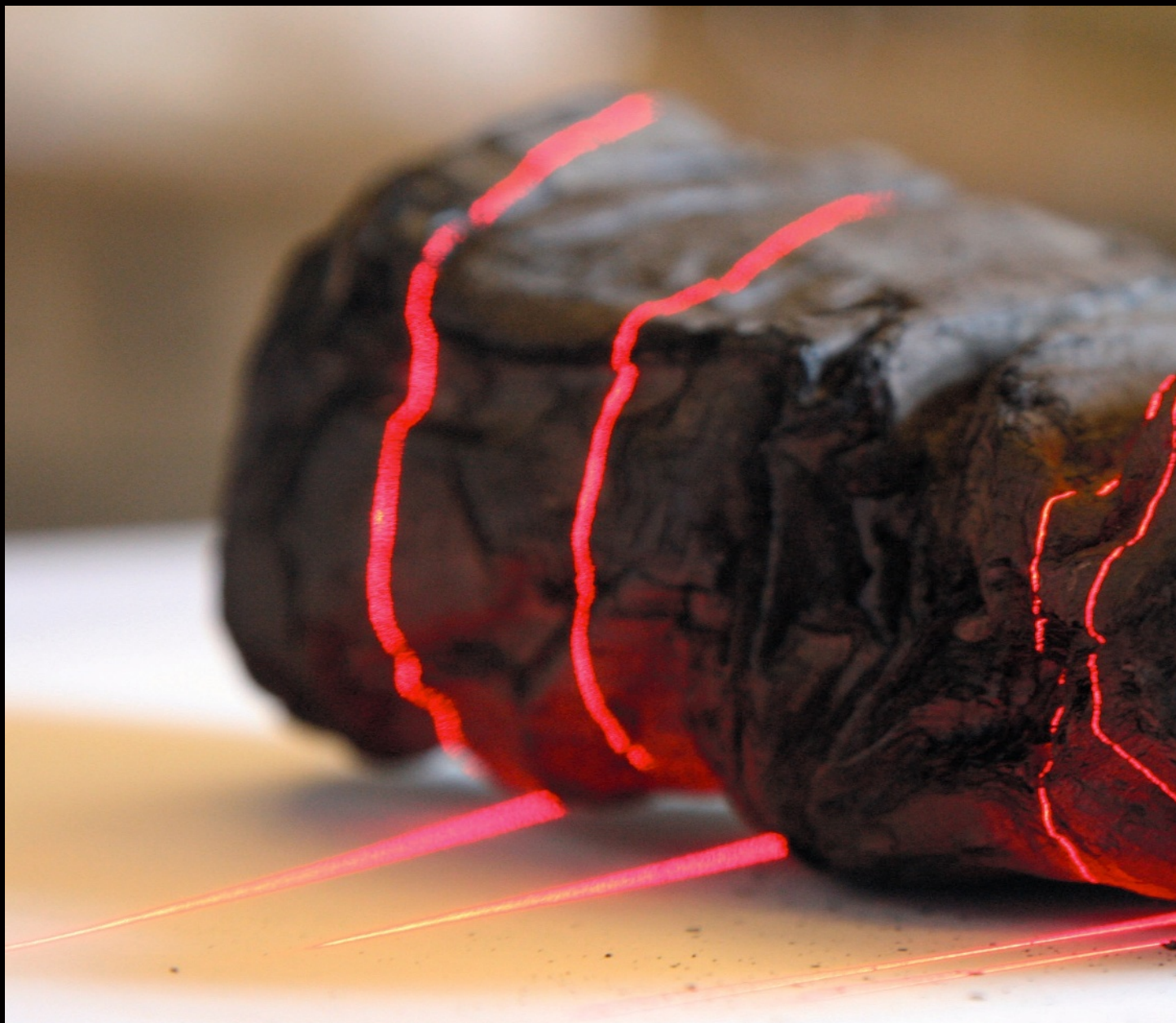
> Les rouleaux de papyrus, découverts il y a longtemps,

sont très carbonisés. On ne peut les ouvrir sans les détruire.

> À l'aide de diverses techniques modernes d'imagerie par rayons X et d'intelligence artificielle, les spécialistes espèrent pouvoir les lire enfin.

L'AUTEUR

FRANK LES HOFFMANN, journaliste scientifique indépendant, basé à Berlin



Lire des papyrus carbonisés?

Au XVIII^e siècle, la fouille d'une villa d'Herculanum a livré quelque 1800 rouleaux de papyrus carbonisés datant de l'Antiquité. Les tentatives de les dérouler en ont détruit beaucoup. Mais avec le développement de méthodes d'imagerie non destructives, l'espoir de les lire renaît.



L'utilisation de lumière laser
aiderait à lire les rouleaux
de papyrus carbonisés
sans risquer de les détruire.

L'ancien palais des Rois de Naples, aujourd'hui la bibliothèque de Naples, abrite l'Officina dei Papiri, c'est-à-dire le « bureau des Papyrus ». On trouve dans ce bureau une collection de magnifiques rouleaux remplis d'atlas et de globes terrestres avant de parvenir à ce bureau où abondent des étagères de bois sombre, des bustes de philosophes et ce qui ressemble à des armures électriques gris-vert. Leur apparence austère est trompeuse, car c'est au sein de ces armures métalliques que l'on conserve un extraordinaire trésor : les papyrus d'Herculanum.

Ces mille huit cents rouleaux de papyrus et autres fragments représentent quelque huit cents ouvrages datant de l'Antiquité ! Malheureusement, ils sont tous carbonisés à un haut degré, car ils proviennent d'une villa proche d'Herculanum qui, en 79 de notre ère, fut ensevelie sous des boues volcaniques brûlantes.

Sur les rouleaux, on distingue parfois des lettres à l'œil nu. On a pu relier certains d'entre eux aux œuvres de philosophes de l'Antiquité ; en revanche, le contenu d'autres reste une énigme. Près de trois cents rouleaux n'ont jamais été ouverts, et personne ne sait comment les dérouler sans les réduire à un tas de fragments de charbon. Depuis la découverte de ces vestiges, au XVIII^e siècle, les experts recherchaient en vain

la bonne méthode à utiliser. Il a fallu deux cent cinquante ans pour que de premières techniques non destructives apparaissent. Elles nous donnent enfin l'espoir d'accéder aux contenus de la seule bibliothèque de l'Antiquité grecque-romaine qui nous soit parvenue.

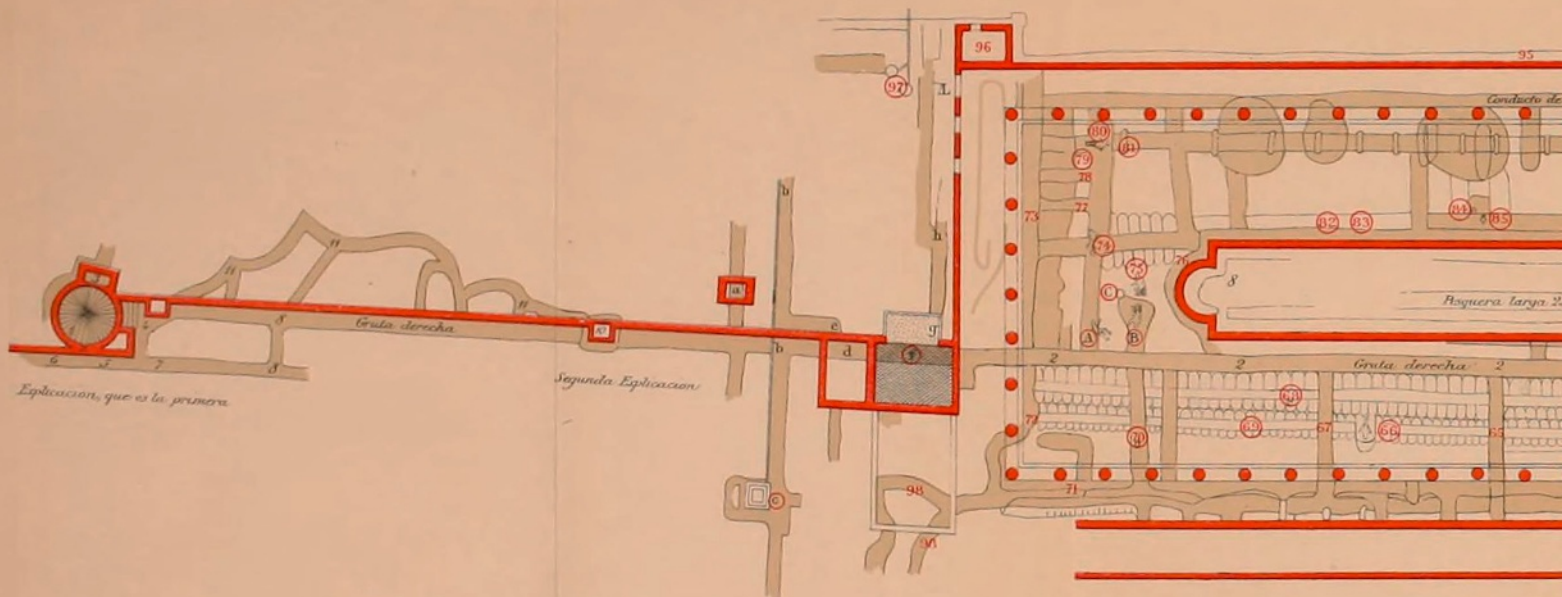
La villa des Papyrus est un grand complexe situé à l'extrémité nord-ouest du port d'Herculanum, face à la baie de Naples. À l'automne 79 de notre ère, elle fut ensevelie au cours de la grande éruption du Vésuve. Alors que Pompéi fut lentement ensevelie sous une pluie de cendres et de pierres ponceuses, Herculanum et la villa des Papyrus, situés directement au pied du volcan, le furent brutalement par des flux de gaz et de particules – des coulées pyroclastiques –, puis par des coulées de boues volcaniques chaudes – des lahars.

BÛCHES DE CHARBON OU PAPYRUS ENROULÉES ?

Cette boue forma vite une couche de roche de 30 mètres d'épaisseur, de sorte qu'Herculanum et la villa tombèrent dans l'oubli. Ce n'est qu'au milieu du XVIII^e siècle que de premières trouvailles les rappelèrent au souvenir des hommes. En 1750, en effet, des puissances découvrirent une mosaïque : le sol de la villa. Dans les années qui suivirent, Charles de Naples et de Sicile (et roi d'Espagne)

Mesurant 253 par 32 mètres, la villa des Papyrus, située dans l'agglomération d'Herculanum, était celle d'une riche famille romaine. Au XVIII^e siècle, l'ingénieur suisse Charles Weber établit son plan d'après les observations faites depuis les tunnels creusés à l'époque pour l'explorer.

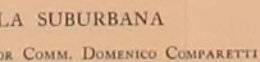
©Herculanum, past, present & future, Ch. Waldstein et L. Knollys-Haywood, ed. Macmillan and Co., 1908, University of California Libraries



PLAN OF THE VILLA
REPRODUCED BY PERMISSION OF PROFESSOR

Nous ne saurons jamais combien exactement de livres antiques avaient déjà été perdus. Mais Daniel Delattre, chercheur émérite à l'Institut de recherche et d'histoire des textes, à Paris, estime qu'une petite cinquantaine d'ouvrages ont pu être gâchés par les effets de cette méprise. Le drame: les carnets de fouilles d'Alcubierre ne documentent guère la découverte des cylindres; les endroits où ils furent trouvés, par exemple, ne figurent pas dans ces carnets, ce qui explique que les générations suivantes d'archéologues n'ont guère porté l'ingénieur militaire espagnol dans leurs cœurs...

Ce succès n'empêche pas que les méthodes essayées depuis le XVIII^e siècle – toutes des méthodes mécaniques – détruisaient plus qu'elles >





> n'obtenaient de résultats. Elles ont réduit des centaines de rouleaux à des puzzles dont les pièces, stockées dans le bureau des Papyrus, se dégradent petit à petit. Dans les certaines des boîtes où ils sont conservés, les plus beaux morceaux de carbone sont suspendus tels des aimants d'insectes à un support en carton. Dans d'autres, on reconnaît les contours de fragments dans la vieille colle, à côté des fins débris de papyrus en lesquels ils se sont décomposés.

UNE BIBLIOTHÈQUE ÉPICURIENNE ?

Dans la salle de lecture du bureau à Naples, les papyrologues étudient aujourd'hui les fragments déroulés à l'aide de stéréomicroscopes. Dans la plupart des cas, constatent-ils, les fragments sont constitués de plusieurs couches fusionnées, certaines dans un état catastrophique. « Il faut les tenir à contre-jour et les bouger quelque peu afin de distinguer les reliefs », explique Daniel Delattre. Auteur de certaines reconstitutions faisant autorité, Daniel Delattre travaille actuellement au bureau des Papyrus sur une copie relativement lisible. Au microscope, l'encre semble presque palpable.

À partir des fragments, les papyrologues n'ont jusqu'à présent reconstitué généralement que des lettres isolées et des morceaux de phrases. Les textes cohérents sont rares. Il semble cependant que l'on puisse attribuer la plus grande partie de la bibliothèque à un seul philosophe : Philodème de Gadara, un Stoïcien hellénisé connu pour avoir romanisé la pensée épicurienne.

De fait, Philodème a principalement écrit sur l'enseignement d'Épicure (341-270 avant notre ère). Les épicuriens trouvaient la place de

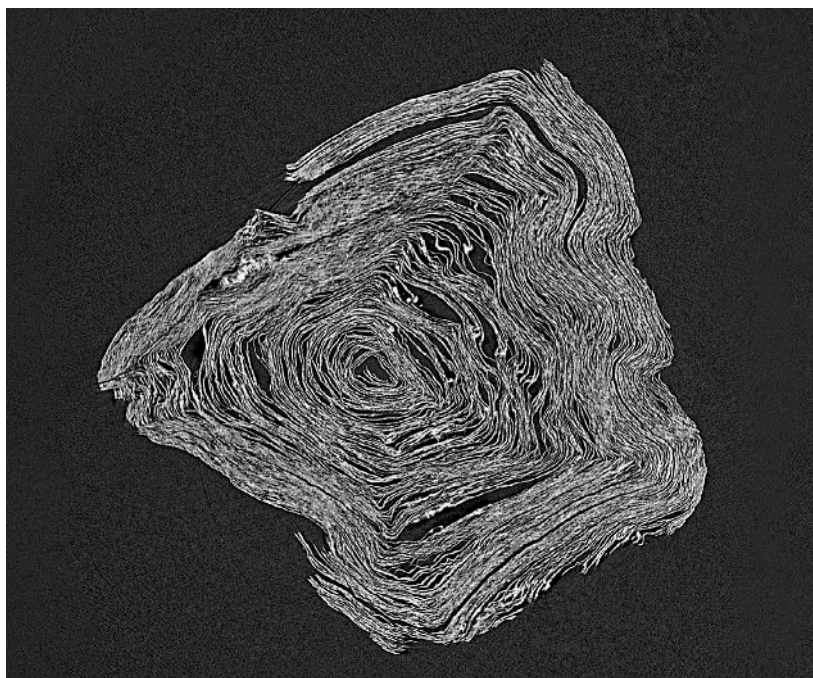
l'âme dans l'idée que les dieux existent, mais ne s'occupent pas des humains. Découverte dans la villa des Papyrus, la statue d'un Mercure au repos (voir l'illustration page 74) montre clairement que le messager des dieux n'a rien à faire... La philosophie épicurienne inclut l'atomisme de Démocrite, qui vécut dans la seconde moitié du V^e siècle avant notre ère et qui émit la première théorie d'un monde discontinu, fait de vide et d'atomes. Pour les épicuriens, l'Univers ne consiste en fait qu'en mouvements, regroupements et collisions de petites particules invisibles et indivisibles.

La tradition épicurienne et atomiste, comme du reste presque toute la littérature antique, est malheureusement largement perdue. Les chiffres varient mais, pour certains experts, guère plus de 0,1 % des livres préchrétiens nous seraient parvenus.

Dès lors, on comprend l'importance cruciale que pourraient revêtir les trois cents rouleaux de papyrus d'Herculanum encore complets, mais toujours illisibles. Ce sont les spécimens les plus carbonisés qui ont échappé au couteau de Camillo Paderni et à la machine d'Antonio Piaggio. Ces formes noires, faisant penser à la trompe retroussée d'un éléphant (voir la photo ci-dessus), sont si fragiles qu'elles ne laissent guère d'espoir de pouvoir les lire un jour. Mais ces dernières années, plusieurs nouvelles méthodes non destructives ont été développées afin de visualiser l'intérieur des rouleaux carbonisés. Vont-elles nous donner enfin accès au monde intellectuel perdu de l'Antiquité ?

En 2015, une équipe dirigée par Daniel Delattre et Vito Mocella, de l'Institut de microélectronique et des microsystèmes, à Naples, a fait connaître une nouvelle méthode,

Froissé par la chaleur ou le manque de soin, ce rouleau de papyrus carbonisé conserve à l'Institut de France ressemblance à une trompe d'éléphant retroussée.



Souvent, les fragments produits par l'ouverture mécanique

des rouleaux de papyrus d'Herculaneum, comme celui ci-dessus, sont constitués de plusieurs couches collées, dont chacune porte une fraction de texte. Ci-dessus à droite: la radiographie en coupe du papyrus d'Herculaneum de Paris n° 4.

vite considérée comme une percée. Fondée sur les rayons X, elle vise à mesurer les minces

reliefs créés par l'encre sur le papyrus. En l'adoptant, les chercheurs espèrent contourner le problème dont souffraient toutes les tentatives de lecture par les rayons X: l'omniprésence du carbone dans la masse des rouleaux.

En effet, les auteurs anciens utilisaient une encre essentiellement composée d'un liant et de carbone (suie ou charbon de bois). Même avec les meilleurs appareils à rayons X, les chercheurs ne sont pas parvenus jusqu'à présent à distinguer le carbone de l'encre de celui du papyrus carbonisé. Toutefois, ils ne se sont concentrés que sur le «contraste d'absorption», le principe exploité en radiographie médicale et dans les scanners à rayons X: l'absorption plus ou moins importante des rayons X selon la densité du matériau traversé. Daniel Delattre et Vito Mocella se sont demandé si l'on pouvait distinguer le petit pointicule d'encre séchée en exploitant le contraste de phase, c'est-à-dire en détectant les déphasages (la phase d'une onde caractérise à quel stade se trouve le cycle suivi par son amplitude) entre les rayons X qui traversent des milieux différents en nature ou en épaisseur.

L'avantage décisif de la tomographie par contraste de phase est la possibilité de produire des images même quand le contraste d'absorption est très faible. L'inconvénient est que pour produire le rayonnement X nécessaire, il faut une énorme machine: un accélérateur de particules. Afin de pouvoir déterminer précisément les déphasages, il faut en outre disposer d'une source X de qualité laser, en d'autres termes une source de lumière X monochromatique (un rayonnement X de longueur d'onde unique).

Les synchrotrons, où des électrons décrivent à grande vitesse une trajectoire circulaire et émettent de ce fait un rayonnement dans la direction tangente, fournissent de telles sources de rayons X. Les chercheurs s'en sont servi pour balayer ligne par ligne l'un des rouleaux d'Herculaneum. Le procédé a permis d'obtenir des images de l'intérieur froissé du rouleau. La structure la plus évidente qui est alors apparue est l'entrecroisement des fibres végétales constituant le papyrus. Au cours de la fabrication de ce papier de l'Antiquité, la moelle des tiges du papyrus (*Cyperus papyrus*) était en effet coupée en bandes, qui étaient ensuite entrecroisées et pressées. Dans leur article de 2015, Daniel Delattre et Vito Mocella affirment avoir reconnu une série de lettres: des structures isolées très floues. S'agit-il vraiment de lettres ou les chercheurs n'ont-ils eu que l'illusion de trouver ce qu'ils attendaient? Depuis la publication de ces travaux, la question est vivement débattue au sein de la petite communauté des papyrologues.

LE PLOMB REND L'ENCRE VISIBLE

En 2016, Daniel Delattre et Vito Mocella participèrent à un nouveau projet promettant d'améliorer sensiblement la tomographie par contraste de phase appliquée aux papyrus: utiliser la spectrométrie de fluorescence aux rayons X. La fluorescence X est le fait que certains atomes, excités par les rayons X, émettent ensuite un rayonnement de fréquence caractéristique. Par spectrométrie de fluorescence aux rayons X, les chercheurs ont pu démontrer, à l'aide des rayons X fournis par le synchrotron européen ESRF (European Synchrotron Research Facility), à Grenoble, >

> que l'encre de deux minuscules fragments de papyrus conservés à l'Institut de France, à Paris, contient du plomb.

On ignore la raison de cette présence de plomb, mais selon les chercheurs, tout indique qu'elle n'est pas accidentelle. On peut donc s'attendre à ce que l'encre des papyrus d'Herculanum contienne du plomb, ce qui pourrait grandement aider à lire les rouleaux. En effet, au-delà d'un certain seuil de concentration, le plomb est une très bonne source de contrastes (en densité, en déphasage...) aux rayons X. Quand le faisceau X d'un synchrotron est réglé sur la longueur d'onde que le métal lourd absorbe le mieux, il devient possible d'obtenir une image de sa distribution spatiale et donc de celle de l'encre. Mais pour l'heure, nul ne sait si l'encre des centaines de rouleaux encore scellés contient du plomb et, le cas échéant, à quelles concentrations.

Au cours de l'été 2019, les principaux experts en papyrus se sont réunis en conférence à Lecce, en Italie, afin de discuter de ces avancées. Vito Mocella en a profité pour présenter à ses collègues une autre nouvelle méthode d'imagerie. Cette variante suppose aussi une certaine teneur en plomb de l'encre et exploite aussi le rayonnement synchrotron. On

utiliserait deux têtes de mesure indépendantes afin de produire des images stéréoscopiques (de la même façon que deux yeux permettent de percevoir le relief) de la fluorescence du plomb lorsque le faisceau de rayons X sonde un point donné à l'intérieur d'un rouleau.

FLUORESCENCE X.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE...

La fluorescence X de la plupart des éléments est un rayonnement de basse fréquence, qui ne peut s'échapper de l'intérieur d'un rouleau de papyrus, mais ce n'est pas le cas avec des noyaux atomiques lourds tels que le plomb. Soumis aux rayons X énergétiques du synchrotron, les noyaux de plomb émettent un rayonnement qui atteint les têtes de mesure sans être absorbé. La présence de plomb dans l'encre est donc une chance, qui pourrait rendre possible l'emploi de la «tomographie confocale par fluorescence».

La mise en évidence de plomb au sein d'autres fragments de papyrus d'Herculanum annoncée par une équipe de l'Institut fédéral de recherche et d'essai des matériaux, à Berlin, autour d'Olivier Bonnerot et Ira Rabin, est donc une découverte bienvenue. Les concentrations mesurées varient considérablement, mais la présence de plomb dans l'encre d'Herculanum semble désormais plus certaine.

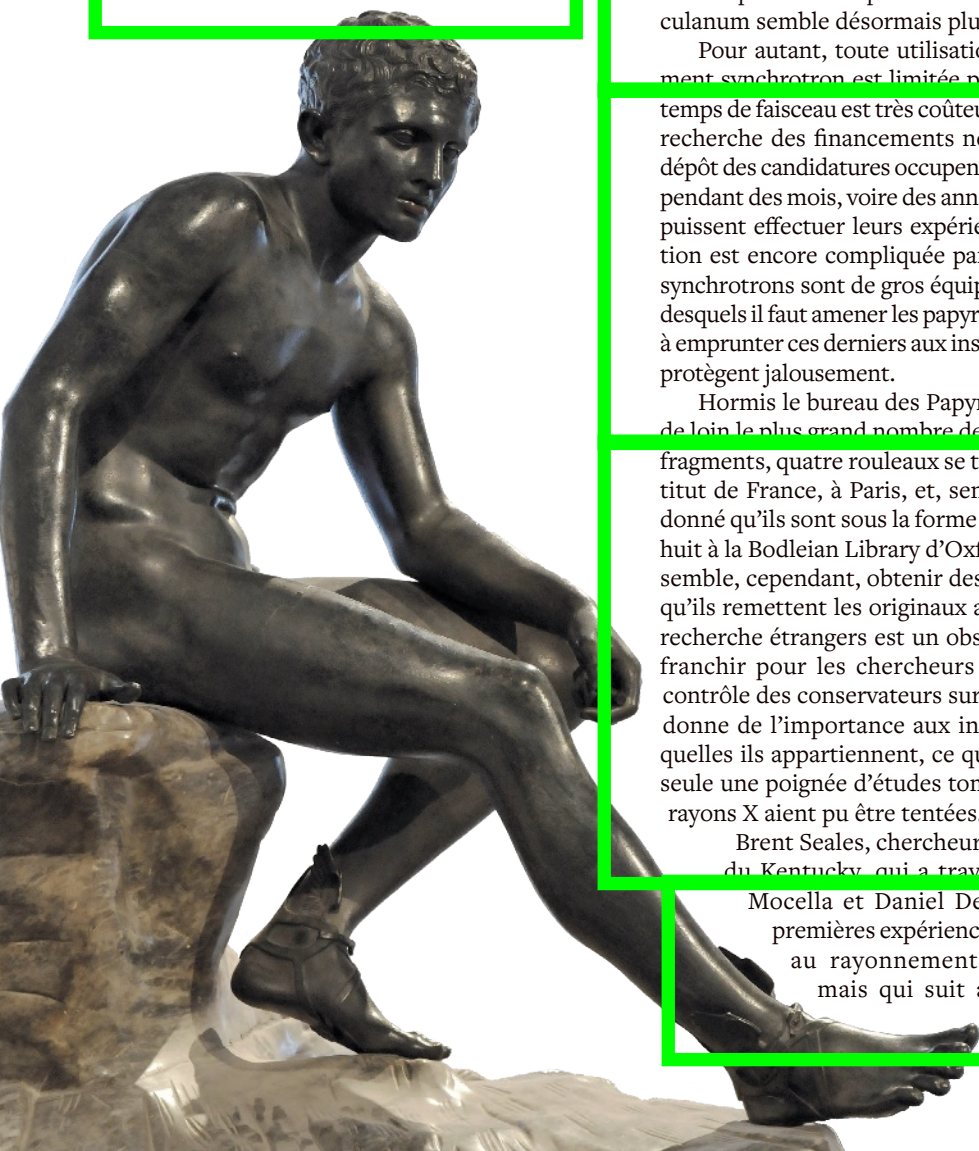
Pour autant, toute utilisation du rayonnement synchrotron est limitée par le fait que le temps de faisceau est très coûteux, tandis que la recherche des financements nécessaires et le dépôt des candidatures occupent les chercheurs pendant des mois, voire des années, avant qu'ils puissent effectuer leurs expériences. La situation est encore compliquée par le fait que les synchrotrons sont de gros équipements auprès desquels il faut amener les papyrus, ce qui oblige à emprunter ces derniers aux institutions où ils sont protégés jalousement.

Hormis le bureau des Papyrus, qui détient de loin le plus grand nombre de rouleaux et de fragments, quatre rouleaux se trouvent à l'Institut de France, à Paris, et, semble-t-il (étant donné qu'ils sont sous la forme de fragments), huit à la Bodleian Library d'Oxford. Dans l'ensemble, cependant, obtenir des conservateurs qu'ils remettent les originaux aux instituts de recherche étrangers est un obstacle difficile à franchir pour les chercheurs intéressés. Le contrôle des conservateurs sur leurs rouleaux donne de l'importance aux institutions auxquelles ils appartiennent, ce qui explique que seule une poignée d'études tomographiques aux rayons X aient pu être tentées.

Brent Seales, chercheur de l'université du Kentucky, qui a travaillé avec Vito Mocella et Daniel Delattre lors de ses premières expériences faisant appel au rayonnement synchrotron, mais qui suit aujourd'hui sa

Cette statue d'Hermès trouvée dans la villa des Papyrus en 1758

masse fidèle épicurienne sur laquelle les dieux ne s'occupent pas des humains : le messager de dieux, qu'est Hermès est assis et semble n'avoir rien à faire.



propre voie, était ostensiblement absent lors de la conférence de Lecce. En mai 2019, son équipe a publié des travaux fondés sur l'intelligence artificielle.

Menés par Clifford Seth Parker, lui aussi de l'université du Kentucky, ces chercheurs se sont servi de répliques de papyrus pour entraîner un réseau de neurones artificiels (l'une des techniques de l'intelligence artificielle) à reconnaître l'encre déposée sur les papyrus. À l'aide de cet « apprentissage profond », le réseau neuronal parvient à reconnaître l'encre de papyrus même à partir de données produites par des microtomographies à rayons X industriels.

Les microtomographies, images tridimensionnelles de haute résolution, produites par ces machines contiennent ainsi des informations subtiles sur les différences structurelles entre l'encre et le papyrus. En raison du manque de contraste, ces différences ne sont pas visibles sur les images, mais l'algorithme d'intelligence artificielle finit cependant par obtenir des informations utiles, à condition qu'il ait pu être entraîné avec suffisamment d'exemples de « contrastes morphologiques » liés à l'encre.

Ces essais ont pour le moment seulement démontré que le logiciel reconnaît de l'encre déposée en plusieurs couches, mais son principe n'en est pas moins prometteur. En octobre 2019, lors d'une conférence à Milan, Brent Seales a annoncé que son algorithme a été en mesure de reconnaître une petite lettre apparente sur un fragment de papyrus, à partir de sa microtomographie.

Le chercheur a aussi utilisé le rayonnement synchrotron, plus efficace, pour examiner pour la première fois des rouleaux de papyrus de Herculanum. Pour qu'il puisse les étudier à la Diamond Light Source, un synchrotron des environs d'Oxford, en Angleterre, l'Institut de France lui en a prêté deux. Les subtils signaux à analyser devraient se révéler davantage détectables dans les tomographies réalisées avec le synchrotron qu'avec un microtomographe. L'exploitation des données prendra plusieurs mois, d'autant que le développement de l'algorithme de lecture, qui doit être entraîné avec une énorme quantité d'exemples, est loin d'être terminé.

Savoir si les rouleaux de papyrus récupérés pourront être lus par l'une des méthodes non destructives joue un rôle déterminant dans la discussion sur l'opportunité de continuer à fouiller la villa des Papyrus. Les fouilleurs d'Alcubierre avaient trouvé les documents en partie dans de petits coffres et en partie dans des *capsae*, des boîtes servant à leur transport. Certains se trouvaient au sol, ce qui est peut-être lié à la façon dont l'avalanche de boue a pénétré les pièces. La plupart furent toutefois découverts sur les étagères équipant les murs d'une petite pièce dépourvue de fenêtre.

À la fin du XVII^e siècle, l'ingénieur suisse Karl Weber a relevé les tunnels et établi le plan d'un étage de la villa (voir la figure page 70-71). Les emplacements présumés des découvertes y sont notés. Il est évident qu'on ne lisait pas les papyrus dans la petite pièce. Les salles de lecture et les salles de stockage des ouvrages devaient donc être séparées. Les rouleaux qui venaient d'être lus se trouvaient probablement dans des *capsae* ou des commodes meublant les pièces éclairées. L'existence d'une salle contenant plus de cinquante chaises disposées en demi-cercle – une salle de réunion sans doute – va dans ce sens.

LA BIBLIOTHÈQUE TOUJOURS SOUS TERRE ?

On suppose aujourd'hui que la plupart des textes – ceux rédigés en grec et relatifs à Philodème – furent découverts dans la petite réserve, tandis que les textes latins le furent dans des *capsae* au sein des salles de lecture. Les différences observées dans les états de conservation des différents rouleaux plaident en ce sens. La petite salle était donc peut-être une sorte d'archive commémorative de Philodème, un centre philologique pour les érudits. De fait, certains des livres de Philodème y étaient disponibles dans des versions similaires. Certains textes comportent aussi des commentaires éditoriaux, ce qui suggère qu'il s'agit des premiers jets de Philodème, même si celui-ci est mort plus d'un siècle avant l'éruption du Vésuve.

En même temps, d'autres indices suggèrent que la bibliothèque principale, celle dont provenaient les textes contenus dans les *capsae*, n'est pas encore découverte. Les fouilles menées dans les années 1990 ont mis au jour deux étages supplémentaires, inconnus en 1750. La plus grande découverte de textes antiques jamais faite depuis la Renaissance nous attend-elle dans la boue pétrifiée qui remplit cette partie du bâtiment ?

En 1999, le surintendant de l'administration des biens culturels, Pier Giovanni Guzzo, a stoppé les fouilles en arguant que les travaux sur les rouleaux déjà exhumés étaient prioritaires. Le chantier de fouille est donc à l'arrêt, mais il a créé une tranchée de 30 mètres de profondeur, qui est aujourd'hui menacée de remplissage par la nappe phréatique. Des pompes ont été installées. Reste à savoir si cela protégera de l'eau la bibliothèque située dans la roche adjacente, si elle existe, et aussi à savoir si l'on pourrait ménager un tunnel pour atteindre les livres en bois.

Il y a quelques années, Pier Giovanni Guzzo a fait savoir que l'on essaierait des « méthodes de sauvetage non conventionnelles ». Rien n'est produit cependant, avec l'argument que si la bibliothèque est en sécurité, mieux vaut la laisser tranquille. Pour le moment, après tout, les rouleaux exhumés continuent à se décomposer et l'on ne sait toujours pas les lire... ■

BIBLIOGRAPHIE

C. S. Parker et al., **From Intensity to Reliability: Recovering the Ink of Herculanum**, *Plos One*, vol. 14(5), e021 5775, 2019.

P. Tack et al., **Tracking Ink Composition on Herculanum papyrus scrolls: Quantification and speciation of lead by X-ray based techniques and Monte Carlo simulations**, *Scientific Reports*, vol. 6, article 20763, 2016.

V. Mocella et al., **Revealing letters in rolled Herculanum papyrus by X-ray phase contrast imaging**, *Nature Communications*, vol. 6, article 5895, 2015.

B. Seales, **Lire sans attendre les papyrus carbonisés d'Herculanum**, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres*, vol. 153(2), pp. 907-923, 2009.



L'urubu à tête rouge *Cathartes aura*, tel que le voyait Jean-Jacques

Audubon dans *The Birds of America* (1840). Ce vautour fut au cœur de la controverse autour de l'odorat des oiseaux qui opposa l'ornithologue à l'explorateur Charles Waterton.

L'ESSENTIEL

Strabon et Plin l'Ancien pensaient que les oiseaux ont un odorat, les naturalistes du XIX^e siècle étaient beaucoup plus sceptiques.

> Il fallut attendre 1964 pour qu'un ornithologue prouve que l'arabida à tête rouge repère bien les cadavres à l'odeur...

> ... Et encore plusieurs dizaines d'années pour découvrir que certains oiseaux sont même capables de retrouver leur nid à des centaines de kilomètres grâce à leur odorat.

L'AUTEUR



BENOÎT GRISON
enseignant-chercheur
au CNRS Sciences et techniques,
à l'université d'Orléans

Du flair de Waterton à l'odorat des oiseaux

Les vautours repèrent-ils les carcasses à l'odeur? En 1826, cette question fut le point de départ d'une controverse qui ne trouva son dénouement que ces dernières années.

Au début de son film *Les neiges du Kilimandjaro* (1952), le classique hollywoodien adapté de Hemingway, Henry King met en scène Gregory Peck dans le rôle d'un écrivain débauché, grand amoureux de l'Afrique. Victime d'un accident de safari, ce dernier est bloqué dans un camp de brousse, dans l'attente d'un avion qui tarde à venir. Sa jambe blessée risquant de se gangrener, il croit bien sa dernière heure venue... Et de contempler d'un œil impavide les vautours rôdant à proximité de sa tente, tout en s'adressant à sa compagne (Susan Hayward): «Des sales bêtes! Je me demande s'ils sont guidés par leur odorat ou par leurs yeux.»

C'est cette même interrogation qui a été débattue – quoique dans un contexte moins dramatique – les naturalistes puis les biologistes du comportement durant quelque deux siècles. Si cette controverse est en train de se dénouer aujourd'hui, elle en dit long sur les présupposés et biais cognitifs de certains chercheurs qui font parfois obstacle à des avancées scientifiques.

De fait, la majorité des ornithologues attendait durablement les oiseaux pour des créatures

dépourvues de tout odorat, «anosmiques» ou presque. Mais ces dernières décennies, des découvertes étonnantes ont démontré que beaucoup d'espèces aviennes ont «du nez», cette capacité perceptive jouant même un rôle crucial dans maints aspects de leur biologie.

D'AUDUBON À DARWIN

Durant la première moitié du XX^e siècle, les manuels de zoologie enseignaient avec constance que la vision et l'audition étaient les deux sens prédominants des oiseaux. En fait, leur acuité visuelle peut être sans égale parmi les vertébrés: certaines espèces possèdent deux fovéas et leur aptitude à discerner les couleurs est remarquable. Par ailleurs, l'oreille de beaucoup d'oiseaux est à même de détecter les infrasons. Enfin, des rapaces nocturnes peuvent, grâce à des neurones «bimodaux», traiter de façon intégrée à la fois les stimulations auditives et visuelles, localiser avec rapidité et précision des proies mouvantes. Toujours est-il que pendant longtemps, la seule exception notable concédée à la règle de l'«absence de flair» avienne était celle du kiwi, aptère (sans ailes) de Nouvelle-Zélande, animal nocturne et fouisseur, friand de lombrics >



Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *ESPECES*, après parution dans son n° 29, pp. 58-63, en septembre 2018, <https://especes.org>.

> qu'il détecte à l'odorat. Il faut dire que cette espèce est dotée d'un dispositif olfactif unique pour un oiseau: ses narines sont disposées à l'extrémité de son long bec effilé, et non à la base de celui-ci.

Si les naturalistes antiques, Aristote ou encore Pliny l'Ancien, défendaient la réalité de l'odorat avien, une telle assertion commença à être mise en doute avec le développement de l'histoire naturelle. L'un des tout premiers, Jean-Jacques Audubon relança le débat scientifique sur la question. En 1826, l'ornithologue franco-américain croisa ainsi le fer au sujet des rapaces avec un autre naturaliste haut en couleur, l'explorateur britannique Charles Waterton. Ce dernier, grand connaisseur des forêts guyanaises, disait avoir souvent observé des urubus à tête rouge (*Cathartes aura*), de grands vautours américains, attirés par l'odeur de carcasses. Jugant cette assertion totalement erronée, Audubon s'en prit avec véhémence à son collègue.

Si la réputation scientifique de Waterton était alors à son zénith (l'un des premiers, il avait expérimenté sur les effets physiologiques du curare), Audubon possédait un avantage indéniable sur son rival: il avait lui-même conduit des expériences sur des urubus. Utilisant, entre autres, des cadavres de porcs, il semblait avoir montré qu'une fois ces cadavres recouverts de végétaux, les urubus ne s'y intéressaient nullement. Son ami le révérend Bachman dupliqua ses expérimentations tout en améliorant leur rigueur. Malheureusement pour ses conclusions, Audubon semble avoir employé par erreur des individus d'une autre espèce que l'urubu à tête rouge, à savoir l'urubu noir (*Coragyps atratus*), d'apparence assez proche. Quant à Bachman, l'on sait aujourd'hui qu'il avait grandement sous-estimé les préférences alimentaires « exigeantes » de l'urubu à tête rouge: s'il en a la possibilité, celui-ci « récus » les carcasses en décomposition (comme celles



Le kiwi, ici sur une planche issue de *The Genera of Birds* (1849), de George Robert Gray, a la particularité de porter ses narines à l'extrémité de son long bec. Pendant longtemps, on a pensé qu'il était le seul oiseau pourvu d'odorat.

Sur le terrain, le naturaliste excentrique britannique Charles Waterton était capable de toutes les audaces, comme le montre cette aquarelle de Robert Cruikshank (1837).



utilisées par le savant ecclésiastique), leur préférant de loin des dépouilles fraîches. Les expériences du révérend Bachman étaient donc entachées d'une absence de « validité écologique », pour parler comme les expérimentateurs actuels: elles confrontaient les rapaces à des situations irréalistes relativement à leurs comportements alimentaires en milieu naturel.

De toute manière, Charles Darwin fut prompt à souligner qu'il était hors de question d'étendre les résultats obtenus sur une espèce à l'ensemble des oiseaux, mettant en garde la communauté ornithologique contre un « biais de généralisation », dirait-on aujourd'hui. Lecteur d'Audubon, mais aussi admirateur de Waterton, Darwin fut amené, lors du périple de la *Beagle*, à effectuer dans les Andes une expérimentation de terrain qui le fit douter de l'importance de l'odorat dans l'alimentation du condor. Mais il conclut avec prudence qu'il n'indiquait que d'autres espèces aviennes fussent pas dotées d'une olfaction fonctionnelle. D'autant plus que les travaux du grand anatomiste britannique Richard Owen montraient avec clarté le développement important à l'extrémité du lobe olfactif et du nerf trijumeau (qui assure la transmission d'informations sensorielles des cavités nasales au cerveau) chez *Cathartes aura*. Néanmoins, il fallut attendre 1964 pour que l'ornithologue californien Kenneth Stager mette en évidence les biais méthodologiques menaçant les expériences du XIX^e siècle, et démontrant définitivement le « flair » exceptionnel de l'urubu à tête rouge... que tous les vautours n'ont pas en partage. Cette modalité sensorielle est



Grâce à ses narines tubulaires, l'albatros fuligineux (*Phoebastria immutabilis*) a un odorat très développé qui lui permet de repérer des zones de nourriture potentielle en mer.

développée chez *Cathartes aura* qu'aux États-Unis, les techniciens gérant les pipelines de gaz tiennent les attroupements d'urubus à tête rouge autour des canalisations comme un indicateur valide de fuite (les oiseaux étant attirés ici par les mercaptans, composés soufrés à l'odeur âcre que l'on ajoute au gaz inodore pour repérer tout écoulement hors des conduits).

Mais les arguments essentiels à l'encadrement d'un odorat développé pour un grand nombre d'espèces aviennes demeuraient ceux des anatomistes du système nerveux : les oiseaux étant tenus alors pour des vertébrés au cortex à peine ébauché, les zones corticales dédiées au traitement des informations olfactives étaient censées occuper peu de place au sein de leur encéphale. Qui plus est, l'absence d'organe de Jacobson, prouvée chez la plupart des espèces, laissait supposer que l'odorat des oiseaux était moindre que celui de beaucoup

de « reptiles » : ces derniers possèdent souvent un tel organe (situé en avant de la fosse nasale) leur permettant de détecter des phéromones. À cela, certains objectaient néanmoins que plusieurs espèces aviennes sont dotées de cavités nasales volumineuses avec une muqueuse olfactive reliée à un bulbe olfactif de très grande taille. C'est vers ces dernières espèces que les chercheurs se sont tournés il y a environ cinquante ans pour repenser le problème de l'olfaction des oiseaux sur de nouvelles bases.

LE FLAIR DU PÉTREL

Parmi les dites espèces, des oiseaux de mer tels que les pétrels, albatros et autres puffins (Procellariiformes), semblaient être les meilleurs candidats à des aptitudes olfactives de haut niveau. C'est en tout cas ce que paraissait indiquer un grand nombre d'observations récurrentes. Ainsi les baleiniers d'autrefois étaient-ils surpris de la vitesse à laquelle une nuée de pétrels, « invisible » très peu de temps auparavant, se formait autour du cadavre d'une baleine qui venait d'être tuée. L'on pouvait soupçonner ici l'intervention d'un odorat à courte distance.

Des expérimentations ont pleinement confirmé l'existence de cette capacité. En Terre Adélie, Pierre Jouventin a conduit des recherches écoéthologiques sur le pétrel des neiges, utilisant des épreuves à choix multiples, fondées sur l'emploi de récipients opaques et partiellement clos, qui contenaient ou non de la nourriture : l'oiseau se dirige alors systématiquement vers ceux contenant du poisson. Finalement, chez certaines espèces marines, le développement olfactif aurait été sélectionné au cours de l'évolution en fonction de l'écologie alimentaire : les oiseaux à tendance charognarde ou détritivore, recherchant leur pitance au ras de l'eau, seraient plus susceptibles que d'autres de posséder un odorat développé. Ils suivraient des gradients d'odeurs, se maintenant au sein de la pellicule d'air localisée immédiatement au-dessus de la surface de la mer : c'est en effet à ce niveau que les odeurs se diffusent le mieux. Cela étant dit, l'océanographe américaine Gabrielle Nettitt a bien montré que le diméthylsulfure, gaz associé à une production intense de phytoplancton, et donc à la présence de proies éventuelles, peut également jouer un rôle d'indicateur olfactif pour les oiseaux de mer.

Au milieu des années 1990, un nouveau consensus régnait parmi les ornithologues : oui, certains oiseaux sont capables d'une olfaction véritable, mais seulement ceux dont la quête alimentaire s'effectue dans de (très) mauvaises conditions d'éclairement, ou qui recherchent surtout des proies dérobées à leur vue. La surprise fut donc grande quand on réalisa bientôt l'importance des capacités olfactives dans la vie d'espèces variées.

Des urubus attroupés autour de canalisations de gaz sont des indicateurs de fuite

> C'est à partir de 1996 que des naturalistes anglo-saxons démontrèrent le rôle central de l'odorat dans l'alimentation des poules domestiques, pourtant peu confrontées à des difficultés réelles dans leur recherche de nourriture. Des expériences élaborées, portant sur des centaines de poulets, ont été menées à cette époque par deux biologistes anglais, Tim Loper et Nicola Marples: ceux-ci confrontaient leurs sujets à trois types de situations successives. Le poulet découvre tout d'abord un récipient rempli d'une eau verte à odeur et goût d'amande amère, et quelques tentatives pour goûter au contenu suffisent à le dissuader de boire ce breuvage, devenu désormais un stimulus aversif. Ensuite, le même individu est placé devant une coupelle d'eau verte inodore: il la boit alors sans problème. Enfin, quand il est confronté à de l'eau bleue à odeur d'amande amère, il s'en écarte immédiatement sans même y toucher. Les résultats des chercheurs britanniques ont une portée réelle pour mieux comprendre l'écologie comportementale des oiseaux. Il semble en effet que certaines de leurs proies potentielles, alors qu'elles sont comestibles, sont susceptibles d'émettre les mêmes substances d'avertissement (dites «signaux aposématisques») que celles, apparentées, qui sont véritablement toxiques...

CHOISIR SON PARTENAIRE

Plus surprenant encore, chez beaucoup d'espèces aviennes, l'odorat semble intervenir dans le choix des partenaires de reproduction. À cet égard, une étude décisive, coordonnée en 2014 par Richard H. Wagner, de l'Institut d'éthologie Konrad-Lorenz, à Vienne, a mis en valeur le rôle central de la glande uropygienne, dont la sécrétion huileuse intervient dans le toilettage des oiseaux. La recherche, menée sur une population de mouettes tridactyles d'Alaska, a fait ressortir des constats capitaux: les composés uropygiens sécrétés sont bien caractéristiques des individus, engendrant des signatures olfactives propres à chacun. Plus l'odeur de l'un est distincte de celle de l'autre, plus les gènes du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH, un ensemble multigénique au rôle immunitaire important) sont distincts entre individus. Or, les mâles et femelles qui s'apparient diffèrent systématiquement par leurs gènes CMH. Comme ils aiment à se renifler, l'on suppose qu'ils «évaluent» ainsi la distance génétique nécessaire pour éviter la consanguinité, et ce grâce à la différence de leurs signatures olfactives, qui se doit ici d'être marquée...

Le sens olfactif joue également un rôle avéré dans les soins apportés à la progéniture, au moins chez certains passereaux. En Corse, dans la vallée du Fango, Adèle Mennerat et Marcel Lambrechts, du Centre d'écologie



fonctionnelle et évolutive (Cefe), à Montpellier, et leurs collègues ont montré que les mésanges bleues du cru sélectionnaient précisément certaines plantes aromatiques (dont la lavande et la calaminthe) dont elles insèrent à répétition des fragments dans le nid en période de couvée. Il s'agit d'un comportement «pharmacologique» préventif: les végétaux choisis contribuent à la désinfection du nid, ce qui favorise le bon développement des oisillons. Ici encore, il a été démontré que l'olfaction intervient de façon décisive lors de la détection par la mésange des végétaux aromatiques appropriés.

RETROUVER SON GÎTE

C'est encore l'étude du pétrel qui a conduit, durant les années 2000, à des trouvailles surprenantes relatives à l'olfaction et à la cognition aviennes. L'on sait que sous beaucoup de latitudes, les pétrels vivent dans des tanières. Francesco Bonadonna, au Cefe, et ses collègues ont ainsi démontré que si le pétrel bleu des Kerguelen, qui ne rejoint sa tanière que la nuit venue, arrive à s'orienter dans la bonne direction, c'est par le truchement de l'odorat. En effet, si l'on obstrue les narines tubulaires de

En Corse, les mésanges bleues (*Cyanistes caeruleus*) disposent des plantes aromatiques dans leur nid en période de couvée... qu'elles repèrent à leur odeur.



En Alaska,
les mouettes tridactyles
(*issa melanoleuca*) choisissent
leur partenaire à l'odor.

l'oiseau avec des bouchons, ou si on anesthésie sa muqueuse olfactive, il se retrouve désorienté et n'arrive pas à regagner son gîte. Chez des espèces apparentées, le puffin cendré atlantique et le puffin de Scopoli, Francesco Bonadonna, Anna Gagliardo, de l'université de Pise, ou encore Oliver Padget, à l'université d'Oxford, et leurs collègues ont mis en évidence un phénomène encore plus étonnant : les grands migrateurs, ces puffins sont à même de retrouver leur nid à des centaines de kilomètres de distance, mais, rendus temporairement anosmiques, ils perdent cette capacité et tendent à s'égarer.

Ainsi, chez certaines espèces aviennes, les stimuli olfactifs contribuent à l'élaboration de cartes cognitives sophistiquées – localisées dans l'hippocampe – rendant possible des comportements complexes d'orientation.

LA CARTE OLEFACTIVE DU PIGEON VOYAGEUR

Mais les résultats les plus inattendus concernent sans doute le rôle possible du sens olfactif dans l'orientation du pigeon voyageur. L'on sait depuis longtemps que les repères visuels, la position du soleil ou les étoiles constituent des indices importants qui contribuent à ce que le pigeon retrouve à coup sûr le chemin du pigeonnier. Cela dit, à eux seuls, ils sont encore insuffisants pour expliquer l'assimilation par l'oiseau de trajets souvent très complexes. La découverte, à partir des années 1980, de cristaux de magnétite, présents dans la partie supérieure du bec et dans l'oreille interne, puis, plus récemment, du caractère « magnétosensible » du cryptochrome, un pigment rétinien, ont permis d'appréhender que la détection du champ magnétique terrestre intervenait dans ce processus. Et surtout, des travaux italiens et allemands ont clairement fait ressortir l'importance de l'olfaction dans l'aptitude du pigeon à s'orienter. Celui-ci est capable de reconnaître

spécifiquement le bouquet olfactif propre à son gîte, et sans doute de constituer, grâce à certaines régions corticales spécialisées et l'hippocampe, une « carte olfactive » de son voyage : cette dernière serait alimentée en informations par des stimuli olfactifs tout comme les « cartes mentales » plus classiques le sont par des stimuli visuels chez les oiseaux et les mammifères... si bien qu'au-delà de 50 kilomètres de distance du pigeonnier, des individus dont on a sectionné les nerfs olfactifs semblent dans l'incapacité de revenir à leur point de départ. De plus, dans le processus d'orientation, la modalité olfactive paraît latéralisée de façon significative : la majorité des individus retrouve moins aisément le bon chemin si l'on obture leur narine droite – ce qui implique un traitement des odeurs par l'hémisphère cérébral gauche.

Ainsi, avec l'étude de l'olfaction s'est ouvert un champ de recherche ornithologique entièrement nouveau, longtemps demeuré *terra incognita*. La génétique moléculaire est encore venue conforter les résultats issus d'approches plus classiques, mettant en lumière la proportion importante des gènes codant les récepteurs olfactifs fonctionnels chez les oiseaux, nettement supérieure à celle relevée dans l'espèce humaine. Il en va de même pour l'imagerie cérébrale.

Cependant, l'histoire de la controverse montre que bien avant l'émergence des techniques sophistiquées actuelles, des méthodes efficaces permettant la démonstration de l'olfaction avienne étaient à la disposition des investigateurs. Mais dans l'esprit des chercheurs aussi, les préjugés peuvent avoir la vie dure ! Remontant, semble-t-il, à la fin du XVIII^e siècle, l'idée selon laquelle la vision et l'audition performantes de beaucoup d'oiseaux s'étaient développées au prix de l'atrophie de l'odorat a persisté durablement. Qui plus est, jusque dans les années 1980, le cerveau avien était tenu sur le plan de l'évolution comme « archaïque » et « viscéral », gérant surtout des pulsions primaires et des automatismes comportementaux. Voilà qui ne prédisposait guère à mettre en lumière le rôle de la perception olfactive dans des processus cognitifs complexes chez l'oiseau ! En réalité, l'on sait aujourd'hui que bien que structurellement différent, le cortex avien comporte des régions qui équivalent au néocortex des mammifères. L'exploration du riche univers perceptif et cognitif des oiseaux ne fait donc que commencer. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Grisson, *Les Forces de la perception animale*, Belin, 2020, à paraître en octobre 2020.

O. Padget et al., *Anosmia impairs homing*

Orientation but not foraging behaviour in free-ranging shearwaters, *Scientific Reports*, vol. 7, article 9668, 2017.

S. Leclaire et al., *Free*

Information on the similarity in certain sex-dyads in a monogamous seabird, *Scientific Reports*, vol. 4, article 6920, 2014.

T. Birkhead, *L'Oiseau et ses sens*, Bachelier, 2014.

N. Marples et T. Roper, *Effects of novel food and smell on the response of naive chicks towards food and water*, *Animal Behaviour*, vol. 51(6), pp. 1417-1424, 1996.

J.-J. Audubon, *Scènes de la nature dans les États-Unis et le nord de l'Amérique*, vol. 1, Sauton, 1868.

R

ENDEZ-VOUS

P.82 Logique & calcul

P.88 Idées de physique

P.92 Chroniques de l'évolution

P.96 Science & gastronomie

P.98 À picorer

À LA RECHERCHE DES NOMBRES TRANSCENDANTS

Les nombres réels, qu'ils soient algébriques ou transcendants, se laissent approcher plus ou moins difficilement par des suites de nombres rationnels. La mesure de cette difficulté permet de les classer.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite

et chercheur au
laboratoire Cristal
(Centre de recherche
en informatique, signal
et automatique de Lille)

Les mots en mathématiques sont parfois arbitraires et difficiles à justifier : par exemple, pourquoi parler d'un «corps» de nombres en français alors qu'en anglais on emploie le mot *field* qui veut dire «champ»? Sans doute parce qu'il n'y a aucune raison précédente de parler de corps ou de champ! Le sarcasme de Bertrand Russell disait que «les mathématiques sont une science où l'on ne sait pas de quoi on parle, ni si ce qu'on dit est vrai». Et, pour David Hilbert, si l'on raisonne correctement en géométrie, «on doit toujours pouvoir remplacer “points”, “droites”, “plans” par “tables”, “chaises”, “verres de bière”»...

Le nom «transcendance» et l'adjectif «transcendant» utilisés en théorie des nombres, font rêver et évoquent l'idée de choses profondes, à la limite de nos capacités de compréhension et de raisonnement. Proposés par Leibniz, ces mots sont d'un usage cette fois justifié, tant les problèmes posés par ces notions sont délicats et les progrès pour les maîtriser sont longs et souvent partiels. Voyons cela.

DES NOMBRES NON ALGÈBRIQUES

Nous nous limiterons aux nombres réels ($2 - 1/3, \sqrt{2}, \pi$, etc.), mais beaucoup des résultats que nous allons mentionner s'étendent aux nombres complexes comme le célèbre *i* dont le carré est -1 .

La plupart des ensembles de nombres réels s'embrassent : il y a les entiers naturels $0, 1, 2, 3$, etc., contenus dans l'ensemble des entiers relatifs $0, 1, -1, 2, -2$, etc., eux-mêmes contenus dans l'ensemble des nombres rationnels (les fractions) $0, 1, -1, 1/2, -1/2, 1/3, -1/3, 2/3, -2/3$, etc. Plus grand et contenant tous ces

précédents, il y a les nombres algébriques, c'est-à-dire les solutions d'une équation polynomiale à coefficients entiers : $\sqrt{2}$ est un nombre algébrique car il est l'une des deux solutions de l'équation $X^2 - 2 = 0$. On dit que $\sqrt{2}$ est racine du polynôme $P(X) = X^2 - 2$.

Parmi les nombres algébriques, il y en a qu'on peut exprimer avec des radicaux (des racines carrées, des racines cubiques, etc.) mais il y en a, d'après le théorème d'Abel, qu'on ne peut pas exprimer avec des radicaux. C'est le cas, par exemple, de l'unique racine réelle du polynôme $X^5 - 3X - 1$.

Les nombres réels qui ne sont pas algébriques sont dénommés «nombres transcendants». L'idée derrière l'adjectif est simple : de tels nombres échappent à toute définition formulée en termes d'entiers et de polynômes, il doit donc être difficile d'en trouver et il est délicat de les comprendre!

IL EN EXISTE UNE INFINITÉ

La première question qui se pose est : bien évidemment, existe-il des nombres transcendants?

Une démonstration complète et n'exigeant aucun calcul (voir l'encadré 3) établit qu'il existe des nombres transcendants. Elle exploite le procédé diagonal découvert en 1891 par Georg Cantor, et permet de construire explicitement des nombres transcendants.

L'idée de la démonstration est simple. On prouve que l'infini des nombres algébriques est le même que celui des nombres entiers (l'infini qualifié de dénombrable). Sachant que l'infini des nombres réels est plus grand que celui des nombres entiers, on en déduit que la grande majorité des nombres réels sont transcendants et qu'il y en a une infinité.



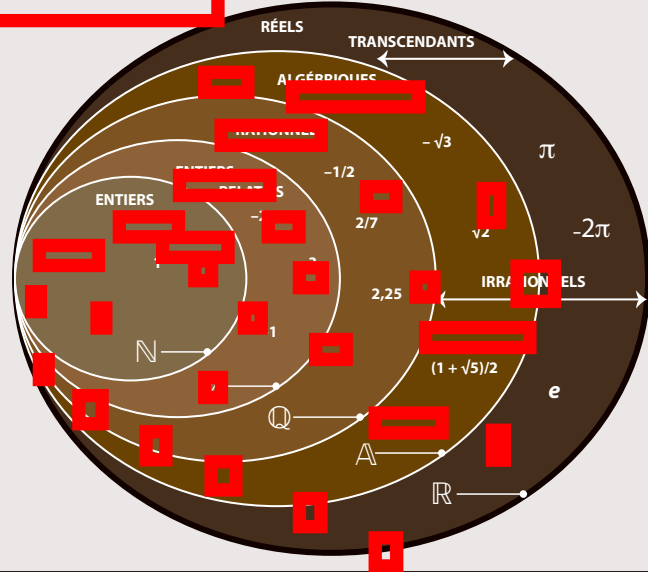
Jean-Paul Delahaye a notamment publié :

Les mathématiques se plient au jeu, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

LES SOUS-ENSEMBLES DES NOMBRES RÉELS

Les nombres naturels ($\mathbb{N}$) sont les nombres les plus simples : 0, 1, 2, ... En y ajoutant les entiers négatifs, on obtient

relatifs » ($\mathbb{Z}$). En formant les quotients de deux tels entiers, on obtient les nombres rationnels ($\mathbb{Q}$). Le nombre $\sqrt{2}$ n'est pas un nombre rationnel, mais c'est une solution de l'équation $X^2 - 2 = 0$. On introduit donc tous les nombres racines d'équations polynomiales à coefficients entiers, ce qui donne l'ensemble des nombres algébriques ($\mathbb{A}$). Certains nombres réels, dont π et e , ne sont pas algébriques. Par définition, ils constituent l'ensemble des nombres transcendants.



DÉCOUVREURS DE NOMBRES TRANSCENDANTS

Perfectionné leurs méthodes, ce qui leur a permis de prouver l'existence de nouveaux nombres transcendants. Le premier fut le premier ; il proposa le nombre $L = 1/10 + 1/10^{21} + 1/10^{31} + 1/10^{41} + \dots$. Puis Charles Hermite (1822-1901), un Français lui aussi, démontra la transcendance de e . Ensuite,

Lindemann (1852-1939) (c) régla le cas de π . Au 20^{e} siècle, le mathématicien d'origine allemande Kurt Mahler (1903-1980) (d) et, plus récemment, Yann Bugeaud (né en 1971) (e) et Boris Adamczewski (né en 1977) (f) en France ont contribué à élargir sensiblement notre compréhension des nombres transcendants.

Le procédé diagonal de Cantor utilise pour construire un nombre transcendant à un défaut : aucune formule simple ne donne les décimales des nombres obtenus. À moins d'écrire un programme prenant les polynômes à coefficient entiers un à un, calculant leurs racines et appliquant le procédé diagonal, ce qui est possible mais exténuant, on ne sait pas très bien à quoi ressemblent les nombres transcendants obtenus. Heureusement, au 19^{e} siècle, le mathématicien Joseph Liouville a proposé une méthode plus directe qui produit des nombres transcendants moins énigmatiques ; ils furent d'ailleurs les premiers nombres transcendants découverts.

UN THÉORÈME DE LIOUVILLE

Justifier la méthode de Liouville exige un raisonnement et des calculs plus compliqués que la méthode de Cantor. L'idée de Liouville est cependant très intéressante. Elle est fondée sur une propriété étrange montrant que, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, les nombres algébriques irrationnels ne peuvent pas être finement approchés par des nombres rationnels, >



> à l'inverse de beaucoup de nombres transcendants. Approcher un nombre, c'est trouver des nombres simples qui seront de plus en plus proches de lui. Par exemple approcher π , c'est proposer la suite : 3 ; $3,1=3/10$; $3,14=31/10$; $3,141=314/100$; $3,141=3141/1000$; $3,1415=31415/10000$; etc.

La formule infinie $\pi = 4(1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + 1/9 - \dots)$ permet d'approcher π à l'infini par les nombres: 4 ; $4(1 - 1/3) = 8/3$; $4(1 - 1/3 + 1/5) = 52/15$, $4(1 - 1/3 + 1/5 - 1/7) = 304/105$. En théorie, elle permet de calculer autant de décimales qu'on le souhaite de π , bien qu'en pratique elle soit très peu efficace.

Dans les deux exemples, on approche par des nombres rationnels (des fractions) et qui est satisfaisant car, bien sûr, grâce à la division, les chiffres d'un nombre rationnel sont toujours faciles à expliciter: approcher un nombre x se ramène à trouver des nombres rationnels, de la forme p/q , de plus en plus proches de x . Et c'est là qu'une étrange découverte a été faite par Liouville et qui a conduit à définir des exemples simples de nombres transcendants.

Le théorème de Liouville de 1844 stipule que si x n'est pas un nombre rationnel, mais si x est la solution d'une équation polynomiale à coefficients entiers de degré n , avec $n \geq 2$, alors il existe une constante C , que l'on peut calculer, telle que tout nombre rationnel p/q s'écarte de x d'au moins C/q^n , c'est-à-dire $|x - p/q| \geq C/q^n$.

Ou encore: un nombre rationnel de dénominateur q ne peut pas s'approcher du nombre algébrique irrationnel x à moins de C/q^n , où n est le degré du polynôme dont x est racine et C une constante qui dépend de x .

Dès lors, en prenant le nombre dont le développement décimal est :

$I = 0 \cdot 1! + 0 \cdot 2! + 0 \cdot 3! + 0 \cdot 4! + \dots$

(les 1 en position 1!, 2!, 3!, 4!, ...) soit

$I = 1/10 + 1/10^2! + 1/10^3! + 1/10^4! + \dots$

on est certain que L est un nombre transcendant, car les nombres rationnels obtenus en s'arrêtant juste derrière le k -ième 1 donne L avec une erreur inférieure à $2/10^{(k+1)!}$, ce qui est incompatible avec le théorème de Liouville.

Une insatisfaction persiste cependant : est-ce que certains nombres connus, et non pas des nombres artificiels comme ceux donnés par Cantor et Liouville, sont transcendants?

DES NOMBRES TRANSCENDANTS

À LA PELLE

Une multitude de résultats ont progressivement permis de répondre oui.

Le premier est dû à Charles Hermite, qui démontra en 1873 que la base e des logarithmes naturels, $e = 2,71828... = 1 + 1/1! + 1/2! + 1/3! + ...$, est transcendant. Il fut suivi en 1882 par celui de Ferdinand von Lindemann, qui démontra que le nombre π est transcendant. Ce dernier résultat a pour conséquence que le problème

PREUVE DE L'EXISTENCE DES NOMBRES TRANSCENDANTS

La démonstration de l'existence de nombres transcendants peut se faire sans calcul. Ce n'est pas la première démonstration de l'existence de ces nombres, mais elle est la plus facile à comprendre.

Étape 1. On attribue à chaque polynôme à coefficients entiers un poids en faisant la somme des valeurs absolues de ses coefficients et de son degré. Par exemple le polynôme $3X^5 - 7X + 1$ a le poids $3 + 7 + 1 + 5 = 16$.

Pour un entier n fixé, il n'y a qu'un nombre fini de polynômes à coefficients entiers de poids n . En effet, pour avoir le poids n , le polynôme doit avoir un degré inférieur ou égal à n , et ses coefficients entiers (au plus $n + 1$) doivent avoir une valeur absolue inférieure ou égale à n . Cela permet de classer tous les polynômes à coefficients entiers dans une liste unique :

- On prend d'abord les polynômes de poids 1. Il n'y a que 1 et -1 (aucun n'a de racine).

– On prend ensuite les polynômes de poids 2. Il y en a quatre : 2 ; -2 ; X ; $-X$ (le polynôme X a pour racine 0, de même que le polynôme $-X$).

$X+1; -X+1; X-1; -X-1; X^2; -X^2$.
Et ainsi de suite. À chaque niveau, on
obtient les polynômes. Notons $P_0(X),$
 $P_1(X), P_2(X), P_3(X), \dots$ cette liste de tous

nombre réels solutions d'une équation $P_i(X) = 0$ sont en nombre fini car un polynôme de degré n possède au plus n racines. Classons ces solutions en un ensemble S_i (certains nombres apparaîtront plusieurs fois, mais c'est sans importance) en prenant par ordre croissant les solutions réelles de l'équation $P_0(X) = 0$ (s'il y en a), puis celles de l'équation $P_1(X) = 0$ (s'il y en a), etc. On obtient ainsi la liste $s_0, s_1, s_2, \dots$ de tous les nombres réels solutions d'équations de la forme $P(X) = 0$ où $P(X)$ est un polynôme à coefficients entiers, autrement dit on obtient la liste de tous les nombres algébriques. Cette partie du raisonnement démontre que les nombres algébriques forment un ensemble dénombrable, c'est-à-dire associable dans une correspondance terme à terme à l'ensemble des entiers naturels $0, 1, 2, \dots$

Étape 2. Considérons maintenant le nombre $10c_0 = c_0, c_1 c_2 c_3 c_4 \dots$ dont premier chiffre décimal après la virgule c_0 , est choisi différent du premier chiffre décimal après la virgule de s_0 (on con-

par exemple de prendre 1 si ce premier chiffre diffère de 1, et 2 sinon), dont le deuxième chiffre de s_1 (même principe de choix), etc. Pour éviter certaines complications dues aux égalités du genre $1 = 0,9999\dots$, il est important de choisir c_i toujours différent de 0 et de 9. Le nombre r qu'on vient de définir explicitement et dont les chiffres pourraient être produits un à un par un programme est différent, par construction, de tout nombre algébrique. C'est donc un nombre transcendant. Cette partie du raisonnement est l'application du procédé de « diagonalisation » de Cantor à l'ensemble des nombres algébriques.

Il existe une infinité non dénombrable de nombres transcendants. Voir sur ce sujet l'article de Robert Gray, « Georg Cantor and transcendental numbers » (*The American Mathematical Monthly*, vol. 101(9), pp. 819-832, 1994) qui explique comment les auteurs ont programmé la création d'un nombre transcendant par la méthode de Cantor et où ils démontrent que tout nombre transcendant est le résultat d'une telle diagonalisation à partir des nombres algébriques.

Les nombres non calculables par algorithme, dont Alan Turing a montré l'existence en 1936, sont des nombres transcendants car les nombres algébriques sont calculables. La constante Ω de Gregory Chaitin, qui est non calculable, est un nombre transcendant, ainsi que le nombre obtenu en ne gardant que le développement

0,101010101... en base 2, est un nombre automatique, car pour connaître le n -ième chiffre de son développement binaire (on compte à partir de 0), il suffit



> décimal de Ω que les chiffres de rang pair, ou que les chiffres de rang multiple de 3, etc.

La fraction continue (voir l'encadré 5) dont la suite des coefficients est la suite de Prouhet-Thue-Morse, avec des 1 et des 0 à la place des 0 et des 1, est un nombre transcendant (Martine Queffélec, 1998), de même que toute fraction continue dont la suite des coefficients n'est pas périodique à partir d'un certain rang et qui est automatique (Yann Bugeaud, 2013), ou qui commence une infinité de fois par un palindrome (Moris Adamczewski et Yann Bugeaud, 2007) (voir un exemple dans l'encadré 6).

MIEUX QUE LE THÉORÈME DE LIOUVILLE

Revenons au résultat de Liouville sur la difficulté d'approcher les nombres algébriques. Il a été amélioré en 1955 par le mathématicien britannique Klaus Roth (mort en 2015). Le nouveau résultat, qui a donc attendu plus d'un siècle, constitue un progrès fantastique, qui a valu à Roth une médaille Fields en 1958 :

Si un nombre irrationnel x peut être approché une infinité de fois par des fractions p/q à mieux que $1/q^{2+a}$ près pour un a positif, alors x n'est pas algébrique.

Le théorème de Liouville disait qu'on ne peut pas approcher un nombre algébrique irrationnel avec des rationnels de la forme p/q avec une précision de l'ordre de $1/q^n$, si n est le degré du polynôme dont x est racine. On sait désormais que c'est vrai en remplaçant n par $2+a$, même si a est un nombre positif très petit.

Formulons encore autrement le résultat de Roth : en utilisant des rationnels n/a , on ne peut approcher à l'infini un nombre algébrique irrationnel x (par exemple $\sqrt{2}$) à mieux que $1/q^2$ près ; si l'on peut faire mieux, c'est-à-dire

en remplaçant le 2 par $2+a$ avec a positif ($1/q^{2+a}$ est alors plus petit que $1/q^2$), c'est qu'on a affaire à un nombre transcendant.

Décidément, les nombres algébriques sont très difficilement approchables !

Du côté des transcendants, on sait parfois les approcher mieux qu'avec une précision de $1/q^2$ et, dans le cas du nombre de Liouville L , on sait même qu'on peut les approcher avec une précision de $1/q^n$ pour tout entier $n \geq 1$. Est-ce la même chose pour tous les nombres transcendants ? La réponse est non : pour cette capacité à approcher les transcendants, il existe une variété infinie de situations.

Pour traiter cette question, nous utiliserons l'exposant de q dans de la fraction $1/q^n$ comme moyen de classer les nombres transcendants. Cela conduit à la définition de la « mesure d'irrationalité » d'un nombre. C'est un peu compliqué, mais juste après la définition, nous verrons des exemples qui permettront facilement de la comprendre.

MESURE D'IRRATIONALITÉ D'UN NOMBRE RÉEL

Soit x un nombre réel. On considère l'ensemble des nombres y tels qu'il est impossible d'approcher x par une infinité de rationnels p/q avec une précision de $1/q^y$.

Si un y est dans cet ensemble, les y' supérieurs à y sont aussi dans cet ensemble. Cet ensemble est donc un intervalle de la forme $[z, +\infty)$ (tous les y tels que $y \geq z$) ou de la forme $]z, +\infty)$ (tous les y tels que $y > z$). Ce z situé à l'extrémité basse de l'intervalle infini est la « mesure d'irrationalité de x », que l'on notera $ir(x)$. Si on peut approcher x avec une précision de $1/q^y$ pour tout nombre y , on dira que $ir(x) = +\infty$.

Avec cette notion, le théorème de Roth s'exprime simplement : les nombres qui ont

LES FRACTIONS CONTINUES

À côté des développements en base de numération b comme les développements décimaux ($b = 10$) ou binaires ($b = 2$), il existe

un autre type important de développement d'un nombre réel : les développements en fraction continue. Un nombre étant donné, on utilise la notation $x = [a_0 ; a_1, a_2, \dots, a_n, \dots]$ pour l'expression :

$$a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{\ddots}}}$$

où les a_i sont des nombres entiers. Tout nombre réel positif s'écrit sous cette forme. Les nombres rationnels

sont les nombres réels dont le développement en fraction

continue est fini (les a_i sont nuls à partir d'un certain rang n). Le nombre d'or, $(1+\sqrt{5})/2$, a le plus simple des développements infinis : $(1+\sqrt{5})/2 = [1 ; 1, 1, 1, \dots]$.

Lorsque le développement en fraction continue est assez simple, le nombre correspondant n'est pas transcendant. Voici deux des résultats généraux récents là-dessus. – Si la suite a_i est automatique (voir l'encadré 4) et n'est pas périodique à partir d'un certain n , alors x est transcendant (Bugeaud, 2013). Le nombre dont le développement en fraction continue est la suite de Prouhet-Thue-Morse $[0 ; 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, \dots]$ est donc transcendant.

– Si les débuts de la suite a_i sont une infinité de fois un palindrome, alors

x est transcendant (Adamczewski et Bugeaud, 2007). Exemple : $x = [0 ; 1, 2, 2, 1, 3, 3, 1, 2, 2, 1, 4, 4, 1, 2, 2, 1, 3, 3, 1, 2, 2, 1, 5, 5, \dots]$

La mesure d'irrationalité $ir(x)$ d'un nombre réel x (voir le texte

principal) est liée à la suite des entiers de son développement en fraction continue. C'est ce qu'indique un résultat classique : $ir(x)$ est la limite de la suite extraite de la suite $(2 + \ln(q_{n+1})/\ln(q_n))$ qui converge vers la plus grande valeur possible, où q_n est le dénominateur du nombre rationnel p_n/q_n obtenu en calculant la fraction continue finie $[a_0 ; a_1, a_2, \dots, a_n]$.

6

LE NOMBRE OMÉGA DE GREGORY CHAITIN

L'incomplétude se manifeste avec une force inouïe dans le nombre Ω de Gregory Chaitin. Par définition, il est la probabilité qu'un programme s'arrête au bout d'un nombre fini de pas. La difficulté à le calculer provient de la fameuse indécidabilité de l'arrêt d'un programme découverte par Alan Turing en 1936.

Le nombre Ω est un objet mathématique comme $\log(2)$ ou π . C'est une constante, est comprise dans une suite infinie de chiffres. Son développement binaire infini possède des propriétés de ce nombre.

- Le nombre Ω est non calculable : aucun algorithme ne peut en égrainer les chiffres un à un. Les

donc transcendant, presque tous les nombres algébriques sont calculables (à partir d'un polynôme dont le nombre algébrique x est la racine, on sait comment calculer autant de chiffres qu'on veut de x).

- Le nombre obtenu en ne retenant que les chiffres de rang impair de Ω , à savoir $\Omega_{\text{pair}} = 0, a_0 a_2 a_4 \dots a_{2n} \dots$, est transcendant. C'est vrai aussi du nombre obtenu en ne retenant que les chiffres de rang impair, ou le rang $f(0), f(1), f(2), \dots$ donné par une fonction f calculable par algorithme et croissante ($f(0) < f(1) < f(2) < \dots$).
- Le nombre Ω est « normal » au sens de Borel : la fréquence avec laquelle on rencontre la séquence 00 (ou 01, ou 10, ou 11) est $1/4$, et plus



Dessin de la médaille conçue par Stephen Wolfram et Hector Zenil, offerte à Gregory Chaitin pour son 60^e anniversaire.

généralement la fréquence avec laquelle on rencontre une séquence déterminée de 0 et de 1 de longueur k est $1/2^k$.

- Le nombre Ω est aléatoire : il est impossible à compresser.

une mesure d'irrationalité strictement supérieure à 2 sont transcendentes.

Ce qu'on a vu pour le nombre de Liouville signifie donc que le nombre transcendant Liouville L a une mesure d'irrationalité $+\infty$. Il n'est pas absurde de considérer que, plus la mesure d'irrationalité d'un nombre est grande, plus ce nombre est « fortement transcendant ». La mesure d'irrationalité est donc un moyen de classer les nombres par « gravité » de la transcendance !

SUR LA LIGNE DE FRONT DE LA RECHERCHE

Que sait-on aujourd'hui de cette gravité de la transcendance et quels sont les résultats connus concernant e , π , la constante de Prouhet-Thue-Morse, le nombre de Champernowne, etc. ?

Voici quelques réponses obtenues plus ou moins récemment.

- Il existe une infinité de nombres transcendents ayant $+\infty$ comme mesure d'irrationalité.

- La base e des logarithmes naturels a pour mesure d'irrationalité 2, et c'est le cas de tous les nombres irrationnels sauf pour un ensemble de mesure nulle.

- Le nombre de Champernowne $0.123456789101112\dots$ a pour mesure d'irrationalité 10. Plus généralement, le nombre de Champernowne en base de numération b a pour mesure d'irrationalité b (Kurt Mahler, 1937). Tout entier supérieur ou égal à 2 est donc la mesure d'irrationalité d'un nombre x au moins. La variété des valeurs possibles pour la mesure d'irrationalité est bien plus grande encore, comme l'affirme le résultat récent suivant : pour tout nombre réel $r \geq 2$, il existe une infinité non dénombrable de

nombres transcendents dont la mesure d'irrationalité est r (Voitéch Jarník, 1931).

- Les nombres automatiques irrationnels ont une mesure d'irrationalité qui est finie (Boris Adamczewski, Julien Cassaigne, 2006).

- Il existe des nombres normaux, c'est-à-dire contenant toutes les séquences finies de chiffres avec une fréquence limite égale à $1/10^n$ où n est la longueur de s , ayant une mesure d'irrationalité $+\infty$ (Yann Bugeaud, 2002). Ce résultat répond à la question : est-ce que pour avoir une mesure d'irrationalité infinie, il est nécessaire de posséder de longues séquences de 0 comme L ? La réponse est donc non.

Voici quelques résultats connus concernant la mesure d'irrationalité :

- π : 7,10320533 (Doron Zeilberger et Wladimir Zudilin, 2020) ;
- π^2 : 5,441243 (Georges Rhin et Carlo Viola, 1996) ;
- $\ln(2)$: 3,57455391 (Raffaele Marcovecchio, 2009) ;
- $\ln(3)$: 5,125 (Vladislav Salikhov, 2007) ;
- $\zeta(3) = 1 + 1/2^3 + 1/3^3 + \dots$: 5,513891 (Georges Rhin et Carlo Viola, 2001) ;
- Constante de Prouhet-Thue-Morse : 2 (Yann Bugeaud, 2011).

À chaque fois, le nombre indiqué n'est pas la mesure précise d'irrationalité, mais seulement un majorant. Il est vraisemblable que ces résultats pourront être améliorés. Le résultat sur π a été obtenu par une méthode intéressante : les chercheurs se sont inspirés d'une preuve proposée par Vladislav Salikhov, qui donnait 7,6063... et, en utilisant un logiciel de calcul formel, ont exploité le plus finement possible ce qu'on pouvait en tirer, ce qui a amélioré le résultat.

Le travail à faire pour répondre aux plus élémentaires questions concernant la gravité de la transcendance des nombres ne fait que commencer ! ■

BIBLIOGRAPHIE

Chaitin, G.J., *On the computational complexity of algebraic numbers*, Trans. Amer. Math. Soc., vol. 372, pp. 3085-3115, 2020 (<https://arxiv.org/pdf/1601.02771.pdf>).

D. Zeilberger et W. Zudilin, *The irrationality measure of π is at most 7.103205334137...*, 2020 (<https://arxiv.org/pdf/1912.06345.pdf>).

J.-P. Delahaye, *Le fascinant nombre Ω* , Belfrage, 2020.

Y. Bugeaud, *Diophantine Approximation*, Cambridge University Press, 2012.

B. Adamczewski et T. F.ivoal, *Irrationality measures for some automatic numbers*, Math. Proc. Cambridge Phil. Soc., vol. 147, pp. 659-678, 2009 (<https://bit.ly/2VaQzS...>).

Y. Bugeaud, *Diophantine approximation and Cantor sets*, Mathematische Annalen, vol. 341(3), pp. 677-684, 2008.

LES AUTEURS



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

COMMENT VOLENT LES INSECTES

Les petites bêtes pratiquent le vol battu, mais pas comme les oiseaux. Le type de mouvement décrit par leurs ailes dépend de la taille de l'insecte.

Le printemps s'achève et les jardins sont animés par les ballets aériens des insectes butineux, mais aussi parfois par des manœuvres surnoises d'importuns moustiques. Observer le vol des insectes suscite toujours l'étonnement : décollage en vol arrière, atterrissage au dos d'une feuille, vol saccadé ou volage en tous genres.

Ces performances aériennes inégales sont longtemps restées inexplicables, en raison de la petite taille des insectes (et de leur refus de coopérer !). Il a fallu le développement des techniques d'imagerie et de calcul pour que l'on comprenne un peu à peu comment ils volent. Surprise : de multiples mécanismes contribuent à leur sustentation et, pour un même type d'insectes, les mouvements de leurs ailes varient selon la taille de l'espèce.

Pour voler, les insectes ont besoin d'une force qui compense leur poids et d'une poussée pour avancer. Comme les

ne disposent ni d'hélices ni de réacteurs, ils créent ces forces en battant leurs ailes d'avant en arrière : ils s'apparentent davantage à un hélicoptère, dont les pales (les ailes) sont mobiles, qu'à un avion.

CALCULER COMME POUR UNE AILE D'AVION ?

On peut tenter de calculer la force aérodynamique agissant sur une aile d'insecte comme on le ferait pour une aile d'avion légèrement inclinée par rapport à l'horizontale. Elle est proportionnelle au carré de la vitesse (ici de l'aile en mouvement dans l'air immobile) et se décompose en une force opposée à la vitesse, la traînée, et une autre perpendiculaire, la portance.

Pour que la portance compense le poids, il faut que l'angle entre le plan de l'aile et la direction du déplacement soit toujours dans le même sens, ce qui suppose que l'aile modifie son inclinaison lorsque son déplacement change de sens (de l'avant vers l'arrière, ou inversement) :

Les mouvements d'ailes que font pour voler les insectes relèvent de deux types bien différents, ceux des insectes plus grands, comme les mouches butineuses, différents de ceux des insectes plus petits, tels que les petits moustiques.

On distingue deux types de battements de l'aile, que l'on constate effectivement chez les insectes, ont pour noms « supination » et « pronation » (voir l'encadré page ci-contre).

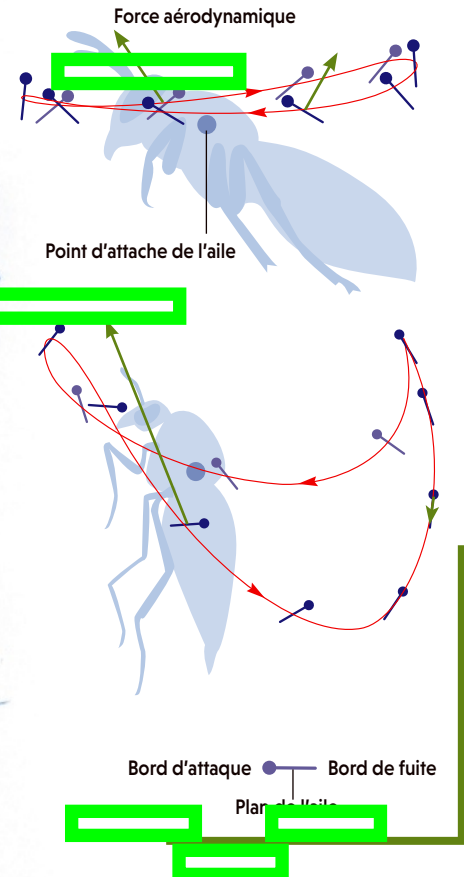
Par ailleurs, comme le poids croît comme le volume de l'insecte et la portance comme la surface des ailes, on peut estimer que la vitesse de translation des ailes augmente comme la racine carrée de la taille caractéristique de l'insecte, donc que la fréquence de battements, qui reflète le rapport vitesse/taille, varie comme l'inverse de cette racine carrée.

Ce résultat va dans le bon sens : à l'oreille, on distingue nettement les petits insectes, comme les moustiques, ou



VA-ET-VIENT DANS UN PLAN... OU NON

Dans la plupart des cas, chez les insectes, les ailes effectuent un mouvement d'avant en arrière, avec une inclinaison qui bascule assez brutalement lorsque ce mouvement change de sens (« supination » quand l'aile tourne à l'avant, « pronation » quand elle tourne à l'arrière). Le mouvement d'aile s'effectue à peu près dans un plan pour les gros insectes de la taille d'une abeille. Pour des insectes nettement plus petits (schéma du bas), les forces de sustentation dues aux corbillons sont basées sur les ailes dans une configuration sans mouvement, pendant la phase de retour. Les insectes projettent les ailes vers le bas, ce qui donne lieu à une traînée presque verticale et contribue ainsi à la sustentation.



moucheron, des plus gros, comme les abeilles domestiques, car les premiers battent des ailes à une plus haute fréquence, donc émettent des sons plus aigus, jusqu'à 1 kilohertz.

Enfin, on comprend que si l'insecte fait varier l'inclinaison de son aile, entre l'aller et le retour, il peut modifier les valeurs de la traînée sur l'aller et le retour, si bien qu'au lieu de se compenser et autoriser le vol stationnaire, la moyenne sur l'ensemble du cycle fournit une poussée vers l'avant (ou vers l'arrière). En brisant la symétrie des mouvements des ailes de part et d'autre du corps, il peut tourner à gauche ou à droite.

En fait, l'approche « aéronautique » adoptée plus haut ne convient pas vraiment au cas des insectes. En effet, lors des battements, tant la vitesse de l'aile que son inclinaison varient en permanence. La force aérodynamique n'est donc pas constante durant chaque phase. Or si l'on calcule la force instantanée comme celle engendrée par une aile d'avion de même vitesse et inclinaison et que l'on fait la moyenne en considérant le mouvement réel de l'aile de l'insecte, on trouve que la force de sustentation est trois fois inférieure au poids !

D'où provient un tel écart ? Comme pour tout écoulement d'un fluide, il est

utile de comparer le rapport entre les forces d'inertie, liées au déplacement du fluide, et les forces de viscosité, liées aux frottements des couches de fluide entre elles. Ce rapport est mesuré par le « nombre de Reynolds ». Pour les insectes, il varie entre 10, pour les plus petits, et 1000, pour les plus gros. C'est très loin des nombres de Reynolds caractéristiques d'un avion de ligne (de l'ordre de 10⁶) ou d'un nageur dans de l'eau (de l'ordre >

Les auteurs ont

notamment publié :

En avant la physique !, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).

> de 10^9). En gros, le cas des insectes correspond à celui d'un nageur évoluant dans une huile extrêmement visqueuse...

Dans ce registre de valeurs, l'écoulement de l'air autour des ailes n'est pas turbulent, mais la relation entre la force aérodynamique et la vitesse n'est pas simple. Plus fondamentalement encore, les mouvements de l'aile sont si rapides qu'on est très loin de la situation d'un écoulement stationnaire où un objet se déplace à vitesse constante relativement au fluide. Il a fallu des années pour que les physiciens fassent l'inventaire des effets faisant varier la force aérodynamique pendant le cycle du battement de l'aile, notamment en travaillant sur des maquettes mises à l'échelle adéquate, avec le même nombre de Reynolds.

TOURBILLONS ET ASPIRATIONS

Pour faire simple, la plupart des effets proviennent de l'apparition de tourbillons transitoires dans les différentes phases. Cela se produit par exemple quand l'aile se retourne entre chaque demi-battement: la rotation entraîne le fluide visqueux environnant.

Plus étonnant, les insectes mettent à profit un phénomène bien connu des ingénieurs aéronautiques: le décrochage retardé. On constate en effet que l'incidence de leurs ailes (entre 20° et 40°) est notablement plus élevée que celle d'une aile d'avion; elle va même au-delà de l'angle de décrochage. Or quand on dépasse cet angle, un tourbillon se crée au-dessus de l'arrière du bord d'attaque de l'aile. D'habitude, il est rapidement évacué derrière l'aile, mais ici il n'en a pas le temps.

Enfin, les chercheurs se sont rendu compte que l'aile interagit avec le tourbillon du sillage créé par le précédent battement. À chaque fois, comme dans une tornade, l'écoulement de l'air dans ces tourbillons est très rapide et la pression y est très faible. Cela provoque des effets de succion-aspiration sur l'aile, qui augmentent en moyenne la force de sustentation.

Dernière complication, pour les plus petits insectes, les effets des forces de viscosité augmentent. Or viscosité et tourbillons ne font pas bon ménage: un tourbillon dans de l'huile se dissipe beaucoup plus rapidement que dans de l'eau. Conséquence: les tourbillons dont nous venons de parler produisent des forces moins intenses pour les petits insectes que pour les gros, et ne permettent donc plus de compenser leur poids.

C'est pourquoi les petits insectes ont une autre façon de voler. Au lieu de

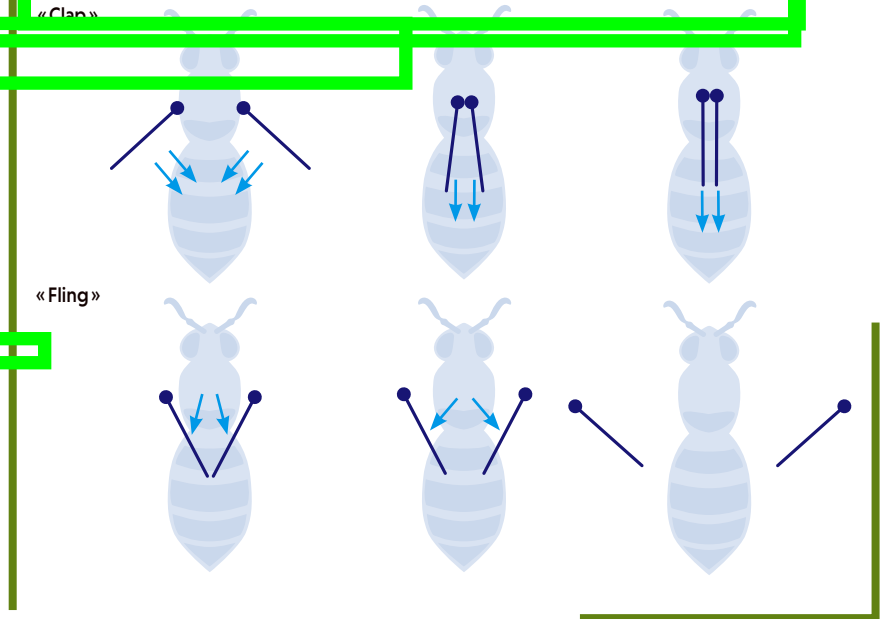
LE CLAP & FLING

Les très petits insectes claquent leurs ailes l'une contre l'autre dans une séquence où les ailes courent et forment le corps étant orienté verticalement.

La propulsion de l'air vers le bas ou son aspiration depuis le haut (flèches bleues) ainsi produites contribuent à la sustentation.

«Clap»

«Fling»



conserver un mouvement alaire dans le plan horizontal pendant la phase de retour, lorsque les ailes repartent vers l'arrière, ils les projettent fortement vers le bas, comme s'ils prenaient appui sur l'air. Durant cette phase, la traînée est alors presque verticale et contribue donc, contrairement au cas des gros insectes, à la sustentation.

CLAQUEMENTS D'AILES

À la limite, pour les insectes les plus petits, on obtient une nouvelle modalité de vol: le «clap & fling» (voir l'encadré ci-dessus). Dans ce cas, l'insecte claque les bords d'attaque de ses ailes l'un contre l'autre à la verticale à la fin de la phase de retour: c'est le «clap». Cela chasse brutalement de l'air vers le bas et engendre donc une poussée vers le haut. Aussitôt, l'insecte rouvre les ailes et les projette vers le bas en les pivotant autour de leurs bords de fuite: c'est le «fling». Cette ouverture aspire l'air vers le bas, créant une dépression au-dessus de l'aile qui accroît la force ascensionnelle.

Évidemment, claquer ses ailes comme dans un garde-à-vous à haute fréquence peut les endommager. C'est pourquoi certains insectes ne se livrent qu'à une séquence incomplète de telles manœuvres.

BIBLIOGRAPHIE

W. B. Yeckart, **Flapping-mode changes and aerodynamic mechanisms in miniature insects**, *Physical Review E*, vol. 99, 012419, 2019.

S. P. Sane, **The aerodynamics of insect flight**, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 206, pp. 4191-4208, 2003.

M. Dickinson, **The flight of insects**, *For the Science*, 286, août 2001.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (fév. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science.

à raison de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à

correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ x 9,90 € = _____

2^e réf. _____ x 9,90 € = _____

3^e réf. _____ x 9,90 € = _____

4^e réf. _____ x 9,90 € = _____

5^e réf. _____ x 9,90 € = _____

6^e réf. _____ x 9,90 € = _____

TOTAL À PAYER

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – R. C. S. Paris 539 539 539 – Siret : 539 539 539 000 23 – APE 5814

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer nos services.

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>. 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.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Téléphone : _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
à Paris

SUR LES TRACES DES POISSONS DES GLACES

Après la formation de l'océan Austral, des poissons se sont non seulement adaptés à ces eaux froides, mais aussi diversifiés de façon étonnante. On sait maintenant comment.

Le 11 janvier 1842, alors que les HMS *Erebus* et *Terror*, les deux navires de l'explorateur britannique James Clark Ross, étaient prisonniers de la glace de mer à 66° de latitude sud, aux abords du cercle polaire antarctique, l'équipage eut la surprise de capturer un phoque de près de 4 mètres de long dont l'estomac contenait environ 15 kilogrammes de poissons. Le naturaliste à bord s'empressa d'examiner ces derniers. D'après les restes, parfois encore entiers, on estima qu'il y avait là quelque deux cents poissons, dont la plupart appartenaient à des espèces diverses d'un même genre, qui fut ensuite nommé *Notothenia*. La température de l'eau en surface était de -2°C et, même si elle avait un ou deux degrés de plus en profondeur, l'équipage ne s'attendait pas à y rencontrer autant de poissons. Comment ces poissons survivaient-ils à de telles températures ?

Aujourd'hui, cette énigme n'en est plus une. On sait que près d'un tiers des

374 espèces de poissons antarctiques connues appartiennent à la famille des nototheniidés, qui présentent l'originalité de produire dans leur sang des protéines antigels, leur autorisant une vie dans des eaux dont la température varie entre -1°C et 4°C. Ces protéines entourent les cristaux de glace naissants et empêchent leur croissance. Quant aux autres poissons, ils se débrouillent pour rester au-dessus de 0°C en nageant. En revanche, ce qui étonne toujours les scientifiques, c'est la diversité inattendue des nototheniidés, la taille de cette famille étant disproportionnée par rapport à celle des autres familles de l'océan Austral. Cependant, tout récemment, un scénario s'est dessiné, mêlant génétique et climat.

UNE GRANDE VARIÉTÉ CHROMOSOMIQUE

Les nototheniidés sont caractérisés par une grande diversité de leur garniture chromosomique : suivant les espèces, les poissons portent de 10 à 29 paires de

On rencontre ce poisson dans l'océan Austral, à des latitudes sud comprises entre 61° et 78°



Il se reproduit une fois par an.



Hervé Le Guyader
a récemment publié :
**Biodiversité et varié
de l'espoir,**
(Le Pommier, 2010).

EN CHIFFRES

115

Sur les 34 000 espèces décrites de poissons, seuls 374 vivent dans l'océan Austral, qui représente pourtant 25 % de la superficie totale des mers. Parmi ces poissons antarctiques, 115 appartiennent à la seule famille des nototheniidés.

20
MILLIONS

L'ancêtre hypothétique le plus récent de la famille des nototheniidés vivait il y a 20 millions d'années. Le genre *Trematomus* serait apparu 10 millions d'années plus tard.

-1,8 °C

L'eau de mer, contenant environ 35 grammes de sel par litre, gèle à -1,8 °C.



Il se nourrit de polychètes, de gastéropodes, d'isopodes, d'amphipodes et de quelques algues.

Il vit principalement sur les fonds marins situés entre 0 et 200 mètres de profondeur, mais on en trouve jusqu'à 700 mètres.



Bocasson émeraude
(*Trematomus bernacchii*)
Longueur moyenne : 50 cm

chromosomes. Or, depuis longtemps, les généticiens pensent que les réarrangements chromosomiques non homologues – l'échange de fragments entre deux chromosomes n'appartenant pas à la même paire – conduisent à la diversification. Toutefois, leur lien avec la spéciation est toujours fortement débattu. Pour aborder ce problème, l'équipe rassemblée par Dominique Higuët, de Sorbonne Université, à Paris, s'est intéressée au genre *Trematomus*, qui regroupe toute espèce d'une très grande diversité chromosomique (elles comptent de 12 à 29 paires de chromosomes).

En effet, si le nombre de chromosomes varie au sein de ce genre, les

quantités d'ADN des génomes restent constantes, ce qui suggère qu'il y a eu fusion de chromosomes chez les espèces qui en ont moins. Un autre indice est en faveur de telles fusions. En 2004, l'équipe de Jean Weissenbach, au Genoscope, a montré qu'il s'est produit, chez un ancêtre commun des poissons téléostéens (qui regroupent la majorité des poissons actuels, dont les nototheniidés), une duplication complète du génome : cet ancêtre possédait 24 paires de chromosomes, contre 12 pour l'ancêtre des vertébrés. Or les taxons les plus proches des nototheniidés en ont eux aussi 24 paires, ce qui suggère qu'il en était de même de l'ancêtre des nototheniidés.

Restait à prouver qu'il y avait bien eu fusion de chromosomes. Pour ce faire, l'équipe de Dominique Higuët a construit des sondes spécifiques de grandes régions chromosomiques à partir du génome de 11 paires de chromosomes d'une espèce proche déjà étudiée (et décrite lors de l'expédition Ross), *Notothenia coriiceps* (voir l'encadré page 94). Contre toute attente, le jeu des fusions ainsi révélé montre que celles-ci se sont produites indépendamment, alors que d'autres nototheniidés proches, comme le genre *Notothenia*, présentent des fusions partagées par plusieurs espèces, donc héritées d'un ancêtre commun.

> Les transposons, des séquences d'ADN capables de se déplacer dans le génome, permettent de réaliser des recombinaisons non homologues entre chromosomes. Aussi leur mobilisation a-t-elle souvent été proposée comme actrice de réarrangements chromosomiques. Seraient-ils responsables de ceux mis en évidence dans le genre *Trematomus*? Pour le tester, l'équipe de Dominique Higué a évalué leur diversité, leur abondance puis leur localisation sur les chromosomes chez treize espèces de nototheniidés.

LE RÔLE CLÉ DES TRANSPOSONS

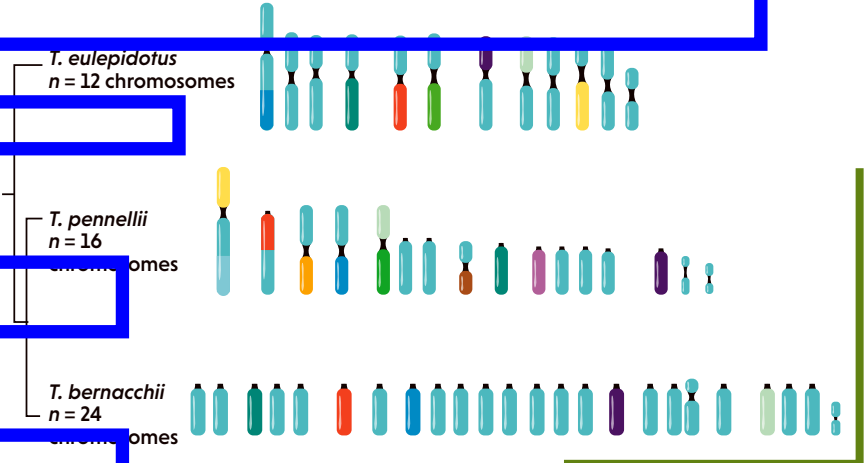
Parmi les quatre superfamilles de transposons décelées, une se distingue par son abondance: les *DIRS1* sont dix fois plus nombreux que les trois autres. De plus, ces transposons s'accumulent dans les régions proches du centromère des chromosomes (la région de contact de leurs bras), alors que les autres sont dispersés dans le génome. Enfin, les autres poissons testés, issus des deux familles les plus proches des nototheniidés, ne présentent pas une telle accumulation de transposons *DIRS1* dans leur génome.

Ainsi, vu la prédominance des transposons *DIRS1* et leur localisation près des centromères, on peut penser qu'ils ont joué un rôle dans les fusions chromosomiques des nototheniidés en facilitant des recombinaisons non homologues. Cependant, quel événement a pu activer les transposons? Généralement, des modifications chimiques, dites « épigénétiques », maintiennent les transposons inactifs. Mais en cas de stress, ce verrou peut sauter, ce qui libère les transposons. Or, justement, il s'avère que les *Trematomus* ont très probablement subi de tels stress par le passé.

Il y a 30 millions d'années, à la fin de l'Éocène, l'ouverture du passage de Drake, entre le Cap Horn et les îles Shetland du Sud, a isolé l'Antarctique des autres continents; un vaste courant circumpolaire antarctique, entraîné par le régime de puissants vents dominants d'ouest, a ainsi pu se mettre en place. Ces eaux froides en mouvement se sont peu mélangées avec les eaux plus chaudes des océans Atlantique, Indien et Pacifique, déterminant une frontière appelée « convergence antarctique ». Celle-ci, située vers le 60° de latitude sud, correspond à une véritable barrière pour les organismes vivants. Parallèlement et jusqu'à aujourd'hui, l'insularité qui recouvre l'Antarctique a suivi de nombreuses phases de régression et d'extension. Soit le plateau continental était

DES FUSIONS DE CHROMOSOMES

Pour reconstituer le jeu des fusions chromosomiques dans le genre *Trematomus*, l'équipe de Dominique Higué a construit des sondes spécifiques de grandes régions chromosomiques – des « unités structurales » –, à partir du génome d'une espèce proche, *Nototremna cornutus*. La plupart correspondent à des unités chromosomiques. Puis l'équipe a hybridé ces sondes avec les génomes de diverses espèces de *Trematomus*, en variant par la même occasion les unités chromosomiques conservées d'un genre à un autre. Elle a ainsi montré que ces unités (en couleur ci-dessous) correspondent à de petits chromosomes chez des espèces ayant un nombre classique de chromosomes, comme *Trematomus bernacchii* (en bas), tandis que certaines ont subi des fusions chez des espèces ayant moins de chromosomes, comme *T. pennellii* et *T. eulepidotus* (en haut).



noyé, en pleine eau, soit le glacier venait s'y appuyer et, en le recouvrant, laissait des anfractuosités qui isolaient les populations des poissons vivant sur les fonds rocheux. Un tel environnement changeant ne pouvait que faciliter les spéciations.

On peut supposer que les successions de réchauffements et de glaciation ont produit des stress qui ont déclenché l'arrêt de la régulation épigénétique, autorisant alors des vagues de mobilisation des transposons dans le génome. La datation de la radiation des *Trematomus* correspond à une période de refroidissement de la fin du Miocène, il y a 10 millions d'années. La fixation des fusions a dû être facilitée par la dispersion de petites populations isolées dans les refuges du plateau continental recouvert par l'inlandsis. Le réchauffement suivant a permis la recolonisation de ce dernier, mais aussi de la pleine mer par certaines espèces comme *T. borchgrevinki*. De tels bouleversements chromosomiques constituent une véritable barrière de reproduction, car l'appariement des chromosomes lors de la fécondation devient impossible. Ainsi, après un réchauffement, la mise en contact des différentes populations de *Trematomus* n'est pas suivie d'hybridations généralisées; on assiste plutôt, suivant le mot des scientifiques, à une « spéciation chromosomique ». ■

BIBLIOGRAPHIE

- J. Auvinet et al., *Chromosomal fusions accompanied the radiation of the Antarctic teleost genus Trematomus (Nototheniidae)*, *BMC Evol. Biol.*, vol. 20, article 39, 2020.
- J. Auvinet et al., *Chromosomal fusions and chromosomal diversifications among the Antarctic teleosts Nototheniidae*, *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 20(3), article 701, 2019.
- G. Duhamel et al., *Biogeographic patterns of fish in the Southern Ocean*, dans C. de Broeyer et al. (éd.), *Scientific Committee on Antarctic Research Biogeographic Atlas of the Southern Ocean*, pp. 328-362, 2014.

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



CONCEPTION & RÉALISATION GRAPHIQUE : OLFA NEMSI

L'AUTEUR



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

UN BON GOÛT DE FRAISES

En assaisonnant le fruit avec
des quantités de sucres et d'acides
bien ajustées, on renforce le goût
de fraises qui en manquent.



Dans une fraise, les concentrations
en sucres varient. Elles sont
supérieures au cœur exposé
au soleil, et augmentent en allant
du pédoncule vers la pointe.

On trouve parfois que les fraises « manquent de goût ». La solution peut être l'« assaisonnement » : généralement du sucre, ou du citron ou de la crème. Pourrait-on faire mieux ? Pour répondre, il fallait étudier le goût des fraises. C'est ce qu'ont notamment fait Atsushi Ikegaya et ses collègues de l'Institut agronomique d'Iwate, au Japon (*Food Science & Nutrition*, vol. 7, pp. 2419-2426, 2019).

Ces chimistes sont partis de l'observation que la partie proche du pédoncule et ainsi que le cœur sont souvent plus blancs que le reste du fruit. Cette différence correspond à des répartitions différentes en sucres, en acides et en composés odorants...

Comme pour tous les végétaux, les trois principaux sucres sont le saccharose (notre « sucre de table »), le glucose (moins sucré, mais qui donne de la plénitude), le fructose (environ 2,5 fois plus sucré que le saccharose). Les acides ? Les principaux sont l'acide citrique et l'acide malique, suivis de l'acide succinique. Atsushi Ikegaya et ses collègues ont déterminé les quantités de ces composés dans des cubes de quelques millimètres de côté, pour des dizaines de fraises cultivées dans des conditions contrôlées.

Ils ont trouvé que les concentrations en sucres et acides organiques variaient considérablement (jusqu'à la moitié) entre la face tournée vers le soleil et l'autre, à l'ombre. Et que, du pédoncule vers la pointe inférieure des fraises, les concentrations en sucres augmentent ; les concentrations en acides, elles, ne présentent pas cette variation.

Les chimistes japonais étudient maintenant la couleur et la composante odorante, mais on retiendra surtout que le goût des fraises impose des sucres et des acides : on trouve couramment sur internet ceux qui sont dans les fraises (choisir la qualité alimentaire). On pourra alors renforcer le goût des fraises par du glucose, du fructose, du saccharose, des acides citrique et malique, soit en accompagnement, soit à l'aide d'une solution concentrée de ces composés et qui aura gélifié autour du fruit, comme on l'a fait pour la partie supérieure du nappage d'un gâteau ou pour les chauds-froids.

Nos collègues japonais ont testé la possibilité d'une reconnaissance de différentes concentrations en sucres et en acides organiques à l'aide de reproductions de fraises constituées par des gels aux concentrations en sucres et en acides correspondant aux résultats de leurs mesures sur le fruit, en ayant quand même ajouté des aromatisants au goût de fraise ainsi que des colorants rouges (l'agent gélifiant était le carraghénane, insipide et inodore).

Les jurés devaient consommer les reproductions de fraises dans un verre particulier, parce que s'ils consommaient la reproduction de la partie pédonculaire, moins sucrée, après la partie pointue plus sucrée, ils auraient fini sur une impression décevante, et vice-versa. Les différences se sont bien révélées perceptibles : la partie proche du pédoncule semble plus acide et la partie pointue plus sucrée.

LA RECETTE

- 1 Préparer 10 g de gelée de gélatine dans de l'eau fraîche.
- 2 Dans 100 g d'eau, dissoudre 30 g de sucre de table, 25 g de glucose, 25 g de fructose, 8 g d'acide citrique et 4 g d'acide malique.
- 3 Ajouter la gélatine trempée, puis porter la solution à ébullition, en agitant pour dissoudre la gélatine. Ajouter quelques gouttes d'eau de fleur d'oranger et mettre au réfrigérateur.
- 4 Quand la solution gélifiée est à la limite de la prise, y tremper des fraises lavées, puis refroidies. Laisser prendre.
- 5 Dans des assiettes creuses, déposer des lits de crème fouettée et y répartir ces fraises enrobées au goût renforcé.
- 6 Servir avec un sirop concentré en sucre, un peu salé et additionné d'acide citrique.



Tous les enfants
font des rêves
mais pour certains
c'est vital de les réaliser.

*Depuis 1987, l'Association Petits Princes réalise les rêves
des enfants gravement malades.*

*Pour leur donner l'énergie de se battre contre la maladie,
nous avons besoin de vous.*



Devenez bénévole ou faites un don
www.petitsprinces.com - 01 43 35 49 00

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur

www.pourlascience.fr

P. 30

SUPINATION

Chez la plupart des insectes, les ailes effectuent un mouvement d'avant en arrière. Mais pour que la portance compense le poids, l'angle entre le plan de l'aile et la direction de son déplacement doit toujours être dans le même sens. L'inclinaison de l'aile bascule brutalement lorsque le mouvement change de sens. On parle de « supination » quand l'aile tourne à l'avant, de « pronation » quand elle tourne à l'arrière.

P. 15

43 %

Selon une étude de l'Insee, 43 % des personnes

sont incapables en France d'avoir une capacité numérique « bonne ou faible »

P. 20

« La prise en compte des données de la science est un impératif moral, voire constitutionnel, des gouvernants, mais l'élaboration des politiques publiques ne s'y réduit pas »

VIRGINIE TOURNAY
politologue à Sciences Po

P. 12

100

Depuis leur découverte en 2003, on a isolé une centaine de virus d'épaves.

Ces virus de la taille d'une bactérie vivent principalement dans les océans.

P. 30

DENTS DE SAGESSE

Ces dents n'ont pas la place de pousser correctement lorsque la mâchoire est trop petite, ce qui est le cas lorsque les enfants sont nourris d'aliments plus faciles à mâcher que ceux de nos ancêtres.

P. 76

PUFFIN DE SCOPOLI

Cet oiseau migrateur est capable de renouveler son nid à plusieurs centaines de kilomètres grâce à son odorat. Rendu temporairement anosmique, il perd cette capacité en tend à s'écarter.

P. 92

374

On connaît 374 espèces de poissons vivant sous le cercle polaire antarctique, dans une eau à une température comprise entre -1 °C et 4 °C. Un tiers de ces animaux produisent dans leur sang des protéines antigel. Les autres maintiennent leur température au-dessus de 0 °C en nageant.

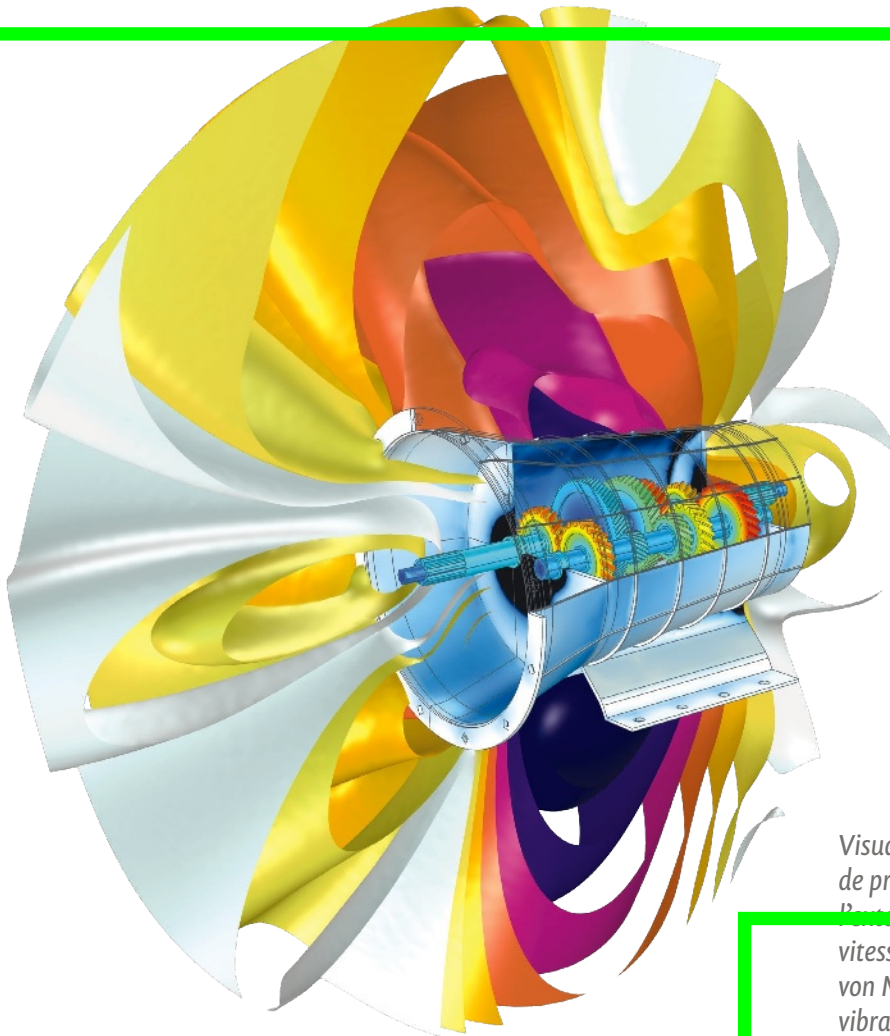
FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses

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



Visualisation du niveau de pression acoustique à l'intérieur de la boîte de vitesse et des contraintes de von Mises induites par les vibrations dans son carter.

L'approche la plus efficace pour réduire le rayonnement sonore d'une boîte de vitesses consiste à effectuer une analyse vibro-acoustique pour savoir comment améliorer la conception. Les essais de bruit, vibrations (NVH) sont une partie importante du processus de conception et peuvent être simulés avec un logiciel multiphysique.

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des composants et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment vous pouvez l'appliquer pour la modélisation des vibrations et du bruit des boîtes de vitesses.

comsol.blog/NVH-simulation