POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

L 13256 - 513 - F: 6,90 € - RD

JUILLET 2020
N° 513

ÉVOLUTION
QUAND LES POISSONS AVAIENT DES DOIGTS

PHYSIQUE
CASSE-TÊTE DANS L'ÉVIER : LE RESSAUT HYDRAULIQUE

MATHÉMATIQUES
LES ASTUCES DES SUPER-PERMUTATIONS

MAYOTTE

UN VOLCAN SOUS-MARIN GÉANT EST NÉ

BEL : 6,6 € - MAR : 64 MAD - TOM : 1040 XPF - PORT. CONT. : 7,6 € - CH : 12,7 CHF - TUN/S : 9,1 TND

[redacted] d'Université
[redacted] Observatoire de Paris

[redacted] L'UNIVERS		LUMIERES SUR L'UNIVERS
Licence 1	**Niveau**	Licence 1 à Master 1
Formation en présentiel ou à distance Cours magistraux filmés et retransmis en direct	**Suivi**	Formation en ligne Tutorat personnel et individualisé Cours thématiques avec de nombreux exercices
Acquérir un panorama des connaissances actuelles en astronomie et astrophysique auprès d'astronomes professionnels	**Objectifs**	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
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)	**Contenu**	Des parcours thématiques adaptés à tous : • Des étoiles aux planètes (L1-L2) • Cosmologie et Galaxies (L2) • Mécanique céleste (L3) • Sciences planétaires (L3) Fondamentaux pour l'astrophysique (L3) • Fenêtres sur l'Univers (M1) • Instrumentation (M1) Plusieurs centaines d'exercices corrigés individuellement
http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers/	**Pages Web**	http://ufe.obspm.fr/Formations-en-ligne/LUMIERES-SUR-L-UNIVERS/
contact.duecu@obspm.fr	**Contact**	contact.dulu@obspm.fr

Dates limites d'inscription

3 septembre 2020

https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

POUR LA SCIENCE

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

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lest[illegible]nne

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaa[illegible]
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

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

Développement numérique: Ph[illegible]ippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Charline Buché
Chef de produit: Eléna Delanne
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vila[illegible]a
Directeur de la publication et gérant: Frédéri[illegible] Mériot
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise [illegible]étry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro:
Henri-Pierre Aberlenc, Matteo Barsuglia, Pascal B[illegible]rnard, Sara Bolognesi, Maud Bruguière, Eric Buffetaut, Lilian Guillemeney Roland Lehoucq, Florian Paca[illegible]d, Asier Sáez-Cirión, Caroline Vanhoove, Laurent Vi[illegible]en

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

PUBLICITÉ France
stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: https://boutique.pourlas[illegible]ence.fr
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél. 03 67 07 98 17
Adresse postale:
Next2C – Service abonnements Pour La Science
26 BD Président Wilson
CS 4003267085 STRASBOURG CEDEX
Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)
France métropolitaine: 59 euros – Europe: 71 e[illegible]os
Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres; Stéphanie Tro[illegible]ard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassor[illegible]:
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN
Editor in chief: Laura Helmuth
[illegible]
Executive vice president: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public franç[illegible]ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents co[illegible]enus dans la revue «Pour la Science», dans la revue «Scientific American» dans les livres édités par «Pour la Science» doivent être adressées par écrit à Pour la Science S.A.R.L.», 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de trad[illegible]ction, 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/t[illegible]nne

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

ÉDITO

MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

VOYAGES FORTEMENT DÉCONFINÉS

En Europe, après quelque deux mois de confinement à domicile pour faire face à la pandémie de Covid-19, la situation sanitaire s'est améliorée et les activités habituelles reprennent peu à peu. L'été s'installe et vient le temps des vacances et des voyages – sauf que les voyages lointains restent encore, pour la plupart, impossibles. Qu'à cela ne tienne! Nous vous proposons ce mois-ci d'aller loin, très loin même, dans l'espace ou dans le temps.

Le premier voyage proposé se cantonne à la France mais nous [illegible]2018, ce territoire connaît un phénomène extraordinaire: la naissance d'un grand volcan sous-marin à une cinquantaine de kilomètres des côtes. Que s'y est-il passé, comment la situation évolue-t-elle, quelle surveillance a-t-on mise en place? Nathalie Feuillet et Arnaud Lemarchand, de l'IPGP, sont aux premières loges et font le point pour nous (*voir pages 22 à 28*).

Un deuxième voyage a pour destination le nord de l'océan [illegible] pour découvrir du volcanisme sous-marin: le massif Tamu. C'est le plus grand volcan de la planète, sauf qu'il est âgé de 145 millions d'années et aujourd'hui inactif. Comment s'est-il formé? Le géophysicien américain William Sager explique comment, récemment, il a contredit la théorie qui prévalait et qui voyait dans le massif Tamu un volcan bouclier (*pages 30 à 36*).

Un autre périple encore plus distant, dans l'imaginaire au moins, consiste à se demander pourquoi, si des civilisations extraterrestres technologiquement avancées existent quelque part dans notre galaxie, elles ne nous ont pas rendu visite jusqu'à présent (*pages 38 à 47*). Est-ce parce que notre planète se situe sur un «archipel» à l'écart des grandes voies de migrations extraterrestres? Mais on peut aussi s'intéresser à une destination plus classique, la Grèce, et aux intrigantes pierres des grands sanctuaires de Délos et Delphes (*pages 66 à 73*); ou à l'origine évolutive des doigts, chez des poissons datant de 375 millions d'années (*pages 48 à 57*)... *Pour la Science*, une véritable agence de voyages virtuels dans l'espace-temps! ■

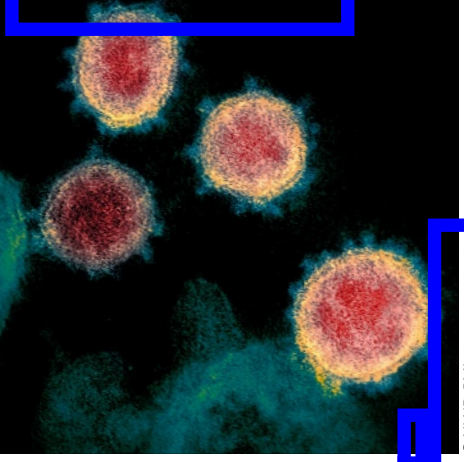
SOMMAIRE

N° 513 /
Juillet 2020

COVID-19

RETROUVEZ TOUS NOS ARTICLES RELATIFS A LA PANDEMIE DE COVID-19 EN ACCÈS LIBRE SUR NOTRE SITE INTERNET

WWW.POURLASCIENCE.FR/TAGS/COVID-19



ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
- Sept millénaires de démographie hexagonale
- Covid-19 et baisse des émissions de CO
- Un pas vers l'asymétrie matière-antimatière?
- Le spinosaure pouvait nager
- Planète en formation, une preuve *de vie*?
- La cocaïne manipule épigénétiquement le cerveau
- Les dessins d'une goutte de whisky
- Sida: nouvelle piste contre les réservoirs
- Le silicium se rapproche de la photonique

P. 16
LES LIVRES DU MOIS

P. 18
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Communiquer tout en restant masqué
Gilles Dowek

P. 20
QUESTIONS DE CONFIANCE
Une chloroquine devenue populiste
Virginie Tournay

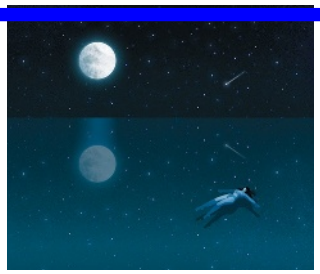
En couverture :
© Équipe Mayobs 4, CNRS/IPGP/[illegible]

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.

© NIAID-RML

GRANDS FORMATS

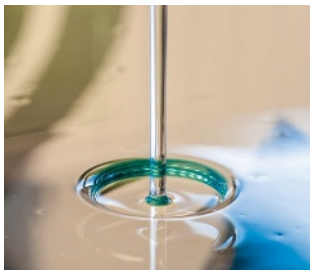


P. 38
ASTROBIOLOGIE
SEULS DANS UN ARCHIPEL GALACTIQUE ?
Caleb Scharf

S'il existait des extraterrestres capables d'effectuer des voyages interstellaires, ils devraient se propager rapidement dans toute la Voie lactée. Las! Il n'y a aucune trace de leur passage sur notre planète... Explication possible: le Système solaire serait trop éloigné de leurs grands axes de migration.

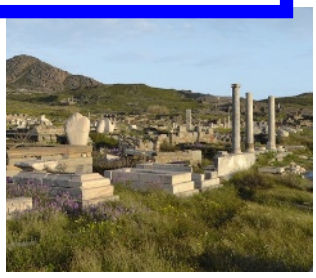
P. 48
EVOLUTION
QUAND LES POISSONS AVAIENT DES DOIGTS
John A. Long et Richard Cloutier

Un fossile remarquable révèle que les doigts sont apparus avant que les vertébrés ne quittent l'eau et ne colonisent la terre ferme.



P. 58
PHYSIQUE
LE RESSAUT CIRCULAIRE, UNE HISTOIRE À REBONDISSEMENTS
Alexis Duchesne

Le bourrelet liquide qui se forme dans un évier autour du jet d'eau du robinet est facile à observer. Mais ce phénomène résiste depuis cinq cents ans à une explication complète. Et, de façon surprenante, il sert aussi à comprendre certaines explosions d'étoiles.



P. 66
ARCHÉOLOGIE
D'OÙ PROVIENNENT LES PIERRES DE DÉLOS ET DE DELPHES ?
Isabelle Moretti

On pensait que les sanctuaires de Délos et de Delphes, en Grèce, avaient été bâtis avec des pierres extraites localement, sauf pour ce qui est des marbres. Les premiers résultats d'une vaste enquête montrent que ce n'est pas aussi simple...

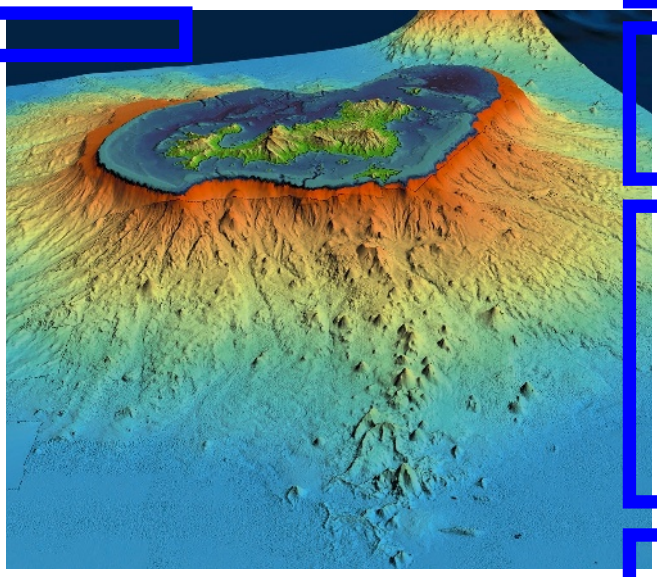
P. 74
HISTOIRE DES SCIENCES

LE MYTHE DE LA GROTTE DU CHIEN
Thierry Lefebvre et Cécile Raynal

Pourquoi les chiens perdaient-ils connaissance dans une grotte près de Naples ? Cette énigme de la Renaissance non seulement contribua à la diffusion des sciences, mais fut aussi une étape clé de la découverte et de la caractérisation du dioxyde de carbone.

À LA UNE

GÉOSCIENCES



P. 22

« MAYOTTE A VÉCU LA PLUS GRANDE ÉRUPTION SOUS-MARINE JAMAIS DOCUMENTÉE »
Entretien avec Nathalie Feuillet et Arnaud Lemarchand

Mayotte, petite île française située entre Madagascar et l'Afrique, ne connaissait pas de séismes importants. La situation a changé en 2018 avec l'apparition d'une énorme activité volcanique sous-marine à l'est de l'île. Le récit de la découverte de ce phénomène extraordinaire et des recherches entreprises pour le comprendre.

P. 30

TAMU : L'ORIGINE REMANIÉE D'UN VOLCAN SOUS-MARIN
William W. Sager

La mesure des anomalies magnétiques du massif Tamu, ancien et immense volcan sous-marin du Pacifique nord, change la vision que l'on avait de sa nature et de la formation d'une bonne partie des fonds sous-marins.

RENDEZ-VOUS

P. 82
LOGIQUE & CALCUL

LE SECRET D'ARSÈNE LUPIN : LES SUPERPERMUTATIONS
Jean-Paul Delahaye

Comment représenter toutes les permutations possibles d'un ensemble par une courte séquence ? Ce jeu de tassement n'intéresse pas seulement les mathématiciens : il peut aussi aider les étourdis, les cambrioleurs et les voyageurs de commerce.

P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE

FLUIDIFIER LE TRAFIC… EN COUPANT UNE ROUTE !
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

L'ART DU MIME HELICONIUS
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE

N'AYONS PAS PEUR DU TEMPS DES CERISES
Hervé This

P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

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

PALÉOANTHROPOLOGIE

SEPT MILLÉNAIRES DE DÉMOGRAPHIE HEXAGONALE

Cette tombe ocrée est typique de la culture Yamnaya, originaire des steppes pontiques, qui a exercé une grande influence génétique et culturelle en Europe.

Une étude génétique confirme l'arrivée dans l'Hexagone de deux grandes vagues de migrants au Néolithique, l'une provenant d'Anatolie, la suivante des steppes pontiques.

Sept millénaires pour raconter 7000 ans d'histoire génétique française… C'est peu, mais quels efforts pour les trouver ! Pour y parvenir, Mélanie Pruvost, du laboratoire Pacea, à l'université de Bordeaux, a rassemblé 34 collègues archéologues connaissant bien les contextes archéologiques de 34 sites, afin de préciser les âges et les cultures de 243 individus ayant vécu dans le territoire au cours des sept millénaires qui ont précédé notre ère. Les chercheurs se sont concentrés à la fois sur un jeu de 120 marqueurs génétiques dont certains au sein du chromosome Y, le chromosome sexuel masculin, transmis uniquement par les hommes.

Il ressort de ces données génétiques qu'après la dernière glaciation, les grandes périodes de migrations ont enrichi et partiellement remplacé le fond génétique paléolithique européen, et constitué le bassin génétique gaulois. Avec le retrait des énormes glaciers qui couvraient l'Hexagone quelque 18000 ans avant notre ère, les Magdaléniens, des chasseurs-cueilleurs qui s'étaient réfugiés dans le sud-ouest de l'Europe, ont progressivement reconquis le nord, avant que, une dizaine de millénaires avant notre ère, leur culture ne le cède aux cultures du Mésolithique (−9700 à −6400). Par remplacement ? Non, puisque les chercheurs ont trouvé une composante génétique magdalénienne dans les génomes de chasseurs-cueilleurs qui vécurent vers −7000.

Ainsi, ce sont des chasseurs-cueilleurs héritiers d'un très ancien patrimoine génétique paléolithique qui ont vu arriver de premiers paysans vers 6400 avant notre ère. Cet événement important se traduit par un accroissement perceptible de la diversité génétique ont d'abord remarqué les chercheurs

© Sayenko Valeriy

lesquels ont ensuite vérifié l'origine ana
tolienne, prédite par l'archéologie, de ces
premiers paysans.

Au Néolithique ancien (−5600 à
−4600), ces pionniers ont été suivis par
deux courants de néolithisation distincts
toujours originaires d'Anatolie : le
Rubané, qui remonte le couloir danubien
et le Cardial, venant de la côte méditer-
ranéenne balkanique, que l'équipe de
Mélanie Pruvost n'a pu distinguer sur le
plan génétique. En revanche, elle a
constaté la persistance de gènes de chas-
seurs-cueilleurs en proportion variable
d'un groupe rubané à l'autre.

Au Néolithique moyen (−4800 à
−3500), les deux courants de néolithisa-
tion se rejoignent au centre de la France et
de nouvelles cultures néolithiques se for-
ment. Toujours présent, le vieux fond
génétique paléolithique s'est homogénéisé
dans la population, ce qui montre qu'un
brassage génétique s'est accompli avant
l'apparition de la culture campaniforme
(−2900 à −1900). Or les chercheurs ont
trouvé que des membres de cette culture
qui domine au Néolithique final (−3000 à
−2100), portaient les gènes d'un groupe
issu de la partie européenne de la grande
steppe eurasienne : les Yamnayas.

L'étude des génomes datant des
débuts de l'âge du Bronze (−2100 à
−860) qui suit, confirme que l'influence
de ces populations, venues du nord de la
mer Noire et censées avoir introduit en
Europe les langues indo-européennes
(presque toutes les langues européennes
le sont), continue et s'intensifie ensuite
dans ce qui est aujourd'hui le territoire
français. Les chercheurs constatent
notamment que le chromosome sexuel
masculin des Yamnayas s'y est largement
répandu et y a laissé une empreinte
pérenne : la majorité des hommes en
France portent encore aujourd'hui cette
signature des hommes des steppes.

L'archéologie nous apprend qu'après
cet événement, des cultures de plus en
plus guerrières se sont succédé jusqu'à
l'âge du Fer (−860 à −50). Les cher-
cheurs ont constaté dans leurs données
que cela s'est fait sans nouveaux apports
de gènes. Le bassin génétique hexagonal
d'avant notre ère était constitué, et il
perdurera jusqu'à l'arrivée des Romains
dans les Gaules. ■

FRANÇOIS SAVATIER

S. Brunel *et al.*, *PNAS*, en ligne le 26 mai 2020

CLIMATOLOGIE

Covid-19 et baisse des émissions de CO_2

Les mesures de confinement pour limiter la crise sanitaire liée au Covid-19 ont entraîné une baisse sans précédent des émissions de dioxyde de carbone, montre une étude dirigée par Corinne Le Quéré. Pour la climatologue, cette crise est l'occasion de penser à une stratégie globale pour lutter contre le réchauffement climatique.

Propos recueillis par SEAN BAILLY

CORINNE LE QUÉRÉ
climatologue à l'université East Anglia, à Norwich, au Royaume-Uni

Quelle a été l'évolution récente des émissions de dioxyde de carbone (CO_2) ?

Durant la décennie passée, les émissions globales de CO_2 étaient à la hausse, d'environ 2 % par an, sauf en 2015 où elles ont été plutôt stables. Ainsi, l'augmentation a été de presque 10 % en dix ans. Les crises économiques et financières ont tendance à provoquer une baisse des émissions, mais celle-ci est vite gommée par la reprise de l'activité. Il est intéressant de voir comment les émissions évoluent pendant une crise sanitaire comme celle du Covid-19 et surtout avec la mise en place d'un confinement quasi mondial.

Comment avez-vous suivi l'évolution du CO_2 dans la crise actuelle ?

Nous avons d'abord rencontré une difficulté qui peut surprendre. Nous n'avons pas les moyens d'établir un suivi en temps réel des émissions de CO_2, malgré le contexte de recherche très actif sur le réchauffement climatique ! Nous avons donc examiné les données qui nous étaient accessibles dans les contraintes de temporalité qui étaient les nôtres. Nous avons utilisé les données sur l'activité de six secteurs parmi les plus gros émetteurs de CO_2 : la production électrique (44,3 % des émissions globales avant la crise), l'industrie, les transports de surface... En examinant par exemple les variations d'activité du trafic aérien, nous avons estimé la baisse de CO_2 associée.

Comment avez-vous utilisé ces données ?

Notre analyse a porté sur 69 pays qui représentent 97 % des émissions globales de CO_2. Nous avons ensuite regardé les politiques de confinement mises en place en établissant un « indice de confinement » noté de 0 à 3. Pour l'échelon 0, aucune restriction n'est mise en place. Pour l'échelon 3, on est sur un confinement strict : la population doit rester à la maison.

Pour chaque pays et chaque jour, nous avons observé l'indice de confinement et les indicateurs d'activité. Et montré qu'il y avait des motifs systématiques communs à tous les pays. Par exemple, en niveau 3, on voit une baisse de 50 % pour le transport de surface, 75 % pour l'aviation et 15 % pour la production d'énergie. Avec toutes ces données en main, nous avons déterminé les émissions quotidiennes de CO_2, pays par pays.

Quels sont les résultats ?

Par exemple, en France, au maximum du confinement, la baisse des émissions a atteint 54 %, comparé à 2019. À l'échelle globale, comme tous les pays n'ont pas appliqué les mêmes restrictions et que les confinements n'ont pas été mis en place en même temps, on a une baisse maximale moins importante. Le pic global de réduction des émissions a atteint 17 % début avril. Nous avons aussi estimé la baisse sur toute l'année 2020 selon différents scénarios de reprise. La baisse serait comprise entre 4 % et 7 %.

Quelles conclusions tirez-vous de ces travaux ?

La baisse de 17 %, c'est du jamais vu. Pourtant, elle n'aura aucun impact sur le climat. En effet, c'est l'accumulation au fil des décennies du dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui est le moteur du réchauffement climatique, et cette quantité de CO_2 ne sera modifiée que de façon infime par la réduction des émissions de cette année. En revanche, cette baisse montre qu'il est possible d'agir en faveur du climat. Les décisions politiques qui seront prises dans les prochaines semaines et mois seront critiques pour réduire sur le long terme nos émissions de CO_2. Si rien n'est fait, nous reviendrons aux niveaux d'avant la crise. Il faut donc mettre en place un programme global, ambitieux et visionnaire pour modifier structurellement nos activités polluantes. ■

C. Le Quéré *et al.*, *Nature Climate Change*, en ligne le 19 mai 2020

PHYSIQUE DES PARTICULES

UN PAS VERS L'ASYMÉTRIE MATIÈRE-ANTIMATIÈRE ?

L'expérience *T2K*, au Japon, suggère que les neutrinos et les antineutrinos se comportent différemment. Une piste pour expliquer l'absence d'antimatière cosmique.

Pourquoi l'Univers contient-il quelque chose plutôt que rien ? Sous ses allures de réflexion philosophique, cette question taraude les cosmologistes depuis des décennies. Le modèle du Big Bang qui décrit la naissance de l'Univers et son évolution ne peut pas expliquer pourquoi le monde est fait de matière et non d'antimatière, voire de rien du tout. Parmi toutes les pistes explorées pour trouver une réponse, la clé se cache peut-être dans les différences entre les neutrinos et leurs *alter ego*, les antineutrinos. Or l'équipe internationale de l'expérience *T2K*, au Japon, vient d'obtenir un indice très fort que les comportements des neutrinos et des antineutrinos ne sont pas identiques, différence qui jouerait un rôle crucial dans l'asymétrie matière-antimatière.

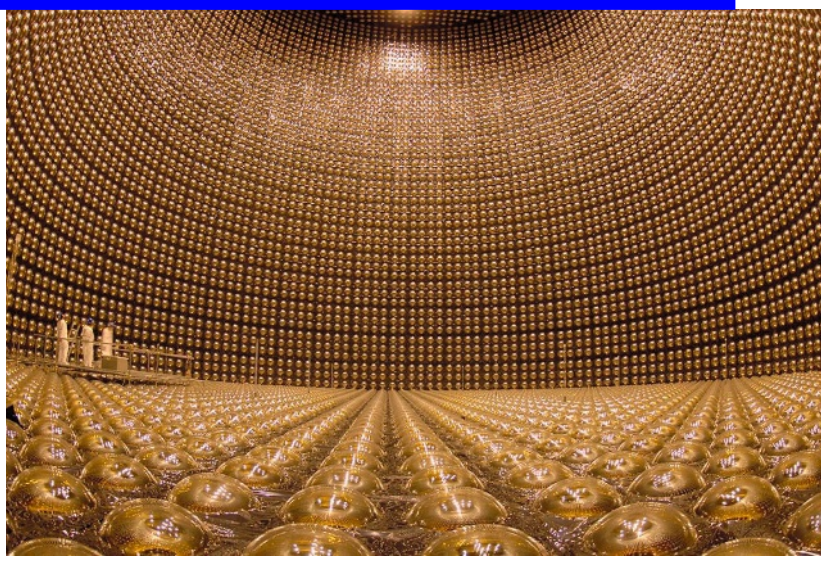
Un point particulièrement surprenant dans le modèle du Big Bang est que dans les premiers instants de l'Univers, il se serait formé 50 % de matière et 50 % d'antimatière, dans des proportions exactement égales. Mais alors, où se cache l'antimatière ? Elle a probablement disparu. En effet, lorsqu'une particule et son antiparticule se rencontrent, elles s'annihilent en émettant des photons. Mais dans l'Univers primordial, cette rencontre « explosive » aurait dû conduire à l'annihilation complète de toute la matière et l'antimatière du cosmos. L'Univers aurait été rempli uniquement de photons, les particules de lumière, ce qui aurait été bien peu palpitant.

L'annihilation primordiale a pourtant bien eu lieu. Les cosmologistes ont constaté que la densité moyenne de particules de matière dans l'Univers est inférieure de dix ordres de grandeur à celle des photons. Cette différence est probablement la trace résiduelle de l'annihilation massive dans l'Univers primordial. Mais cela suggère aussi qu'un petit excès de matière a échappé au cataclysme et constitue aujourd'hui le monde qui nous entoure. Reste à expliquer pourquoi il y a eu un surplus de matière…

Pour répondre à cette question, le physicien russe Andrei Sakharov a montré en 1967 que le mécanisme capable de créer une telle asymétrie entre la matière et l'antimatière devait inclure trois ingrédients essentiels. L'un de ces derniers implique que les particules et les antiparticules ne suivent pas tout à fait les mêmes règles et violent ce qu'on nomme la « symétrie CP » (CP pour « charge-parité »). Le modèle standard de la physique des particules intègre des violations de cette symétrie, mais elles sont trop faibles pour expliquer le contenu actuel de l'Univers.

La réponse pourrait venir des neutrinos, des particules étranges dont il existe trois types et qui sont capables d'« osciller » : elles passent spontanément d'un type de neutrino à un autre. L'expérience *T2K*, au Japon, étudie ce phénomène d'oscillation. Et en le faisant pour les neutrinos d'une part et pour les antineutrinos d'autre part, il est possible d'examiner la possible violation de la symétrie CP dans ce secteur. En analysant leurs résultats, les physiciens de l'expérience ont montré que la violation pourrait effectivement être « maximale » chez les neutrinos. La valeur précise du paramètre de violation devrait être précisée dans les années à venir. ■

S. B.



Vue de l'intérieur de la cuve du détecteur de neutrinos *Super-Kamiokande* utilisé par l'expérience *T2K*.

1,5 × 10²¹

C'EST LE NOMBRE DE COLLISIONS PROTON-ATOME DE CARBONE AYANT PRODUIT LES NEUTRINOS DANS L'EXPÉRIENCE *T2K*. EN TOUT, 68 NEUTRINOS ÉLECTRONIQUES ET 20 ANTINEUTRINOS ÉLECTRONIQUES ONT ÉTÉ DÉTECTÉS.

Collaboration T2K, *Nature*, vol. 580, pp. 339-344, 2020

© Observatoire de Kamioka, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), université de Tokyo

EN BREF

DES JARDINIERS EFFICACES

Les fourmis moissonneuses *Messor barbarus* récoltent des graines qu'elles stockent pour se nourrir. L'équipe de Thierry Dutoit, de l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale, a montré que cette activité aide la régulation du cycle des nutriments dans les sols. Conséquence : en quelques années, ces insectes améliorent la fertilité et la biomasse de pelouses sèches méditerranéennes à côté des nids. Un allié à considérer pour restaurer des milieux dégradés

Biological Conservation, 20 avril 2020

LE SOLEIL, UNE ÉTOILE CALME

Il est possible de retracer l'activité du Soleil (éruptions, présence de taches, brillance, etc.) sur près de 9 000 ans. Timo Reinhold, de l'institut Max-Planck de recherche sur le Système solaire, à Göttingen, et ses collègues ont comparé ces données avec celles de 369 astres aux caractéristiques comparables. L'analyse de leur brillance grâce au télescope spatial *Kepler* a montré que le Soleil est exceptionnellement peu actif. Une période de « repos » pour notre étoile ?

Science, 1er mai 2020

LA PLUIE ET LES TESTS NUCLÉAIRES

La formation de la pluie serait favorisée par la présence de particules chargées dans les nuages. Giles Harrison, de l'université de Reading, au Royaume-Uni, et ses collègues ont étudié les précipitations sur les îles Shetland dans les années 1950-1960, alors que les États-Unis, l'Union soviétique et d'autres procédaient à des essais nucléaires de surface, sources d'ions émis dans l'atmosphère. Résultat : une hausse de 24 % sur cette période. Les tests auraient donné les précipitations.

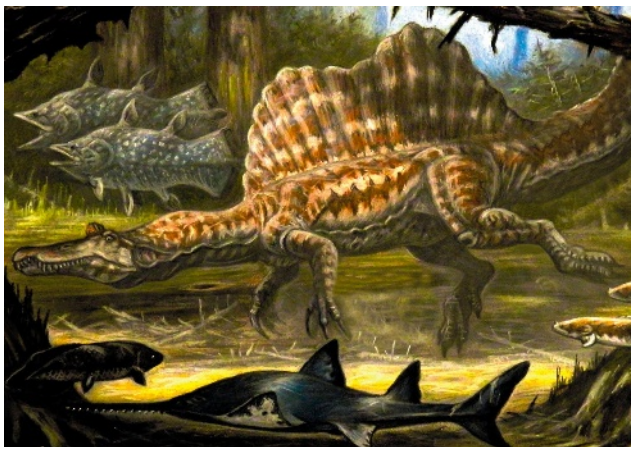
Phys. Rev. Lett., 13 mai 2020

PALÉONTOLOGIE

LE SPINOSAURE POUVAIT NAGER

Le mode de vie aquatique des spinosauridés fait l'objet d'une controverse. Mais Nizar Ibrahim, de l'université de Detroit Mercy, aux États-Unis, va peut-être mettre un terme à celle-ci. Découverts sur tous les continents, toujours en milieu fluvial, ces dinosaures de la famille des théropodes ont vécu du Jurassique supérieur jusqu'au milieu du Crétacé, il y a 100 millions d'années environ. Leurs pattes, petites en proportion de leur corps très long, et leur mâchoire, rappelant celle du gavial, crocodile piscivore du Gange, suggèrent qu'ils chassaient dans l'eau. Avec ses collègues, Romain Amiot, de l'université de Lyon, l'a confirmé en 2010 en prouvant par des rapports isotopiques que le régime alimentaire de *Spinosaurus aegyptiacus* s'approchait de ceux des tortues aquatiques et des crocodiliens de la même époque. Des arguments forts que Donald Henderson, du musée royal Tyrrell de paléontologie en Alberta, au Canada, refuse pourtant, après avoir modélisé la nage de *S. aegyptiacus* : la position des poumons de ce spinosaure l'empêchait de plonger, avance-t-il, et lorsqu'il nageait, il devait battre des pattes arrière pour ne pas basculer sur le côté…

Toutefois, l'équipe de Nizar Ibrahim vient de découvrir au Maroc une queue presque



Cette restitution d'un spinosaure le montre en train de nager dans le type de milieu d'où provient son fossile marocain.

complète de spinosaure. Les chercheurs en ont tiré une réplique robotique, avant de se livrer à des essais en bassin. Lesquels ont montré que l'ondulation horizontale de cette longue lame produisait huit fois plus de poussée que celle de la queue des autres théropodes et presque autant que celle d'un crocodilien. Comment une telle queue aurait-elle pu évoluer si *S. aegyptiacus* et ses ancêtres n'étaient pas de bons nageurs ? ■

E. S.

N. Ibrahim *et al.*, *Nature*, vol. 581, pp. 67-70, 2020

ENVIRONNEMENT

DES SOUS-BOIS BANALS

De l'Irlande à la Pologne, du sud de la Norvège à la Slovénie, les forêts tempérées d'Europe se ressemblent de plus en plus. Face aux perturbations anthropiques, les herbacées typiques des différentes régions disparaissent progressivement, remplacées par des espèces plus cosmopolites. La grande ortie, par exemple, prospère dans de nombreux sous-bois. Grâce aux suivis de 68 milieux forestiers, sur des périodes allant de 15 à 78 ans, un consortium de chercheurs européens, dont Jonathan Lenoir, du CNRS, s'est intéressé aux mécanismes à l'origine de cette banalisation de la flore des sous-bois. Leur étude statistique révèle l'impact majeur de la pollution atmosphérique.

Certaines espèces généralistes, qui ont une croissance rapide et produisent de petites graines qui se dispersent facilement

Sous-bois dans une forêt irlandaise avec des jacinthes des bois. On trouve cette plante aussi au Royaume-Uni, en France, en Belgique et dans la péninsule Ibérique.

prolifèrent davantage grâce aux pollutions à l'azote. Ce phénomène se fait au détriment d'espèces plus spécialisées, moins adaptables à des changements de conditions environnementales, et à la croissance lente. ■

CORALINE MADEC

L. P. Staude *et al.*, *Nature Ecology & Evolution*, vol. 4, pp. 802-808, 2020

En haut : © ABelov2014 ; en bas : © Shutterstock.com/Mark Carthy

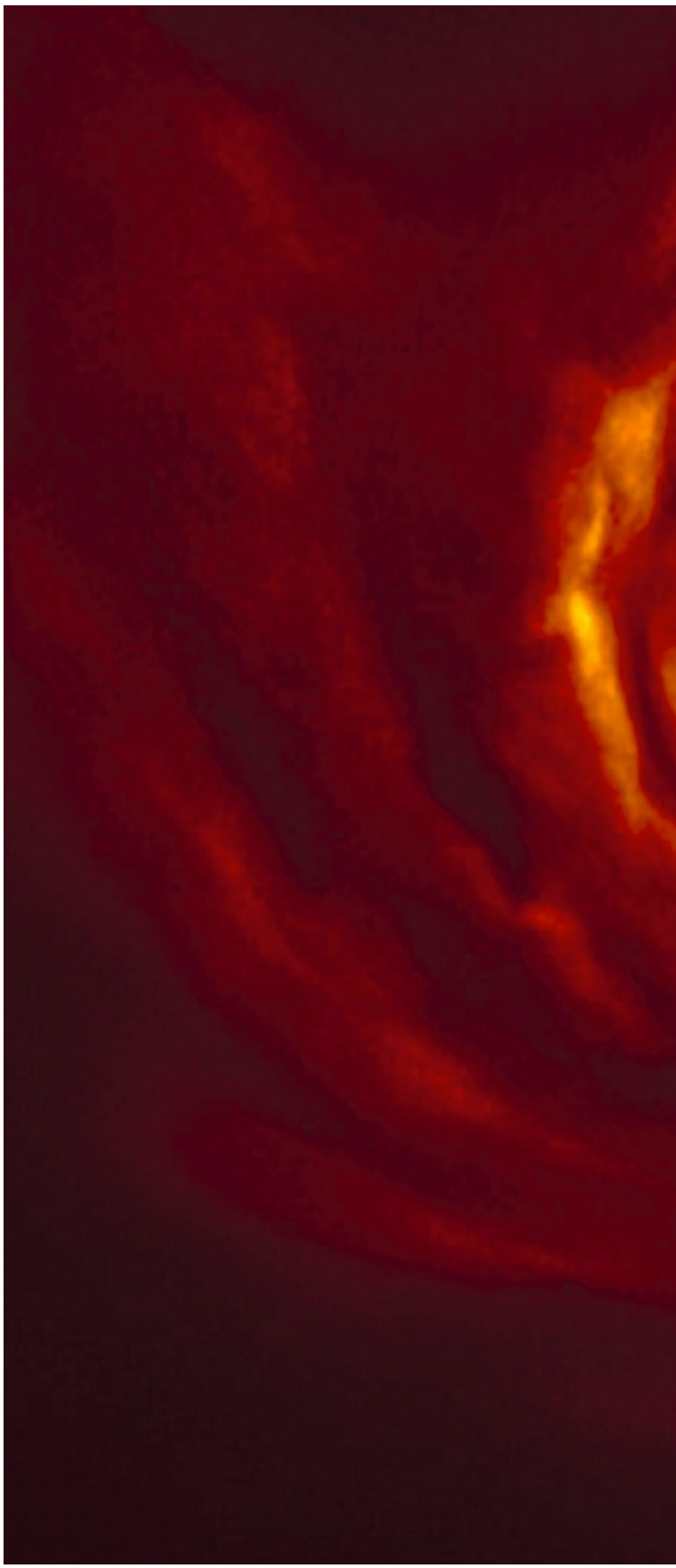
ASTROPHYSIQUE

PLANÈTE EN FORMATION, UNE PREUVE DE VISU ?

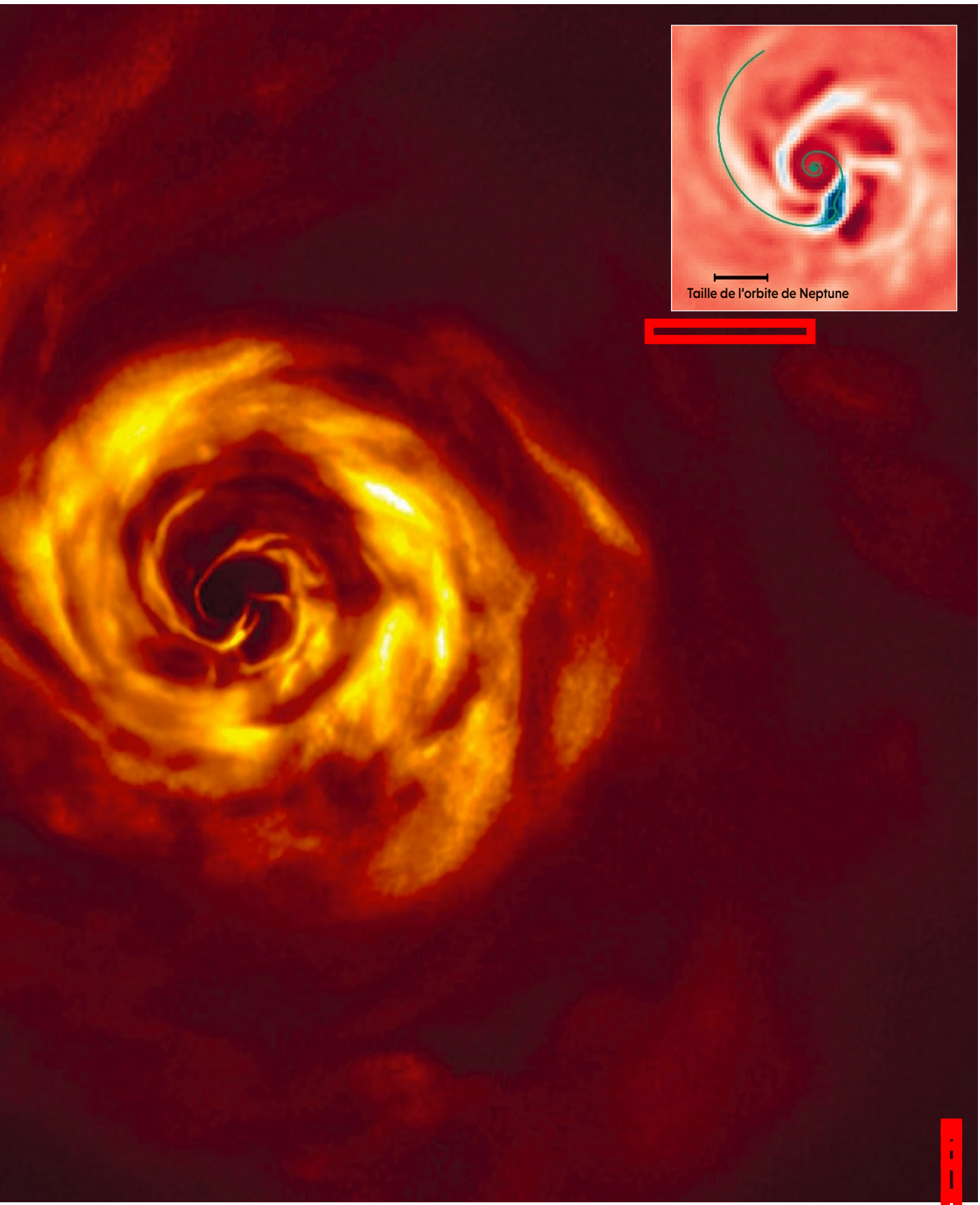
Les planètes naissent dans le disque de gaz et de poussière qui entoure une étoile jeune. Le mécanisme de cette formation est cependant mal connu. Notamment parce que, jusqu'à présent, les observations portant sur le voisinage d'une étoile avaient un contraste et une résolution angulaire trop faibles pour identifier exactement l'endroit où se forme une planète dans le disque de gaz. En 2017, en utilisant le réseau d'antennes *Alma* (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), au Chili, des astrophysiciens avaient identifié deux bras spiraux dans la partie interne du disque de l'étoile jeune AB Aurigae, distante de 520 années-lumière. Lorsqu'une planète en devenir se déplace au sein du disque, elle excite le gaz dans lequel elle induit une onde. Progressivement, cette onde prend la forme d'un bras spiral qui se décompose en deux parties, l'une se propageant vers l'intérieur de l'orbite de la planète, l'autre vers l'extérieur (c'est la même idée que le sillage d'un bateau, mais avec l'effet de rotation autour de l'étoile).

Grâce à l'instrument Sphere du *VLT* (*Very Large Telescope*), au Chili, et à ses images d'une incroyable précision, Anthony Boccaletti, de l'observatoire de Paris, et ses collègues ont confirmé la présence des deux bras (*voir l'image ci-contre*) et découvert une « torsion » dans l'un des deux (*indiquée sur l'image agrandie par la perturbation de la spirale verte modélisée*). Ce phénomène est prédit par certaines théories de la formation des planètes. La torsion correspond à la connexion des deux bras de gaz. À cette jonction, l'apport de gaz et de poussière alimente la croissance de la jeune planète (qui reste invisible dans les images). La planète en formation se situerait à une distance de son étoile comparable à celle qui sépare Neptune du Soleil (environ 30 unités astronomiques). ■

S. B.



A. Boccaletti *et al.*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 637, L5, 2020



© ESO/A. Boccaletti *et al.*

NEUROSCIENCES

LA COCAÏNE MANIPULE ÉPIGÉNÉTIQUEMENT LE CERVEAU

La dopamine, un neurotransmetteur, intervient d'une façon inattendue dans les mécanismes de rechute après un sevrage à la cocaïne.

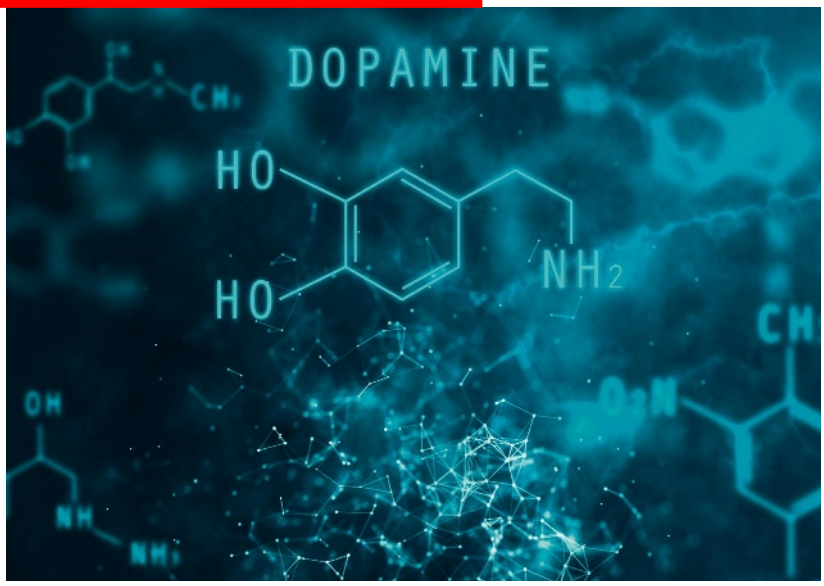
Pourquoi le risque de rechute persiste-t-il si longtemps après un sevrage à la cocaïne ? Ashley Lepack et ses collègues, de l'hôpital du Mont-Sinaï, à New York, et de l'université d'État de New York, à Buffalo, apportent une réponse : ils viennent de montrer chez des rats que l'autoadministration de cocaïne, suivie d'une période d'abstinence, entraîne des modifications épigénétiques à l'intérieur des neurones qui produisent la dopamine.

La cocaïne est connue pour augmenter la neurotransmission de la dopamine dans les zones cérébrales de la récompense. Cette drogue bloque des pompes de recapture de dopamine à la surface des neurones. Le neurotransmetteur s'accumule dans le milieu extracellulaire (dans la synapse), et c'est ce surplus de dopamine dans la synapse qui amplifie son effet et produit l'euphorie associée à la prise de cocaïne.

Pendant le sevrage, la dopamine jouerait un autre rôle, tout à fait inattendu. À l'intérieur des neurones, elle se fixerait massivement sur certaines histones, des protéines autour desquelles s'enroule l'ADN et qui permettent sa compaction à l'intérieur du noyau. Or en se liant aux histones, certaines molécules sont connues pour moduler la compaction de l'ADN et agir sur d'autres fonctions des histones, ce qui influe sur l'expression des gènes. On parle de « modification épigénétique ». L'étude révèle que la dopamine aurait une telle influence épigénétique.

Les rats qui avaient été entraînés à s'autoadministrer de la cocaïne et en disposaient ensuite librement présentaient moins d'histones « dopaminylées » dans les neurones producteurs de dopamine que les rats contrôles. Cependant, après trente jours de sevrage, la proportion de ces histones avait dépassé celle des rats contrôles et perturbait l'expression de gènes dans les neurones concernés.

En réduisant la proportion d'histones dopaminylées pendant le sevrage, les chercheurs ont identifié ces gènes. Certains régulent la capacité des neurones à communiquer entre eux, d'autres sont impliqués dans l'addiction à la drogue. Par ailleurs, le modèle animal suggère que la modification épigénétique augmente la libération de dopamine dans les synapses. Un comportement actif de recherche de drogue semble aussi directement lié à cette modification épigénétique, puisqu'il est fortement réduit lorsque la proportion d'histones dopaminylées est réduite.



La dopamine est un neurotransmetteur notamment impliqué dans les circuits de la récompense. Une nouvelle étude a mis en évidence son rôle épigénétique dans les neurones.

Cette cascade d'événements liée au sevrage ne s'est en revanche pas produite chez des rats ayant eu un accès passif à la cocaïne. « Supprimer la cocaïne, quel que soit son mode d'administration initial, devrait avoir la même conséquence, or ça ne semble pas être le cas. La régulation du phénomène promet d'être complexe », soulève Jean-Antoine Girault, de l'institut du fer à Moulin (Inserm et Sorbonne Université). En effet, de nombreuses questions restent à éclaircir sur les mécanismes en jeu. Notamment, la même équipe avait mis au jour un processus similaire avec un autre neurotransmetteur, la sérotonine. Il sera intéressant de savoir si ces modifications épigénétiques par des neurotransmetteurs demeurent assez anecdotiques ou si elles relèvent d'un mécanisme beaucoup plus général de régulation de l'expression génique et de la fonction cellulaire. ■

NOËLLE GUILLON

A. E. Lepack *et al.*, *Science*, vol. 368, pp. 197-201, 2020

© Shutterstock.com/Peshkova

CHIMIE

ELECTRONIQUE EN BOIS

La question de la durabilité environnementale de l'électronique est d'importance. Depuis leur fabrication jusqu'à leur fin de vie, les dispositifs actuels sont loin des standards environnementaux de durabilité et d'impact écologique. Pour tenter de répondre à ces exigences, Qiliang Fu et ses collègues, de la société Scion, en Nouvelle-Zélande, ont mis au point un procédé de fabrication de circuits électroniques totalement dérivés du bois. Ils ont d'abord créé un support souple et résistant en éliminant la lignine avec un bain d'eau de javel puis en comprimant le matériau. Ils ont ensuite imprimé dessus un circuit électronique avec une encre conductrice obtenue par carbonisation de la lignine. ■

MARTIN TIANO

Q. Fu *et al.*, *ACS Nano*, vol. 14(3), pp. 3528-3538, 2020

ASTROPHYSIQUE

UN COUPLE TRÈS INÉGALITAIRE

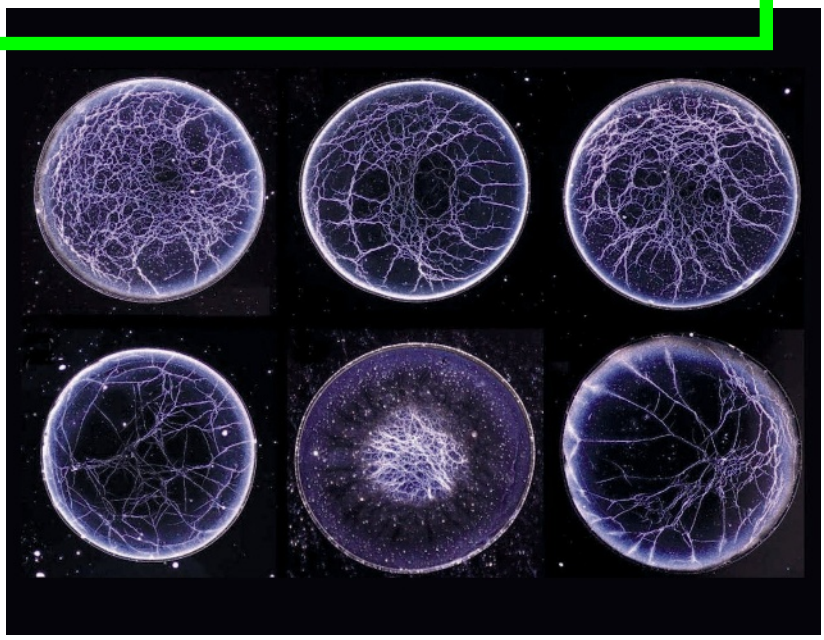
Jusqu'à présent, les paires de trous noirs dont on a détecté la coalescence grâce aux ondes gravitationnelles avaient des masses comparables. Les collaborations *Ligo* et *Virgo* viennent d'annoncer la détection d'un signal (noté GW190412) correspondant à la fusion d'un couple de trous noirs de 30 masses solaires. Ce déséquilibre permet de calculer plus efficacement les caractéristiques du système que dans le cas de masses équivalentes. Le signal d'un tel événement émet une composante principale comparable aux autres déjà observés, mais aussi des harmoniques (de fréquences plus élevées) détectables. Leur analyse a permis de déterminer la distance du système et l'inclinaison du plan de l'orbite avec la ligne de visée. Cette observation suggère aussi que 10 % des couples de trous noirs auraient un rapport de masses supérieur à 2,5. De quoi mieux comprendre la formation de ces couples. ■

LUCAS GIERCZAK

Collaborations *Ligo* et *Virgo*, prépublication du 27 avril 2020, https://arxiv.org/abs/2004.08342

PHYSICOCHIMIE

LES DESSINS D'UNE GOUTTE DE WHISKY



Six exemples de structures qui apparaissent lorsqu'une goutte de whisky sèche. Chaque goutte provient d'un whisky américain différent.

En laissant sécher une goutte de whisky sur une plaque de verre, Stuart Williams et son équipe, de l'université de Louisville, aux États-Unis, ont découvert l'apparition de motifs très divers, qui ressemblent parfois à de fines toiles d'araignées, parfois à des réseaux réguliers de filaments, ou encore des structures plus hétérogènes... Alors que les « ronds de café » ne sont dus qu'à des phénomènes de capillarité, à l'origine des mouvements de convection qui conduisent à l'accumulation de composés colorés en bord de goutte, la formation de ces « empreintes de whisky » est plus complexe.

En plus de la convection par capillarité, la goutte est soumise à l'effet Marangoni : en raison de la tension superficielle moindre de l'éthanol par rapport à l'eau, l'alcool migre vers la surface de la goutte, entraînant au passage les molécules les moins solubles dans l'eau. Celles-ci finissent par former une couche monomoléculaire à la surface de la goutte. Lorsque la goutte sèche, elle conserve son étendue initiale, mais elle est de moins en moins bombée : sa surface diminue ainsi, et la monocouche de molécules organiques se retrouve comprimée jusqu'à ce qu'elle finisse par s'effondrer. Elle se replie alors sur elle-même et conduit à la formation de très fins rubans torsadés qui, globalement, constituent « l'empreinte du whisky ».

En reproduisant cette expérience de nombreuses fois sur plus de 80 whiskies, l'équipe de Stuart Williams a mis en évidence que chaque breuvage avait une signature particulière, une empreinte qui lui était propre, et reconnaissable. La constitution d'une banque d'empreintes pourrait ainsi servir à vérifier l'authenticité de ces spiritueux et à lutter contre les contrefaçons. ■

M. T.

A. D. Carrithers *et al.*, *ACS Nano*, vol. 14(5), pp. 5417-5425, 2020

© J. Yeh

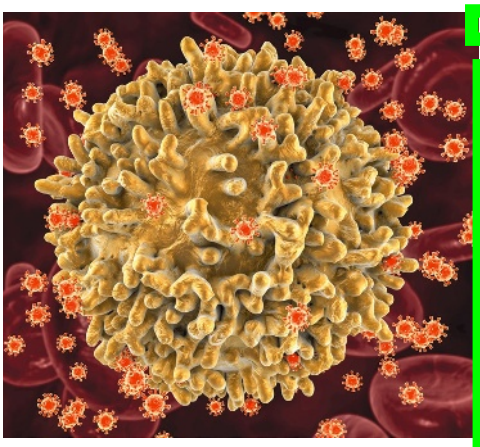
IMMUNOLOGIE

SIDA : NOUVELLE PISTE CONTRE LES RÉSERVOIRS

Dans la lutte contre le sida, les thérapies antirétrovirales ont sauvé 13,6 millions de vies entre 2000 et 2018. Toutefois, elles doivent être administrées à vie, car le virus du sida persiste dans certaines cellules immunitaires dites « réservoirs », en particulier des lymphocytes T $CD4^+$, sous la forme dormante d'ADN inséré dans leur génome. Ya-Chi Ho, de l'université Yale, aux États-Unis, et ses collègues ont mis en évidence une piste pour faciliter l'éradication de ces cellules.

Depuis plusieurs années, on sait qu'il est possible de « réveiller » les formes dormantes du virus en stimulant les lymphocytes T $CD4^+$. Les cellules réservoirs se remettent alors à produire des éléments viraux susceptibles d'être détectés et détruits par les thérapies antirétrovirales. Toutefois, des virus dormants échappent au réveil : différents mécanismes propres à la cellule semblent y bloquer la transcription de l'ADN viral, même après stimulation. De plus, après leur activation, certains lymphocytes réservoirs prolifèrent, ce qui complique encore leur élimination.

L'équipe a stimulé des échantillons sanguins de patients sous thérapie, puis « pêché » les cellules où le virus avait été activé, avant de comparer leur transcriptome à celui des lymphocytes non pêchés. Dans les cellules pêchées, l'ADN viral s'était intégré à divers endroits, mais pas n'importe où : l'activation du virus avait induit la transcription aberrante de plusieurs gènes cellulaires, tous situés en aval de l'endroit d'insertion et impliqués dans des fonctions clés pour le virus, comme celles de favoriser la transcription de son ADN, la survie de la cellule ou la prolifération cellulaire. Autant de stratégies à retourner contre lui… ■



Quand le VIH *(en rouge)* s'active dans un lymphocyte T *(en jaune)* où il était dormant, il détourne l'environnement cellulaire à son avantage.

MARIE-NEIGE CORDONNIER

Nature Medicine, vol. 12, article e2az0802, 2020

PALÉOANTHROPOLOGIE

ORNEMENTS CORPORELS DE 45 000 ANS

Nos ancêtres du Paléolithique portaient souvent des dents de carnivores percées en guise de pendentifs. C'est ce qu'une équipe dirigée par Jean-Jacques Hublin, de l'institut Max-Planck à Leipzig, vient de découvrir dans la grotte de Bacho Kiro, en Bulgarie, sont les ornements corporels les plus anciens d'Europe, puisqu'elles datent de quelque 45 000 ans. Elles proviennent d'une strate, où, outre de nombreux ossements d'animaux, ont été trouvés des fragments osseux de *Homo sapiens* datant de 46 000 à 44 000 ans. L'industrie lithique trouvée dans cette strate relève du « Paléolithique supérieur initial », une culture matérielle issue de la zone syro-palestinienne, qui mêle des éléments de la technique Levallois, typique du Paléolithique moyen (notamment des Néandertaliens), et des lames, retouchées et autres outils typiques du Paléolithique supérieur. Cette culture s'est répandue en Eurasie occidentale il y a entre 50 000 et 45 000 ans, avec la première vague *sapiens* progressant vers le nord. ■

Ces dents de carnivores percées sont les plus anciens pendentifs d'Europe.

E. S.

J. J. Hublin *et al.*, *Nature*, vol. 581, pp. 299-302, 2020

EN BREF

LES ESPÈCES MARINES SONT PLUS RAPIDES

Face au réchauffement climatique, de nombreuses espèces migrent pour retrouver des températures plus favorables. Jonathan Lenoir, de l'université de Picardie-Jules-Verne, et ses collègues ont analysé la vitesse de déplacement de l'aire de répartition de 12 000 espèces animales et végétales en fonction de l'évolution des températures en latitude et en altitude. La redistribution des organismes marins est six fois plus rapide que celle des espèces terrestres.

Nature Ecol. Evol., 25 mai 2020

NAISSANCE DE LA CROÛTE CONTINENTALE

Les débuts de la formation de la croûte continentale sont encore très mal connus. Meng Guo et Jun Korenaga, de l'université Yale, ont proposé de retracer l'histoire de cette croûte à partir des variations de la concentration en argon 40 dans l'atmosphère. Grâce à ces données et à leur modèle, qui prend en compte le cycle du gaz et le recyclage des croûtes, les deux chercheurs ont conclu que 80 % de la masse de la croûte continentale était formée il y a 4 milliards d'années.

Science Advances, 20 mai 2020

LA PLUS ANCIENNE ŒUVRE D'ART CHINOISE

Une statuette en os sculpté d'oiseau miniature, qui tient debout grâce à un piédestal, a été retrouvée à Lingjing, en Chine. Francesco d'Errico, du CNRS et de l'université de Bordeaux, et ses collègues ont daté cet objet entre 13 800 et 13 000 ans. L'artiste aurait utilisé diverses techniques (rabotage, abrasion, raclage et incision) : les particularités techniques et stylistiques qui suggèrent une tradition originale, différente de celles connues en Europe de l'Ouest et en Sibérie.

Plos One, 10 juin 2020

En haut : © Shutterstock.com/Kateryna Kon ; en bas : © J.-J. Hublin et al., Nature, vol. 581, pp. 299-302, 2020

ENVIRONNEMENT

INSECTES : DES HAUTS ET DES BAS

En 2017, une étude menée en Allemagne avait mis en évidence une baisse de plus de 75 % de la biomasse des insectes volants en vingt-sept ans. Qu'en est-il ailleurs ? L'équipe de Roel Van Klink, de l'université de Leipzig, a analysé 166 études portant sur 1676 sites dans le monde suivis sur les dernières décennies. Deux tendances se dégagent : les insectes terrestres subissent une baisse globale (en nombre d'individus) de 0,92 % par an (soit une baisse de 24 % sur trente ans) et les insectes aquatiques sont en augmentation de 1,08 % par an. Les chercheurs soulignent que ces valeurs moyennes cachent d'importantes disparités, aussi bien entre les sites géographiques qu'entre les divers groupes d'insectes. ■

S. B.

R. Van Klink *et al.*, *Science*, vol. 368, pp. 417-420, 2020

COSMOLOGIE

ANISOTROPIE COSMIQUE ?

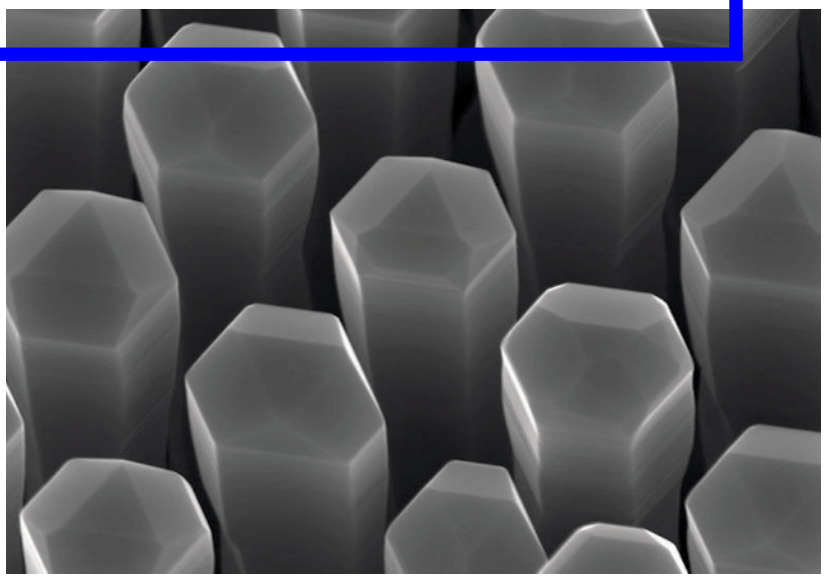
Pour construire le modèle du Big Bang, les cosmologistes font deux hypothèses fondamentales : l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle. Cela signifie que deux points de l'Univers sont globalement équivalents et que l'Univers a un aspect similaire dans toutes les directions où l'on regarde. Ces idées relativement naturelles sont d'ailleurs assez bien étayées par les observations. Pourtant, le modèle du Big Bang n'est pas sans défauts et des chercheurs ont parfois proposé de révoquer l'une de ces hypothèses, voire les deux. Dans des travaux récents, Konstantinos Migkas, de l'université de Bonn, et ses collègues ont étudié la température et la luminosité d'amas de galaxies à partir de données des télescopes spatiaux *Chandra* et *XMM-Newton*. Ils ont observé des indices qui mettent à mal l'isotropie de l'expansion de l'Univers. Un résultat à confirmer et à expliquer... ■

S. B.

K. Migkas *et al.*, *Astrophysics & Astronomy*, vol. 636, A15, 2020

PHYSIQUE

LE SILICIUM SE RAPPROCHE DE LA PHOTONIQUE



Grâce à leur structure hexagonale, ces nanofils de silicium et germanium peuvent émettre de la lumière.

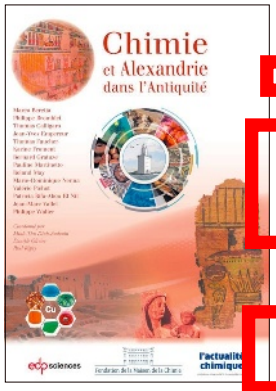
© E. Fadaly, université technologique d'Eindhoven

Toute l'électronique actuelle repose sur le silicium et ses propriétés de semi-conducteur. Cependant, alors que les besoins en puissance de traitement des données continuent de croître, les systèmes en silicium atteignent des limites physiques incontournables. Une solution serait de remplacer les électrons par des photons. Autre avantage des systèmes photoniques, la vitesse de communication au sein d'une puce optique, ou entre deux tels dispositifs, serait multipliée par un facteur 100, voire 1000. Utiliser le même matériau (ici, le silicium) pour intégrer au sein d'une même puce l'électronique et les dispositifs photoniques (sources de lumière laser, modulateurs optiques pour le codage de l'information, détecteurs pour transcrire le signal otique en signal électrique), serait un gain de performance inestimable. Le silicium est hélas connu pour être une très mauvaise source de lumière. Mais Erik Bakkers, de l'université technologique d'Eindhoven, aux Pays-Bas, et ses collègues ont mis au point un alliage de silicium et de germanium ayant une structure cristalline hexagonale et dont les propriétés optoélectroniques sont prometteuses.

En changeant la structure cristalline du silicium, on en change les propriétés électroniques (le germanium facilite l'obtention d'un bon émetteur de lumière). Mais ce changement de géométrie n'est pas simple à mettre en œuvre, car le silicium s'assemble spontanément dans sa configuration la plus stable, la configuration cubique. Pour y parvenir, les chercheurs ont commencé par construire des nanofils de section hexagonale en arséniure de gallium. Puis ils ont fait croître autour de cette amorce hexagonale une couche d'alliage de silicium et de germanium. Les tests sont encourageants, même si le chemin vers une puce optique est encore long. ■

S. B.

E. M. T. Fadaly *et al.*, *Nature*, vol. 580, pp. 205-209, 2020



HISTOIRE DES SCIENCES – CHIMIE

CHIMIE ET ALEXANDRIE DANS L'ANTIQUITÉ

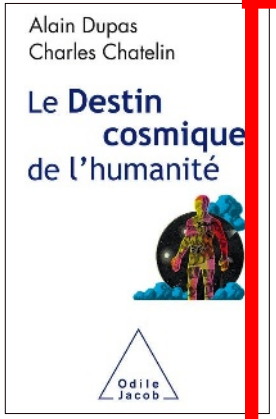
Minh-Thu Dihh-Audouin, Danièle Olivier et Paul Rigny (dir.)
EDP Sciences, 2020
280 pages, 25 euros

Qui n'a été fasciné par la mythique Alexandrie, et les explorations sous-marines dont elle fut et est encore aujourd'hui le théâtre! Expositions et documentaires nous ont offert une image de la vie alexandrine, mais l'ouvrage ici proposé ajoute la façon dont les informations ont pu être obtenues, les démarches qu'il fallut entreprendre et les méthodes mises au point pour protéger, restaurer et interpréter ces objets retrouvés. Soutien indispensable de l'archéologie, la chimie et ses méthodes ont ainsi permis d'obtenir des résultats qui, depuis plus d'une génération, ont fait faire un bond immense à la connaissance du passé.

On peut savoir gré aux quatorze auteurs, tous reconnus dans leur sphère d'activité, d'avoir relevé le pari d'une présentation grand public nourrie et passionnante de leur domaine de recherche, dans un ouvrage richement illustré. Ils ont reconstruit l'histoire des techniques utilisées et nous donnent accès aux conceptions et usages antiques de la matière, de l'alchimie à l'exploitation de mines, ou à la fabrication de substances à partir de matières premières parfois importées de lointaines contrées.

L'ouvrage se décline en trois parties: les enjeux allant de la découverte à la restauration des vestiges, les techniques de fabrication reconstituées d'après les analyses utilisées en chimie et en physique, enfin une nouvelle histoire des échanges à longue distance que ces découvertes ont permis de proposer. Chaque partie est introduite par un texte de synthèse plaçant le projet du livre dans un ensemble plus large. Des exemples précis les illustrent: les verres et leurs couleurs, les pierres précieuses et leur imitation, la céramique avec les amphores, les métaux et la monnaie.

DANIELLE FAUQUE
GHDSO, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY



ESPACE

LE DESTIN COSMIQUE DE L'HUMANITÉ

Alain Dupas et Charles Chatelin
Odile Jacob, 2020
272 pages, 23,90 euros

Comment est née l'épopée spatiale, comment s'est-elle développée, vers quoi se dirige-t-elle? Tel est le thème du livre proposé par les auteurs. Le premier a travaillé au Cnes pendant plus de vingt ans sur les systèmes spatiaux futurs. Le second, journaliste, suit l'actualité spatiale.

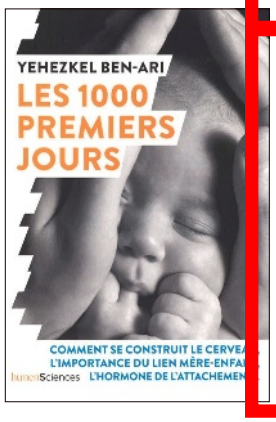
Après Tsiolkovski, Goddard, Oberth, qui ont étudié les fusées, l'aventure spatiale s'est concrétisée à la suite de tragiques événements historiques: la guerre de 1939-1945 qui amène à la fabrication des missiles V2, puis la guerre froide qui conduira au développement des lanceurs *Saturn V* et au programme *Apollo*. Douze hommes ont marché sur la Lune entre 1969 et 1972.

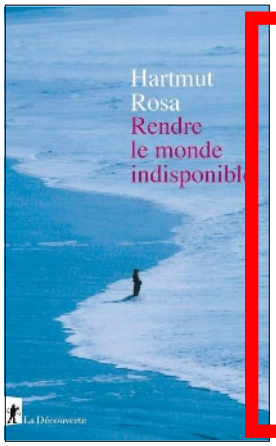
Et après? Certes, la *Station spatiale internationale* a été très habitée, mais l'héritage d'*Apollo* s'est surtout traduit aussi par l'acquisition d'un fort savoir-faire. L'usage des satellites est devenu banal: télécommunications, météorologie, observation de la Terre, géolocalisation, internet, etc. L'exploration robotique a permis d'aller visiter toutes les planètes du Système solaire et la connaissance de l'Univers a énormément progressé.

Et maintenant? Des entreprises privées viennent modifier la manière de concevoir les programmes. Des partenariats sont signés entre la Nasa et ces entreprises. Jeff Bezos voudrait développer une économie dans l'espace entre la Terre et la Lune. À la base, un lanceur de faible coût, réutilisable, est envisagé. Elon Musk voudrait coloniser Mars. Les exoplanètes permettraient aux humains de poursuivre une destinée qui paraît limitée sur Terre.

Tout au long du livre, la science-fiction est avancée comme une source d'inspiration et de motivation pour s'échapper de la Terre. Comme concluent les auteurs, des réalisations sont possibles à l'échelle d'une galaxie. À lire pour s'évader.

JEAN COUSTEIX
ISAE-SUPAÉRO, TOULOUSE





NEUROSCIENCES

LES MILLE PREMIERS JOURS
Yehezkel Ben-Ari
Humensciences, 2020
224 pages, 20 euros

Les «mille premiers jours» désignent la période allant de la conception à la fin de la deuxième année d'un bébé. Cruciaux pour le développement, ils sont marqués par l'acquisition des deux fonctions essentielles que sont la marche et le langage. L'auteur, fondateur de l'institut de neurobiologie de la Méditerranée et chercheur connu pour ses travaux sur l'épilepsie et ses crises assimilables à des orages électriques, s'est aussi attaqué à l'autisme. Il nous propose ici, avec ses mots d'électrophysiologiste, un récit de la construction du cerveau pendant les mille premiers jours; en remontant le cours du temps – ce qu'il nomme l'«archéoneurologie» –, il décrit la mise en place des câblages cérébraux par les neurones qui naissent et migrent pendant cette période cruciale.
Ce processus est influencé à la fois par l'environnement (polluants?) et le milieu intérieur (rôle d'hormones maternelles telle l'ocytocine, dite «hormone de l'attachement»); ses erreurs expliqueraient des pathologies s'exprimant plus tard dans la vie.

Cet ouvrage est aussi une autobiographie originale et pleine d'humour. Le «Pharaon» – le surnom que lui ont donné ses proches en référence à sa naissance cairote – est un battant, qui appelle à plus d'imagination au laboratoire. Il a fait le pari de confier au grand public ses hypothèses sur le traitement de l'autisme pour ce qu'elles sont, en attente de nouvelles explorations. S'agissant des mille premiers jours, étant donné la multiplicité des facteurs jouant un rôle, il propose que, pour bien préserver le bébé de tous les dangers pendant ces deux années, le mieux est de conjuguer bon sens et principe de précaution...

ANNE-MARIE MOULIN
LABORATOIRE SPHERE – UNIVERSITÉ DE PARIS

SOCIOLOGIE – PHILOSOPHIE

RENDRE LE MONDE INDISPONIBLE
Hartmut Rosa
La Découverte, 2020
144 pages, 17 euros

Il est manifeste que quelque chose ne va pas dans la façon dont notre civilisation appréhende le monde. Mais qu'est-ce «quelque chose»? Hartmut Rosa le cerne dans ce livre dont le titre intrigant s'éclaire au fil des pages.

Une société moderne ne sait se stabiliser que de manière dynamique. Elle rend le monde de plus en plus disponible, suivant un schéma qui se résume ainsi: la science étend les savoirs; le développement technique rend maîtrisables les fragments du monde découverts par la science; l'évolution économique fournit les ressources qui permettent d'acquérir biens, savoirs et instruments; enfin, les règles juridiques et les appareils administratifs ont pour mission de rendre prévisibles et pilotables les processus sociaux induits par l'extension de l'accès au monde.

En un sens, ce schéma fonctionne. Par exemple, si nous avons l'argent, nous achetons «en quelques clics» un voyage pour à peu près n'importe où. Pourtant, en leur ensemble, les succès de ce schéma se conjuguent en un échec massif! Un monde disponible n'est pas, en fait, ce dont a besoin l'individu. Il aspire à entrer en résonance: tomber amoureux, être transformé par une lecture inattendue, enthousiasmé par une musique. En étant ouvert, il rend possibles de tels événements, mais ils ne sont jamais à sa disposition: ils peuvent se produire comme ils peuvent ne pas se produire. Le bilan de la «modernité tardive» est d'être parvenue à l'opposé du but visé. Le monde rendu disponible se révèle à la fois menaçant et menaçant – donc constitutivement indisponible. Le monde physique apparaît comme un environnement dont nous percevons la destruction. Et le monde économique et politique prend les traits d'une globalisation ressentie par beaucoup comme un extérieur périlleux et incontrôlable.

DIDIER NORDON
ESSAYISTE ET MATHÉMATICIEN ÉMÉRITE

ET AUSSI

L'ODYSSÉE DU PLASTIQUE
Éric Loizeau
Favre, 2020
191 pages, 23 euros

Créée à Lausanne en 2010, la fondation Race for water a réalisé depuis 2015 deux expéditions d'observation et d'étude par le plastique. Dans ce beau livre très bien illustré, l'ambassadeur de la fondation, l'ancien navigateur Éric Loizeau, retrace les atterrantes découvertes de pollution faite par l'équipage, notamment aux quatre coins de l'Asie, le continent à l'origine de 80 % de la pollution des océans par le plastique. Il esquisse à la fin du livre la vision d'une possible solution : considérer le plastique comme du pétrole encore utilisable.

DE LA TERRE À L'ASSIETTE
Marc Dufumier
Arary, 2020
240 pages, 18,90 euros

L'auteur, professeur d'agronomie prédestiné, se pose ici 50 questions interessantes sur l'agriculture et l'alimentation : faut-on un régime végan ? Boire du lait de vache, est-ce mauvais pour la santé ? L'Union européenne croule-t-elle sous le poids d'excédents alimentaires ? L'agriculture industrielle met-elle en danger la biodiversité ? Très claires, ses réponses, souvent incisives, sont aussi intéressantes que les questions posées.

MA GRANDE FAMILLE
Karin Bojs
Les Arènes, 2020
480 pages, 20 euros

La lecture de ce livre éclectique est une excellente facon d'acquérir une vision de la vie de nos ancêtres européens. Du reste, c'est bien parce qu'elle manquait d'information sur sa propre famille que l'autrice, une journaliste scientifique suédoise, s'est lancée dans un parcours commençant il y a 54 000 ans et se terminant en 2014, parcours qui couvre l'histoire d'*Homo sapiens* en Europe. Toujours méticuleuse, jamais ennuyeuse, sa plume vole élégamment.

LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

COMMUNIQUER TOUT EN RESTANT MASQUÉ

Dans le contexte du déconfinement, l'utilisation d'applications de traçage soulève des questions sur les moyens de protéger son identité.

Est-il possible d'échanger des informations sans avoir besoin de révéler son identité ou d'autres informations personnelles?

En mai dernier, l'organisation du déconfinement a suscité des débats sur les avantages et les inconvénients des «brigades sanitaires», des applications de traçage centralisées, décentralisées, etc. Ces discussions ont mis en lumière une question sur laquelle les informaticiens travaillent depuis longtemps: comment échanger de l'information sans dévoiler son identité?

Imaginons par exemple que, pendant une épidémie, Alice et Bob se rencontrent et que, trois jours plus tard, Alice tombe malade. Comment peut-elle prévenir Bob pour qu'il s'isole, se fasse diagnostiquer et interrompe ainsi la chaîne de contamination?

Une première approche consiste, pour Alice, à noter préalablement dans un carnet le numéro de téléphone de Bob et celui de toutes les personnes qu'elle rencontre afin de les prévenir si jamais elle tombe malade. Mais Bob ne veut pas nécessairement donner son numéro à Alice. Et s'il refuse, il ne sera pas prévenu. Un tel «algorithme», qui oblige à décliner son identité à toutes les personnes que l'on rencontre, est intrusif. Et il est peu efficace, car il est difficile de noter l'identité de toutes les personnes que l'on rencontre, surtout si elles ne coopèrent pas. C'est pourtant ainsi que procèdent en général les médecins pour éviter les épidémies: quand une personne tombe malade, un enquêteur cherche à identifier toutes les personnes avec qui elle a été en contact, pour leur proposer des soins.

> **Il existe des protocoles respectueux de la vie privée**

Pour éviter ces algorithmes intrusifs, les informaticiens en ont inventé d'autres, plus respectueux de la vie privée. Par exemple, quand Alice et Bob se rencontrent, ils choisissent l'une et l'autre un pseudonyme, par exemple Xlthlx et Qfwfq, et communiquent à une tierce personne, Zoé, l'information que Xlthlx et Qfwfq se sont rencontrés. Quand Alice tombe malade, elle indique à Zoé que la personne dont le pseudonyme est Xlthlx est malade et Zoé en déduit que la personne dont le pseudonyme est Qfwfq a été en contact avec une personne tombée malade depuis. Bob, tous les jours, demande à Zoé si Qfwfq a été en contact avec une personne malade.

Cet algorithme, dans lequel Zoé enregistre toutes les paires de pseudonymes à l'échelle d'un pays ou d'un continent, est dit «centralisé». C'est approximativement ainsi que fonctionne le protocole ROBERT, qui est utilisé en particulier dans l'application de traçage StopCovid.

Mais il est aussi possible de se passer de Zoé. Bob peut lui-même noter qu'il a été en contact avec une personne dont le pseudonyme est Xlthlx et Alice peut prévenir le monde entier que la personne dont le pseudonyme est Xlthlx est malade, afin que Bob, parmi d'autres, sache qu'il a été en contact avec une personne malade.

Mais cet algorithme, dit «décentralisé», demande de rendre publique beaucoup d'informations, car tout un chacun doit savoir que la personne dont le pseudonyme est Xlthlx est malade, pour déterminer s'il a été en contact avec une personne tombée malade depuis ou non (dans l'algorithme centralisé, cette information n'est connue que d'Alice et de Zoé). C'est l'idée qui est derrière le protocole DP3T.

Dans les deux cas, Bob est prévenu sans avoir besoin de communiquer à Alice, ni à personne, son numéro de téléphone ou son nom. Ces protocoles sont donc peu intrusifs. Cependant, si une utilisation «normale» de ces protocoles est peu intrusive, ils présentent les uns et les autres de potentielles failles de sécurité.

L'épidémie de Covid-19 a fait émerger un domaine entier au sein de la théorie des protocoles et les chercheurs développent de nouveaux protocoles qui présenteront encore plus de garanties pour la vie privée, mais ils ne seront sans doute prêts que pour la prochaine épidémie...

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria, enseignant à l'École normale supérieure [illegible] national pilote d'éthique du numérique.

© Shutterstock.com/StunningArt

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

PAG20STD

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

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

59€ Au lieu de 82,80€

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

79€ Au lieu de 114,40€

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

99€ Au lieu de 174,40€

* Prix de vente en kiosque et tarifs aux archives. Réduction : 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.

2 / J'indique mes coordonnées

☐ Mme ☐ Mr

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

.....

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

Téléphone

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @.....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Chèque** à l'ordre de Pour la Science

☐ **Carte bancaire**

N° | | | | | | | | | | | | | | | |

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

Signature obligatoire :

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

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

LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

UNE CHLOROQUINE DEVENUE POPULISTE

La controverse autour de l'usage de la chloroquine contre le Covid-19 est un révélateur de la défiance vis-à-vis des institutions biomédicales et pharmaceutiques.

« Nous tombons dans l'avenir en reculant », l'affaire politicomédiatique autour des prises de position de l'infectiologue marseillais Didier Raoult remet au goût du jour ce vers de Paul Valéry. Sa déclaration fin mars en faveur d'un traitement à base de chloroquine, un antipaludéen, comme solution préventive contre le Covid-19 déchaîne des passions qui ne sont pas uniquement scientifiques.

Cette polémique présente un incroyable mélange des genres entre le régime de vérité scientifique et celui des communautés d'opinions plaidant pour une légitimité démocratique. En effet, les expertises soulignant les faiblesses méthodologiques des études censées montrer l'utilité de la chloroquine et ses dérivés contre le Covid-19 se heurtent à des revendications de justice médicale visant une égalité d'accès aux thérapies proposées. Le plébiscite populaire autour de la chloroquine pose en vérité publique ses effets bénéfiques dans la lutte contre le Covid-19, alors même que plusieurs études suggèrent que l'administration de cette molécule dans ce contexte est inefficace, voire délétère.

Cette affaire, comme d'autres dans le passé, témoigne de divers mécanismes de défiance envers les évaluations scientifiques des médicaments (V. Tournay et A. Pariente, *Therapies*, vol. 73(3), pp. 341-348, 2018) et les modes de production des connaissances publiques. Elle révèle que les perceptions collectives de la chloroquine ne reposent pas seulement sur la fiabilité des études cliniques, ni, plus largement, sur les niveaux de preuve biologique et statistique.

> **Les normes relatives aux essais cliniques sont contestées sur les médias sociaux**

La controverse médiatique montre que le traitement politique de la science mobilise trois registres. Le premier est le niveau de la culture scientifique, identifiable par la patrimonialisation des savoirs biologiques et méthodologiques. Marquée par des figures mythiques comme Louis Pasteur ou Marie Curie, cette représentation de la science constitue un vecteur de progrès pour plus de trois Français sur quatre. Elle est pourtant remise en cause à travers le rejet de la vaccination, qui concernerait près d'un quart des Français si cette solution était proposée pour le Covid-19.

La deuxième dimension renvoie à la production institutionnelle des savoirs scientifiques. Les normes relatives aux essais cliniques sont fortement contestées sur les médias sociaux – un discrédit qui est concomitant au décloisonnement des controverses d'experts par l'arrivée d'internet. On assiste à une immixtion progressive du jugement démocratique dans les questions toxicologiques et médicamenteuses. Ainsi, les polémiques autour de la nouvelle formule du Levothyrox, en 2018, ou la forte séduction exercée par les thérapies non homologuées témoignent de l'étendue de la défiance des publics à l'égard de la production des médicaments et des institutions qui la contrôlent.

Troisième registre, la science devient un objet de communication politique qui prend appui sur des symboles d'opposition épiques. Ainsi, les déclarations de Didier Raoult sont défendues par des personnalités qui évoquent des fractures françaises fortement ancrées dans les imaginaires populaires, tels que le rejet de l'*establishment* médical et de *big pharma* ou les tensions entre Paris et la province. On a pu voir des supporters de football brandir une banderole « Marseille et le monde avec le professeur Raoult » en soutien à la pétition impulsée par l'ancien ministre de la Santé Philippe Douste-Blazy pour autoriser l'usage de la chloroquine contre le Covid-19. La chloroquine serait-elle soluble dans le populisme ? ■

VIRGINIE TOURNAY, biologiste de formation,

© Matyo

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET

15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE

Crédit photo : © Christophe Abramowitz

france inter

INTERVENEZ

ABONNEZ-VOUS AU PODCAST DE L'ÉMISSION

NATHALIE FEUILLET
est responsable de l'équipe de Géosciences marines à l'institut de physique du globe de Paris (IPGP). Elle codirige certaines des missions océanographiques *Mayobs* menées pour étudier les phénomènes sismiques et volcaniques touchant l'île de Mayotte depuis 2018.

ARNAUD LEMARCHAND
est ingénieur de recherche à l'institut de physique du globe de Paris.

Mayotte a vécu la plus grande éruption sous-marine jamais documentée

Mayotte, petite île française située entre Madagascar et le continent africain, ne connaissait pas de séismes importants. La situation a changé en 2018 avec l'apparition d'une énorme activité volcanique sous-marine à l'est de l'île. Nathalie Feuillet et Arnaud Lemarchand, de l'institut de physique du globe de Paris (IPGP), nous racontent la découverte de ce phénomène extraordinaire et les recherches entreprises pour le comprendre.

Quelle est l'origine du volcanisme à Mayotte ?

Nathalie Feuillet : Mayotte, dans l'archipel des Comores, est une île volcanique qui a commencé à s'édifier il y a environ 20 millions d'années. L'origine exacte de son volcanisme est controversée. L'une des hypothèses est la présence d'un point chaud, c'est-à-dire d'une remontée massive de matière chaude depuis les profondeurs du manteau terrestre. Une autre attribue ce volcanisme à un système de fractures faisant partie du rift est-africain, ce grand fossé parsemé de volcans courant de l'Éthiopie au Malawi, qui s'élargit et fracture lentement l'Afrique.

Selon la théorie du point chaud, Mayotte serait la plus ancienne île de tout l'archipel des Comores, et l'île de la Grande Comore serait le témoignage le plus récent de sa présence. Toutefois, la morphologie bien préservée de cônes volcaniques et de cratères à l'est de Mayotte – à Petite-Terre et à Mamoudzou – suggère une activité volcanique récente. Elle est attestée par le carottage, réalisé en 2005 dans le lagon de Mayotte par une équipe franco-allemande, qui a révélé un dépôt de cendre volcanique daté de quelques milliers d'années seulement. Tous ces indices d'activité récente, et surtout la découverte d'une nouvelle éruption et d'un nouveau volcan au large de l'île, nous amènent à revoir nos théories sur l'origine de Mayotte.

Comment a-t-on découvert l'éruption ?

N. F. : Tout a commencé le 10 mai 2018 par de très forts séismes à l'est de Mayotte. Le 15 mai, un séisme de magnitude 5,9 a fait des dégâts sur l'île et apeuré la population, ce qui, de mémoire humaine, n'était jamais arrivé. Au départ, nous n'avions aucune idée précise de l'origine du phénomène, puisque la région de Mayotte n'était considérée ni à risque sismique, ni à risque volcanique. Les séismes étaient organisés en essaims, c'est-à-dire en séries de séismes produits sur des périodes de temps courtes. Cela suggérait autre chose qu'un événement tectonique ponctuel; c'était plutôt caractéristique d'une activité volcanique.

Vous avez donc relié ces essaims de séismes à un possible volcanisme ?

N. F. : Oui, d'autant plus que l'activité sismique s'est poursuivie pendant deux mois. Il y a eu un bref retour au calme à l'été 2018, mais qui a très vite été suivi d'une reprise de l'activité sismique en septembre. En outre, les stations géodésiques de l'île ont enregistré de très importantes déformations du sol: Mayotte se déplaçait vers Madagascar et s'enfonçait de plusieurs centimètres par an, ce qui est considérable. Ces signes faisaient penser à la vidange d'un réservoir magmatique. Le 11 novembre 2018, un étrange phénomène est venu conforter cette hypothèse: vingt minutes durant, les stations sismiques du monde entier ont enregistré un fort signal sismique de très basse fréquence issu de quelque part à l'est de Mayotte; or ce genre de signal est caractéristique d'une activité volcanique. L'occurrence de cet événement a provoqué une intense discussion sur Twitter entre sismologues de tous les pays. À partir de ce moment-là, nous savions avoir affaire à un phénomène magmatique important.

Où pouvait-il se situer ?

N. F. : Les données des stations sismologiques mondiales et régionales indiquaient que le phénomène se déroulait en mer à l'est de Mayotte, mais on ne savait pas où exactement: les sources sismiques se trouvaient dans une vaste zone située à quelques dizaines de kilomètres de l'île. En février 2019, nous sommes allés y placer six « sismomètres fond de mer », des instruments qui enregistrent les mouvements du fond marin. Nous avons ainsi découvert que les sources des séismes étaient toutes localisées le long d'un alignement de volcans sous-marins. La grande majorité d'entre elles se trouvaient sous des structures volcaniques situées à quelques kilomètres seulement de Petite-Terre, à des profondeurs se mesurant en dizaines de kilomètres.

Êtes-vous aussi allés observer ce qui se passait au fond ?

N. F. : En mai 2019, grâce au soutien de l'État, le *Marion Dufresne* a été affrété. Le navire amiral de la flotte des TAAF, la collectivité des Terres australes et antarctiques françaises, possède en effet des instruments qui nous ont permis de mener la campagne d'observation *Mayobs 1*. Notre objectif était d'acquérir les données des sondeurs multifaisceaux de coque afin de faire de la bathymétrie, c'est-à-dire la cartographie du fond océanique, mais aussi d'obtenir des images de la colonne d'eau et du fond, de sonder les sédiments et finalement de recueillir des données magnétiques et gravimétriques. Nous voulions mettre en évidence des traces d'activité volcanique récente sur le fond océanique.

>

> Et en avez-vous trouvé ?

N. F. : Un soir, l'équipe de quart a détecté un important panache acoustique se propageant dans la colonne d'eau. Un tel phénomène résulte d'une variation de la vitesse des ondes sonores et peut être dû au passage d'une baleine, d'un banc de poissons, d'un courant d'eau, etc. Nous avons tout de suite soupçonné que l'origine de ce panache était plutôt une remontée de gaz volcaniques. Le panache que nous voyions au-dessus d'un fond à 3000 mètres, situé à 50 kilomètres à l'est de Mayotte, mesurait près de 2 kilomètres de haut. Nous n'avions jamais rien vu de tel. Ce que nous observions était tout simplement extraordinaire.

Pour savoir d'où il venait, nous avons comparé nos données bathymétriques à des données plus anciennes collectées dans la zone en 2014 par le *Beautemps-Beaupré*, le navire océanographique du Shom, le Service hydrographique et océanographique de la Marine. Nous avons ainsi mis en évidence un nouveau relief : nous assistions à la naissance sur le territoire français d'un grand volcan sous-marin…

Grand comment ?

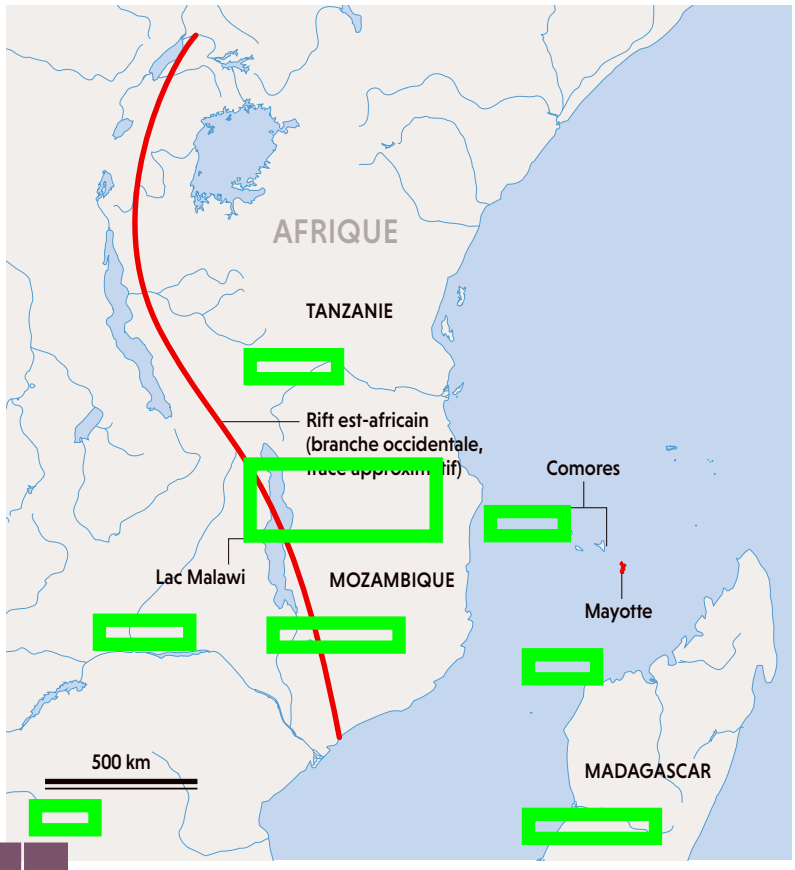
N. F. : Il mesure 5 kilomètres de diamètre et plus de 800 mètres de haut. Cela représente une énorme quantité de lave déversée : de l'ordre de 5 kilomètres cubes en un an environ. C'est comme si l'on avait recouvert la moitié de la ville de Paris d'une couche haute de plusieurs centaines de mètres de lave. Le volcan mesure trois fois la tour Eiffel. C'est la plus grande éruption sous-marine jamais documentée.

Qu'avez-vous alors fait pour en savoir plus ?

N. F. : Nous avons pu collecter plusieurs kilogrammes de lave fraîche, tout juste mise en place, sur le flanc du volcan. À peine déposées sur le pont du *Marion Dufresne*, ces roches ont explosé, projetant des fragments à plusieurs mètres de hauteur. Il s'agissait de ce que l'on nomme en anglais des *popping rocks* : des roches qui explosent parce qu'elles sont pleines de bulles de gaz volcanique. Lorsqu'elles arrivent en surface, du fait de la différence de pression entre le fond de la mer et la surface, le gaz contenu dans ces bulles se décomprime en brisant la roche qui l'enferme. Ces roches sont rares. Seules quelques expéditions scientifiques en ont récolté, sur des dorsales océaniques principalement. C'est à ma connaissance, la première fois qu'on en récolte de toutes fraîches.

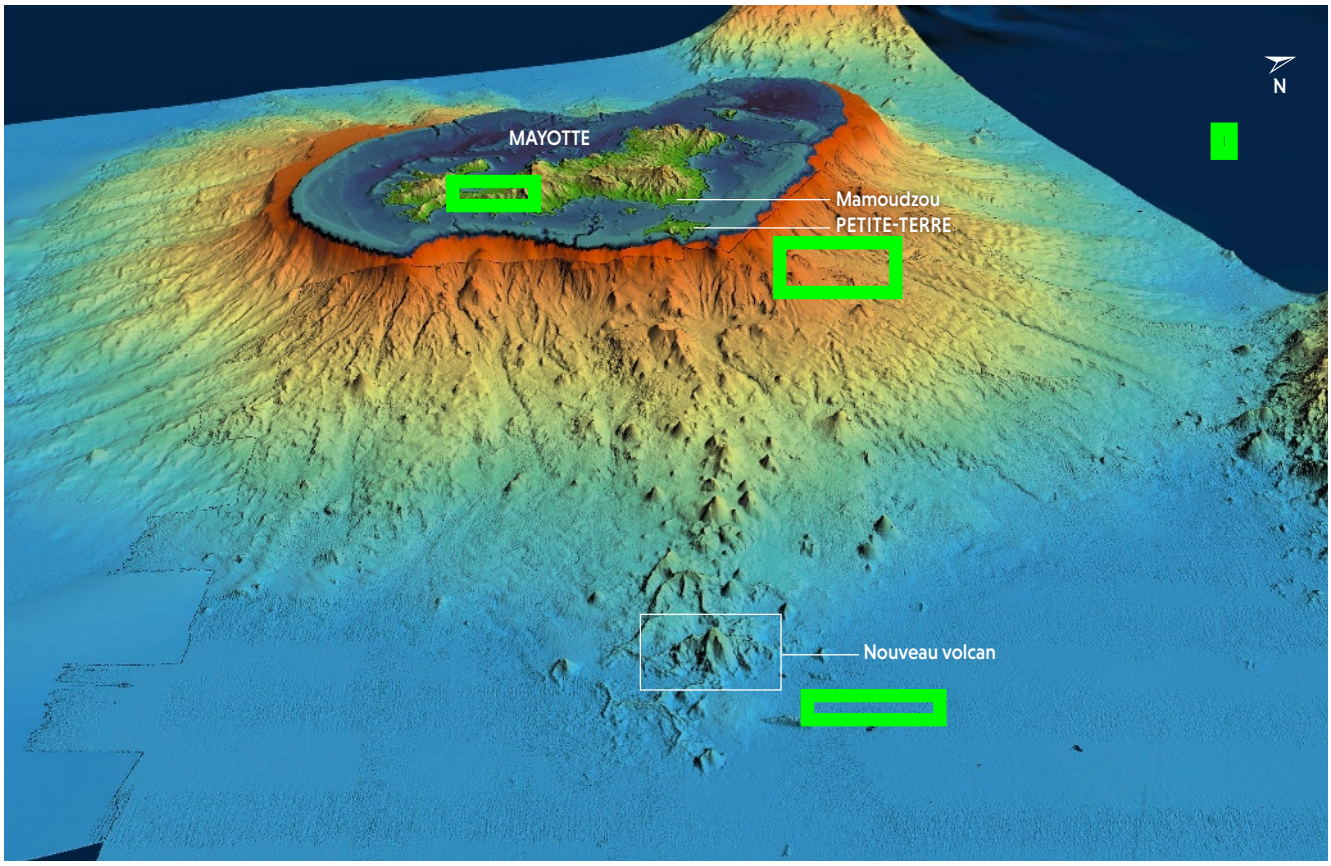
A-t-on une idée de l'origine de l'éruption ?

N. F. : Pour l'instant, deux équipes, celle de Simone Cesca, de l'Institut allemand pour la recherche sur les géosciences à Potsdam, et celle d'Anne Lemoine, du BRGM, le Bureau de recherches géologiques et minières, ont publié des résultats qui permettent d'avancer sur la compréhension de cette éruption. L'équipe de Simone Cesca a exploité les données des séismes forts collectées dès mai 2018 par le réseau mondial de stations sismologiques. Celle d'Anne Lemoine a utilisé des données des réseaux sismologiques terrestres de Mayotte et des autres îles des Comores. Les deux études ont aussi mis à profit des données géodésiques disponibles sur l'île de Mayotte. Ces chercheurs ont pu localiser les sources des séismes et détecter de nombreux signaux de basse fréquence similaires à celui



Le nouveau volcan mesure 5 kilomètres de diamètre et plus de 800 mètres de haut

© Pour la Science, d'après Eric Gaba/Wikimedia Commons



L'île de Mayotte *(ci-dessus)* est la partie émergée d'un grand édifice volcanique datant d'une vingtaine de millions d'années. Elle fait partie de l'archipel des Comores, qui pourrait se trouver dans un système de fractures associé à la branche orientale du rift est-africain *(la ligne rouge sur la carte de gauche)*. En mai 2019, une mission française embarquée a découvert à 50 kilomètres à l'est de Mayotte un nouveau volcan. Il résulterait de l'épanchement du magma d'une chambre magmatique allongée, située à une quinzaine de kilomètres de profondeur entre Mayotte et le nouveau volcan.

du 11 novembre 2018. Cela a permis de diagnostiquer une remontée de magma depuis un réservoir profond jusqu'à la surface.

Quel mécanisme d'éruption proposent-ils ?

N. F. : Avec ses collègues, Simone Cesca propose que du magma ait migré jusqu'en surface, jusqu'à l'emplacement du nouveau volcan, depuis une chambre magmatique située à 30 kilomètres de profondeur et à 30 kilomètres à l'est de Mayotte. Quand le magma migre vers la surface, la chambre magmatique se vide, ce qui peut provoquer un effondrement du fond marin en activant des failles situées directement à la verticale de la chambre. Ce genre d'effondrement est bien connu, mais très rare. Il s'est cependant produit récemment, en 2007 à La Réunion, en 2014 en Islande et en 2018 à Hawaii. Cependant, le groupe de Simone Cesca a calculé que pour que cela arrive, il faudrait que 230 kilomètres cubes de magma sortent du réservoir, soit 50 fois plus que le volume déjà émis par le nouveau volcan. Pour l'instant, ce scénario est très peu probable, mais il faut tout de même en tenir compte pour évaluer les risques.

Êtes-vous d'accord avec ce mécanisme ?

N. F. : Dans l'ensemble, oui. Nos données confirment en effet l'hypothèse de l'existence d'un réservoir profond en train de se vidanger à l'est de Mayotte. Comme nous avons utilisé des données en mer et que nous étions au plus près du phénomène, nous pouvons le décrire avec beaucoup plus de précision. Mais surtout, nos données sont indispensables pour documenter les traces d'activité volcanique sur le fond marin. La découverte du volcan a permis à nos collègues d'affiner leur scénario.

Que s'est-il passé depuis la découverte du volcan ?

N. F. : Après la campagne *Mayobs 1*, l'État a rendu possible la création du Réseau de surveillance volcanologique et sismologique de Mayotte (Revosima). Ce réseau est opéré par l'IPGP en partenariat avec le CNRS, l'Ifremer et le BRGM. Depuis, plusieurs autres >

© Équipe Mayobs 4 CNRS/IPGP/Ifremer/BRGM/université de Paris

> campagnes à la mer ont eu lieu dans le cadre du Revosima. Plusieurs d'entre elles avaient pour but de poser puis de récupérer les sismomètres fond de mer et d'analyser les signaux enregistrés. L'idée est d'avoir un enregistrement le plus continu possible de l'activité sismique. Depuis mai 2019, l'activité sismique se poursuit dans les mêmes zones, mais a largement diminué. La déformation de l'île a aussi beaucoup ralenti.

Au cours des campagnes qui ont succédé à la campagne *Mayobs 1*, et ce jusqu'à la dernière mission avec le sondeur multifaisceaux, en août 2019, nous avons montré que l'éruption était toujours en cours, en mettant en évidence de nouvelles coulées importantes des deux côtés du volcan. Certaines mesurent jusqu'à 150 mètres de hauteur et couvrent plusieurs kilomètres carrés. Cependant, nous avons constaté que le nouveau volcan ne grandit plus. Les panaches de près de 2 kilomètres de haut observés en mai et juin 2019 avaient disparu en juillet, mais d'autres, moins hauts, s'élevaient au-dessus des coulées récentes.

Nous avons aussi observé des coulées à l'aide d'une caméra. Elles étaient formées de roches magmatiques effusives, comme celles que l'on observe à Hawaii et sur d'autres volcans de point chaud, ou encore le long des dorsales océaniques. Parce qu'elles sont constituées de nombreux bourrelets parallèles, ces laves sont dites « cordées » ou « en cousins ». Nous avons prélevé plus d'une dizaine d'échantillons pour analyser leur composition chimique et pétrologique et en savoir plus sur la formation du volcan.

L'activité volcanique pourrait-elle se poursuivre ?

N. F. : Le groupe de Simone Cesca suppose un réservoir d'une quinzaine de kilomètres de large, donc beaucoup plus grand que celui qui a déjà été vidangé. Le matériel pourrait être suffisant pour que l'éruption se prolonge, surtout si le réservoir continue à être alimenté. Il faut aussi qu'une certaine pression se maintienne dans le réservoir pour que le flux de magma vers la surface se poursuive. Cela pourrait être le cas si le toit du réservoir continue de s'effondrer. Certaines grandes éruptions dans le rift africain ont duré plusieurs années et certains volcans sous-marins de la zone des Mariannes, notamment le Mata Ouest, près des Tonga, sont en éruption depuis plusieurs années.

Le *Marion Dufresne* est le navire amiral des Terres australes et antarctiques françaises (TAAF). Il est spécialement équipé pour assurer sur de très grandes distances ses missions logistiques et sanitaires mais aussi océanographiques.

© Nelly Gravier - TAAF

Quels risques cela représenterait-il pour les Mahorais ?

N. F. : Les habitants de Mayotte ont *a priori* peu à craindre de l'éruption sous-marine distante située près du nouveau volcan ; mais il est possible que de nouveaux sites éruptifs apparaissent plus près de l'île, sur la pente insulaire supérieure, là où la plupart des séismes ont lieu. On ne peut pas non plus exclure une éruption à terre, puisque des cônes volcaniques se sont formés à Petite-Terre il y a plusieurs milliers d'années, ce qui est court à l'échelle des temps géologiques. C'est bien pour cela qu'il est indispensable de surveiller ce volcan dans le cadre du Revosima.

Cette surveillance peut-elle être permanente, étant donné le coût élevé des campagnes océanographiques ?

Arnaud Lemarchand : Le Revosima surveille déjà au jour le jour l'activité sismo-volcanique à l'aide des réseaux de capteurs à Mayotte et sur l'île des Glorieuses, et il s'appuie aussi sur le réseau des stations géophysiques régionales installées en Grande Comore, à Madagascar et dans certains pays africains longeant le canal du Mozambique. Toutefois, sans les données de capteurs placés au plus proche de l'activité, cette surveillance reste imprécise, et il faut les affiner avec des données prélevées en mer. L'État a financé des campagnes océanographiques pour plusieurs millions d'euros chacune. Elles ont notamment servi à récupérer les sismomètres fond de mer. Cette façon de fonctionner signifie aussi que l'on ne peut suivre les évolutions du volcan qu'avec trois ou quatre mois de retard, ce qui empêche de suivre les phénomènes rapides, comme les migrations de magma qui peuvent se produire en quelques semaines, voire quelques jours ou moins encore… Il nous semble donc qu'il faut mettre en place une surveillance plus constante et moins chère…

De quelle façon ?

A. L. : Nous proposons d'installer sur le fond marin un observatoire, relié par câble à Mayotte, conçu pour surveiller la zone sismique principale, située à quelque dix kilomètres de Petite-Terre. Il devrait nous permettre de connaître en temps réel l'activité sismique, les sources de déformations du sol et de surveiller les zones les plus susceptibles de glissements de terrain sous-marins, capables de déclencher des tsunamis.

En quoi consistera cet observatoire ?

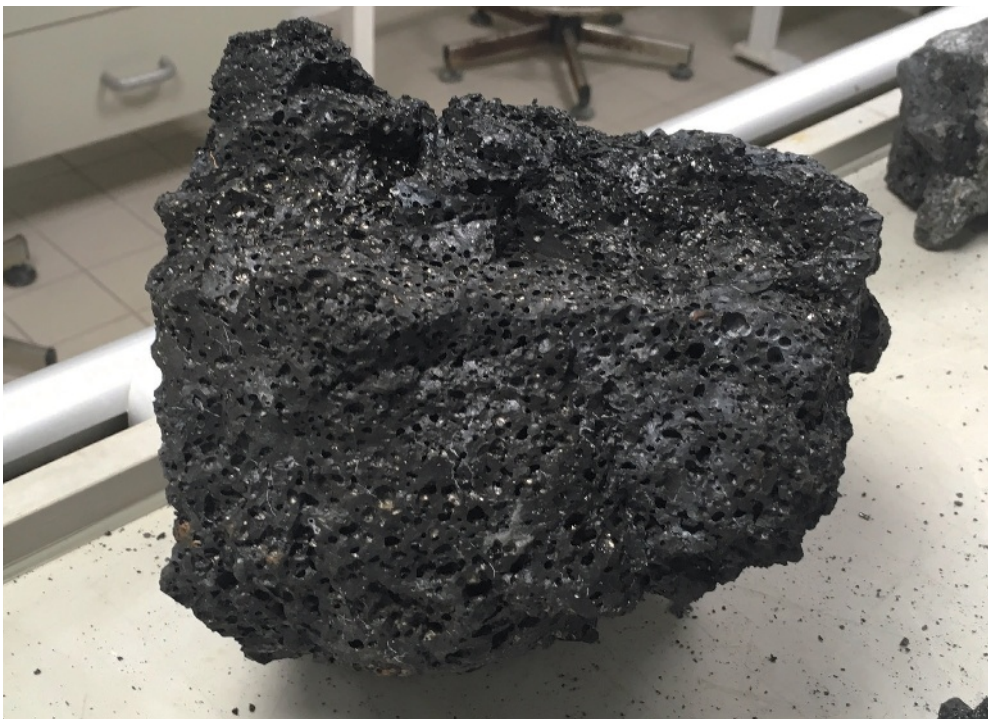
A. L. : Il s'agit en fait d'un réseau d'instruments variés visant à surveiller plusieurs grandeurs physiques. Les stations de mesure seront toutes reliées les unes aux autres par un câble qui transmet les données par fibres optiques et qui alimente les capteurs en électricité. Ce câble arrivera dans un local à terre proche des côtes, qui centralisera les informations et les diffusera à l'observatoire du Piton de la Fournaise à La Réunion, le centre opérationnel de Revosima. Le dispositif est pensé afin de ne pas perdre tout le système en cas d'avarie sur un tronçon de câble ou une station. L'ensemble du projet repose sur les technologies très bien maîtrisées par les compagnies de télécommunications, qui exploitent les nombreux câbles sous-marins assurant 90 % du trafic mondial de l'internet. La conception du système d'observation sous-marin bénéficie aussi de l'expérience acquise par l'observatoire océanographique européen Emso (*European multidisciplinary seafloor and water column observatory*).

> **Sans capteurs placés au plus proche de l'activité, la surveillance reste imprécise**

Quelles grandeurs physiques surveillera-t-on ?

A. L. : Les stations abriteront non seulement des sismomètres, pour mesurer les vibrations du sol et bien détecter et localiser les microséismes, mais aussi des capteurs de déformation du terrain, pour détecter par exemple des gonflements du fond marin en réponse à des remontées de magma ou de gaz sous-jacentes ; des capteurs électriques et magnétiques pour détecter des changements de la résistance électrique du sous-sol, qui signeraient la remontée de fluides volcaniques ; des capteurs géochimiques, afin de surveiller les sites de dégazage identifiés lors des campagnes *Mayobs* de 2019 ; enfin, des capteurs conçus pour suivre l'installation d'organismes vivants sur les nouveaux reliefs sous-marins.

Certaines des fibres optiques contenues dans les câbles sous-marins serviront non pas à transmettre à terre les mesures des capteurs électriques, mais permettront d'opérer deux types de dispositifs de mesure très innovants, purement optiques. Un premier type, commercialisé – le « DAS » (*distributed acoustic sensing*) – consiste à envoyer depuis la terre une impulsion laser à haute cadence dans la fibre et d'en mesurer la diffusion en retour – c'est-à-dire les échos –, et d'analyser les interférences entre échos de segments proches. Ces interférences >



Ce fragment de lave solidifiée, remonté de quelque 3 000 mètres de profondeur près de Mayotte, est une *popping rock*, c'est-à-dire une roche susceptible d'éclater parce qu'elle contient des bulles de gaz volcanique restées à la pression du fond (ici de l'ordre de 300 bars).

> sont très sensibles aux déformations de la fibre lors du passage des ondes sismiques. Leur analyse en temps réel permet d'obtenir des milliers de points de mesure de déformation tout le long de la fibre, qui peut faire des dizaines de kilomètres de long, ce qui fait du câble une sorte d'antenne sismique de milliers de sismomètres.

Un deuxième type de mesure optique plus précis, se fait uniquement à l'extrémité de la fibre, le faisceau laser pointant sur la partie déformable d'un capteur et s'y réfléchissant : ce peut être la masse mobile d'un sismomètre, ou la membrane déformable d'un pressiomètre, appareil qui suit les mouvements verticaux du fond marin. L'interférence produite entre la réflexion sur cette cible mobile et la réflexion en bout de fibre produit un signal lumineux qui peut être traduit en mouvement du sol pour le sismomètre – donc en vibration –, ou en pression d'eau pour le pressiomètre – donc en profondeur. Parce qu'ils sont purement optiques, ces systèmes allient grande résolution et grande robustesse : leurs capteurs en mer ne peuvent pas avoir de panne électronique, l'interrogateur et toute la partie électronique étant à terre à des dizaines de kilomètres des zones de mesure.

Où sera installé ce réseau de surveillance ?

A. L. : Nous prévoyons de l'installer sur la zone de l'essaim sismique principal, à une dizaine de kilomètres des côtes de Petite-Terre. C'est de là que peuvent venir d'éventuels risques pour les Mahorais, de sorte qu'elle exige plus d'attention que le nouveau volcan, plus lointain.

Ce réseau pourrait-il être détruit par une nouvelle éruption ?

A. L. : Les stations installées près des panaches acoustiques seront en effet vulnérables. Les campagnes océanographiques nous ont cependant permis d'identifier les canyons et les coulées de lave récentes que le tracé du câble contourne. Seuls deux câbles secondaires équipés de fibres optiques, utilisées comme capteurs afin de mesurer les contraintes réparties le long du câble, traversent les zones en voie de déstabilisation, où pourraient se déclencher des glissements de terrain qui, s'ils se produisent, détruiront évidemment ces câbles secondaires…

Quand ce réseau de surveillance sera-t-il en place ?

A. L. : Notre projet de système d'observation câblé est soumis au Programme d'investissements d'avenir (PIA) de la France n° 3. Il a été conçu avec toute la communauté scientifique nationale des géosciences et biologie marines et avec quatre grands instituts collaborant dans le cadre du Revosima. S'il est accepté, il débutera en 2021 pour une mise en place un à deux ans après. ■

Propos recueillis par François Savatier

BIBLIOGRAPHIE

S. Cesca *et al.*, **Drainage of a deep magma reservoir near Mayotte inferred from seismicity and deformation**, *Nature Geoscience*, vol. 13(1), pp. 87-93, 2020

F. Paquet *et al.*, **The Mayotte seismo-volcanic crisis : characterizing a reactivated volcanic ridge from the upper slope to the abyssal plain using multibeam batymetry and backscatter data**, AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, décembre 2019 (https ://bit.ly/3dv9f5).

A. Lemoine *et al.*, **The 2018-2019 seismo-volcanic crisis east of Mayotte, Comoros Islands : Seismicity and ground deformation markers of an exceptional submarine eruption**, prépublication EarthArXiv, 28 février 2019 (https ://doi.org/10.31223/osf.io/d46xj).

© Mayobs/N. Feuillet

Leaders in Future Trends, Taiwan Talent Recruitment Program

2020 LiFT TAiWAN

Ministry of Science and Technology R.O.C. (Taiwan) has kept up the call for overseas talent to return to Taiwan and serve. This proactively introduces new international knowledge and technology into Taiwan's industry-academic-research infrastructure, and helps guide Taiwanese industry to break new ground. Taiwan has a great need for excellent people like you to join the Leaders in Future Trends (LIFT) Program. Excellent overseas scholars are welcome to come work with us and become the keys to change!

Applicant Requirements

- Applicants must be under 45 years of age (born after January 1, 1975).
- Academic and work qualifications (must be in one of the following four categories):
  (1) Possesses a doctoral degree from a foreign university, and has at least 2 years of paying work experience at the applicant's last job outside Taiwan.
  (2) Possesses a master's degree from a foreign university, and has at least 3 years of relevant overseas work experience in the field of artificial intelligence.
  (3) Possesses a doctoral degree from a domestic university, has at least 3 years of overseas work experience, and is still overseas at the time of application.
  (4) Applicants who are currently enrolled in an overseas Ph.D. program and plan to graduate before the end of 2020 may submit proof issued by the overseas university that they have passed their oral defense and dissertation review. Once they have received a doctoral degree certificate, applicants must submit a copy to MOST for review.

(See official LIFT website for the most up-to-date specifics)

To Apply

Please apply via the LIFT Program website and upload the following documents:
(1) Official diploma and/or related academic credentials issued by an institution in Taiwan or overseas.
(2) Before the application deadline, applicants must provide proof of study/work overseas during the most recent two years, or R.O.C. (Taiwan) entry and exit records for the most recent three years.

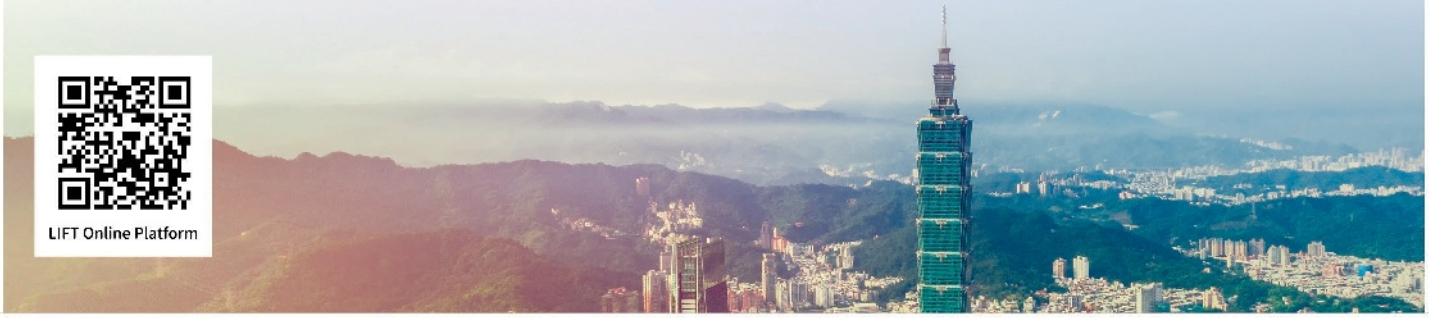
Subsidy Method and Accommodations Arrangement

- The Program will provide subsidies covering single round-trip economy class airfare to and from Taiwan for the selected applicant's attendance at the Leaders in Future Trends O2O Conference, and such airfare will be for the most direct route from the selected applicant's place of residence or work. Selected applicants must submit their electronic ticket, boarding pass, and proof of purchase to obtain reimbursement. Relevant subsidy regulations will be announced on the Program website.
- The Program will arrange professional exchange activities, visits to national development projects and domestic industries, universities, and research organizations, and also hold a talent matchmaking event (10 days in total) for those individuals selected to participate in the Leaders in Future Trends O2O Conference in Taiwan. Subsidies will be provided for accommodations, meals, and transportation during the activity period; other expenses will not be covered.

I Want to Apply

To learn more, please contact :
Ministry of Science and Technology R.O.C. (Taiwan) Leaders in Future Trends (LIFT) Program Office
Tel : +886-2-2737-7956/7746 Email : lift@stpi.narl.org.tw

LIFT Online Platform



Organizer MOST 科技部 Ministry of Science and Technology
Implementer STPI NARLabs 國家實驗研究院 科技政策研究與資訊中心 Science & Technology Policy Research and Information Center

TAMU

L'origine remaniée d'un volcan sous-marin

La mesure des anomalies magnétiques du massif Tamu, un ancien et immense volcan sous-marin du Pacifique nord, change la vision que l'on avait de sa nature et de la formation d'une bonne partie des fonds sous-marins

© Craig Taylor, Mapzilla

L'ESSENTIEL

> Une nouvelle cartographie magnétique des fonds du Pacifique nord indique que le massif Tamu n'est pas un volcan bouclier, contrairement à ce que l'on pensait.

> Cet ancien et grand volcan s'est formé à un endroit où des plaques tectoniques se sont mutuellement écartées.

> Des dizaines de structures volcaniques géantes se seraient formées sur les fonds océaniques de la même façon.

L'AUTEUR

WILLIAM W. SAGER
professeur de géophysique à l'université de Houston, au Texas, aux États-Unis

Le massif volcanique Tamu se trouve sous 2 000 mètres d'eau, à quelque 1 600 kilomètres à l'est du Japon dans le Pacifique nord. Les bandes colorées représentant la signature magnétique inhabituelle du volcan révèlent comment ce géant s'est formé (dans cette image, l'échelle verticale est multipliée par 25).

Malgré ses 83 mètres de long et ses 2000 tonnes, le *Falkor* roulait violemment au milieu de grandes vagues sombres. Notre navire de recherche se trouvait à la mi-octobre de 2015 dans le nord-ouest de l'océan Pacifique, quelque 1600 kilomètres à l'est du Japon. Nous venions d'échapper à une tempête automnale venue de Sibérie, mais la mer était encore agitée. Assis dans le laboratoire installé sur le pont principal, je faisais de mon mieux pour empêcher mon café de souiller la carte des fonds marins étalée devant moi. Pour la énième fois, je contemplais cette carte montrant une série de bandes à peu près parallèles entourant un énorme et très ancien volcan sous-marin : le massif Tamu. Chacune de ces bandes indiquait l'aimantation – dans un sens ou dans le sens opposé – d'une partie du fond marin, mais le motif d'ensemble qu'elles formaient était pour moi une énigme. Il s'accordait mal avec les éruptions successives du Tamu telles que je les concevais…

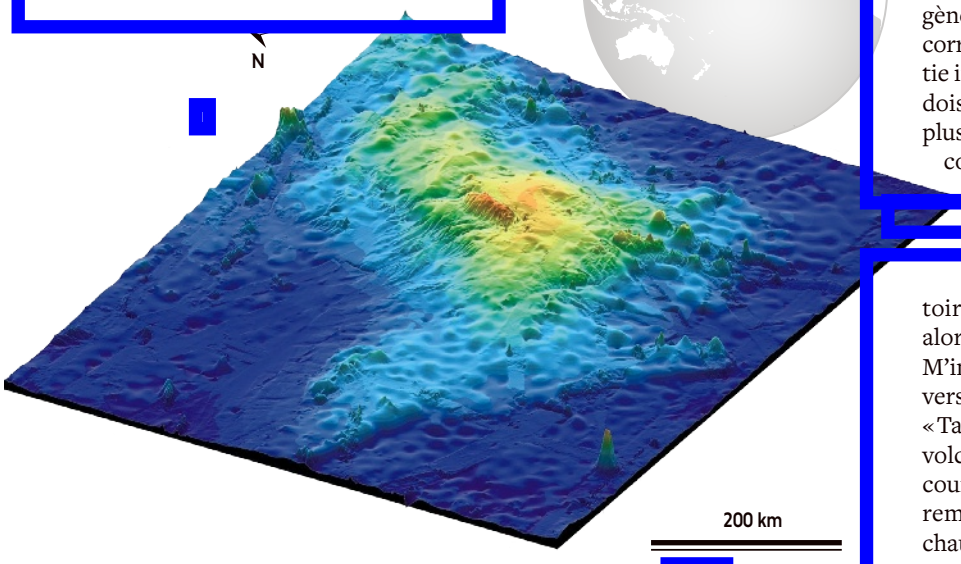
Puis une autre vague frappa le *Falkor*, qui émit une sourde plainte… et je compris soudain ce qui m'échappait depuis vingt ans que j'étudiais ce grand édifice volcanique. Je suis à l'origine de son nom, que j'ai introduit dans les articles dans lesquels je lui ai donné son interprétation définitive, du moins censée l'être… Ce qui m'arrivait sur le pont du *Falkor* relevait moins du « Eureka » d'Archimède que de l'onomatopée « D'oh ! » par laquelle Homer Simpson, personnage principal de la série d'animation *Les Simpson*, signale qu'il a encore commis une gaffe. Notre conception de la façon dont le Tamu s'est constitué était fausse!

Le massif Tamu est un volcan très particulier. Il mesure environ 430 kilomètres de large et 600 kilomètres de long, et couvre donc une surface comparable à la moitié de la France. Il est aussi plus de 50 fois plus volumineux que le plus haut volcan terrestre – le Mauna Loa à Hawaii –, alors qu'il est essentiellement plat. Les pentes de la plupart des volcans sous-marins sont comprises entre 5 et 10 degrés, mais celles du Tamu n'excèdent guère 1 degré. Pour donner une idée, cela correspond à la pente d'un terrain de football entier couvert par une bâche tendue avec un bâton haut de 60 centimètres en son centre.

Le Tamu est le principal relief de l'un des plus vastes plateaux océaniques de la planète, le plateau Shatsky, qui culmine à environ 1980 mètres sous la surface de la mer. Il s'est formé en plusieurs millions d'années d'éruption, il y a quelque 145 millions d'années. Comme la plupart des plateaux océaniques, il est constitué de basalte. Cela signifie que lors de sa formation, de grands volumes de matière chaude se sont élevés au sein du manteau terrestre, les 2885 kilomètres d'épaisseur sous-jacents à la croûte terrestre. Ce basalte a partiellement fondu sous la lithosphère, c'est-à-dire la croûte terrestre et la partie supérieure du manteau, puis s'est frayé un chemin vers le haut avant de s'épancher sur le fond marin.

L'apparence du Tamu semble traduire directement ce processus, mais de nouvelles données, que j'ai recueillies depuis 2015, montrent que l'histoire est différente. Ces données impliquent que, jusqu'à présent, les géophysiciens ont mal compris comment se sont constitués des dizaines d'immenses volcans sous-marins, qui représentent au total 5 à 10 % du plancher océanique. Le massif Tamu est en fait un volcan d'un type entièrement nouveau.

L'éruption d'un tel volcan pourrait acidifier l'océan au point d'éliminer une grande partie de la vie marine et libérerait de grandes quantités de gaz à effet de serre. De fait, il semble que les éruptions passées d'une structure volcanique comparable au Tamu, le plateau d'Ontong Java, dans le sud-ouest de l'océan Pacifique, puissent être associées à des périodes d'acidification et d'appauvrissement en oxygène intenses de l'océan. Et, même si l'idée de corriger notre vision de la formation d'une partie importante des fonds marins me stimule, je dois aussi admettre que le massif Tamu n'est plus le « plus grand volcan bouclier de la Terre » comme on le pensait.



Le massif Tamu, à l'est du Japon, semble constituer un unique volcan sous-marin. Il couvre une superficie d'environ 553 000 kilomètres carrés, ce qui en fait le plus vaste volcan connu du Système solaire. Son sommet culmine à environ 1980 mètres de profondeur et à 4460 mètres au-dessus du fond de l'océan.

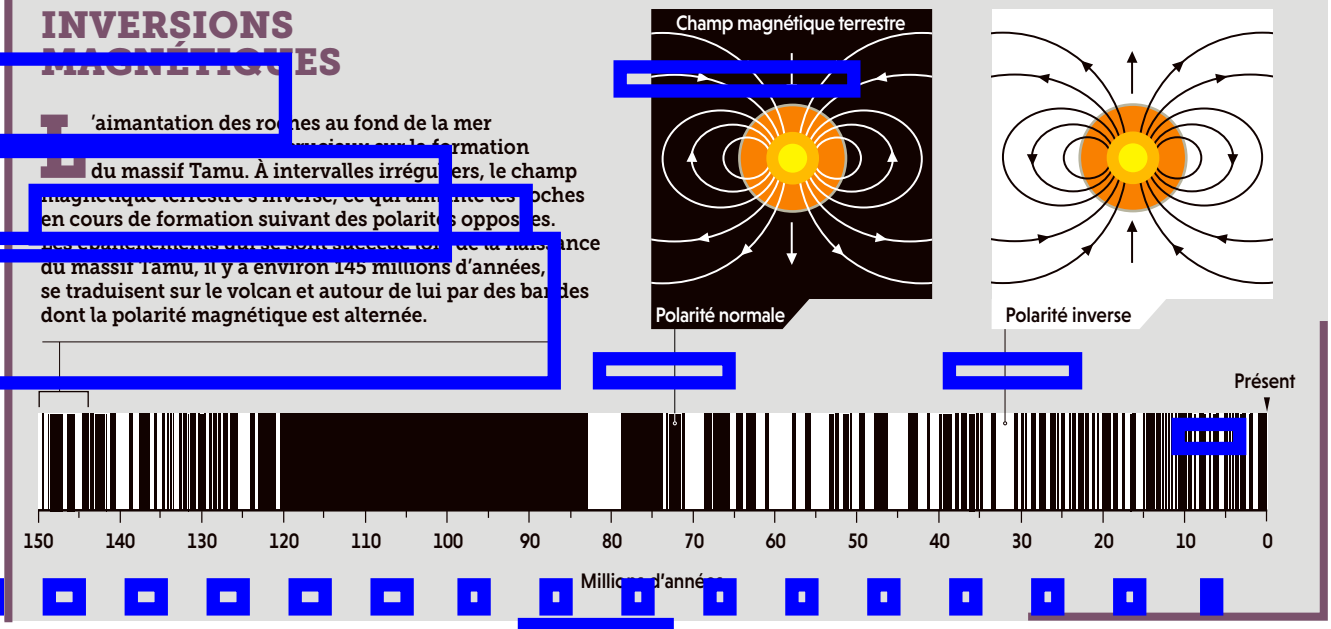
NÉ D'UNE GRANDE ÉRUPTION ? PAS SI SIMPLE !

J'ai publié mon premier article sur l'histoire magnétique du massif Tamu en 1993, alors que le volcan n'avait pas encore de nom. M'inspirant de l'acronyme anglais de mon université, *Texas A & M University*, je l'ai nommé « Tamu ». Je concluais dans cet article que ce volcan avait dû se former en peu de temps au cours d'une grande éruption provoquée par la remontée d'un énorme panache de matière chaude à travers le manteau terrestre.

En bas : © Wikimedia Commons/IODP, en haut : © Pour la Science, © Shutterstock.com/RaiDztor

INVERSIONS MAGNÉTIQUES

L'aimantation des roches au fond de la mer renseigne sur la formation du massif Tamu. À intervalles irréguliers, le champ magnétique terrestre s'inverse, ce qui alimente les roches en cours de formation suivant des polarités opposées. Sachant que l'océan Pacifique a commencé à naître lors de la naissance du massif Tamu, il y a environ 145 millions d'années, ces inversions se traduisent sur le volcan et autour de lui par des bandes dont la polarité magnétique est alternée.



D'après ce que j'écrivais à l'époque, au fil d'une série d'éruptions massives, du basalte liquide s'était écoulé sur les pentes du volcan, ce qui a formé un vaste dôme légèrement bombé. Éruption après éruption, les couches se seraient accumulées, créant une sorte de gâteau stratifié, dont la couche la plus ancienne est au fond et la couche la plus jeune en haut. C'est ainsi que se sont formés tous les volcans boucliers de la Terre. D'autres chercheurs quelques mois ont développé une vision similaire de la formation du Tamu, du plateau d'Ontong Java et du plateau des Kerguelen, au sud de l'océan Indien, dans la région des îles françaises du même nom.

En 2013, après plusieurs missions visant à cartographier davantage le massif Tamu et à prélever des échantillons de ses basaltes, mes collègues et moi avons publié un article dans *Nature Geoscience* stipulant que ce volcan était un énorme volcan bouclier. Les médias déclarèrent bientôt que nous avions découvert le plus grand volcan bouclier du monde. Cette manchette m'a toujours gêné. J'ai bien essayé de faire comprendre aux journalistes que nous n'avions nullement découvert le massif Tamu (sa découverte date du début du XX^e^ siècle) et qu'il existe dans l'océan des plateaux basaltiques plus vastes encore... Mais quelque chose d'autre me dérangeait: le motif magnétique que présentait le volcan correspondait mal à celui que devrait avoir un volcan bouclier stratifié.

Pour comprendre où est le problème, il importe d'abord de rappeler que la polarité du champ magnétique terrestre s'inverse à intervalles irréguliers (*voir l'encadré ci-dessus*), ce qui peut se produire lors de la formation d'un volcan quand celle-ci dure plusieurs millions

> **Le Tamu s'est formé dans une zone où trois plaques tectoniques s'affrontent**

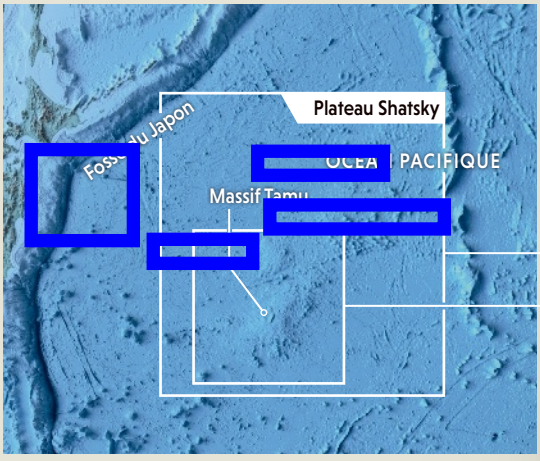
d'années. Ce phénomène crée des bandes de croûte océanique magnétisées de façon différente, selon le moment où elles se sont formées. Ainsi, si l'on pouvait regarder depuis l'espace le fond de l'océan Pacifique en portant des lunettes permettant de voir l'aimantation, on distinguerait de grandes bandes parallèles.

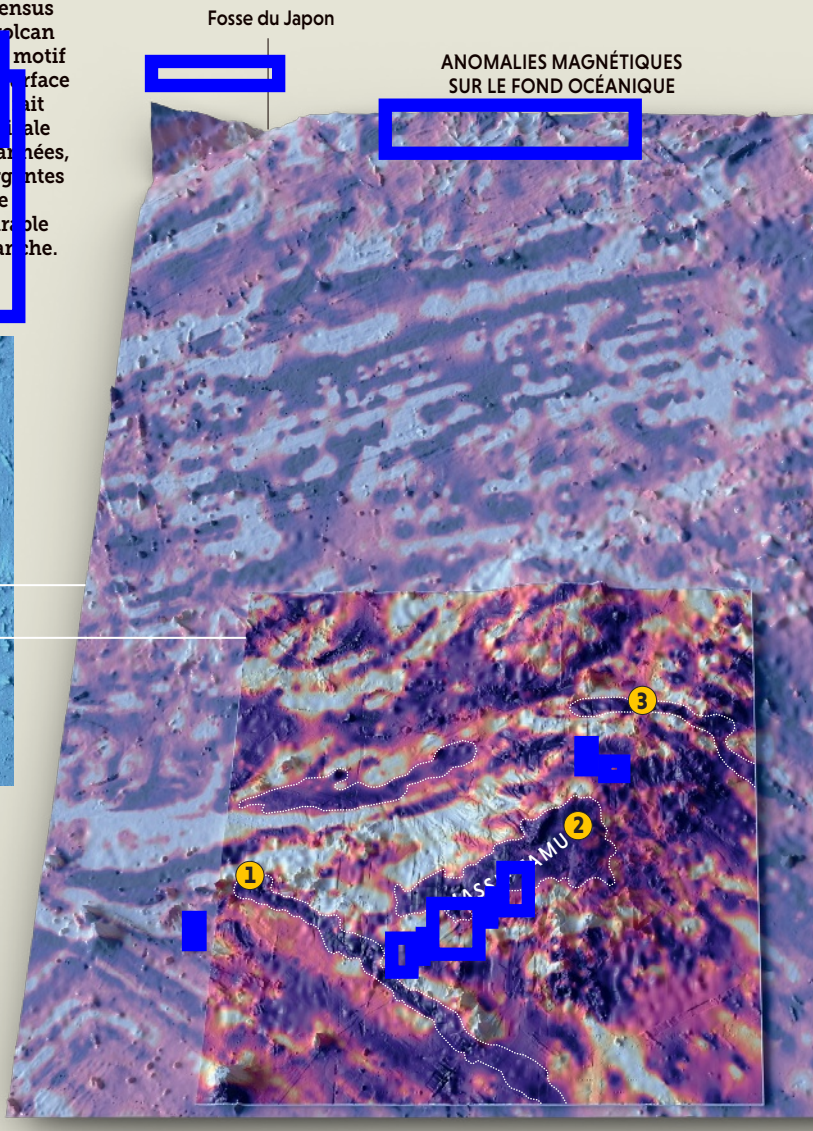
En revanche, sur les volcans boucliers, on s'attendrait à voir comme une large tache, puisque chaque épanchement, aimanté d'une certaine façon, recouvrirait celui qui l'a précédé et qui était aimanté d'une autre façon (*voir l'encadré page 35*). Ne portant pas de lunettes magiques visualisant l'aimantation, j'avais dû aller prélever des données en mer depuis le *Falkor*, où j'ai poussé mon « Eurêka ! » quand je me suis rendu compte que le massif Tamu était traversé par une large bande d'aimantation.

Le Tamu s'est formé sur un point triple, autrement dit une zone où trois plaques >

COMMENT LE MASSIF TAMU S'EST FORMÉ

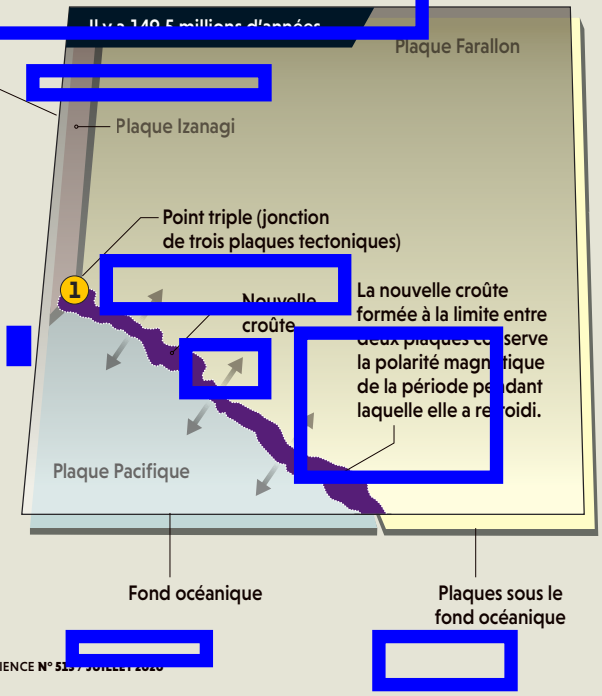
Des années durant, le consensus était que le Tamu est un volcan bouclier classique, mais le motif dessiné par l'aimantation de sa surface contredit cette idée. Il s'avère en fait que c'est plutôt la remontée verticale de magma, il y a des millions d'années, entre plaques tectoniques divergentes qui a fait du Tamu une structure feuilletée verticalement, comparable à un mille-feuille posé sur sa tranche.

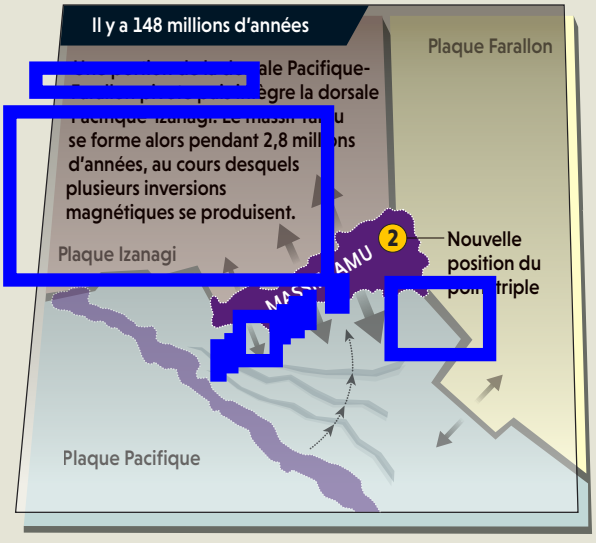


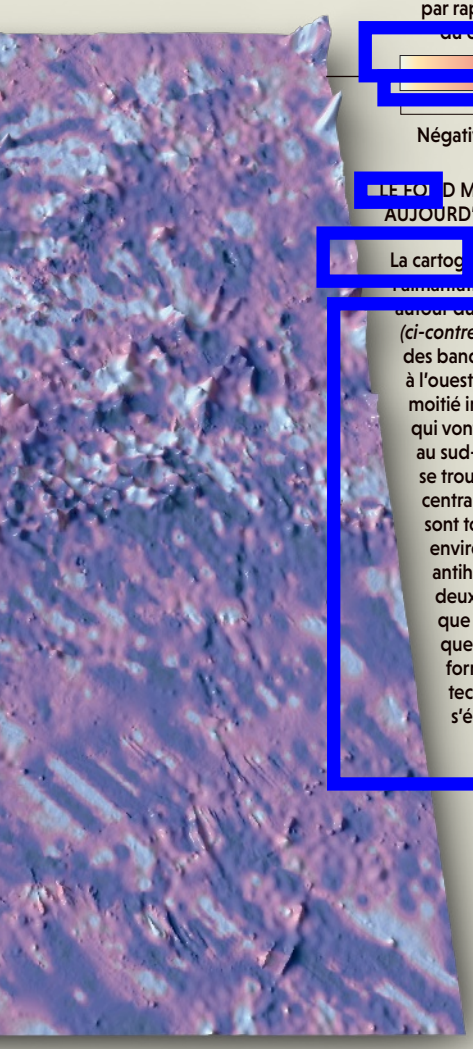


L'HISTOIRE D'UN VOLCAN ZÉBRÉ

Il y a environ 149 millions d'années, trois plaques tectoniques se rejoignaient en un point triple (1) ont commencé à s'écarter près de la région qui allait devenir le massif Tamu. Les espaces entre les plaques se sont remplis de basalte. Puis, il y a 148 millions d'années, alors que le massif Tamu se constituait, le point triple s'est déplacé vers le nord-est, de sorte qu'une partie de la zone séparant la plaque Pacifique de la plaque Farallon a pivoté dans le sens antihoraire pour intégrer la dorsale séparant les plaques Pacifique et Izanagi (2). Cela a fait tourner les bandes d'aimantation du massif Tamu. Il y a 144 millions d'années, après l'arrêt de l'éruption à l'origine du volcan, la jonction entre plaques s'est de nouveau déplacée, car la plaque Izanagi avait migré vers le nord-est (3). La large bande courant sur le volcan indique que le gros des éruptions s'est déroulé lors d'une seule période de polarité magnétique.





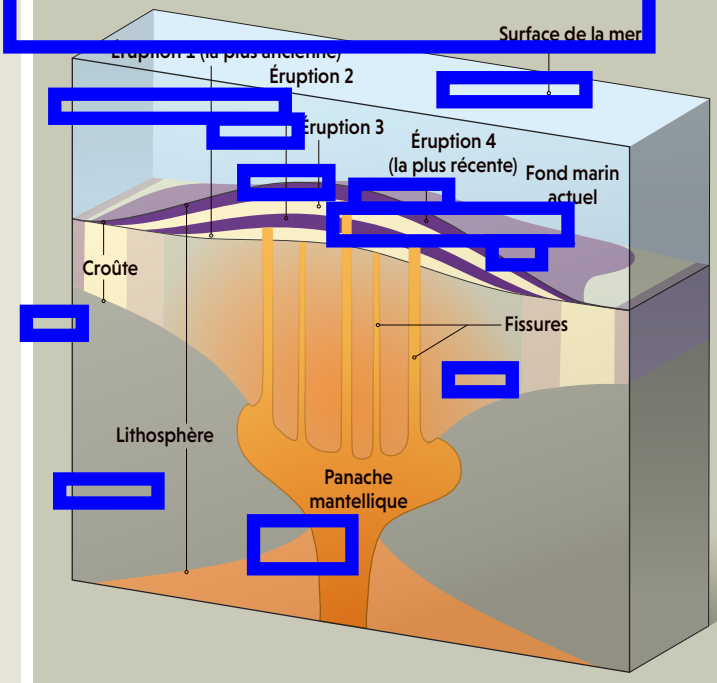


LE FOND MARIN AUJOURD'HUI

La cartographie de l'aimantation du fond marin autour du massif Tamu *(ci-contre à gauche)* révèle des bandes parallèles à l'ouest et à l'est de la moitié inférieure du volcan, qui vont du nord-ouest au sud-est (1). Les bandes se trouvant sur le volcan central lui-même (2) sont tournées à 90 degrés environ dans le sens antihoraire et sont deux fois plus larges que les autres, parce que le volcan s'est formé là où les plaques tectoniques s'écartaient vite.

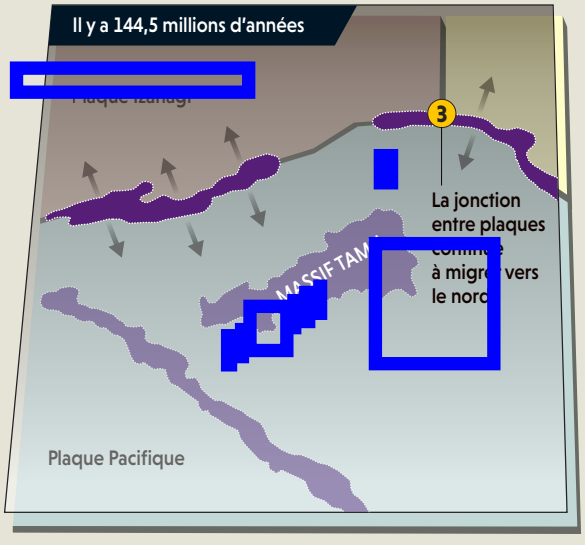
ANCIENNE EXPLICATION : LE GÂTEAU STRATIFIÉ

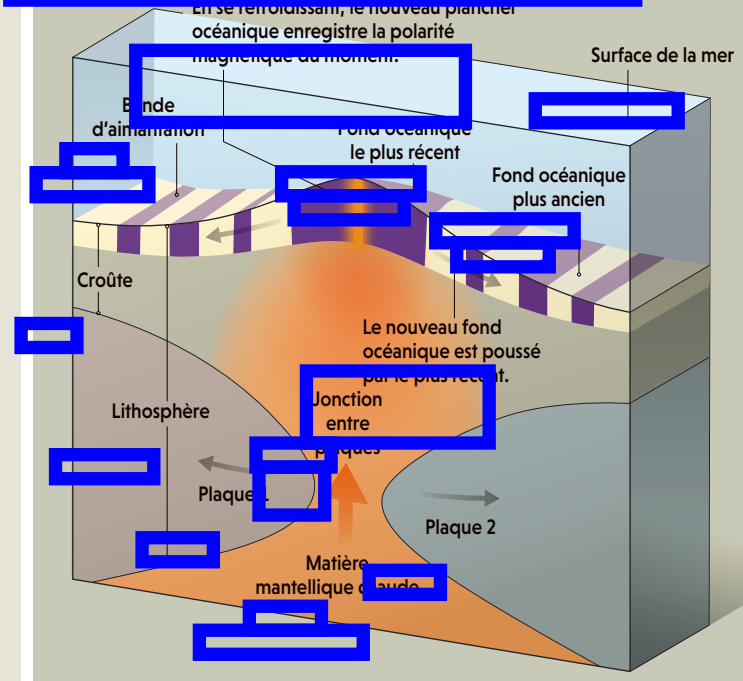
Un volcan bouclier, ce qu'était sans doute le massif Tamu, se forme à l'image d'un gâteau stratifié. Du matériau chaud s'élève des profondeurs du manteau terrestre et, parvenu sous la lithosphère plus froide, fond partiellement, ce qui forme du magma. Une fissure verticale conduit le magma jusqu'en surface, d'où une éruption sur le fond océanique. Le processus se reproduit et ajoute ainsi, couche après couche, ce qui forme un édifice volcanique stratifié.



NOUVELLE EXPLICATION : LE MILLE-FEUILLE VERTICAL

Lorsque des plaques tectoniques divergent, la lithosphère se fend et une fissure s'ouvre le long des bords des plaques. Du magma chaud s'y infiltre puis se solidifie, ce qui forme une nouvelle bande de plancher océanique. Le processus se répète : une bande supplémentaire de plancher océanique se forme et, en se refroidissant, enregistre la polarité magnétique de l'époque. Avec le temps, ce mécanisme crée au fond de l'océan un motif magnétique zébré, qui fait penser à un mille-feuille posé sur sa tranche.





© Cartes de Craig Taylor, Mapzilla, illustrations de Jen Christiansen

> tectoniques s'affrontent, formant trois grands secteurs qui s'ajustent pour se rejoindre en un même point. Lorsque deux plaques se sont écartées, une fissure s'est ouverte le long d'elles ; du magma est alors venu la remplir et a donné du basalte en se solidifiant. Quand les deux plaques se sont de nouveau éloignées, le nouveau ruban formé s'est déchiré le long de son axe et s'est séparé en deux parties, tandis que du magma frais a rempli le nouveau vide ainsi créé.

UN VOLCAN MAGNÉTIQUEMENT ZÉBRÉ

Ce processus s'est répété par la suite, de sorte que le Tamu n'a pas été construit par empilement de couches successives aboutissant à une sorte de gâteau stratifié, mais d'une façon le faisant plutôt ressembler à un mille-feuille posé sur sa tranche : à peine formée, une fente se remplit de pâte ou de crème pâtissière, ce qui ajoute une feuille, puis le processus recommence. Comme la nature du remplissage change d'une feuille à l'autre, un motif rayé en résulte. L'alternance de bandes magnétiques positives et négatives observable sur le massif Tamu constitue un tel motif.

Deux problèmes troublent toutefois cette explication. Le premier est que les rayures changent d'orientation au sud-est du Tamu, en tournant à 90 degrés dans le sens antihoraire. Rétrospectivement, la raison de cette situation me semble assez évidente. Au cours de l'éruption qui a formé le massif Tamu, un morceau de la plaque située au nord-est s'est détaché et déplacé, entraînant une rotation de 90 degrés d'un segment situé près de la triple jonction (*voir l'encadré page 34*). Ce segment se trouve à l'endroit où le massif Tamu s'est formé. C'est au moment où j'ai compris que la structure se trouvant au sud du massif Tamu traduisait la propagation d'une anomalie magnétique que j'ai poussé mon « D'oh ! ».

Le deuxième problème est que, dans le modèle du mille-feuille, chaque nouvelle strie doit avoir la même hauteur que le reste du gâteau fendu, alors que le massif Tamu est plus élevé en son milieu. Je pense que cette structure s'est développée parce que la fusion au centre de l'édifice s'est accrue pour un temps, ce qui a formé une croûte plus épaisse.

UNE NOUVELLE VISION DE SA FORMATION

Afin de convaincre les autres chercheurs de la justesse de notre analyse, mes collègues et moi avons recueilli des données magnétiques sur les fonds marins ainsi que des carottes de forage dans les basaltes de la région. Notre nouvelle vision de la formation du Tamu change celle de la formation des grands plateaux océaniques. La cartographie magnétique de plusieurs autres plateaux implique en effet que beaucoup se sont formés de façon similaire. Les plateaux apparus là où divergent des plaques constituent une nouvelle classe de volcans, et l'hypothèse largement admise selon laquelle les plateaux océaniques seraient de grands volcans boucliers créés par des successions de coulées doit être abandonnée.

Pourquoi nous sommes-nous trompés à ce point dans le passé ? Et qu'est-ce que cela change si le massif Tamu n'est pas un volcan bouclier ? Nous nous sommes trompés parce que les volcans sous-marins sont dissimulés sous des milliers de mètres d'eau, de sorte que nous avons tenté de les décrire à partir de données fragmentaires. C'est un peu comme si l'on essayait de restituer un dinosaure à partir d'une dent et un os d'orteil seulement. Cela conduit à associer de mauvais éléments au sein d'un même dessin en s'inspirant de ce que l'on sait des autres dinosaures. Si les hypothèses adoptées pour mener ces comparaisons sont fausses, le résultat de la restitution sera faux.

Le massif Tamu n'est pas un volcan bouclier. Nous nous sommes trompés

L'hypothèse que nous avions adoptée était que le Tamu était un volcan bouclier, ce qui nous a conduits à conclure qu'il s'était formé comme les autres édifices de ce type, mais l'hypothèse était fausse. Nous avons découvert une nouvelle famille de montagnes volcaniques, et une nouvelle explication de la façon dont certaines structures géantes se sont édifiées – des structures qui se comptent par dizaines sous la mer.

Les scientifiques cherchent à savoir comment les phénomènes se produisent. Cet objectif peut nous amener à remettre en cause de précédentes interprétations. Notre nouvelle compréhension du massif Tamu me donne l'impression d'avoir enfin compris comment toute une classe de volcans se forme. Ce résultat se prête moins que le précédent à des manchettes dans les médias, mais il me rend bien plus heureux. ■

BIBLIOGRAPHIE

W. W. Sager *et al.*, **Oceanic plateau formation by seafloor spreading implied by Tamu Massif magnetic anomalies**, *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 661-666, 2019.

W. W. Sager *et al.*, **An immense shield volcano within the Shatsky Rise oceanic plateau, Northwest Pacific Ocean**, *Nature Geoscience*, vol. 6, pp. 976-981, 2013.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

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

PAG20STD

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

☐ FORMULE PAPIER — 4,90€ — -29 %
- 12 n° du magazine papier

OPV4E90

☐ FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE — 6,50€ — -31 %
- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

OPV6E50

☐ FORMULE INTÉGRALE — 8,20€ PAR MOIS — -43 %
- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

OPV8E20

2 / Mes coordonnées

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

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PRÉLÈVEMENT RÉCURRENT

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

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

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

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Ne rien inscrire

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux [illegible] l'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au [illegible] sur 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 vendues ni louées 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 58.14 Z

L'ESSENTIEL

> Il existe dans la Voie lactée des civilisations technologiquement avancées, elles pourraient se propager très vite à travers la Galaxie. Mais il faut alors expliquer pourquoi la Terre semble n'avoir pas été visitée par des extraterrestres.

> Les réponses habituelles (nous sommes seuls, le voyage interstellaire est impossible, les extraterrestres se cachent...) reposent toutes sur des hypothèses peu plausibles.

> Une autre explication serait que la colonisation galactique se fait par vagues, et que nous vivons actuellement dans une région restée à l'écart de l'exploration interstellaire.

L'AUTEUR

CALEB SCHARF
directeur du centre d'astrobiologie de l'université Columbia, aux États-Unis, et auteur de plusieurs ouvrages, dont *The Copernicus Complex* (2014) et *The Zoomable Universe* (2017)

Seuls dans un archipel galactique ?

S'il existait des extraterrestres capables d'effectuer des voyages interstellaires, ils devraient se propager rapidement dans toute la Voie lactée. Or il n'y a aucune trace de leur passage sur notre planète... Explication possible : le Système solaire serait trop éloigné de leurs grands axes de migration.

Le 15 juillet 1790, à la suite de la fameuse mutinerie du *Bounty*, neuf marins, dix-huit passagers tahitiens et un bébé débarquaient sur l'île de Pitcairn. Perdue dans le sud de l'océan Pacifique, à plusieurs centaines de kilomètres des îles les plus proches, Pitcairn est l'un des lieux habitables les plus isolés de la planète.

Avant l'arrivée des mutins du *Bounty*, l'île avait été occupée pendant plusieurs siècles par des populations venues de Polynésie, puis désertée pendant près de trois cents ans. À la fin du XVe siècle, un appauvrissement des ressources naturelles et des conflits avec d'autres îles lointaines, qui ont perturbé les liens de commerce et les voies de ravitaillement, auraient mis un terme à l'occupation humaine de Pitcairn, laissant l'île inhabitée jusqu'à l'arrivée du *Bounty* en 1790. Étonnamment, aucun autre navire n'a jeté l'ancre à Pitcairn pendant dix-huit ans, même si les colons ont confié avoir vu des vaisseaux passer au loin.

L'histoire de Pitcairn n'est qu'un exemple extrême de la dynamique inhabituelle de l'occupation humaine du sud du Pacifique. La Polynésie, la Micronésie et la Mélanésie englobent des dizaines de milliers d'îles parpillées sur des millions de kilomètres carrés d'océan. La plupart ne sont guère plus que de modestes protubérances rocheuses ou coralliennes. Et les lieux habitables ne sont d'ailleurs pas tous occupés à tout moment donné. Néanmoins, ils représentent un vaste >

© Maria Corte

Peut-on comparer la Galaxie à un vaste océan où les espèces technologiquement avancées voyageraient comme les marins voguant d'île en île ?

> potentiel d'implantation pour qui serait prêt à traverser les vastes et profondes étendues marines de la planète.

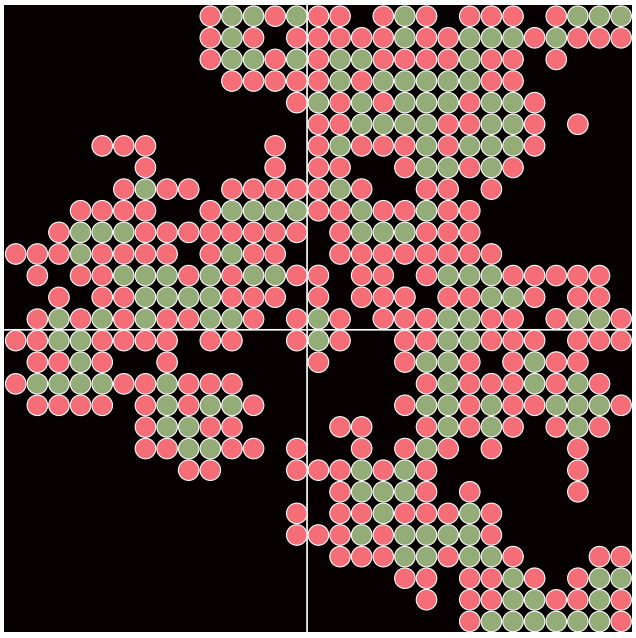
Le parallèle entre cet environnement sur Terre et notre voisinage galactique est frappant. Dans la Voie lactée, il y a environ 300 milliards d'étoiles. Les observations récentes et en cours, comme celles du télescope spatial *Kepler* de la Nasa, suggèrent que dans cet océan de corps stellaires il y aurait plus de 10 milliards de petits mondes rocheux présentant des conditions de surface hospitalières, grâce à des configurations orbitales propices.

DE PITCAIRN À LA VOIE LACTÉE

Comme les îles de la Terre, ces exoplanètes et ces exolunes seraient en mesure d'héberger des organismes vivants, qui y sont nés ou y ont migré. Elles constitueraient autant d'escales potentielles pour une espèce déterminée à voyager à travers l'espace interstellaire. Cette analogie est bien plus riche qu'on ne peut le penser.

De la même façon que les peuples du Pacifique ont essaimé sur des milliers de kilomètres d'océan à bord de simples embarcations avançant à la vitesse de quelques nœuds seulement, une dispersion à travers la Galaxie est envisageable, même si les contraintes sont parfois très différentes (distances à parcourir, possibilité de survie en mer et dans l'espace).

Selon une anecdote célèbre, en 1950, en se rendant compte à quel point il pourrait être facile de parcourir la Galaxie, le physicien italien Enrico Fermi se serait exclamé au cours d'un déjeuner avec des collègues : « Mais où sont-ils tous ? » – ce « tous » désignant les espèces qui explorent l'espace. La célèbre question s'est développée par la suite pour donner le non moins célèbre (bien qu'assez mal nommé) « paradoxe de Fermi » : à moins que les espèces technologiquement avancées soient excessivement rares, elles devraient à présent s'être répandues pratiquement partout dans la Galaxie, et pourtant nous n'en voyons pas la moindre trace. Fermi, réputé pour sa capacité



Geoffrey Landis a simulé le mécanisme d'expansion dans un réseau tridimensionnel régulier avec $N = 6$. Le seuil critique est alors $P_c = 0{,}311$. En prenant $P = 1/3$, juste au-dessus du seuil critique, on obtient des régions colonisées *(en vert)* et non colonisées *(en rose)*.

LA PERCOLATION, UN MODÈLE DE COLONISATION GALACTIQUE

Dès 1950, Enrico Fermi et d'autres ont constaté qu'*a priori*, une espèce extraterrestre ayant développé les moyens technologiques de voyager à une étoile à proximité devrait coloniser la Voie lactée en quelques millions d'années.

Il existe diverses façons de modéliser le processus de migration galactique. Un exemple classique s'inspire du phénomène physique de percolation, qui désigne l'écoulement d'un fluide à travers un milieu plus ou moins perméable, à l'image de la préparation du café où l'eau traverse le café moulu. La modélisation de la percolation met en évidence un seuil critique, dépendant de différents paramètres du système, au-dessous duquel la transmission du fluide devient trop difficile et s'arrête.

En 1998, Geoffrey Landis, du centre de recherche Lewis de la Nasa, a proposé d'utiliser la théorie de la percolation pour décrire la propagation d'espèces extraterrestres dans la Galaxie. Avec cette description, la colonisation de la Voie lactée ne s'effectue pas selon un unique mouvement homogène, mais selon des branches plus ou moins actives dont la propagation s'interrompt parfois.

Le modèle repose sur deux hypothèses. Premièrement, les voyages interstellaires sont possibles, mais difficiles. Il existe donc un horizon, une distance maximale pour qu'un voyage direct soit entrepris. Dans le volume défini par cet horizon, on dénombre en moyenne N systèmes habitables.

Deuxième hypothèse : à cause de la distance qui sépare une colonie de sa planète d'origine et des moyens de communication limités, chaque colonie développe une culture propre. Celle-ci a alors une probabilité P de vouloir continuer à coloniser la Galaxie et une probabilité $(1 - P)$ d'être sédentaire, car elle considère que le coût et le besoin en ressources pour mener à bien ce projet sont excessifs. Comme dans la théorie de la percolation, il existe alors une valeur critique P_c de la probabilité au-dessous de laquelle la conquête de la Galaxie s'arrête au bout de quelques colonies. Pour P supérieur à P_c, seules des petites régions de la Voie lactée ne seront pas occupées. Si P est proche de P_c, on obtient des zones colonisées et des zones non visitées de tailles arbitraires. De même façon que Caleb Scharf et ses collègues, mais avec des hypothèses différentes, on obtient une colonisation hétérogène de la Galaxie, ce qui expliquerait le paradoxe de Fermi. Mais comme avec toutes les explications avancées pour résoudre ce paradoxe, la principale difficulté est la justification des hypothèses utilisées.

SEAN BAILLY
Pour la Science

© Pour la Science, d'après G. A. Landis

à faire de rapides estimations, grâce à des calculs de tête, s'était rendu compte que la Voie lactée pouvait être colonisée en quelques millions d'années seulement.

En 1975, l'astrophysicien américain Michael Hart effectua la première étude quantitative et montra que ce problème n'était pas aussi simple qu'on pouvait le penser. Le chercheur est parti d'une observation indiscutable (pour la plupart des gens sensés), qu'on nomme la «contamination A» de Hart : l'absence d'extraterrestres sur la Terre aujourd'hui. Il en a conclu qu'aucune autre civilisation technologiquement avancée n'existe actuellement (ou n'a existé) dans la Galaxie. La clé de cette affirmation, comme avec l'idée initiale de Fermi, repose sur le temps relativement court qu'il faudrait pour qu'une

> **La Voie lactée pourrait être colonisée en quelques millions d'années**

espèce se propage sur les 100 000 années-lumière de rayon de la Voie lactée, même en utilisant des systèmes de propulsion modestes, beaucoup plus lents que la lumière.

En 1980, le physicien américain Frank Tipler se pencha aussi sur le problème. Il parvint à des conclusions similaires : des extraterrestres suffisamment motivés pourraient effectivement visiter l'intégralité de la Galaxie en quelques millions d'années. Étant donné que le Système solaire existe depuis 4,5 milliards d'années, et que la Voie lactée s'est formée il y a au moins 10 milliards d'années, cela laisse plus qu'assez de temps aux extraterrestres de la Galaxie pour atteindre tous ses mondes habitables.

L'INVASION DES SONDES AUTONOMES

Il est intéressant de noter les différences dans les scénarios des deux chercheurs. Michael Hart a fait l'hypothèse d'un processus de peuplement «en chair et en os» par une espèce biologique, tandis que Frank Tipler a imaginé des essaims de sondes automatiques et autoréplicantes – des «machines de von Neumann» – qui bondiraient d'étoile en étoile et se répandraient sans entrave. Dans la plupart des scénarios de colonisation, les systèmes stellaires et leurs planètes deviennent habités, s'ils ne l'étaient pas déjà, et servent alors de bases pour se lancer à la conquête de nouveaux systèmes. Pour les machines autoréplicantes, la principale limite à leur expansion serait la disponibilité d'énergie et de matières premières pour construire la génération suivante.

Ces approches très différentes illustrent la difficulté de tirer des conclusions claires et significatives sur la migration interstellaire. Sur quelles hypothèses construire un modèle de peuplement de la Galaxie ? Quels sont les postulats raisonnables ? S'appliquent-ils à des entités peut-être très différentes de nous ? Certaines hypothèses sont faciles à justifier, d'autres sont plus discutables. Par exemple, tous les scénarios font intervenir des estimations des performances de la technologie utilisée pour voyager dans l'espace. De plus, quand l'espèce prend part au voyage et ne se contente pas d'envoyer des émissaires robotiques, l'hypothèse la plus fondamentale est que les organismes vivants sont capables de survivre au voyage interstellaire.

D'un point de vue technique, voyager à seulement 10 % de la vitesse de la lumière demande déjà des moyens très avancés, comme une propulsion par fusion nucléaire ou d'immenses voiles solaires poussées par des lasers très puissants. Un bouclier efficace est aussi indispensable pour protéger le vaisseau : à de telles vitesses, les atomes du gaz interstellaire provoquent une usure importante de la coque et de petits morceaux de roches suffisent pour détruire le vaisseau tant les collisions sont énergétiques. Il est donc plus sûr de voyager à des vitesses réduites, mais il faudrait alors des siècles ou des millénaires pour passer d'une étoile à une autre. Se pose alors la question de comment maintenir un équipage en vie et en bonne santé sur des durées dépassant largement celles des vies individuelles.

Mais les hypothèses les plus controversées tournent autour des questions de motivation, et des projections que nous faisons sur la longévité de civilisations entières et de leurs colonies. En 1983, à l'inverse de Michael Hart et Frank Tipler, les astrophysiciens Carl Sagan et William Newman ont considéré que l'absence d'indice n'est pas une preuve de la non-existence d'espèces intelligentes dans la Galaxie. Pour ces deux chercheurs, les hypothèses avancées sur le comportement de ces civilisations sont trop calquées sur celui des humains : ils parlent d'une «approche solipsiste» de l'intelligence extraterrestre.

Par exemple, si une espèce extraterrestre ne voit tout simplement pas d'intérêt à atteindre d'autres étoiles, toute l'idée du peuplement galactique devient caduque. Mais, comme le souligne Jason Wright, de l'université d'État de Pennsylvanie, cette proposition souffre aussi >

SEULS AU MILIEU DE LA FOULE

Pourquoi n'avons-nous pas vu d'autres civilisations dans la Voie lactée ? Parmi toutes les [illegible] en existe, mais qu'elles ne se trouvent pas dans notre voisinage. Cette situation se produirait si l'exploration et la migration interstellaires sont partielles et se font par vagues, avec des civilisations spatiales qui s'étendent périodiquement en colonisant les systèmes planétaires les plus proches et les plus accueillants. [illegible] civilisation, des simulations de ce processus produisent des amas de systèmes occupés en continu, ainsi que des régions isolées très peu habitées. La Terre pourrait se situer dans l'une de ces dernières.

DIASPORAS GALACTIQUES

Cet instantané d'une simulation représente 10 millions d'années d'exploration interstellaire pour [illegible] systèmes colonisables dans un cube d'environ 404 années-lumière de côté. Les systèmes non colonisables sont 22 fois plus nombreux que les systèmes propices, mais ils ne sont pas représentés ici. À cette échelle, les étoiles se déplacent comme des particules d'un gaz, entravant ou facilitant le voyage interstellaire selon leurs trajectoires relatives. Les caractéristiques sont comparables à celles de notre région de la Galaxie. Les sondes lancées par des civilisations dispersées dans cet espace virtuel se déplacent à 3 000 kilomètres par seconde, 100 fois plus vite que la vitesse moyenne des étoiles environnantes.

Chaque point représente la position actuelle d'un système colonisé ou colonisable.

Dans la simulation considérée ici, 6 948 systèmes habitables ont été visités par une sonde, mais seulement 403 ont abrité des colonies actives ; 3 052 systèmes colonisables n'ont pas été visités. Ce processus a donné naissance à 11 « empires » interstellaires distincts (comportant au moins 10 systèmes colonisés) et représentés chacun par une couleur différente pour indiquer leur origine commune.

Les autres vagues de colonisation, implantées sur moins de systèmes, sont représentées en gris.

Les couleurs estompées indiquent des systèmes qui n'hébergent plus de colonies actives.

Les colonies actuellement actives sont entourées de bulles semi-transparentes ayant un rayon de 10 années-lumière, qui indiquent la sphère théorique d'influence d'un système dominé.

Aucune colonie active au cours du dernier million d'années

La colonie s'est éteinte il y a 0,5 million d'années

Colonie actuellement active

10 années-lumière

Les agents simulés ne ciblaient que des systèmes situés à moins de 10 années-lumière, colonisables, sans colonie en cours, et non ciblés par un autre agent. Les lignes indiquent les voyages interstellaires couronnés de succès et connectent les systèmes récemment colonisés avec leurs antécédents : les traits ne montrent pas les itinéraires réellement suivis, les positions relatives des systèmes ayant varié au cours de la simulation.

Connexion antérieure

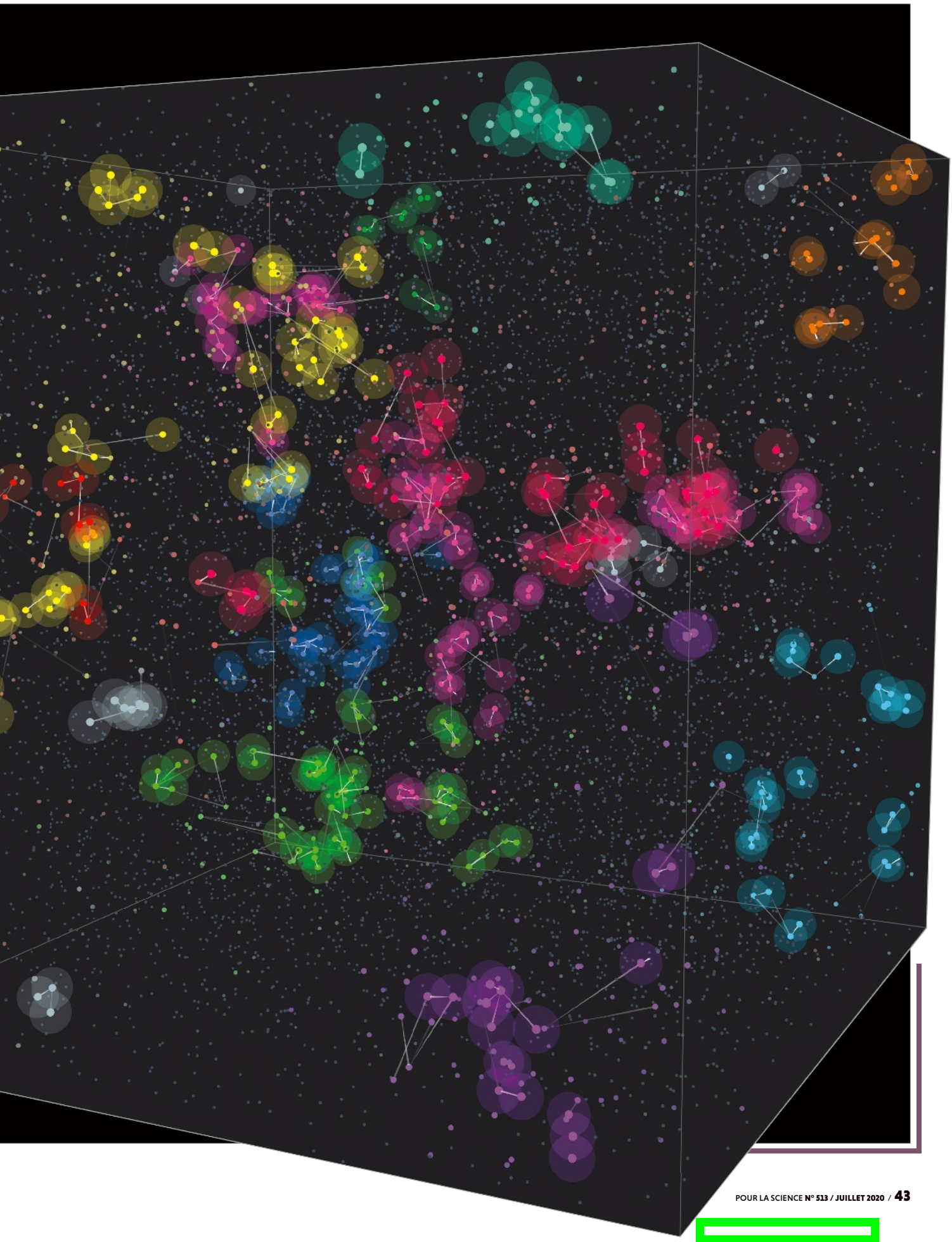
Connexion plus récente

Vue agrandie

OÙ EST LA TERRE ?

Cette simulation reproduit les caractéristiques de notre voisinage galactique. Le système solaire pourrait se trouver dans n'importe quelle région non colonisée de ce cube. Ces « déserts » transitoires sont des régions où des mondes habitables resteraient hors de portée des civilisations voisines.

© Nadieh Bremer, source : J. Carroll-Nellenback, université de Rochester



> d'une erreur de « raisonnement monoculturel ». En d'autres termes, il est impossible de spéculer avec la moindre certitude sur le comportement d'une espèce entière comme si tous ses représentants avaient une unique façon de penser. Nous autres humains en sommes loin ! Et même si la grande majorité des civilisations spatiales putatives de la Voie lactée ne se lancent pas dans une diaspora galactique, il suffirait d'une seule culture plus aventureuse que les autres pour semer des signes de vie et de technologie à travers des centaines de milliards de systèmes stellaires.

DES EXPLICATIONS EN GÉNÉRAL TRÈS DIFFICILES À TESTER

En fait, l'histoire du paradoxe de Fermi est jalonnée de débats divers et variés sur ces hypothèses fondamentales, ainsi que d'une grande variété de « solutions » proposées. En général, ces explications sont très difficiles à tester. Bien que certaines fassent intervenir des idées assez simples, d'autres sont de la pure science-fiction.

Par exemple, il se pourrait que le coût en ressources pour être capable de traverser rapidement l'espace interstellaire soit trop élevé, même pour une espèce technologiquement très avancée. Cela limiterait drastiquement le nombre d'explorateurs et expliquerait la constatation A de Hart. Ou peut-être l'accroissement de la population n'est pas, comme l'ont supposé de nombreux chercheurs, une motivation forte pour voyager vers d'autres étoiles, en particulier pour une espèce qui développerait un mode de vie vraiment durable dans son système d'origine. Une révolution verte ultime éliminera-t-elle toute tentation d'aller voyager ailleurs si ce n'est pour l'exploration scientifique ?

Certaines conceptions jouent sur une note plus sombre, comme la notion de « grand filtre », c'est-à-dire l'idée qu'il y a toujours quelque chose qui limite une espèce : une évolution qui conduit invariablement toute vie technologique à sa propre extinction (guerre, pollution, épuisement des ressources, etc.). Peut-être que des cataclysmes naturels, depuis les explosions de supernovæ jusqu'à des soubresauts énergétiques du trou noir central de la Voie lactée, éliminent régulièrement la vie dans la Galaxie et l'empêchent ainsi de se diffuser.

Il existe des propositions encore plus extrêmes, comme l'hypothèse du zoo. D'après ce scénario, nous sommes maintenus délibérément isolés par des puissances extraterrestres. Il y a également ce que j'aime appeler le scénario de la paranoïa : d'autres civilisations existent, mais elles se cachent et refusent de communiquer par peur de dévoiler leur position à une autre espèce potentiellement belliqueuse.

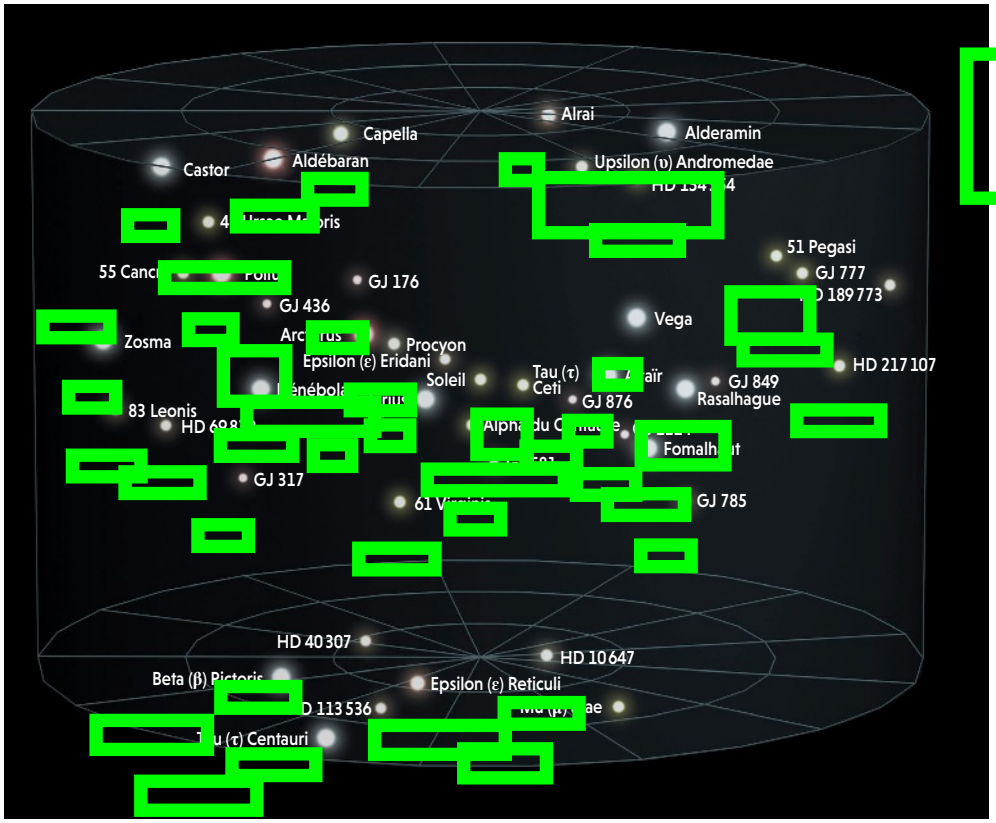
Mais peut-être existe-t-il des explications plus simples à notre ignorance actuelle concernant les extraterrestres. Ces réponses pourraient partager des caractéristiques avec l'exemple que nous avons juste sous le nez : l'occupation humaine des îles du sud du Pacifique, variable dans le temps et dans l'espace. Tant dans le cas terrestre que dans le cas extraterrestre, des facteurs essentiels et universels sont en jeu, comme la rareté des endroits propices ou le temps dont a besoin une population pour se préparer à pousser un peu plus loin l'exploration de l'immensité.

En 2015, Adam Frank, de l'université de Rochester, et moi déjeunions près du campus de l'université Columbia, à New York. Comme lors du repas de Fermi soixante-cinq ans plus tôt, la conversation tournait autour de la nature des espèces qui explorent l'espace. Et, sans doute inspirés par le calcul mental de Fermi, nous avons essayé de concevoir une stratégie d'investigation qui ferait le moins possible d'hypothèses non corroborées et que l'on pourrait tester ou contraindre à l'aide de données réelles. Au cœur de cet exercice, il y avait l'idée simple que, comme avec l'occupation transitoire de l'île de Pitcairn, l'exploration ou la colonisation de la Galaxie se ferait par vagues, avec des flux et des reflux. Et que l'humanité

Beaucoup de solutions au paradoxe de Fermi ont été proposées

aurait émergé lors d'une période où notre région de la Voie lactée subissait un reflux.

Cette idée est en accord avec la constatation A de Michael Hart : il n'y a pas de preuve aujourd'hui sur Terre de la présence d'explorateurs extraterrestres. Mais elle offre la possibilité d'aller plus loin et d'estimer la durée pendant laquelle la Terre n'aurait pas connu de visites. Peut-être des extraterrestres sont-ils passés ici il y a très longtemps. Un certain nombre de scientifiques ont discuté, au fil des ans, la possibilité de chercher des artefacts dans le Système solaire que ces visiteurs auraient laissés derrière eux. Il est un peu difficile de prédire l'envergure que devrait avoir une recherche complète, mais une recherche sur Terre est davantage à notre portée. En 2018, Gavin Schmidt, de l'institut Goddard de science spatiale de la Nasa, et Adam Frank ont évalué nos capacités à déterminer si la Terre a



Carte tridimensionnelle du Soleil *(au centre)* et des étoiles les plus proches. Comme les astres se déplacent les uns par rapport aux autres, les distances varient au cours du temps.

connu une civilisation industrielle venue d'ailleurs.

Gavin Schmidt et Adam Frank ont d'abord constaté (comme la plupart des planétologues) que le simple passage du temps efface très facilement presque toute trace de vie technologique sur la Terre. Les seules preuves qui resteraient après un million d'années ou plus se réduiraient à des anomalies stratigraphiques isotopiques ou chimiques : présence de molécules de synthèse, de plastiques ou de déchets radioactifs à longue durée de vie. Les restes fossiles et autres marqueurs paléontologiques sont tellement rares et dépendent de conditions de formation si particulières qu'ils seraient inexploitables.

PAS D'INDICES ARCHÉOLOGIQUES

Par ailleurs, les cités humaines modernes ne couvrent qu'environ 1 % de la surface de la planète. S'il en était de même pour les civilisations passées, les chances de découverte pour les paléontologues seraient limitées. Et personne n'est en mesure de réaliser des fouilles exhaustives sur Terre pour trouver des signatures non naturelles. Concrètement, cela signifie que si une civilisation industrielle à l'échelle de la nôtre a existé il y a quelques millions d'années, nous pourrions très bien ne pas le savoir. Cela ne veut absolument pas dire qu'il en a existé une ; cela indique simplement qu'en toute rigueur, on ne peut pas exclure cette possibilité.

Ces dernières années, avec Jonathan Carroll-Nellenback, de l'université de Rochester, et Jason Wright, de l'université d'État de Pennsylvanie, nous nous sommes intéressés aux implications de ces idées (un peuplement par vagues, des traces du passé qui s'effacent), à l'échelle de la Galaxie. Pour ce faire, nous avons développé des simulations à base d'agents (où l'on étudie un comportement global à partir d'entités individuelles qui suivent des règles simples et évoluent de façon indépendante), complétée par les bonnes vieilles mathématiques à base de papier et crayon. Nous avons alors brossé un tableau plus réaliste de la façon dont des espèces se déplaceraient au sein d'une galaxie elle-même mouvante.

Si vous regardez les étoiles situées dans un rayon de quelques centaines d'années-lumière du Soleil, vous vous apercevrez qu'elles se déplacent comme les particules d'un gaz. Par rapport à n'importe quel point fixe de cette portion d'espace, une étoile peut se déplacer vite ou lentement, et ce dans une direction en pratique aléatoire. Si vous considérez des régions de quelques milliers d'années-lumière de diamètre, vous commencerez à observer un mouvement d'ensemble de rotation autour du centre de la Galaxie (qui amène, par exemple, le Soleil à faire le tour de la Voie lactée avec une période de 230 millions d'années environ). Les étoiles plus proches du centre galactique effectuent une révolution plus rapidement, et >

© Andrew Z. Colvin, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

> certaines étoiles du « halo » en mouvement rapide plongent dans ou hors du plan du disque galactique, au sein d'un essaim plus ou moins sphérique entourant ce disque.

Dès lors, une civilisation qui cherche autour d'elle des étoiles à explorer constaterait que les astres les plus proches varient énormément avec le temps. Actuellement, Proxima du Centaure est l'étoile la plus proche du Soleil. Elle se trouve à 4,24 années-lumière de nous ; mais dans environ 10 000 ans, elle ne sera plus qu'à 3,5 années-lumière. Elle sera alors une cible plus facile à atteindre, avec un voyage interstellaire moins long. Et dans 37 000 ans, l'autre plus proche voisine sera la naine rouge Ross 248, à seulement 3 années-lumière.

Pour modéliser cette carte stellaire changeante, nous avons simulé une boîte tridimensionnelle d'étoiles, avec des mouvements proches de ceux observés dans une petite portion de la Voie lactée. La simulation enclenche alors un « front » de colonisation, en désignant une sélection de ces étoiles comme hôtes des civilisations qui explorent l'espace. Ces civilisations ont des durées de vie finies, de telle sorte qu'un système peut aussi devenir inoccupé. Une civilisation est aussi soumise à un délai d'attente avant d'être capable de lancer des missions d'exploration robotique ou des programmes de colonisation vers sa plus proche étoile. Tous ces facteurs peuvent être modifiés, ajustés et explorés afin de voir comment ils influent sur le résultat. Dans une vaste majorité de cas, on constate la propagation d'un front de colonisation assez disparate à travers l'espace interstellaire. La vitesse de cette propagation est le paramètre clé pour recouper et confirmer les solutions possibles de l'énigme initiale de Fermi.

Ce que nous observons est à la fois simple et subtil. Tout d'abord, le mouvement naturel des étoiles dans la Galaxie, semblable à celui d'un gaz, signifie que même les vaisseaux interstellaires les plus lents, se déplaçant à quelque 30 kilomètres par seconde (soit près du double de la vitesse actuelle de la sonde *Voyager 1* qui est en train de quitter le Système solaire, à 17 kilomètres par seconde) garantiraient qu'un front de colonisation traverserait la Galaxie en bien moins de un milliard d'années.

Si l'on prend en compte les mouvements stellaires, comme la rotation galactique ou les étoiles du halo, cette durée diminue. En d'autres termes, comme Fermi l'avait compris, il n'est pas difficile de remplir la Galaxie de vie. Mais le « niveau de remplissage » de la Galaxie dépend à la fois du nombre de planètes véritablement colonisables (ce que nous avons désigné sous le nom d'« effet Aurora », en hommage au roman de science-fiction *Aurora* de Kim Stanley Robinson, paru en 2015, qui met en lumière les difficultés de la colonisation spatiale) et de la durée de vie d'une civilisation sur une planète donnée.

Il est facile de rendre la Galaxie vide de vie en réduisant simplement le nombre de planètes adéquates ou en décrétant que les civilisations ne durent qu'une centaine de milliers

Certains endroits de la Galaxie sont trop isolés pour valoir la peine de les explorer

d'années. À l'autre extrême, il est facile de modifier ces facteurs pour remplir l'espace de colonies actives. En fait, si les mondes habitables sont assez nombreux, la durée de vie moyenne des civilisations implantées n'a presque aucune importance. Si elles restent maîtresses de la technologie qui leur a permis de prendre le départ, alors il en restera toujours assez pour poursuivre l'exploration et, à terme, remplir la Galaxie.

UNE COLONISATION PAR VAGUES

Mais c'est entre ces deux extrêmes que l'on trouve les situations les plus réalistes et les plus convaincantes. Quand la fréquence des mondes colonisables n'est ni très élevée ni très basse, des choses étonnantes peuvent se produire. En particulier, les effets des fluctuations statistiques sur le nombre et la localisation des mondes habitables dans les différentes régions de la simulation créent des regroupements de systèmes stellaires où les explorateurs interstellaires s'établissent régulièrement au cours de vagues successives. On peut se représenter ces régions spatiales comme des archipels ou des chapelets d'îles. L'existence de ces amas a une contrepartie : typiquement, ils sont entourés de vastes zones non colonisées, des endroits trop lointains et trop clairsemés pour valoir la peine de les explorer.

Ce scénario d'« archipel galactique » peut-il expliquer la situation de la Terre ? C'est possible. Par exemple, si les civilisations planétaires typiques peuvent durer un million d'années et que seuls 3 % des systèmes stellaires sont véritablement colonisables, on a une probabilité d'environ 10 % qu'une planète telle

BIBLIOGRAPHIE

J. Carroll-Nellenback *et al.*, **The Fermi paradox and the Aurora effect : Exo-civilization settlement, expansion, and steady states**, *Astronomical Journal*, vol. 158(3), art. 117, 2019.

M. M. Ćirković, **The great silence : science and philosophy of Fermi's paradox**, Oxford University Press, 2018.

M. Livio, **Winston Churchill et la vie extraterrestre**, *Pour la Science*, n° 474, avril 2017.

M. Agelou *et al.*, **Où sont-ils ?**, Les Éditions, 2017.

G. Landis, **The Fermi paradox : an approach based on percolation theory**, *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 51, pp. 163-166, 1998.

B. R. Finney et E. M. Jones (eds.), **Interstellar migration and the human experience**, University of California Press, 1985.

que la Terre n'ait pas été visitée depuis au moins un million d'années. En d'autres termes, il n'est pas improbable que nous nous trouvions du côté solitaire de l'équation.

À l'inverse, ce scénario implique qu'ailleurs dans la Galaxie, il existe des amas, des archipels d'espèces interstellaires pour lesquelles la norme est d'avoir régulièrement des voisins ou des visiteurs cosmiques. De notre point de vue, les hypothèses adoptées pour obtenir ce résultat nous semblent raisonnables : il suffit d'un décompte des planètes habitables (ce que les spécialistes des exoplanètes étudient activement) et de prendre en compte les mouvements des étoiles dans la Voie lactée. Cependant, il est nécessaire de faire des hypothèses sur la faisabilité du voyage interstellaire et la probabilité qu'une espèce l'entreprenne. La longévité des civilisations est une inconnue, mais une question très étudiée surtout à l'heure où nous, Terriens, tentons de régler nos propres problèmes de durabilité planétaire.

Il y a aussi la possibilité que nous découvrions des preuves de l'existence d'archipels stellaires colonisés. Une nouvelle stratégie intéressante consisterait à cibler nos recherches d'intelligence et de technologie extraterrestre non pas sur des exoplanètes individuelles connues, mais plutôt sur des régions galactiques dont la topographie stellaire se prêterait à l'expansion stellaire ou aux amas. Jusqu'à récemment, notre carte tridimensionnelle de l'espace galactique était très limitée, mais avec des instruments tels que l'observatoire spatial *Gaia*, qui cartographie un milliard d'objets astronomiques et de mouvements stellaires, nous pourrions être en mesure de cartographier de façon plus réaliste ces « points chauds ».

En fin de compte, le paradoxe de Fermi pourrait avoir une explication assez simple. Un monde habitable et habité tel que la Terre peut très bien rester longtemps sans aucune visite (de la même façon que Pitcairn a été inoccupée pendant trois siècles), même si la Galaxie regorge de formes de vie technologiquement avancée et d'explorateurs interstellaires. La Terre pourrait simplement connaître une période transitoire d'isolement avant d'être balayée à nouveau par une vague cosmique de vie pangalactique. La vraie question est de savoir si la civilisation humaine sera toujours là quand cela se produira. ■

L'ESSENTIEL

> Il a longtemps été difficile de déterminer comment les membres des animaux à quatre membres ont évolué à partir des nageoires de leurs ancêtres poissons, du fait de la rareté des fossiles documentant la transition.

> La récente découverte d'un squelette complet d'un poisson vieux de 375 millions d'années bouleverse les connaissances sur l'origine des mains et l'émergence des tétrapodes.

> Les doigts seraient apparus avant la sortie des eaux, chez des poissons osseux capables d'inspirer de l'air hors de l'eau.

LES AUTEURS

JOHN A. LONG
professeur de paléontologie à l'Université Flinders, à Adélaïde, en Australie méridionale

RICHARD CLOUTIER
professeur de biologie évolutive à l'Université du Québec à Rimouski

Quand les poissons avaient des doigts

Un fossile remarquable révèle que les doigts sont apparus avant que les vertébrés ne quittent l'eau et ne colonisent la terre ferme.

Elpistostege watsoni, un poisson de 375 millions d'années proche des vertébrés à quatre pattes, comportait dans ses nageoires pectorales des os de doigt probablement capables de supporter son poids hors de l'eau.

© Chase Stone

Une paume ramifiée en cinq doigts, une disposition à la fois souple et solide – capable de jouer du piano, brandir un marteau ou réconforter: la main est au centre de la plupart de nos tâches quotidiennes, de l'habillage à la conduite en passant par la cuisine et l'écriture de textos. Pourtant, d'un point de vue évolutif, elle reste très mystérieuse, en particulier quant au premier stade de son origine. D'autres animaux à quatre membres – des «tétrapodes» – ont des mains dont l'apparence et le fonctionnement diffèrent beaucoup des nôtres. Chez les oiseaux et les chauves-souris, elles aident à former de délicates ailes; chez les éléphants, elles soutiennent des pattes aussi grosses que des troncs d'arbre. Mais la structure de base est la même, comme l'a noté Charles Darwin en 1859 dans *L'Origine des espèces*: «Quoi de plus curieux que le fait que la main de l'homme, formée pour attraper, celle de la taupe faite pour creuser, la jambe du cheval, la palette du marsouin, et l'aile de la chauve-souris soient toutes construites selon le même patron et doivent inclure les mêmes os dans les mêmes positions relatives?»

Darwin a proposé une explication élégante: ces divers animaux partagent ce patron parce qu'ils ont évolué à partir d'un ancêtre commun qui présentait des membres munis de doigts. Depuis, les biologistes de l'évolution ont rassemblé des preuves issues de la paléontologie, de la génétique et de l'embryologie qui leur ont donné raison. Ils ont mis en lumière l'ascendance commune des tétrapodes, qui ont évolué à partir de poissons osseux; ils ont montré que les os qui composent la main humaine se retrouvent aussi chez les grenouilles, les oiseaux et les baleines; et ils ont identifié certains des gènes qui contrôlent le développement des mains, des ailes et des nageoires, entre autres.

Néanmoins, le premier chapitre de cette histoire – où la main et le poignet ont évolué à partir d'os dans la nageoire d'un poisson ancestral – est au mieux resté obscur, par manque de fossiles assez complets d'animaux de transition entre les poissons osseux entièrement aquatiques et les tétrapodes terrestres. En mars dernier, cependant, nous avons décrit un fossile extraordinaire – le squelette complet d'un poisson vieux de 375 millions d'années, *Elpistostege watsoni* – qui fournit de précieux indices pour écrire ce chapitre.

DES ORIGINES OBSCURES

Jusque récemment, la compréhension que les scientifiques avaient de la transition entre les poissons et les premiers tétrapodes reposait principalement sur plusieurs fossiles spectaculaires semblant relier ces deux groupes. L'un d'eux est un fossile de *Panderichthys rhombolepis*, un poisson de la Baltique remontant au Dévonien moyen à supérieur (il y a environ 384 à 379 millions d'années). Avec son humérus allongé (l'os du bras chez les tétrapodes), ses grands radius et cubitus (les os de l'avant-bras) et un patron du crâne semblable à celui des tétrapodes, *Panderichthys* offrait les premiers indices que, de tous les poissons décrits, son groupe – les elpistostégaliens, du nom d'un fossile du genre *Elpistostege* alors mal connu, découvert dans l'est du Canada – était le plus proche des tétrapodes.

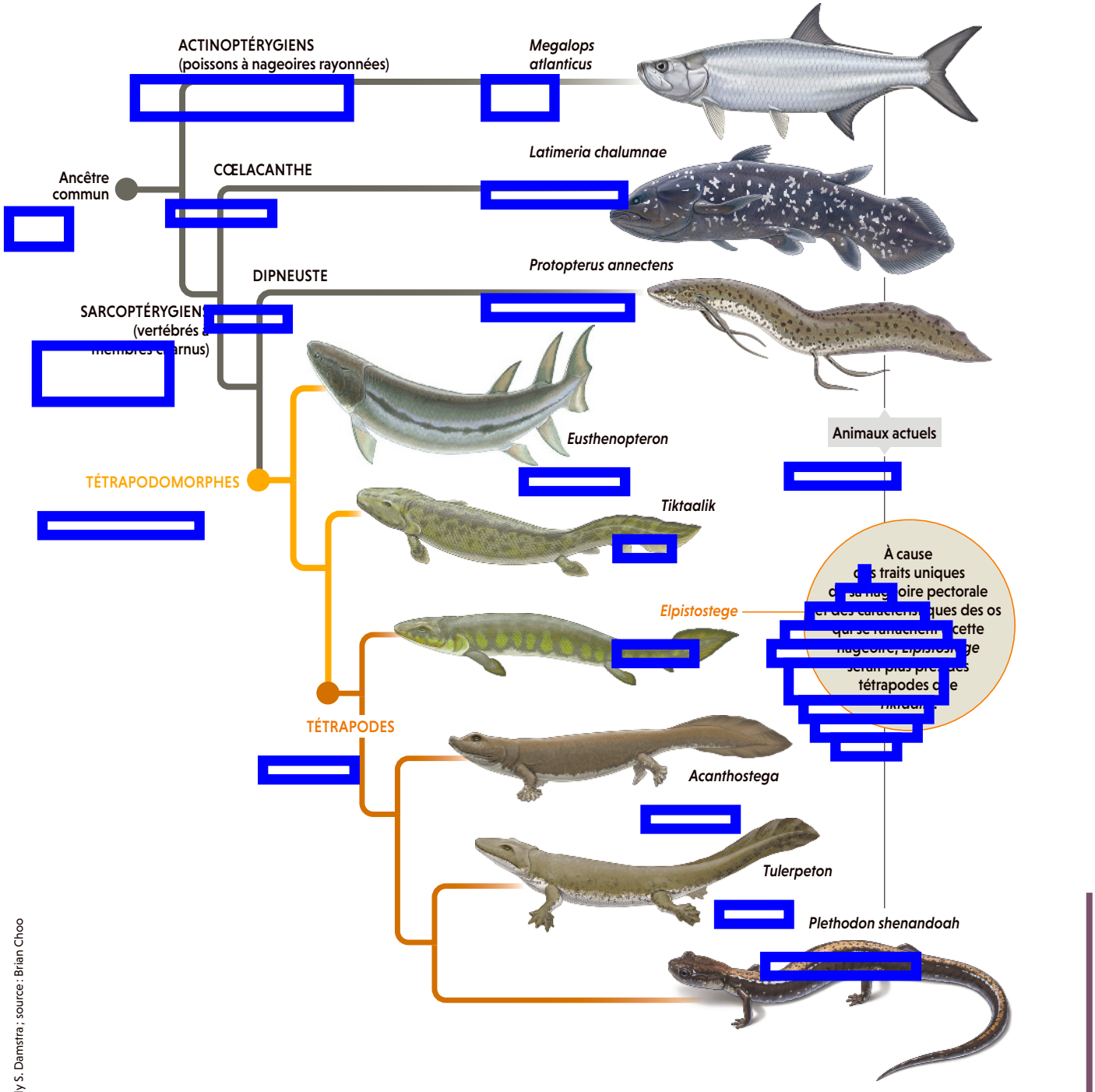
En 2006, Neil Shubin, de l'université de Chicago, et ses collègues ont annoncé la découverte, dans l'Arctique canadien, d'un autre fossile clé de poisson elpistostégalien, *Tiktaalik roseae*, vieux de 380 millions d'années. *Tiktaalik* a changé la donne en fournissant une série de nouvelles données, lesquelles montraient que la nageoire pectorale était très perfectionnée chez ce poisson – plus que chez tout autre fossile connu – avec à la fois des os du bras bien développés et des articulations mobiles du poignet. Son crâne présentait aussi des caractères distinctifs, notamment un long museau plat et une boîte crânienne spécialisée – des traits communs aux tétrapodes.

> **Il manquait un trait aux elpistostégaliens: des doigts**

Ensemble, ce fossile et les autres connus d'elpistostégaliens suggéraient qu'un certain nombre de traits caractéristiques des tétrapodes provenaient de leurs prédécesseurs ichtyens, dont des os du bras et des articulations compatibles avec la vie hors de l'eau. Mais il manquait un trait à ces poissons: des doigts. Dans le cas de *Panderichthys*, de nombreux chercheurs avaient d'abord vu des os de doigts rudimentaires dans certains éléments osseux, mais l'hypothèse avait ensuite été rejetée. Quant au fossile de *Tiktaalik*, l'extrémité de ses nageoires pectorales était incomplète; or c'était à cet endroit que l'on aurait pu trouver d'éventuels os de doigts. Les preuves disponibles ont conduit les experts à conclure que les doigts ne faisaient pas partie de la transformation initiale des nageoires en membres. Au contraire, ils semblaient être apparus plus tard, après que les tétrapodes ont gagné la terre ferme. >

NOTRE ARRIÈRE-ARRIÈRE-ARRIÈRE-GRAND POISSON ?

Pour comprendre comment le poisson fossile [illegible] apparenté aux autres vertébrés, les auteurs [illegible] concentrant sur leurs caractéristiques com[illegible] occupe une position clé dans l'arbre de l'évolution : il est le plus proche parent poisson connu du groupe couronne des tétrapodes – le groupe [illegible] et de leur dernier ancêtre commun. Cette découverte suggère qu'*Elpistostege* est très proche de la lignée qui a donné naissance aux tétrapodes actuels (dont les humains), voire en fait parti[illegible]



© Emily S. Damstra ; source : Brian Choo

> En science, cependant, le savoir est susceptible de changer à la lumière de nouvelles preuves. Notre fossile d'*Elpistostege* nous a conduits à l'une d'elles. Exhumé en 2010 à Miguasha, au Québec, un site du patrimoine mondial de l'Unesco, ce fossile est un spécimen de l'espèce même qui a donné son nom aux elpistostégaliens. À la grande différence qu'il est complet et en parfait état. Ce qui nous a amenés à proposer une théorie différente sur la façon dont les doigts sont apparus et ont donné naissance à la main, structure qui persiste chez plus de 33 800 espèces de tétrapodes actuels, dont les humains.

DANS LES FALAISES DE MIGUASHA

Pour comprendre le rôle d'*Elpistostege* dans ce changement de perspective, il est utile de se pencher sur l'histoire de sa découverte. Au cours de l'été 1937, deux jeunes paléontologues britanniques écumaient les falaises de la baie des Chaleurs, le long de la côte sud de la presqu'île gaspésienne, dans l'est du Canada. Thomas Westoll et William Graham-Smith cherchaient des fossiles du Dévonien et ces falaises étaient connues comme un eldorado dans le domaine. Des collectionneurs locaux assistaient les paléontologues dans leurs recherches et leur vendaient parfois des fossiles. L'un de ceux que Westoll acquit était un petit fragment d'os crânien qui deviendrait une pierre angulaire de notre compréhension de la transition entre les poissons et les tétrapodes.

À l'époque, les scientifiques soupçonnaient déjà que les tétrapodes avaient évolué à partir des poissons dits «à nageoires charnues», un groupe d'animaux aux nageoires lobées et puissantes, qui compte le cœlacanthe et le dipneuste parmi ses représentants actuels. Mais il leur manquait des fossiles d'anatomie intermédiaire pour renforcer ce lien. Le toit crânien que Westoll avait acquis était susceptible d'aider à combler cette lacune. Vu la forme des os du crâne, Westoll pensait qu'il s'agissait du crâne longtemps recherché d'un amphibien primitif du Dévonien. Il nomma ce spécimen *Elpistostege watsoni*, du grec «espoir» et «toit». Dans un court article publié en 1938, Westoll soutint que le fossile offrait «une transition parfaite» entre les poissons à nageoires charnues et les premiers animaux à quatre pattes.

Les paléontologues ont accueilli avec scepticisme cet argument fondé sur un fragment de crâne. Ils sont alors venus de toute l'Europe et de l'Amérique pour collecter des fossiles sur les falaises de la baie des Chaleurs, aujourd'hui connue comme le parc national de Miguasha. Mais aucun de ces chercheurs n'a trouvé de nouveau spécimen d'*Elpistostege*.

Cependant, quelque trente ans après la publication de Westoll, un heureux hasard est intervenu. Allan Parent, un collectionneur local de fossiles, a découvert le museau d'un crâne incomplet dans les falaises de Miguasha. Ce

© Richard Cloutier

Le squelette complet d'*Elpistostege watsoni* (*en haut*), découvert dans le parc national de Miguasha, au Québec, vieux de 375 millions d'années, est le premier fossile de poisson de la transition poisson osseux - tétrapode dont la nageoire pectorale est entièrement préservée *(en bas)*. Dans ses nageoires, il présente des os de doigts similaires à ceux qui composent les doigts humains.

© Richard Cloutier

fragment est resté caché dans sa collection privée jusqu'à sa mort. Mais, en 1983, le frère Lemoine Parent a montré le museau au directeur du parc de Miguasha, Marius Arsenault, qui à son tour a fait appel à Hans-Peter Schultze, un spécialiste des poissons fossiles de l'université du Kansas, pour l'identifier. Hans-Peter Schultze a immédiatement compris son importance : les similitudes entre la disposition et la forme des os crâniens conservés dans ce fossile et le toit crânien de Westoll ont montré qu'ils appartenaient à la même espèce.

Avec ces informations supplémentaires sur l'anatomie de l'animal, les idées sur son identité ont commencé à changer. Les traits du nouveau museau suggéraient qu'*Elpistostege* n'était plus un amphibien, mais un poisson à nageoires charnues très perfectionné. Dans leur article de 1985 décrivant le museau, Hans-Peter Schultze et Marius Arsenault ont suggéré qu'il était étroitement apparenté à *Panderichthys*. Ils ont aussi abordé le cas d'un autre spécimen énigmatique, un fossile contenant une plaque d'écailles et quelques vertèbres que le biologiste responsable de l'interprétation à Miguasha, Marc Brassard, et l'un de nous (Richard Cloutier) avaient trouvé quelques années auparavant dans les mêmes falaises. Compte tenu des similitudes entre les textures de la surface des écailles de ce fossile et du museau, Hans-Peter Schultze et Marius Arsenault ont proposé qu'il s'agissait aussi d'un spécimen d'*Elpistostege*.

L'attribution de ce fossile au genre *Elpistostege* était importante. En plus d'être le seul matériel alors connu documentant d'autres parties que la tête de l'animal, il avait un autre atout : une provenance stratigraphique détaillée. En effet, si l'on ignorait de quelle couche rocheuse provenaient le toit crânien et le museau, Marc Brassard et Richard Cloutier avaient en revanche noté l'emplacement stratigraphique exact du fossile qu'ils avaient trouvé : 90 mètres au-dessus des couches inférieures d'une unité géologique particulière connue sous le nom de « formation d'Escuminac ».

Les années suivantes, Richard Cloutier et ses collaborateurs sont revenus plusieurs fois dans cette partie de la formation d'Escuminac pour y chercher d'autres restes d'*Elpistostege* – en vain. Les preuves géologiques et fossiles rassemblées leur ont quand même permis de préciser l'environnement de l'animal, un canal qui alimentait un estuaire. Une image d'*Elpistostege* a émergé, celle du plus grand poisson – et donc probablement du plus grand prédateur – d'eaux qu'il partageait avec une vingtaine d'autres espèces de poissons.

Finalement, ces données paléoécologiques ont pris une nouvelle dimension. Le 4 août 2010, en fin d'après-midi, alors qu'il était en patrouille à Miguasha, le garde et naturaliste du parc, Benoît Cantin, a trouvé sur la plage, au pied des falaises, un fragment inhabituel de queue de poisson fossilisée, incrusté dans les couches rocheuses inférieures de la formation d'Escuminac. Le lendemain matin, Benoît Cantin, accompagné de deux guides naturalistes, a mis au jour le reste de l'animal. C'est le plus grand fossile jamais découvert dans la formation d'Escuminac et sans doute le plus important : un squelette complet d'*Elpistostege* de 1,57 mètre de long.

VOIR À TRAVERS LA PIERRE

Quelques jours plus tard, on invitait Richard Cloutier à l'étudier. Comme la plus grande partie du squelette était encore enfouie dans la roche, la première étape a consisté à l'examiner plus précisément en utilisant la tomographie aux rayons X assistée par ordinateur. Richard Cloutier a recruté Isabelle Béchard, une de ses anciennes étudiantes, pour l'aider à analyser le spécimen à l'aide d'un tomodensitomètre non médical de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), au Québec. L'image obtenue a montré que le spécimen était complet – le moindre os avait été préservé. Toutefois, la résolution était insuffisante pour révéler la structure interne des os. C'est ainsi qu'*Elpistostege* a voyagé quelque 3900 kilomètres au sud, jusqu'au service de tomographie assistée par ordinateur de l'université du Texas à Austin, où chaque morceau de fossile a été scanné avec la plus grande précision disponible à l'époque.

Puis Richard Cloutier et ses collègues ont commencé le méticuleux travail de préparation du fossile en retirant peu à peu la roche environnante pour exposer les os. Ils ont effectué ce travail sur un modèle du fossile fondé sur les images de tomographie ainsi que sur le fossile lui-même. Après quelques mois, le corps et le crâne ont émergé de la roche, à la fois virtuellement et concrètement. L'ensemble du spécimen était incroyable, mais ses nageoires pectorales >

> ont suscité une excitation particulière, car personne n'avait jamais vu une nageoire pectorale complète d'elpistostégalien auparavant. À l'intérieur des nageoires, on distinguait de nombreux éléments du squelette, entourés d'écailles et de rayons osseux. À première vue, la nageoire pectorale d'*Elpistostege* ressemblait beaucoup à celle de *Tiktaalik*. Toutefois, elle paraissait contenir des os supplémentaires. De quoi s'agissait-il ?

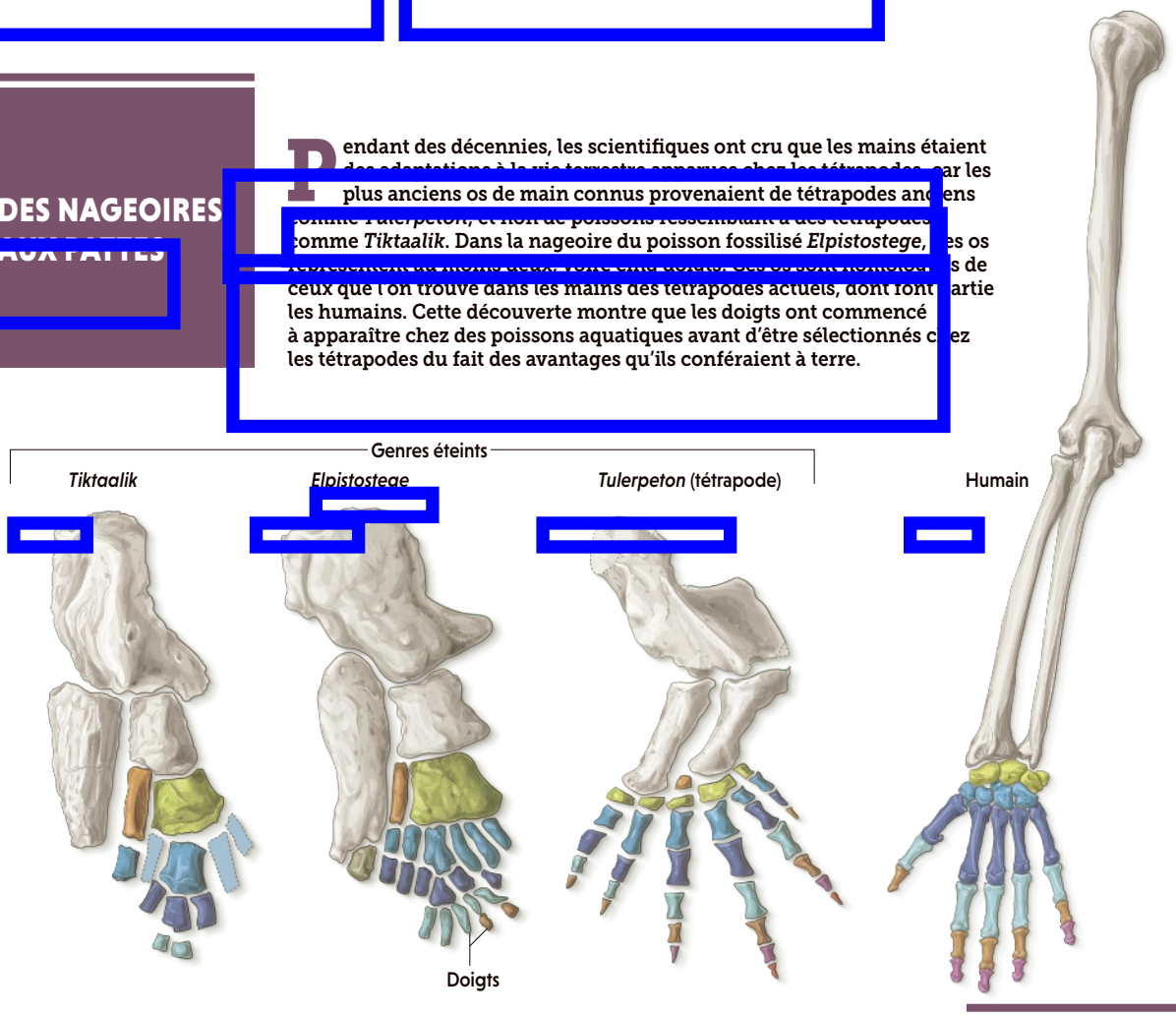
Les années suivantes, Richard Cloutier et Isabelle Béchard ont présenté des résultats préliminaires de leurs analyses à des collègues lors de congrès scientifiques. C'est après une telle présentation, en 2014 à la Société de paléontologie des vertébrés, à Berlin, que Richard Cloutier et l'un de nous (John Long) ont décidé de collaborer.

John Long travaillait depuis de nombreuses années sur des fossiles de poissons du Dévonien issus de la formation de Gogo, en Australie occidentale. Les squelettes de ces anciens poissons sont parfaitement conservés en trois dimensions, et les tissus mous de certains spécimens sont aussi particulièrement bien préservés. Pour étudier ces fossiles, situés à l'intérieur de nodules de calcaire, John Long et ses collègues avaient l'habitude de dissoudre la roche en les plaçant dans des bains acides. Mais, plus récemment, ils se sont tournés vers la tomographie et l'imagerie à l'aide du rayonnement synchrotron assistées par des logiciels perfectionnés. Ces techniques leur permettent d'élucider la structure anatomique fine des fossiles avant qu'ils ne soient plongés dans des bains d'acide et ainsi de garder une empreinte des tissus mous préservés avant leur destruction par l'acide. Par sa conservation remarquable, le nouveau spécimen d'*Elpistostege* semblait un candidat idéal pour cette nouvelle approche.

En 2014, John Long s'est rendu au laboratoire de Richard Cloutier au Québec et a commencé à travailler avec son équipe sur la meilleure façon de traiter les données d'imagerie de ce poisson. Après plusieurs essais avec différents types de données et de logiciels, nous avons finalement trouvé une combinaison gagnante qui nous permettrait d'isoler et d'étudier numériquement chaque os. Alice Clement, de l'université Flinders, en Australie, ainsi que Roxanne Noël et Vincent Roy, alors étudiants en master sous la direction de Richard Cloutier, ont poursuivi ce travail.

DES NAGEOIRES AUX PATTES

Pendant des décennies, les scientifiques ont cru que les mains étaient des adaptations à la vie terrestre apparues chez les tétrapodes, car les plus anciens os de main connus provenaient de tétrapodes anciens comme *Tulerpeton*, et non de poissons ressemblant à des tétrapodes comme *Tiktaalik*. Dans la nageoire du poisson fossilisé *Elpistostege*, les os ressemblent au moins deux fois plus à ceux de la main des tétrapodes qu'à ceux que l'on trouve dans les mains des tétrapodes actuels, dont font partie les humains. Cette découverte montre que les doigts ont commencé à apparaître chez des poissons aquatiques avant d'être sélectionnés chez les tétrapodes du fait des avantages qu'ils conféraient à terre.



© Daisy Chung ; sources : John A. Long/R. Cloutier et al., Nature, vol. 579, pp. 549-554, 2020

Quand Alice Clement a commencé à segmenter la nageoire pectorale, nous étions tenus en haleine. Cet organe contenait forcément des indices clés sur la transition entre les nageoires et les membres. Les résultats préliminaires n'ont pas déçu. Ils ont non seulement confirmé les résultats de tomographie suggérant la présence d'os supplémentaires dans la nageoire d'*Elpistostege*, mais aussi montré ces os de façon beaucoup plus détaillée. On voyait à présent que le fossile comprenait une série inattendue de nombreux petits os très serrés. Généralement, l'extrémité du squelette de la nageoire pectorale contient de petits os nommés «radiaux» qui supportent les rayons de nageoire. Les os les plus évidents dans cette partie de la nageoire d'*Elpistostege* étaient au bon endroit pour être des radiaux, mais leur nombre important ainsi que la disposition de certains en rangées distinctes suggéraient que ces derniers étaient autre chose. Il était très tentant d'y voir des os de doigts semblables à ceux des tétrapodes. À l'appui de cette hypothèse, nous avons identifié deux doigts, chacun composé de deux os articulés, ainsi que trois autres doigts possibles constitués chacun d'un seul os.

Pourquoi notre argument est-il plus convaincant que celui des os de doigts rudimentaires dans les nageoires pectorales de *Panderichthys*? Les supposés os de doigts de *Panderichthys* sont de forme irrégulière et aucun ne présente d'articulations avec d'autres, du type de celles qui relient les os des doigts – ou phalanges – dans la main humaine. D'après la comparaison avec les os de la nageoire d'*Elpistostege*, il est probable qu'ils soient équivalents à certains os carpiens des poignets des tétrapodes.

DES POISSONS HORS DE L'EAU

Pendant que l'équipe finissait d'isoler la nageoire et la ceinture (les os qui se connectent aux nageoires) pectorales afin d'étudier chaque os sous tous ses aspects, nous avons aussi commencé à décrire les caractéristiques internes du crâne et du neurocrâne, la partie qui entoure le cerveau. Ce travail nous aiderait à mieux comprendre non seulement l'anatomie d'*Elpistostege*, mais aussi ses liens de parenté avec les autres poissons primitifs et les tétrapodes.

Pour déterminer la place d'*Elpistostege* dans l'arbre de l'évolution, nous devions le comparer avec d'autres espèces en examinant les traits distinctifs qu'ils partageaient. En collaboration avec Mike Lee, de l'université Flinders, un expert des méthodes de détermination des liens de parenté entre espèces, nous avons effectué une analyse phylogénétique de 202 caractéristiques chez 43 espèces. Nous avons alors constaté avec stupéfaction qu'*Elpistostege* paraissait plus étroitement apparenté au groupe couronne des tétrapodes – le groupe qui comprend tous les tétrapodes vivants et leur dernier ancêtre commun – que ne l'est *Tiktaalik*, quoique de peu. Notre hypothèse est que les caractères uniques de la nageoire pectorale d'*Elpistostege* (en l'absence de nageoire complète de *Tiktaalik*), ainsi que quelques traits récemment découverts dans la ceinture pectorale, ont suffi à rapprocher *Elpistostege* des tétrapodes dans l'arbre de l'évolution.

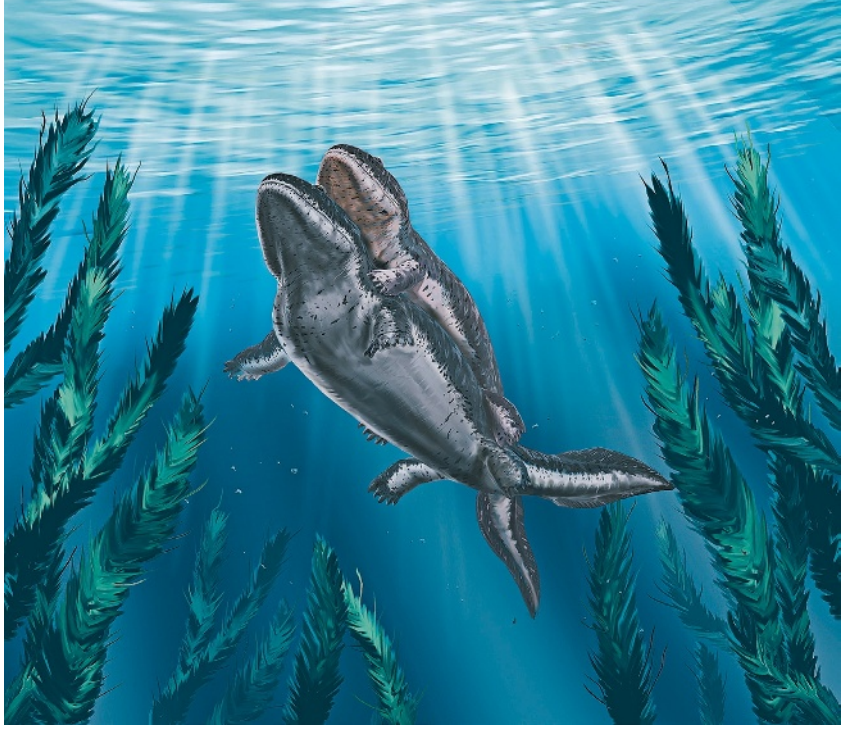
Nous avons identifié deux doigts composés de deux os articulés

En combinant les informations obtenues sur le squelette d'*Elpistostege* et celles concernant sa place dans l'arbre de l'évolution, nous avons reconstruit l'apparition du plan de base des mains des tétrapodes. La présence, dans la nageoire pectorale d'*Elpistostege*, de petites rangées d'os que nous avons identifiées comme des doigts montre que cette organisation est apparue au début du Dévonien tardif, il y a plus de 380 millions d'années, chez des poissons à nageoires charnues évolués. Ces structures servaient probablement à supporter leur poids, car le fait d'avoir de nombreux petits os alignés dans cette région aurait donné à la partie extérieure de la nageoire robuste la souplesse nécessaire pour pousser le poisson vers le haut.

Quel aurait été le bénéfice d'une telle manœuvre? Le crâne d'*Elpistostege* fournit un indice: à l'arrière de la tête se trouvent deux grands trous nommés «spiracles». Certains poissons modernes qui respirent de l'air ont des spiracles similaires. Pendant longtemps, un doute a subsisté sur la fonction de ces trous. Dans une étude publiée en 2014, John Long a donc travaillé avec une équipe d'ichtyologistes de l'institut d'océanographie Scripps, à La Jolla, en Californie, pour la déterminer. En analysant les spiracles de bichirs *Polypterus* vivants (des poissons africains d'eau douce), nous avons montré qu'ils sont indispensables pour respirer l'air. En supposant que les spiracles d'*Elpistostege* aient eu la même fonction, la capacité de soulever son corps aurait constitué un avantage pour sortir la tête de l'eau dans les rivières peu profondes et l'estuaire où vivait ce poisson.

Par ailleurs, *Elpistostege* n'était pas nécessairement limité au domaine aquatique. Aujourd'hui, les dipneustes et certains poissons-chats sont capables de se propulser sur la >

POISSON OSSEUX OU TÉTRAPODE, QUI EST SORTI DES EAUX ?



Les premiers membres chiridiens, c'est-à-dire munis exclusivement de doigts, ont-ils facilité la reproduction ? C'est l'une des nombreuses pistes envisagées.

La découverte de doigts dans les nageoires d'*Elpistostege* est intéressante à plus d'un titre. Tout d'abord, elle interroge sur la définition même des tétrapodes. Il en existe plusieurs, mais classiquement, ce groupe embrasse tous les vertébrés possédant plusieurs caractères dont des membres munis de doigts : aujourd'hui, le groupe compte environ 34 000 espèces d'amphibiens, reptiles – oiseaux inclus – et mammifères. Avec ses doigts, *Elpistostege* remet-il en cause cette définition ? Pas vraiment, car ses doigts sont « noyés » dans une nageoire présentant également des baguettes osseuses (ou rayons), ce qui l'exclut des tétrapodes.

En effet, plusieurs caractères définissent les « tétrapodes », dont la présence de membres chiridiens, c'est-à-dire munis exclusivement de doigts à leur extrémité, sans autres éléments distaux. La question de la redéfinition du groupe se posera si l'on découvre un jour un étrange vertébré muni de pattes à l'avant et de nageoires à l'arrière – ou l'inverse. En attendant, c'est la combinaison de plusieurs caractères qui définit classiquement le groupe : présence de doigts (uniquement donc), mais aussi de vertèbres cervicales et d'une articulation monobasale (un seul joint articulaire entre l'épaule et le membre ou la nageoire). Pris séparément, ces caractères existent chez divers groupes de « poissons » : les cervicales sont présentes chez *Tiktaalik* et l'articulation monobasale chez certains requins, par exemple. Mais cela n'en fait pas pour autant des tétrapodes. *Elpistostege* n'est donc pas un tétrapode, mais il confirme bien l'importance des combinaisons de caractères dans les définitions.

Les doigts d'*Elpistostege* rappellent aussi que l'évolution des espèces n'est pas linéaire ni dirigée. La transition entre « poissons » et tétrapodes nous le montre bien, car d'un côté, nous avons des poissons osseux considérés comme de plus en plus terrestres et, de l'autre, des tétrapodes de plus en plus aquatiques ! Cela brise le mythe de la « sortie des eaux » ou, comme on le lit trop souvent, de la « conquête des continents ».

Si les premiers membres chiridiens n'étaient pas utilisés lors de la marche sur la terre ferme, quelle(s) était(ent) donc leur(s) fonction(s) première(s) ? Une hypothèse est qu'ils aient facilité la reproduction, en permettant le maintien de la femelle lors de la fécondation externe dans l'eau, la stabilisation dans l'estran, l'équilibrage du corps sous l'eau, la pénétration dans des eaux chargées en débris de plantes, les hypothèses ne manquent pas. Nous en testons actuellement certaines grâce notamment à des analyses biomécaniques (étude des articulations possibles entre les os) et ostéohistologiques (fondées sur la microstructure interne des os).

Ces hypothèses – sans doute complémentaires – sont aussi à mettre en regard avec l'évolution des environnements et des régimes alimentaires : même si les poissons à nageoires charnues s'aventuraient sans doute sur la terre ferme, ils conservaient une denture plutôt piscivore, avec de petites dents sur le bord de la mâchoire et de grosses dents à l'intérieur, utiles pour saisir des proies glissantes dans l'eau… C'est le contraire chez les tétrapodes qui changeaient apparemment de régime : leurs grosses dents externes et leurs petites dents internes leurs permettaient peut-être de s'intéresser de plus près aux arthropodes, riches en protéines et nombreux au Dévonien, que ce soit dans l'eau ou sur la terre ferme.

Il reste par ailleurs beaucoup de questions à élucider sur *Elpistostege* et ses cousins du Dévonien, qu'ils soient poissons osseux ou tétrapodes. Chose très rare, les structures endocrâniennes d'*Elpistostege* sont merveilleusement bien préservées et attestent de son étroite parenté avec les premiers tétrapodes. La configuration des os de son toit crânien le rapproche aussi des tétrapodes, mais combien de temps *Elpistostege* va-t-il détrôner *Tiktaalik* en tant que « plus proche parent des tétrapodes » ? Les prochaines découvertes nous permettront sans doute de le savoir.

Concernant les paléoenvironnements, les enquêtes se poursuivent pour répondre aux interrogations des géologues : les premiers tétrapodes aquatiques se sont-ils fossilisés dans des sédiments d'eau douce ou d'eau de mer ? Récemment, j'ai fait partie d'une équipe internationale qui a quantifié les variations isotopiques de divers éléments (carbone, oxygène, soufre) contenus dans des fossiles clés du Dévonien : nous avons tranché le débat en montrant que ces organismes étaient euryhalins, c'est-à-dire capables de vivre en eaux salées.

Enfin, la génétique du développement devrait en effet nous aider à mieux comprendre l'apparition de nouvelles structures comme les doigts, ainsi que le soulignent John Long et Richard Cloutier. Nous savons que les gènes à l'origine des doigts interviennent aussi dans la morphogenèse des systèmes cranio-facial et urogénital. Or ce dernier, qui gère le stockage du sel dans le corps, est intimement lié au mode de vie : il y a donc un lien à explorer entre cette vie euryhaline des premiers tétrapodes et les gènes *Hox* à l'origine notamment des doigts. Tout cela est très excitant et montre l'importance de travailler en équipe, aussi bien en laboratoire que sur le terrain. Hélas, ce dernier, jugé trop risqué dans les « programmes » de recherches, est souvent négligé par les évaluateurs… à qui il est donc bon de rappeler que sans terrain, il n'y a pas de fossiles, donc pas de paléontologues !

> « Les doigts d'*Elpistostege* brisent le mythe de la "sortie des eaux" »

JEAN-SÉBASTIEN STEYER
paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris

J. Goedert *et al.*, Euryhaline ecology of early tetrapods revealed by stable isotopes, *Nature*, vol. 558, pp. 68-72, 2018.

© Alain Bénéteau

> terre ferme pendant de courtes périodes avec leurs nageoires. Avec ses nageoires bien plus puissantes, *Elpistostege* était probablement d'autant plus capable de s'aventurer à terre.

Notre découverte non seulement éclaire le moment où la transition nageoires-membres s'est opérée, mais aide aussi à comprendre quels changements génétiques et développementaux l'ont orchestrée. Il y a encore quelques décennies, peu d'indices étaient disponibles. À l'époque, on ne connaissait que quelques poissons fossiles dont l'anatomie pectorale était intermédiaire entre les nageoires et les membres. S'ils suggéraient que les os du bras et de l'avant-bras avaient évolué progressivement, la main et le poignet des tétrapodes semblaient en revanche être apparus d'un coup à partir de la nageoire d'un poisson ancestral. Mais un changement aussi radical s'était-il produit ou cette rupture apparente n'était-elle qu'un artefact dû au manque de fossiles ?

UNE MAIN APPARUE D'UN COUP ?

En 1991, le Britannique Peter Thorogood, qui était un éminent biologiste du développement, a proposé que la main et le poignet aient eu une origine soudaine. Il s'appuyait sur la comparaison du développement embryonnaire des poissons osseux et des tétrapodes. Dans ces deux groupes, une structure de l'embryon au stade précoce – la crête ectodermique apicale – agit comme un centre de signalisation qui guide le développement de la nageoire ou du membre. Située à l'extrémité de la nageoire ou du membre bourgeonnant, cette crête sécrète des substances qui favorisent localement la croissance des tissus.

Chez les poissons, elle n'est active qu'un court instant avant de se transformer en un autre centre de signalisation, le pli ectodermique apical, qui dirige la formation des rayons des nageoires. Chez les tétrapodes, en revanche, la crête est active beaucoup plus longtemps, car elle ne se transforme pas en pli. Il n'y a donc pas de formation de rayons de nageoire et la crête a plus de temps pour développer les os à la base de la fabrication d'une main. Pour Thorogood, la perte de la transition crête-pli aurait entraîné à la fois la perte des rayons et d'autres traits des nageoires pectorales, et le gain des os nécessaires à la formation d'un poignet et de doigts.

La découverte de *Tiktaalik*, le premier poisson fossile à présenter l'équivalent non seulement des os de nos bras et de certains os proximaux (proches du centre du corps) de nos poignets, mais aussi des os distaux (éloignés) de nos poignets, a stimulé les recherches. Des biologistes ont voulu déterminer quels os de la nageoire ancestrale du poisson s'étaient transformés en os de poignet et de main et quels gènes produisaient cette nouvelle morphologie. Des gènes de la famille *Hox*, connue pour contrôler le développement de la tête, la queue, etc., semblaient de bons candidats.

En 2007, Zerina Johanson, du Muséum d'histoire naturelle de Londres, et ses collègues ont étudié l'activité d'un de ces gènes, *HoxD13*, chez l'un des plus proches parents vivants des tétrapodes, le dipneuste australien. Des recherches antérieures avaient révélé que chez les tétrapodes, *HoxD13* est actif dans les membres en développement lorsque les poignets et les doigts se forment. L'équipe de Zerina Johanson a montré que le gène est aussi actif pendant le développement des os des radiaux de la nageoire du dipneuste.

Toutefois, alors que chez les tétrapodes, *HoxD13* a deux phases d'activité durant le développement des membres – une phase précoce associée au développement du bras et de l'avant-bras et une phase tardive associée à celui du poignet et des doigts –, chez le dipneuste, il semble n'avoir qu'une seule période d'activité lors du développement de la nageoire, correspondant à la deuxième phase des tétrapodes. Ces travaux suggèrent que les os des doigts des tétrapodes ont évolué à partir des radiaux des nageoires de poissons. Cependant, le poignet et la main n'ont pu apparaître d'un coup, comme le proposait Thorogood, car quelques poissons à nageoires charnues actuels et fossiles ont des radiaux et des os du poignet (os carpiens) sans pour autant avoir de doigts. Au moins deux événements ont dû survenir durant la transition, l'un qui a produit des doigts et l'autre des poignets.

Elpistostege complique encore l'histoire. Il suggère que, contrairement à l'argument de Zerina Johanson, les radiaux des dipneustes et autres poissons à nageoires charnues ne sont pas tous équivalents à des doigts : seuls les radiaux les plus distaux sont homologues des os des doigts, tandis que les radiaux proximaux sont homologues des os du poignet et des os longs de la paume (les métacarpes).

De plus, *Elpistostege* révèle une autre étape dans la transition nageoires-membres, parce qu'il préserve à la fois les os du poignet et les doigts, ainsi que les rayons des nageoires. *Elpistostege* montre que la perte des rayons des nageoires a dû être une autre phase, distincte de l'évolution de la main.

Nous devons encore affiner notre compréhension des mécanismes génétiques et développementaux à l'œuvre. Néanmoins, par sa préservation et les nombreuses études en cours sur lui, le spécimen entier d'*Elpistostege* semble bien destiné à jouer le rôle de pierre de Rosette pour résoudre l'énigme de l'évolution des membres à partir des nageoires – et donc de la manière dont les vertébrés ont conquis la terre. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Cloutier *et al.*, ***Elpistostege* and the origin of the vertebrate hand**, *Nature*, vol. 579, pp. 549-554, 2020.

Z. Johanson *et al.*, **Fish fingers : Digit homologues in sarcopterygian fish fins**, *JEZ-B Molecular and Developmental Evolution*, vol. 308B(6), pp. 757-768, 2007.

J. Clack, **Le premier pied à terre**, *Pour la Science*, n° 340, pp. 50-56, février 2006.

Le ressaut circulaire, une histoire à rebondissements

Un jet liquide d'huile de silicone, 20 fois plus visqueux que l'eau, frappe perpendiculairement une surface horizontale. On observe un ressaut hydraulique circulaire.

L'ESSENTIEL

> Les premières observations du ressaut hydraulique sont anciennes. Pourtant les modèles qui décrivent ce phénomène ne sont pas encore totalement satisfaisants.

> Des expériences et des travaux théoriques récents contribuent à affiner la compréhension du ressaut hydraulique.

> La modélisation du ressaut présente des analogies avec des systèmes astrophysiques bien plus difficiles à étudier en laboratoire : les supernovæ ou les hypothétiques « trous blancs », inverses des trous noirs.

L'AUTEUR

ALEXIS DUCHESNE
maître de conférences à l'université de Lille et à l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie (IEMN)

Le bourrelet liquide qui se forme dans un évier autour du jet d'eau du robinet est facile à observer. Mais ce phénomène résiste depuis cinq cents ans à une explication complète. Et, de façon surprenante, il sert aussi à comprendre certaines explosions d'étoiles.

Et si, une fois la vaisselle terminée, vous laissiez le robinet couler encore un peu ? Ce n'est certes pas très écologique, mais cela vous permettra d'observer un phénomène surprenant. Le jet atteint le fond de l'évier et l'eau s'écoule radialement autour du point d'impact sous la forme d'un mince film. La raison de l'étalement radial et de la friction de l'eau sur la surface de l'évier, on s'attend à ce que le film liquide perde peu à peu sa vitesse. Pour autant, on n'anticipe pas la présence d'une transition brutale, où le film de faible épaisseur et de forte vitesse fait place à un écoulement environ cinq fois plus épais et cinq fois plus lent. Ce changement de régime d'écoulement se traduit par un « mur » d'eau, un bourrelet liquide circulaire. C'est ce qu'on appelle le « ressaut hydraulique circulaire ».

Même s'il nous est familier, un tel ressaut peut surprendre, car il va à l'encontre d'un précepte partagé par les physiciens et les philosophes depuis Aristote jusqu'à Newton et élevé au rang d'axiome par Leibniz : *Natura non facit saltus* (« La nature ne fait pas de saut »). Ce principe, également nommé « principe de continuité », est assez intuitif et, en effet, très souvent valable. Il suppose qu'en général les choses évoluent de façon continue et progressive. Et pourtant, dans l'évier, on observe un ressaut plutôt qu'une pente faible et régulière de la surface liquide.

Pendant longtemps, ce mur d'eau ne semble pas avoir troublé les savants. Il a fallu attendre Léonard de Vinci, au XVIe siècle, pour trouver la première description du ressaut. Il notait ainsi dans ses carnets : « L'eau qui tombe en ligne perpendiculaire par un tuyau arrondi sur un lieu plan, tracera une onde circulaire autour de l'endroit percuté ; à l'intérieur de ce cercle l'eau se mouvra très rapidement et s'étalera en une couche fort mince autour du point frappé, puis finira par heurter la vague qu'elle a produite qui cherche à retourner au lieu de la percussion. »

En termes modernes, de Vinci définit, à juste titre, le ressaut comme une onde de choc. Pour les physiciens, ce phénomène est dû à la compétition entre la vitesse de déplacement du liquide et la célérité des ondes gravitaires. Ces dernières sont des vagues qui se propagent à la surface d'un fluide. C'est la gravité et la hauteur du liquide qui déterminent leur longueur d'onde et leur vitesse de propagation. Elles deviennent visibles sous l'effet d'une excitation externe, comme le vent sur la mer ou lorsqu'on lance un caillou dans une mare.

Dans la zone interne d'un ressaut circulaire (près du jet), les ondes gravitaires se propagent moins vite que le liquide ; elles sont donc emportées par l'écoulement. Dans la zone externe où l'eau est plus profonde et l'écoulement plus lent, les ondes gravitaires vont plus vite que le fluide. Du fait de perturbations ou de réflexions, sur les bords de l'évier par exemple, ces ondes gravitaires sont susceptibles de remonter le courant. Le ressaut hydraulique est alors vu comme l'endroit où l'onde gravitaire (surélévation du liquide) émise depuis les bords (bords de l'évier, fin de >

© Alexis Duchesne

> la plaque) ne peut plus remonter vers l'amont car l'onde « rencontre » un écoulement trop rapide pour se propager.

Peut-on alors dire que la question du ressaut a été résolue il y a cinq siècles par Léonard de Vinci ? Pas tout à fait. À ce jour, il n'existe toujours pas de modèle qui fasse consensus et qui permette de prédire une caractéristique aussi essentielle que le rayon du ressaut en fonction des paramètres du système (le débit, les propriétés du liquide, le diamètre du jet, etc.). Néanmoins, d'importants progrès ont été réalisés depuis les observations du génie italien. On a une meilleure idée des mécanismes en jeu et de leurs importances respectives, et le ressaut hydraulique est même devenu un outil pour modéliser d'autres phénomènes.

LE MASCARET, GRAND FRÈRE DU RESSAUT CIRCULAIRE

Après Léonard de Vinci, les savants ne semblent pas s'être intéressés à l'énigme du ressaut hydraulique circulaire pendant plus de trois cents ans. On n'en retrouve la trace qu'au XIXe siècle, dans les études du médecin et physicien français Félix Savart qui a observé et dessiné le phénomène sans particulièrement chercher à l'étudier. Un regain d'intérêt est dû à de nombreux travaux qui ont porté, dès le XVIIIe siècle, sur le « grand frère » du ressaut circulaire, le mascaret.

Ce type de ressaut hydraulique, que l'on observe sur les rivières et les fleuves, par exemple la Dordogne ou la Sélune, se caractérise par une vague plus ou moins haute qui remonte le courant. Cette vague sépare une zone torrentielle, située en amont, où la vitesse du liquide est supérieure à la célérité des ondes gravitaires et une zone fluviale, en aval, où les ondes gravitaires se déplacent plus rapidement que le liquide et sont donc susceptibles de se diriger vers l'amont.

Le changement rapide de hauteur d'eau à l'embouchure du fleuve lors d'une marée montante est à l'origine du mascaret. Plus la marée est rapide et puissante, plus la vague est importante. L'onde gravitaire induite par la marée se propage vers l'amont et crée une onde de choc avec le courant torrentiel.

Si les mascarets font aujourd'hui le bonheur des surfeurs en Gironde (*voir l'illustration page 62*), ils n'en sont pas moins meurtriers, dans la Seine par le passé, et encore aujourd'hui dans le fleuve Qiantang, qui débouche sur la baie de Hangzhou (au sud de Shanghai, en Chine) où une vague pouvant atteindre trois mètres de hauteur remonte la baie à 40 kilomètres par heure. On peut toutefois moduler la puissance du mascaret, voire empêcher sa formation, en aménageant la topographie et en contrôlant le débit du fleuve. Si le mascaret est un ressaut mobile, on peut aussi observer des ressauts hydrauliques stationnaires lors d'un lâcher d'eau au cours de l'activité d'un barrage, à la sortie d'une chute d'eau ou encore dans un évier.

À partir de la fin du XVIIIe siècle, des ingénieurs et des physiciens se sont intéressés au mascaret. Par exemple, l'Italien Giorgio Bidone voyait dans ce ressaut hydraulique un moyen de surélever le liquide afin de faciliter l'irrigation. Il a ainsi été le premier à décrire le ressaut dans un cas à deux dimensions.

Dans la continuité de Bidone, l'hydraulicien français Jean-Baptiste Bélanger a été le premier à étudier le choc d'un point de vue théorique. En 1828, il proposa une équation qui permettait de lier l'écoulement (défini par la hauteur et la vitesse du liquide) en amont et celui en aval. Malheureusement, si ce premier modèle était en accord avec les données de Bidone, il est incorrect, car il suppose la conservation de l'énergie mécanique sans prendre en compte sa dissipation sous forme de tourbillons et de chaleur au voisinage immédiat du choc.

Bélanger corrigea lui-même son erreur quelques années plus tard en publiant, en 1846, une équation correcte fondée sur la conservation de la quantité de mouvement du fluide (c'est-à-dire le produit de sa masse volumique par sa vitesse) et du débit de part et d'autre du ressaut. Il posa ainsi la première condition de « choc » qui permet de raccorder mathématiquement les zones amont et aval. À la même époque, grâce à des expériences menées dans des canaux, les hydrauliciens français Henry Darcy et Henry Bazin ont confirmé cette théorie du choc, qui reste encore aujourd'hui à la base

COMME LE MUR DU SON !

Le ressaut hydraulique est [illegible] du nombre [illegible] du son. Dans l'évier, les ondes gravitaires jouent le rôle des ondes acoustiques et l'écoulement, se déplaçant à quelques dizaines de centimètres par seconde, remplace l'avion volant à 1 224 kilomètres par heure.

Ressaut hydraulique circulaire dans un évier. On observe une zone de faible épaisseur et de vitesse élevée près de l'impact, puis une zone de forte épaisseur et de faible vitesse après un « mur » liquide.

© Shutterstock.com/LedyX

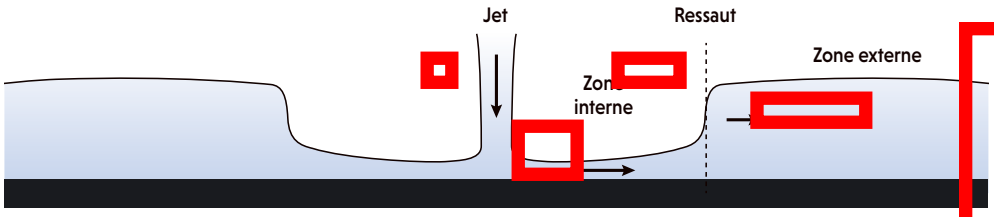


Schéma en coupe du ressaut hydraulique avec le jet d'eau, la partie interne où l'écoulement est rapide et le film d'eau mince, le ressaut et la partie externe où l'écoulement est lent et le film épais. Des considérations de conservation du débit et de la quantité de mouvement permettent de relier les vitesses et les hauteurs d'eau avant et après le ressaut.

des modélisations de ressauts hydrauliques, qu'ils soient dans les rivières ou dans les éviers.

Le physicien anglais lord Rayleigh a ensuite été le premier à faire le lien entre le ressaut dans un canal et le ressaut circulaire que l'on crée dans un évier. À la veille de la Première Guerre mondiale, en 1914, il reprit la condition de choc proposée par Bélanger et l'appliqua au cas circulaire. Dans ce cas aussi, la condition de choc se vérifie bien expérimentalement. En revanche, le rayon prédit pour le ressaut est dans certains cas plusieurs dizaines de fois supérieur à celui observé.

UN INGRÉDIENT ESSENTIEL

Les physiciens ont alors compris qu'il fallait prendre en compte la viscosité dans la partie interne du ressaut pour décrire plus correctement l'écoulement du fluide et calculer le rayon du choc. La viscosité peut être vue comme le frottement entre les « particules fluides », les volumes élémentaires de fluide à une échelle mésoscopique que l'on considère pour décrire ce qui se passe dans le système. Plus ces frottements sont intenses, plus le liquide sera difficile à mettre en mouvement et donc visqueux. On le constate quand on essaye de déplacer une cuillère dans du miel, dans de l'huile ou dans de l'eau… La principale différence entre ces trois liquides est la viscosité : celle de l'huile est cent fois plus élevée que celle de l'eau, et le miel est environ cent fois plus visqueux que l'huile.

En mécanique des fluides, on distingue les écoulements inertiels, où les effets de la viscosité sont négligeables et donc l'énergie mécanique conservée, et les écoulements laminaires où la viscosité est beaucoup plus importante. Dans ce dernier cas, une partie non négligeable de l'énergie mécanique du système se transforme en chaleur. Pour reprendre l'exemple de la cuillère dans le liquide : lorsque vous remuez votre cuillère dans du miel, vous allez mettre le liquide en mouvement uniquement autour de votre cuillère et l'énergie que vous injectez se dissipera presque instantanément sous forme de chaleur. On est alors en présence d'un écoulement visqueux.

Quand vous agitez votre cuillère dans de l'eau, vous obtenez un écoulement inertiel. Vous allez mettre en mouvement l'ensemble du liquide jusqu'à ce que l'énergie que vous avez injectée se dissipe au niveau des bords *via* les « couches limites ».

Lorsqu'on a un écoulement inertiel sur une plaque solide immobile (ou sur le fond de l'évier juste après le jet d'eau), les particules fluides en contact avec la surface de la plaque ont une vitesse nulle. La vitesse des particules augmente très vite à mesure que leur distance à la plaque croît. Elle devient pratiquement égale à la vitesse du reste du fluide au bout d'une faible épaisseur, qui définit ainsi la « couche limite ».

L'existence de cette couche limite complique la modélisation du ressaut, car si l'écoulement est principalement inertiel juste après le jet, une couche limite laminaire se développe et finit par envahir entièrement l'épaisseur du film mince à mesure que l'on s'éloigne du point d'impact du jet. Dans la partie basse de la couche limite, la vitesse est très faible et la viscosité domine, et l'on se retrouve dans un régime laminaire. À cause des frottements qui sont importants dans cette couche, l'écoulement est de plus en plus ralenti à tel point que le film liquide finit par s'épaissir lorsque la couche limite envahit l'épaisseur. En l'absence de la viscosité et donc de couche limite, le film liquide ne cesserait de s'amincir car il s'étalerait radialement tout en conservant sa vitesse constante. Dès lors, on s'attend à obtenir un diamètre de ressaut d'autant plus petit que la viscosité est grande, un effet que le modèle de lord Rayleigh ne prenait pas en compte. En 1948, le physicien japonais Itiro Tani a modélisé pour la première fois cette couche limite visqueuse.

À la suite de ces travaux, le Britannique Eric Watson a développé en 1964 l'une des théories les plus abouties du ressaut circulaire. L'originalité de son modèle est de découper la >

Le ressaut hydraulique se heurte au principe de continuité de Leibniz

INERTIEL OU LAMINAIRE ?

On utilise généralement le nombre de Reynolds, le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, pour distinguer les différents régimes d'écoulement. Un petit nombre de Reynolds (petit devant 1) correspond à un écoulement laminaire et un grand nombre de Reynolds (grand devant 1) correspond à un écoulement inertiel. Un très grand nombre de Reynolds correspond à un régime turbulent avec la formation de tourbillons. Le régime turbulent est un cas particulier du régime inertiel. Le nombre de Reynolds dépend de la vitesse du liquide : plus la vitesse du fluide est importante, plus le nombre de Reynolds est élevé. Inversement, plus la viscosité du liquide est élevée, plus le nombre de Reynolds est faible.

© Pour la Science

> zone interne (avant le choc) en plusieurs parties distinctes (l'impact du jet d'eau, la zone de développement de la couche limite et la région où la couche limite a envahi toute l'épaisseur du liquide). Les équations décrivent alors très bien la hauteur du film d'eau en fonction de la distance au jet d'eau.

Sur le fleuve Qiantang, le mascaret se déplace à 40 kilomètres par heure

Cette théorie reste toutefois incomplète dans la mesure où elle ne décrit que ce qui se passe à l'intérieur du ressaut et ne donne pas d'informations sur ce qui se passe à l'extérieur. Pour déterminer le rayon, on doit associer un choc « à la Bélanger » au modèle et connaître la hauteur de liquide juste après le ressaut. Mais comme il est plus difficile de mesurer cette hauteur que le diamètre du ressaut directement, le modèle n'a que peu d'intérêt prédictif.

VERS UN MODÈLE COMPLET

En 1993, Tomas Bohr, de l'université technique du Danemark, près de Copenhague, fils et petit-fils de Prix Nobel de physique, et ses collègues ont enfin pris en compte la zone extérieure. En modélisant les zones interne et externe avec une seule équation (dite « équation de lubrification ») et en raccordant ces deux zones à l'aide d'une condition « à la Bélanger », ils ont décrit le problème complet. Grâce à une résolution numérique de ces équations, ils ont obtenu la première loi théorique prédisant le rayon du ressaut en fonction des paramètres du système (débit, viscosité et densité du liquide…).

Il a donc fallu pas moins de cinq siècles pour développer le premier modèle assez satisfaisant du ressaut circulaire. Cela paraît énorme si l'on considère qu'on n'a alors « résolu » que le cas simple d'un jet liquide tombant verticalement sur une plaque, autour de laquelle le liquide est libre de s'écouler. On ne peut ainsi pas rendre compte d'un jet incliné ou atteignant une plaque présentant des bords comme dans un évier. En réalité, on n'en est là qu'au début de la compréhension du phénomène et on a à peine effleuré la complexité du problème.

En particulier, on s'aperçoit que l'on ne comprend pas physiquement pourquoi le choc se produit. Le modèle hydrodynamique de Tomas Bohr prédit la position du ressaut en utilisant les hypothèses caractérisant les zones interne et externe et montre qu'à un certain rayon (là où l'on observe le ressaut), les solutions mathématiques de ces deux zones ne sont plus réalistes. Autrement dit, il prédit la nécessité d'une transition entre la zone interne et la zone externe, mais il n'explique rien sur la nature de cette transition. Une pente douce entre les deux zones aurait ainsi été tout autant compatible avec le modèle. Cette limite descriptive et non explicative du modèle était déjà présente dans l'approche ondulatoire évoquée au début de l'article avec les ondes gravitaires qui remontaient le courant : dans ce cas, on suppose un changement de régime de

PLUS SUR LES MASCARETS

A. Colas, **Mascaret, prodige de la marée**, PLP, 2017.

Le mascaret est un ressaut hydraulique qui se forme dans les cours d'eau comme ici sur la Dordogne, près de Saint-Pardon. Les surfeurs profitent de cette vague qui remonte vers l'amont.

© Antony Colas

propagation des ondes au niveau du mur, mais la forme de ce mur n'est pas déterminée, en particulier sa hauteur. La condition de Bélanger encode ce changement de hauteur, mais il ne fait que le décrire et n'est pas prédictif.

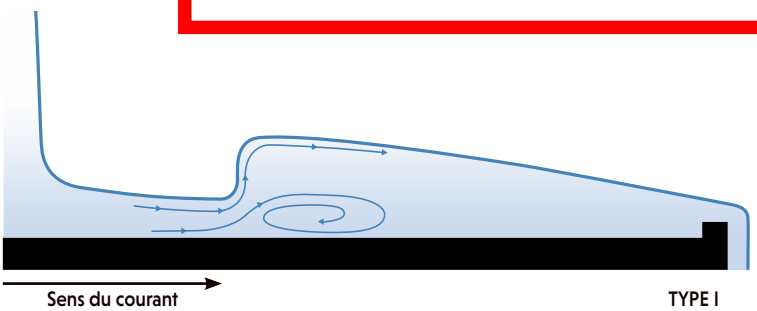
Certains scientifiques pensent que le mur liquide est dû à un décollement de la couche limite (comme cela arrive sur une aile d'avion: la plupart du temps, la couche limite se décolle à l'arrière de l'aile, mais si la couche limite est décollée sur toute la largeur de l'aile, on observe un décrochage de l'appareil). D'autres suggèrent que l'on peut modéliser le choc par une instabilité: dans la zone interne, la gravité cesse d'être négligeable à partir d'un certain rayon. Alors que le film s'épaissit peu à peu, la >

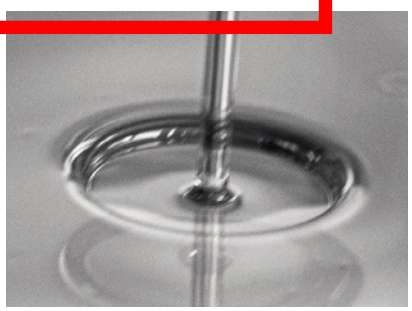
UN RESSAUT PAS TOUJOURS CIRCULAIRE

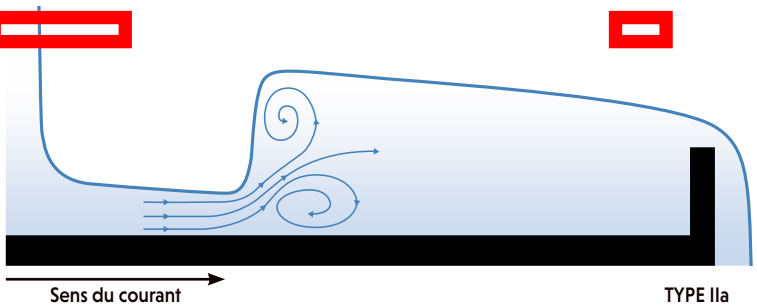
Quand on bouche l'évacuation d'eau, l'évier se remplit et le diamètre du ressaut rétrécit. On constate aussi que le ressaut est de moins en moins circulaire et que ses bords sont perturbés. Après le ressaut, des tourbillons (ou vortex) se forment. Quand l'épaisseur d'eau augmente, la circulation des tourbillons change et donne lieu à des brisures de symétrie, c'est-à-dire que le ressaut ne sera plus circulaire et que des « coins » vont apparaître.

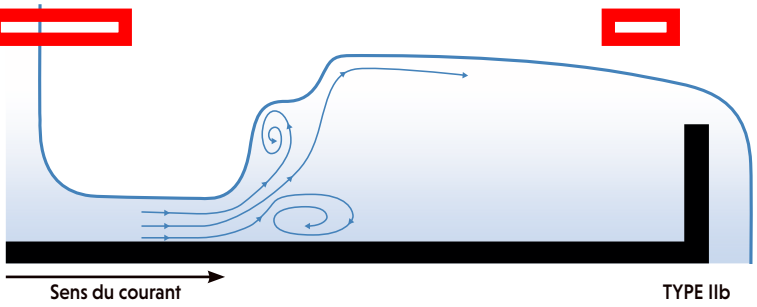
En 2000, John Bush, du MIT, et ses collègues ont étudié de plus près ces vortex. Ils remplacent l'eau par un liquide plus visqueux et qu'ils placent un rebord pour faire varier la hauteur de l'eau dans la partie externe du ressaut. Pour une petite hauteur (ou pas de rebord du tout), on observe un ressaut classique (dit de « type I », *voir la figure ci-dessous*). Pour une hauteur plus importante, on constate l'apparition d'un deuxième vortex en surface du mur liquide : à la surface du mur, le sens du vortex est alors opposé à celui de l'écoulement général (ressaut de « type IIa »).
Le ressaut prend une forme polygonale avec au moins trois côtés. Notons qu'il n'y a pas, à notre connaissance, de limite au nombre de côtés possibles pour un ressaut.

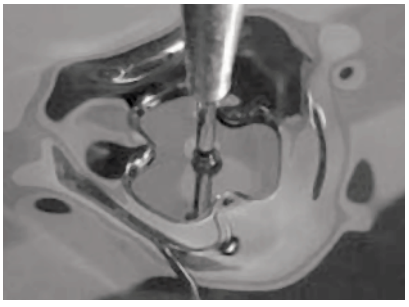
En changeant la taille du jet liquide et en augmentant encore la hauteur du mur extérieur, John Bush et ses collègues ont obtenu des motifs encore plus complexes où le ressaut est couplé avec une petite vague située juste à l'extérieur (ce type de double ressaut est noté « IIb »). Ce nouveau régime se caractérise par de nouvelles formes : ovale, œil-de-chat, nœud papillon, papillon, trèfle à trois, quatre feuilles ou davantage.











Schémas : © Pour la Science ; photo Type I : © A. Duchesne ; photos Type IIa et IIb : © J. Bush *et al.*, J. Fluid Mech, vol. 558, 2006

> vitesse du liquide diminuant, la surface présente une pente légèrement positive. La gravité ajoute une contrainte supplémentaire sur cette surface et s'oppose à l'écoulement. La vitesse continue alors de décroître, la pente augmente encore, le rôle de la gravité s'accroît encore, et ainsi de suite. Résultat : à cause de ce mécanisme d'instabilité, on obtient une pente aussi verticale, c'est-à-dire un ressaut.

En 2014, avec Luc Lebon et Laurent Limat, du laboratoire Matière et systèmes complexes, à Paris, j'ai réalisé des expériences qui fournissent des indices cruciaux en vue d'une explication théorique au ressaut circulaire. En mesurant avec précision la hauteur du liquide juste après le ressaut, nous avons montré que le nombre de Froude (un nombre qui compare les effets inertiels et la gravité) est identique juste après le mur pour tous les ressauts.

Il n'existe pas encore d'explication complète à cette propriété universelle, mais elle serait compatible avec le mécanisme d'instabilité gravitationnelle évoqué précédemment. Ce n'est pas étonnant car, si le ressaut est bien déclenché à la position où la gravité cesse d'être négligeable, le nombre de Froude, qui compare localement gravité et inertie, prendrait en ce point une valeur particulière identique pour tous les systèmes, indépendamment de leurs caractéristiques. Et, en raison de la condition de choc, on aurait également un nombre de Froude « universel » juste après le ressaut.

LE RAYON DU RESSAUT CALCULÉ

En outre, combiné à une modélisation fine de l'écoulement à l'extérieur du ressaut, notre résultat permet de calculer avec précision la position du ressaut. En définitive, nous sommes parvenus à ce résultat sans rien postuler sur l'écoulement qui a lieu dans la zone interne. À rebours de ce qui avait été fait précédemment, nous nous sommes attaqués au problème du ressaut comme à un puzzle, c'est-à-dire en commençant par l'extérieur et, comme pour un puzzle, cela s'est révélé particulièrement fructueux puisque nous avons été les premiers à proposer une loi analytique simple reliant, avec une excellente précision, le rayon du ressaut aux paramètres du système.

Plusieurs équipes de théoriciens se sont emparées de la question de la constante du nombre de Froude et cherchent à retrouver dans leurs équations cette observation expérimentale. On peut ainsi espérer voir apparaître de nouveaux résultats majeurs sur le sujet dans les années à venir.

Si la viscosité joue un rôle crucial, qu'en est-il d'un autre ingrédient souvent influent en mécanique des fluides à ces échelles, la tension superficielle ? À la surface d'un liquide, à l'interface de l'eau avec l'air par exemple, la force de cohésion entre les molécules en surface, différente de ce qui se passe en volume, tend à réduire au minimum l'aire de l'interface. Cela explique la forme quasi sphérique des gouttes de pluie, par exemple.

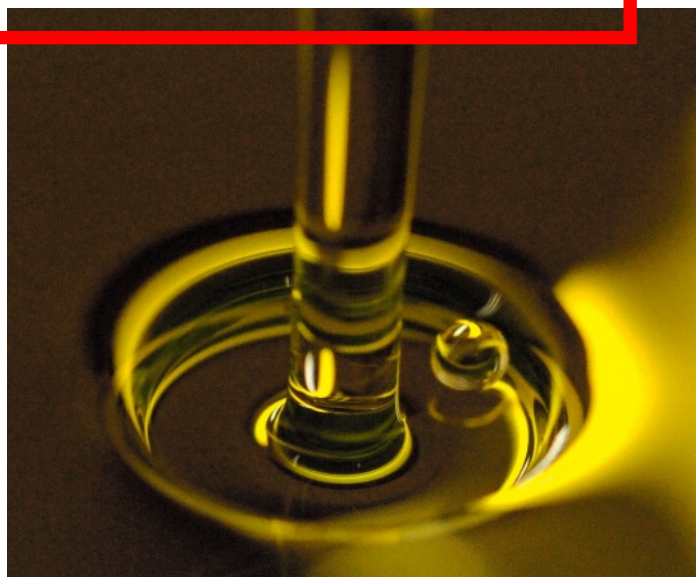
Dans la plupart des modélisations évoquées, la tension superficielle était totalement absente. En 2003, John Bush et Jeffrey Aristoff du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis, ont montré grâce à une analyse poussée que cet ingrédient physique a peu d'influence sur le rayon du ressaut, excepté dans le cas des petits ressauts de moins de un centimètre de diamètre. Il semblait donc justifié de négliger cet effet.

Or, en 2018, cette conclusion a été remise en cause. Avec leurs collègues Rajesh Bhagat et Paul Linden, de l'université de Cambridge, ont proposé une nouvelle modélisation impliquant que la tension superficielle jouerait un rôle clé dans le mécanisme de formation du ressaut hydraulique. Ce résultat fournit en apparence un bon accord entre la théorie et les

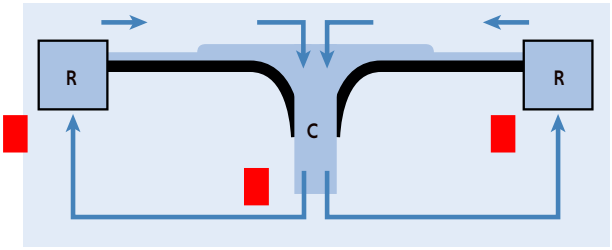
DES GOUTTES DANS UN RESSAUT

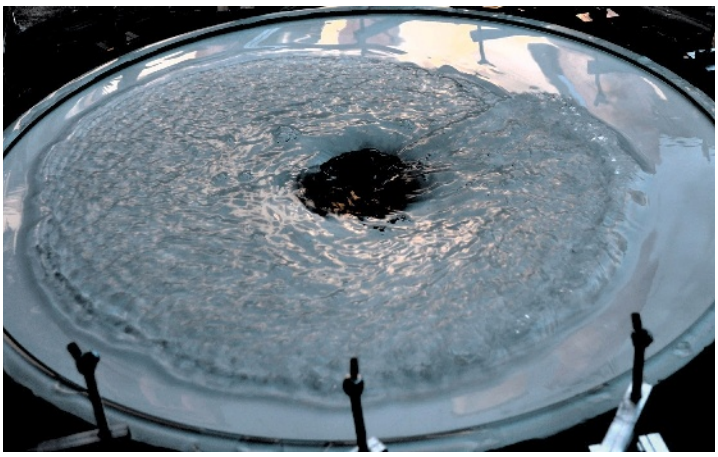
Il est aussi possible d'utiliser le ressaut dans le cadre d'expériences de lévitation de gouttes. Ainsi, lorsqu'on dépose une goutte du même liquide dans le ressaut, la goutte se retrouve piégée contre la paroi liquide du ressaut et séparée du bain par un film d'air entraîné en permanence par l'écoulement liquide du ressaut hydraulique. La goutte peut ainsi rebondir plusieurs dizaines de minutes avant de finalement fusionner avec le liquide (on parle de « coalescence »).

L'un des phénomènes les plus remarquables dans cette expérience est qu'une fois entraînée contre le ressaut, la goutte se met à évoluer selon un mouvement périodique le long du ressaut à vitesse constante en faisant typiquement un tour par seconde. Mais en augmentant le diamètre du ressaut, on observe une transition vers un régime chaotique complexe : la goutte tourne dans un sens, ralentit, repart en sens inverse, fait demi-tour, etc., et cela sans motif régulier. Pourquoi le comportement de la goutte change-t-il ainsi ? Cette énigme est toujours à l'étude.



© A. Duchesne *et al.*, Multiple rotations of a drop rolling inside a horizontal circular hydraulic jump, *EPL*, vol. 102, 64 001, 2013





Dans cette expérience, le ressaut hydraulique est utilisé pour modéliser l'effondrement d'une étoile avant son explosion en supernova.

Le dispositif consiste en un réservoir annulaire (R) qui injecte de l'eau sur une surface hyperbolique (analogue au potentiel gravitationnel de l'étoile) qui s'évacue par la partie centrale (C). Le ressaut qui se forme (inversé par rapport à celui de l'évier) est d'abord symétrique et circulaire, mais une instabilité se crée *(photographie à droite)*. Cette instabilité est aussi observée dans les simulations numériques de supernovæ.

expériences. Mais, en 2019, avec le groupe de Tomas Bohr, j'ai suggéré que leur modèle serait fondé sur une hypothèse erronée. La question du rôle exact de la tension de surface semble encore loin d'être résolue!

Ce dernier rebondissement illustre le fait qu'il existe toujours un débat actif autour de ce problème qui semble banal et facile à résoudre: quelle est la taille du petit rond que vous voyez au fond de votre évier en faisant la vaisselle

DE L'ÉVIER AUX ÉTOILES À NEUTRONS

Malgré la modestie du phénomène, il pourrait nous en apprendre beaucoup sur des objets sans rapport avec le ressaut hydraulique et se manifestant à des échelles bien plus grandes. L'astrophysique nous propose des applications au phénomène de ressaut à des échelles un million de fois plus grandes qu'un évier. En 2012, Thierry Foglizzo, du CEA à Saclay, et ses collègues ont ainsi proposé d'étudier la dynamique des supernovæ par une analogie hydraulique.

Une supernova correspond à l'effondrement du cœur d'une étoile en fin de vie. Elle forme alors une étoile à neutrons ou un trou noir, tandis que les couches externes de l'astre sont violemment expulsées dans le milieu interstellaire. Les simulations numériques qui décrivent ce phénomène astrophysique ont mis en évidence que l'explosion de l'étoile présente toujours une asymétrie due à une instabilité entre le gaz qui s'effondre et l'onde de choc qui précède l'explosion en supernova. Pour modéliser expérimentalement un tel phénomène à l'échelle du laboratoire, Thierry Foglizzo et son équipe ont utilisé un dispositif ingénieux: un «ressaut circulaire inversé».

Dans un bassin circulaire de surface hyperbolique, une nappe de liquide de faible épaisseur est injectée depuis la périphérie vers un trou d'évacuation au centre. Un ressaut se forme et l'écoulement vers le tube d'évacuation central se fait ensuite en régime dominé par la gravité. La forme hyperbolique est analogue au potentiel gravitationnel de l'étoile. Le ressaut hydraulique est similaire à l'onde de choc dans l'étoile et l'écoulement correspond au gaz en effondrement. Alors que le ressaut est initialement symétrique, il se forme une instabilité qui lui donne un mouvement global de rotation dans un sens alors que les régions internes tournent dans le sens opposé. Ces travaux confirment les instabilités observées dans les simulations numériques.

Les correspondances mathématiques entre les équations de la mécanique des fluides et les lois de la gravitation sont très fortes. En 1981, William Unruh, de l'université de Colombie Britannique, au Canada, a suggéré que de tels systèmes hydrodynamiques pouvaient reproduire, par analogie, certaines propriétés des trous noirs: c'est ce qu'on nomme les trous noirs acoustiques.

Un trou noir correspond à une région où la courbure de l'espace-temps est si importante que rien ne peut s'en échapper. Plus exactement, un ressaut pourrait servir de modèle à un «trou blanc», un trou noir où la flèche du temps est inversée. En effet, de la même façon que rien ne peut pénétrer dans un trou blanc, les ondes gravitaires ne peuvent pas se propager dans la zone interne d'un ressaut. Certains chercheurs, comme Germain Rousseaux, du laboratoire Pprime, à Poitiers, travaillent donc sur le ressaut hydraulique afin d'explorer cette analogie, notamment pour tester la formation du rayonnement Hawking, de faibles radiations émises par un trou noir et prédites par Stephen Hawking en 1974.

Le ressaut hydraulique est devenu un outil puissant pour étudier des phénomènes parfois inaccessibles comme les supernovæ ou les trous noirs. Mais d'autres applications sont aussi à l'étude, en particulier l'analogie avec des systèmes dynamiques en régime chaotique *(voir l'encadré page 64)*. Pas mal pour un phénomène né dans un simple évier! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Duchesne *et al.*, **Surface tension and the origin of the circular hydraulic jump in a thin liquid film**, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 4, art. 084001, 2019.

A. Duchesne *et al.*, **Multiple rotations of a drop rolling inside a horizontal circular hydraulic jump**, *Europhysics Letters*, vol. 102, art. 64001, 2013.

T. Foglizzo *et al.*, **Shallow water analogue of the standing accretion shock instability : Experimental demonstration and a two-dimensional model**, *Physical Review Letters*, vol. 108 (5), art. 051103, 2012.

J. W. M. Bush *et al.*, **An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump**, *J. Fluid Mech.*, vol. 558, pp. 33-52, 2006.

T. Bohr *et al.*, **Shallow water approach to the circular hydraulic jump**, *J. Fluid Mech.*, vol. 254, pp. 635-648, 1993.

E. J. Watson, **The radial spread of a liquid jet over a horizontal plane**, *J. Fluid Mech.*, vol. 20, pp. 481-499, 1964.

© Pour la Science / T. Foglizzo

L'ESSENTIEL

> Longtemps a prévalu l'idée que les bâtiments de la Grèce ancienne, comme les sanctuaires d'Apollon à Délos et à Delphes, ont été construits avec de la pierre extraite localement, sauf pour les marbres.

> Depuis 2017, un projet de recherche a pour objectif d'étudier les provenances des pierres à Délos et à Delphes, ainsi que les usages qui en ont été faits.

> Ses premiers résultats montrent que beaucoup de ces roches avaient une origine non locale, et parfois lointaine.

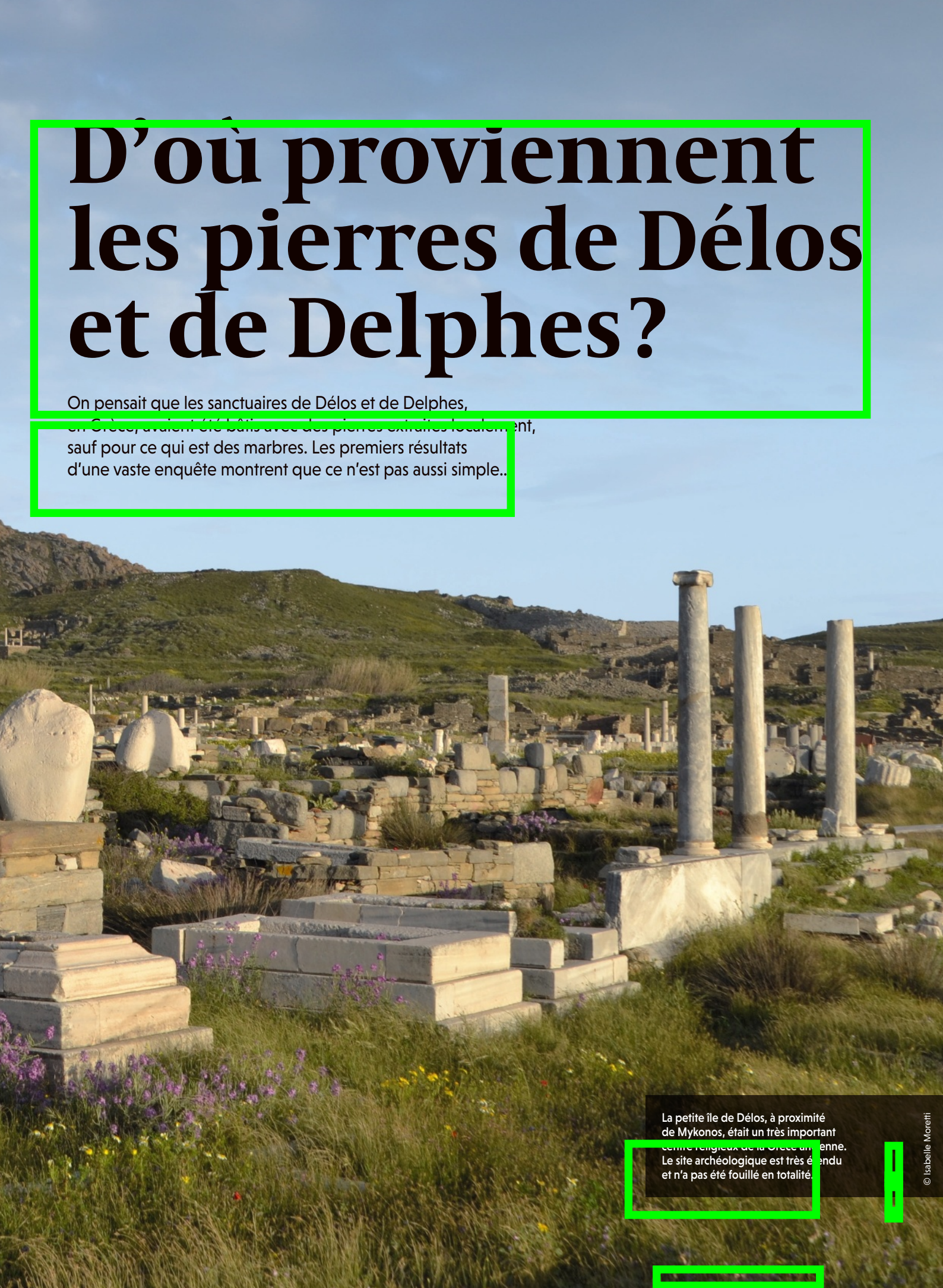
> Les raisons de ces importations, coûteuses en transport, sont à éclaircir.

L'AUTRICE

ISABELLE MORETTI
chercheuse associée à Sorbonne Université et à l'université de Pau et des Pays de l'Adour, membre de l'Académie des technologies

D'où proviennent les pierres de Délos et de Delphes?

On pensait que les sanctuaires de Délos et de Delphes, en Grèce, avaient été bâtis avec des pierres extraites localement, sauf pour ce qui est des marbres. Les premiers résultats d'une vaste enquête montrent que ce n'est pas aussi simple..



La petite île de Délos, à proximité de Mykonos, était un très important centre religieux de la Grèce antique. Le site archéologique est très étendu et n'a pas été fouillé en totalité.

© Isabelle Moretti

Les ruines des cités et sanctuaires de la Grèce antique fascinent tout un chacun, voyageurs, touristes mais aussi les scientifiques. Même si des travaux de reconstruction ont souvent suivi les premières fouilles, au début du XXe siècle, et expliquent parfois l'état actuel des monuments, beaucoup de ces lieux ont été habités ou utilisés pendant des siècles. Hors guerres et catastrophes naturelles, tremblements de terre ou glissements de terrain, ils ne semblent pas avoir nécessité de fréquentes réparations. Une longévité qui laisse songeur à l'ère de l'obsolescence programmée…

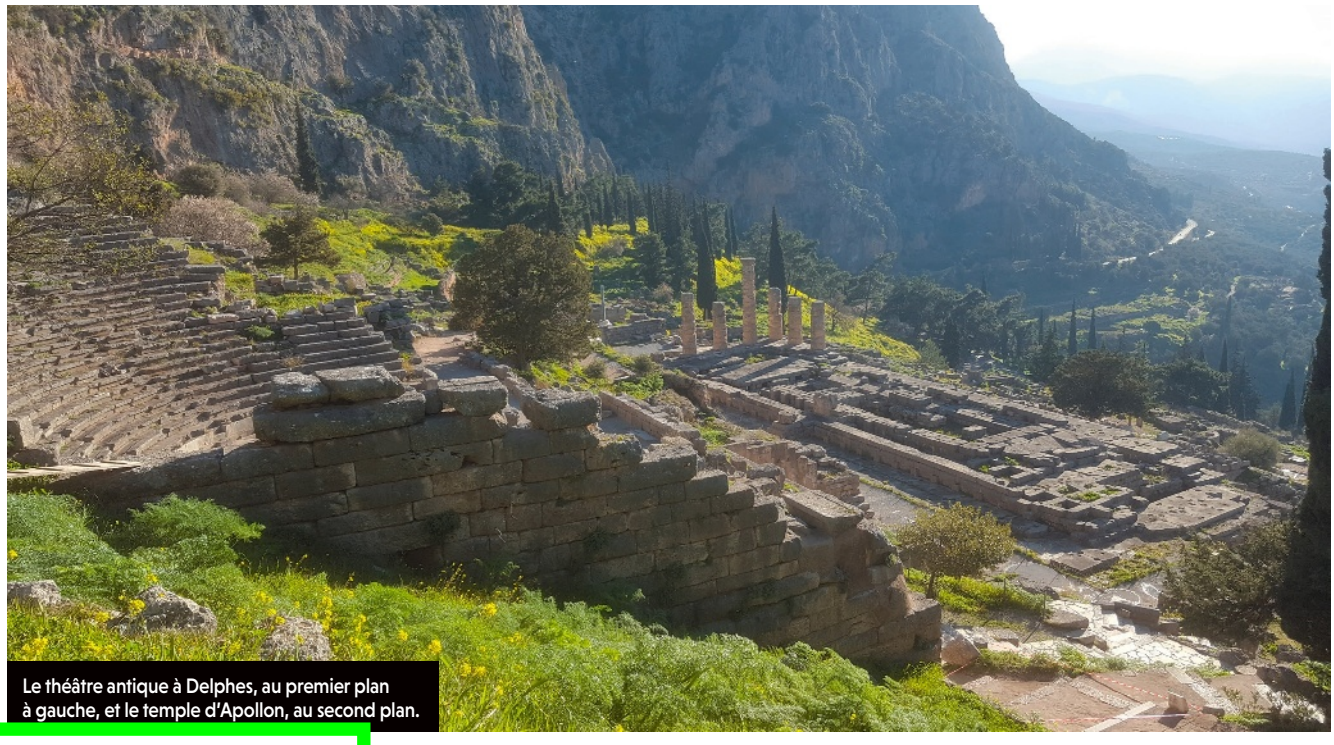
Pour parvenir à un tel résultat, les bâtisseurs de l'époque, en plus d'un sens aigu de l'esthétique, avaient sans doute une connaissance fine des matériaux et des méthodes de construction. Enfin, et là aussi contrairement à aujourd'hui, le transport, en particulier terrestre, avait un coût énorme. Le choix de matériaux locaux devait donc souvent être le plus économique.

On trouve pourtant une belle variété de pierres dans le bâti des grands sanctuaires dédiés à Apollon sur la petite île de Délos, dans les Cyclades, et à Delphes, sur le continent – deux sites archéologiques majeurs, qui étaient parmi les centres religieux les plus importants de la Grèce ancienne. Pourquoi cette diversité de pierres ? À la fin du XIXe siècle, des archéologues et des historiens ont avancé que lorsqu'une cité grecque prenait l'initiative de construire un monument dans ces sanctuaires, elle amenait les ouvriers et la pierre de chez elle, par souci de prestige mais aussi parce que ses ouvriers excellaient dans le travail de ce matériel.

Les textes anciens permettent parfois de confirmer ce mode de fonctionnement. Il en

> **Le transport, en particulier par voie terrestre, avait un coût énorme**

est ainsi du trésor des Naxiens à Délos, édifice construit au début du VIe siècle avant notre ère dans le sanctuaire d'Apollon et destiné aux offrandes au dieu et aux banquets qui accompagnaient les sacrifices : des inscriptions sur place indiquent qu'il a été bâti par des artisans de Naxos avec du marbre de leur île (située à une cinquantaine de kilomètres de Délos), à un moment où personne d'autre n'avait ce savoir-faire, en particulier pour la charpente et le toit en marbre.



Le théâtre antique à Delphes, au premier plan à gauche, et le temple d'Apollon, au second plan.

© Luigi Piccardi

L'une des techniques d'analyse *in situ* utilisées est la fluorescence X. La photo montre ainsi Sylvain Pont, du MNHN, dressant avec une « fluoX » portative la carte chimique d'un chapiteau, en s'assurant grâce à des échantillons étalonnés que l'appareil reste bien calibré.

Autre méthode d'examen *in situ* : le microscope de terrain, qui permet (ici à Marilou de Vals, de Sorbonne Université, et à raison) d'observer et d'enregistrer sur l'ordinateur connecté une image à fort grossissement de la roche.

Mais la recherche du prestige n'explique pas tout et il y a aussi des bâtiments plus ordinaires, les habitations de particuliers par exemple. Où et d'après quels critères les artisans se fournissaient-ils ? Un projet lancé en 2017 par l'École française d'Athènes (EFA) et qui a pris de l'ampleur grâce aux financements de l'ANR vise à comprendre cette variété des pierres de construction sur les sites de Délos et de Delphes, les raisons qui ont présidé aux choix effectués et la façon dont ces pierres étaient extraites et transportées jusqu'aux chantiers.

Un tel objectif nécessite une approche pluridisciplinaire. Sous la houlette de l'EFA et des éphories, l'administration grecque dont dépendent les autorisations de travaux, travaillent désormais ensemble des archéologues, des architectes, des épistémologues, des historiens des sciences et des géologues. Les équipes sont dirigées par Jean-Charles Moretti, de l'Institut de recherche sur l'archéologie antique à Lyon, pour Délos, et par Amélie Perrier, de l'EFA, pour Delphes. Du côté de la géologie, elles comprennent à la fois des structuralistes de Sorbonne Université qui cartographient les sites, reconnaissent les carrières et estiment leur volume, et des pétrographes du Muséum national d'histoire naturelle, qui étudient plus en détail les faciès, c'est-à-dire les caractéristiques fines des roches, indispensables pour déterminer leur provenance : une caractérisation du type « marbre blanc à cristaux millimétriques » est en effet insuffisante et ne permet pas de savoir précisément de quelle carrière ce marbre provient, ni même de quelle région (Cyclades, Attique…).

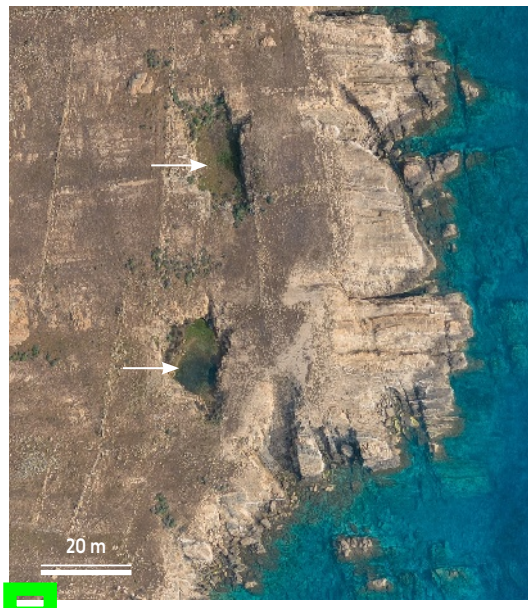
Depuis que le projet a débuté, il y a deux ans, il a apporté plusieurs informations surprenantes, même pour les experts des sites, qui montrent que l'origine des pierres est beaucoup plus variée qu'attendue.

DES OUTILS ET DE LA MÉTHODE

Pour les géologues, les difficultés du projet sont liées aux limites d'échantillonnage sur les sites au regard de la précision visée. Lorsqu'ils étudient des roches dans la nature, ils voient l'ensemble de l'affleurement, qui peut être hectométrique, en déduisent les conditions de dépôt (pour les roches sédimentaires), prélèvent des morceaux pour y découper des lames minces à examiner sous microscope, les broient pour en analyser la composition chimique et en extraient des *plugs* (cubes ou cylindres de quelques centimètres) pour déterminer les propriétés physiques de la roche telles que la densité ou la porosité.

Sur un site archéologique tel que Délos ou Delphes, les échantillonnages sont aujourd'hui soumis à des autorisations très strictes et difficiles à obtenir. Il faut donc, en général, se limiter à des méthodes non destructives appliquées *in situ*, grâce à des instruments de laboratoire miniaturisés. Ainsi, nous nous sommes servi de « fluoX » portatives, appareils qui permettent de dresser une carte chimique de roches, en laboratoire comme sur le terrain ; ces instruments utilisent la fluorescence X, c'est-à-dire qu'ils émettent des rayons X et analysent le rayonnement réémis par la matière, rayonnement qui dépend des éléments présents et de leurs concentrations. Nous avons aussi réalisé des observations sur place avec des microscopes de >

À gauche : © Isabelle Moretti ; à droite : © Luigi Piccardi



Pour identifier les carrières anciennes sur l'île de Délos, les chercheurs ont d'abord utilisé des vues aériennes 3D de haute résolution, prises au moyen de drones par l'entreprise Iconem. On distingue ainsi, sur l'exemple de photo à gauche, deux carrières (*flèches*) creusées dans le gneiss du nord de l'île. L'examen sur place permet ensuite de confirmer qu'il s'agit bien de carrières antiques. Le cliché de droite montre ainsi une saignée d'extraction (large d'une trentaine de centimètres) dans une carrière ancienne de granit, dans le sud de l'île.

Les carrières proches des sanctuaires n'ont pu fournir toutes les pierres

> terrain grossissant vingt fois, c'est-à-dire plus du double d'une loupe, reliés à un ordinateur portable (*voir les photos page 51*).

Parallèlement, nous avons dressé ou affiné les cartes des environs des sanctuaires et localisé les carrières présentes à proximité. En comparant les faciès présents dans les constructions à ceux des carrières, nous avons défini ce que l'on pouvait considérer comme des matériaux autochtones et ce qui était du matériau importé.

À Délos, île de 3,5 kilomètres carrés à peine, l'insularité offre un critère évident de distinction entre allochtone et autochtone. À Delphes, des carrières connues pour avoir été utilisées dans l'Antiquité, pour bâtir en particulier le temple d'Apollon au IVe siècle avant notre ère, se situent à une petite dizaine de kilomètres du site. C'est dans ces limites que nous considérons que les roches utilisées par les constructeurs sont d'origine locale.

PLUSIEURS TYPES DE ROCHES UTILISÉES DANS CHAQUE SITE

De quelles roches plus précisément s'agit-il? À Délos, nous avons recensé quatre types de roches: du granit, du gneiss, du marbre et du *pôros* (terme sur lequel on reviendra). Les quatre sont présents dans l'île. À Delphes, on a quatre grandes familles de pierres de construction: des calcaires, des brèches conglomératiques (roches détritiques composées de blocs anguleux), des marbres et des *pôros*. Brèches et calcaires sont présents sur place.

Si l'on s'en tenait à ce niveau de précision, nous n'aurions fait en rien avancer les connaissances: on savait depuis longtemps que l'on avait utilisé de la pierre locale. Ainsi, l'emploi du granit dans le sanctuaire de Délos, bâti sur une île à 80% en granit, était renseigné depuis fort longtemps; l'archéologue français Roland Martin l'a considéré, en 1961, comme l'exemple même de la prédominance de la pierre locale. Comme Délos est le seul grand sanctuaire d'Apollon en Grèce où l'on a utilisé le granit et le seul à être bâti sur ce substrat, la mise en relation était facile.

Cependant, dès le début du projet, les limites de cette vision globale sont apparues. Nous avons repéré toutes les carrières présentes sur Délos, île assez petite pour qu'on puisse aisément la parcourir entièrement. Les photos prises par des satellites ou des drones

À gauche: © Iconem; à droite: © Isabelle Moretti

mettent clairement en évidence les découpes non naturelles dans les reliefs, et il suffit ensuite d'aller vérifier sur place si le lieu présente des traces d'extraction ancienne (*voir les photos page 52*). Nous avons ainsi identifié une trentaine de carrières, dont quatre de marbre. Ces dernières sont de taille réduite, le marbre y étant limité à des lentilles prises dans le granit. À Delphes, les bâtisseurs ont dû faire de gros travaux de terrassement pour ériger le sanctuaire. Une partie de la pierre vient de là et des traces d'extraction sont visibles sur beaucoup des roches qui affleurent sur le site.

Bien qu'il soit le plus grand de Grèce par la superficie de ses vestiges exhumés, le site de Délos n'est pas entièrement fouillé. Mais on peut calculer les volumes approximatifs de roche qu'a nécessités la construction du sanctuaire et de la ville à son apogée, et les comparer à ceux ayant pu être extraits des carrières. Cette comparaison a fait immédiatement apparaître que, sauf pour le granit, il en manque énormément. Ainsi, les gneiss sont très majoritaires dans le bâti, alors que les carrières de gneiss, au nord de l'île, sont petites et peu nombreuses. Une première conclusion s'est donc vite imposée: bien que l'île de Délos soit on ne peut plus rocheuse et caillouteuse, on y a massivement importé de la roche pour bâtir le sanctuaire.

Le portique des Athéniens à Delphes présente des pierres de différentes teintes. La colonne est en marbre blanc et le socle en calcaire rose de provenance locale. Le mur de soutènement de la terrasse du temple d'Apollon, en arrière-plan, est en calcaire gris local.

Ce mur de maison à Délos montre un exemple d'agencement de pierres dans le bâti. Les gros blocs sont du granit, les petits allongés du gneiss. En bas à gauche, on remarque un reste de crépi et de peinture. Malgré leur magnifique agencement, les murs étaient en effet recouverts.

DÉCRIRE PRÉCISÉMENT LES PIERRES DU BÂTI

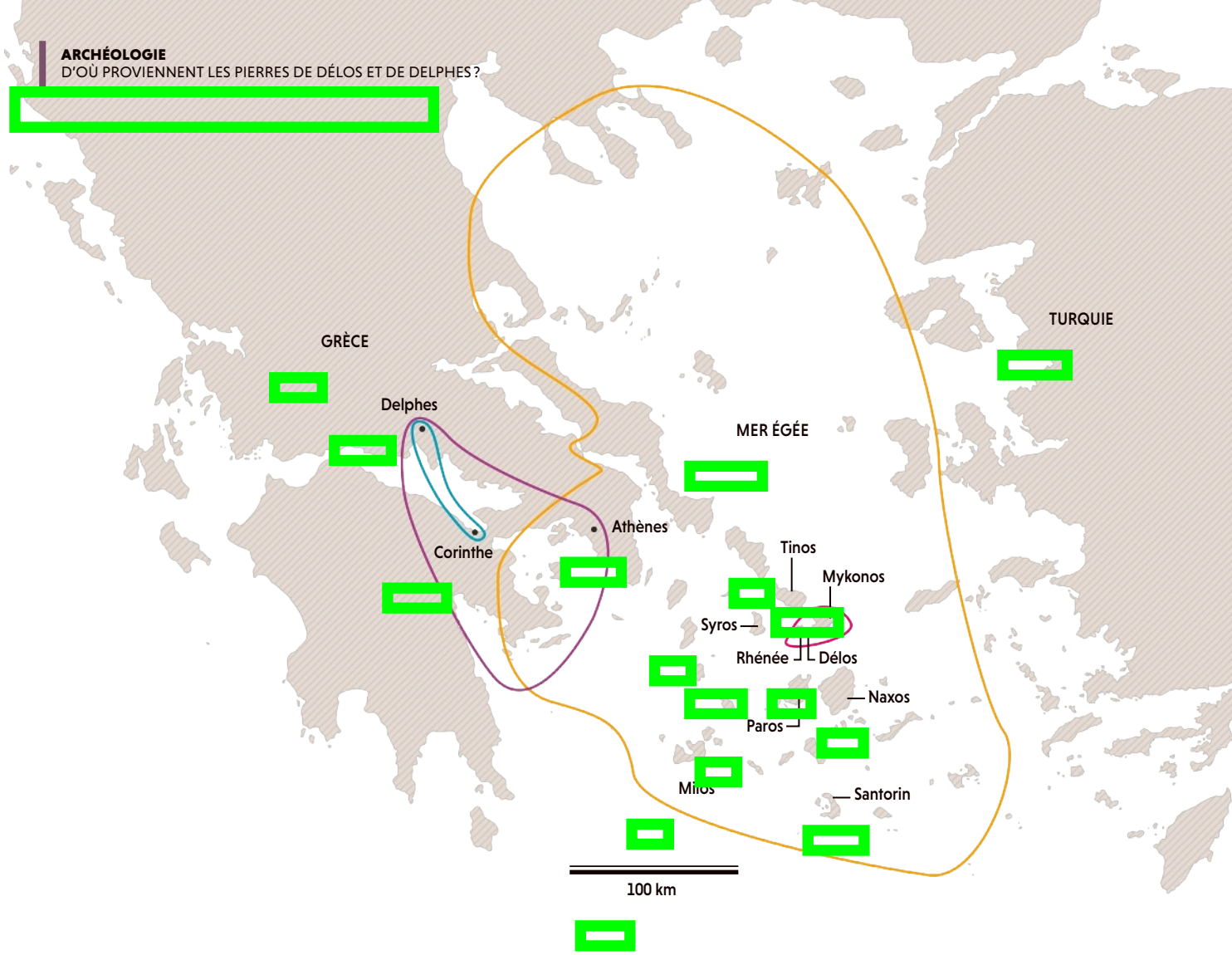
D'où cette roche a-t-elle été importée? Pour le savoir, une description précise des pierres du bâti et de leur mise en œuvre est requise. Commençons par le gneiss. Ce terme, assez global, désigne une roche métamorphique, c'est-à-dire qui a été portée à des températures et des pressions assez élevées, et qui en général a aussi subi une déformation intense. La texture résultante ainsi que les minéraux qui la composent sont donc variables. Certains gneiss contiennent du mica blanc, d'autres du mica noir. Seuls les seconds sont présents à l'état naturel sur Délos, alors que c'est le premier type que l'on voit partout dans le bâti; les paillettes de mica blanc brillent au soleil et sont identifiables à l'œil nu. L'analyse pétrographique du gneiss du site conduit donc à la même conclusion que l'analyse volumique: importation massive de gneiss.

Nous recherchons à présent les types de gneiss présents sur les îles voisines en commençant évidemment par Rhénée, la plus proche (à moins de 1 kilomètre), en espérant vérifier l'hypothèse d'une provenance non locale, mais pas trop lointaine non plus, des gneiss utilisés sur le site de Délos.

Qu'en est-il des marbres de Délos? Le marbre est en principe une roche métamorphique dérivée du calcaire, dominée par des cristaux de calcite ($CaCO_3$), sauf en cas de présence de dolomie, composée majoritairement de dolomite, de formule $CaMg(CO_3)_2$. La composition est très monotone et ce sont les éléments présents à l'état de traces ou texturaux, comme la taille des cristaux, qui permettent de différencier les marbres les uns des autres.

En raison de l'histoire géologique de la Grèce et de la mer Égée, les marbres des Cyclades et du sud de l'Attique se ressemblent beaucoup, et les distinguer à l'œil nu est rarement possible. L'approche que nous avons choisie, inhabituelle en géologie, est une « analyse en composantes principales », méthode d'analyse de données adaptée à l'analyse statistique d'un grand nombre de variables; elle remplace un grand nombre de variables corrélées (par exemple les contenus en strontium, en >

En haut: © Luigi Piccardi; en bas: © Isabelle Moretti



Au début du projet de recherche, en 2017, la zone d'importation des *pôros* attendue pour Délos *(contour rouge)* englobait juste l'île toute proche Rhénée et peut-être Mykonos. La zone désormais considérée inclut les îles volcaniques et les côtes de la mer Égée, vers la Macédoine, au nord *(contour orange)*. Pour Delphes, on savait que des fûts de colonne ont été importés de Corinthe vers le temple d'Apollon *(contour bleu)*, mais une aire de provenances beaucoup plus étendue *(contour violet)* est désormais étudiée pour les autres pierres du bâti.

Certains marbres de Délos proviennent d'encore plus loin que Naxos, Paros ou Syros

> silicium, en fer, les tailles de grains, etc.) par un plus petit nombre de variables, mais décorrélées, c'est-à-dire indépendantes.

COMPARAISONS AVEC UNE LITHOTHÈQUE

Nous avons construit une «lithothèque» contenant des échantillons de toutes les carrières de marbre susceptibles d'avoir été utilisées pour la construction de Délos. Hors du site archéologique, l'échantillonnage est possible, ce qui nous a permis d'effectuer à la fois des analyses complètes et des analyses plus qualitatives par fluorescence X. Nous comparons ensuite les analyses non destructives faites sur les éléments des bâtiments à cette base de données.

Là encore, la conclusion de nos travaux est claire : les bâtisseurs sont allés chercher ces marbres plus loin que nous ne l'envisagions. Certains ne peuvent avoir été extraits d'aucune des carrières de Délos et d'aucune de celles que nous avons déjà échantillonnées sur d'autres îles voisines comme Naxos, Paros, Syros… Autrement dit, il faut reprendre notre manteau et rechercher plus loin les carrières ayant fourni le marbre de Délos !

Venons-en au quatrième type de roches utilisées à Délos, les *pôros*. Ce terme désigne dans les textes anciens et pour les archéologues

© Pour la Science, © Shutterstock.com/Peter Hermes Furian (d'après I. Moretti)

et architectes, une pierre non dure plus ou moins poreuse employée dans le bâti par opposition aux roches métamorphiques et aux marbres, quasiment sans porosité, mais aussi aux calcaires très compacts, datant en général du Jurassique ou du Crétacé (soit 200 à 65 millions d'années), que l'on trouve en Grèce.

LES PÔROS, DES PIERRES GÉOLOGIQUEMENT DIVERSES

Sur le plan géologique, cependant, la dénomination *pôros* ne correspond à rien – ni à un âge (crétacé, jurassique…), ni à une conception de dépôt (lacustre, marin…), ni à une granulométrie (grès grossier, grès fin…), ni à une composition chimique particulière (quartz, carbonate…). La porosité d'une roche évolue avec son enfouissement et les interactions qu'elle a eues avec l'eau, et n'en est donc pas une propriété spécifique.

Sur les deux sites, les *pôros* sont ainsi géologiquement très divers. À Délos, ils incluent des faciès continentaux, lacustres ou éoliens, des faciès marins et des faciès de plages, mais aussi des roches volcaniques et des roches volcanoclastiques. Ils proviennent peut-être de Milos ou de Santorin, les deux îles volcaniques proches où l'on retrouve ces faciès.

À Delphes, les *pôros* sont des grès marins plus ou moins grossiers, des dunes oolithiques (c'est-à-dire des dunes à grains sphériques qui se sont solidifiées) ou des travertins. Tous ces faciès sont présents autour du golfe de Corinthe, mais non à Delphes même, ni juste à proximité, car il n'y a quasiment pas de sédiments récents sur la côte nord du golfe. On peut ainsi conclure que les *pôros* de Delphes ont été importés.

Les provenances exactes et les carrières restent toutefois à préciser. Pour ce faire, les recherches pourront s'appuyer sur la géologie du golfe de Corinthe, qui a été beaucoup étudiée puisque c'est l'un des rifts les plus actifs du monde et la zone la plus fortement sismique d'Europe, et sur la comparaison avec les nombreuses autres villes antiques bordant le golfe, dont Corinthe et ses ports antiques Léchaion et Cenchrées, pour ne citer que les plus célèbres.

COMPRENDRE LES CHOIX DES BÂTISSEURS

Les provenances des pierres de construction ne sont qu'un des volets des recherches. Un autre porte sur la façon dont ces pierres ont été utilisées et la logique qui était derrière. Il est très rare que les bâtiments ne soient faits que d'une seule roche. Par exemple, pour le temple d'Apollon à Delphes, les bâtisseurs ont réalisé le mur qui soutient la terrasse en calcaire; les soubassements, non visibles à l'époque de l'activité du temple, en *pôros* (dont le type est à préciser); le plancher, en un calcaire gris clair très dur provenant de la carrière située à une dizaine de kilomètres à l'est *(voir l'encadré ci-dessus)*; les colonnes, en *pôros* de type dunes oolithiques, qui pourrait provenir de la zone de Corinthe au sud-est du golfe; les caniveaux permettant l'écoulement des eaux qui ruissellent parfois dans cette zone montagneuse, en brèche conglomératique; et le marbre était présent dans la statuaire, mais aussi dans certains éléments du toit. De toute évidence, il y a eu de la part des bâtisseurs un choix précis et raisonné qu'il reste à mieux comprendre. Les mesures pétrologiques en cours ainsi que la comparaison entre les différents édifices de la région devraient nous y aider.

Ainsi, alors que nous avions démarré ce projet avec l'idée classique que l'on construisait en pierres locales et que seuls les marbres, en particulier ceux destinés aux édifices prestigieux, étaient massivement importés, nos investigations ont mis en évidence qu'une grande partie des matériaux l'étaient. Même le vulgaire *pôros*, que l'on trouve essentiellement dans les soubassements et dans les cloisons où il était entièrement recouvert de stuc (contenant de la poudre de marbre), a pu être acheminé de très loin, c'est-à-dire à grands frais. La diversité des roches utilisées pour ces sanctuaires est surprenante et les zones d'importation de la pierre sont plus vastes qu'attendu. Il y a là une énigme archéologique qui reste à élucider. ■

LES CALCAIRES DE DELPHES

Ce qui frappe avant tout le visiteur arrivant à Delphes, ce sont le site, les reliefs escarpés du mont Parnasse, et les Grecs vont skier au nord, l'énorme falaise qui longe le site, la mer Oliviers qui descend vers la côte. Mais cette beauté a un écrin. La falaise est une faille active au rejet kilométrique, elle sépare les calcaires jurassiques (gris) du Parnasse des calcaires du Crétacé roses ou gris. Comme toutes les failles, elle joue un rôle majeur dans le drainage des fluides ; sources et fontaines sont très nombreuses sur le site et à la base d'une grande partie des mythes autour de la Pythie. Revers de la médaille, des glissements de terrain du fait des tremblements de terre et des venues d'eau rapides ont aussi ponctué l'histoire du site. L'aspect des calcaires, leur couleur, la densité de fractures et de stylolithes (tracés en dents de scie) mais aussi les fossiles permettent assez facilement de reconnaître ces calcaires à l'œil nu. Le stade de Delphes est situé en haut du site, juste au pied de la faille ; ses gradins sont en calcaire du Jurassique et une carrière dite « du stade » située juste au-dessus montre que les Anciens n'ont pas hésité à extraire des blocs de cette falaise/faille – dans des conditions sans doute très risquées pour les ouvriers. Le théâtre, en dehors de quelques éléments en marbre, est fait de ce même calcaire du Parnasse. En revanche, le temple actuel, rebâti après un glissement de terrain en 373 avant notre ère, est en calcaire du Crétacé terminal et provient d'une carrière située à 10 kilomètres à l'ouest du site, qui semble avoir été ouverte pour cette occasion. C'est le premier et apparemment seul bâtiment d'importance qui contient ce faciès. D'autres calcaires du Crétacé se retrouvent dans le spectaculaire mur de soubassement de la terrasse du temple ; ils proviennent de carrières à l'est du site.

BIBLIOGRAPHIE

M. de Vals *et al.*, **The stones of the Delphi sanctuary – Northern shore of the Corinthian Gulf – Greece**, *BSGF - Earth Sciences Bulletin*, vol. 191, 11, 2020.

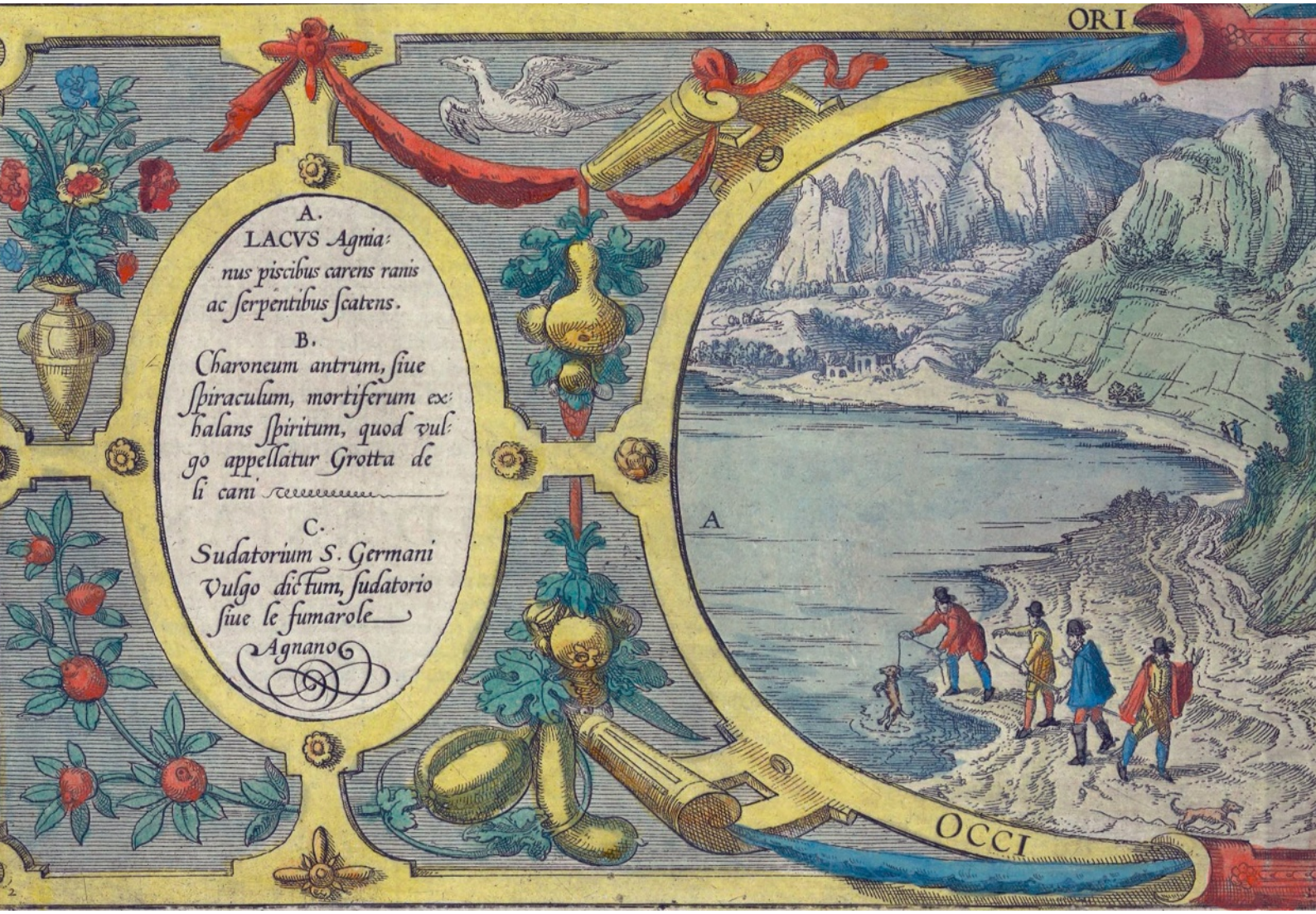
A. Perrier, **La réorganisation de l'espace du sanctuaire d'Apollon à Delphes au IVe siècle av. J.-C.**, dans S. Montel et A. Polosini, *La question de l'espace au IVe siècle avant J.-C. dans les mondes grec et étrusco-italique*, Presses univ. de Franche-Comté, pp. 71-91, 2019.

J.-C. Moretti, **L'architecture publique à Délos du IIe siècle av. C.**, dans J. des Courtils (éd.), *L'architecture monumentale grecque au IIIe siècle av. C.*, Ausonius Mémoires 40, Bordeaux, 2015, p. 83-115.

L. Piccardi *et al.*, **Scenery, rhythm, tectonics, geochemistry and geomythology at Delphi (Greece)**, *Journal of the Geological Society*, vol.165(1), pp. 5-18, 2008.

Le mythe de la Grotte du chien

Pourquoi les chiens perdaient-ils connaissance dans une grotte près de Naples ? Cette énigme de la Renaissance non seulement contribua à la diffusion des sciences, mais fut aussi une étape clé de la découverte et de la caractérisation du dioxyde de carbone.



L'ESSENTIEL

> À la fin du XVIe siècle, une grotte près de Naples intrigua nombre de savants : les chiens y perdaient connaissance mais se réveillaient une fois sortis.

> On ne comprit la nature des vapeurs toxiques à l'œuvre que dans la seconde moitié du XVIIIe siècle, quand un jeune médecin écossais, Joseph Black, découvrit le dioxyde de carbone.

> Profitant de l'engouement pour les cabinets de curiosité et les voyages en Europe au XVIIIe siècle, la grotte de Naples connut un grand succès.

> Au XIXe siècle, une réplique à Royat-Chamalières, en Auvergne, contribua à sortir à la diffusion des sciences sans chien cette fois !

LES AUTEURS

THIERRY LEFEBVRE
maître de conférences à l'université de Paris et membre du Comité des travaux historiques et scientifiques (CTHS)

CÉCILE RAYNAL
pharmacienne et membre de la Société d'histoire de la pharmacie

© Bibliothèque nationale de France, département Cartes et plans, GE DD-1607 (175)

La Grotte du chien, au bord du lac Agnano, près de Naples, sur une copie de 1645 de l'estampe qui la rendit célèbre, du peintre flamand Georg Hoefnagel (années 1580).

Pendant des millénaires, les humains ont respiré du dioxyde de carbone sans le savoir et sans même en soupçonner l'existence. Invisible et inodore, ce gaz ne se signalait guère que par les phénomènes inquiétants qui en découlaient parfois (malaises pouvant aller jusqu'à l'asphyxie). En raison de sa densité supérieure à celle de l'air, il s'accumulait de manière insidieuse dans les endroits confinés: les mines, les chais et les celliers, mais également des cavernes dites «méphitiques» (du latin *mephitis*, qualificatif utilisé pour désigner les exhalaisons toxiques). Certaines de ces grottes sont même devenues des attractions très prisées pendant plusieurs siècles – et constituent aujourd'hui des témoins précieux à la fois de l'histoire de la chimie et de celle de la vulgarisation scientifique.

UN MYTHE NAÎT…

Cet engouement a commencé pendant la Renaissance lorsqu'une grotte, située non loin de Naples, a accédé à la célébrité. Il s'agissait d'une galerie de sondage creusée par des prospecteurs de l'Antiquité, probablement entre les IIIe et IIe siècles avant notre ère, sans doute afin de mettre au jour une de ces sources minérales qui faisaient alors la renommée de cette région au riche patrimoine thermal.

Haut de deux mètres et large d'une soixantaine de centimètres, ce modeste couloir souterrain s'enfonçait, avec une déclivité d'environ 30%, dans la paroi sud-orientale du cratère d'Agnano. Une descente très courte de surcroît: à peine une douzaine de mètres qui se terminaient en cul-de-sac dans une salle parallélépipédique de 32 mètres carrés, dont tout indique qu'elle dut servir de *sudatorium*.

Les siècles passèrent. L'antique galerie de cure tomba d'autant plus profondément dans l'oubli que des «vapeurs puantes et toxiques» s'y étaient infiltrées au fil des remaniements géologiques, si coutumiers dans cette région volcanique dite «des Champs phlégréens».

Au XIe siècle, l'eau envahit le cratère, donnant naissance à un petit lac. On peut imaginer que la proximité de cette rive pittoresque relança l'intérêt pour la cavité redoutée. Les paysans des environs utilisèrent alors sa mauvaise réputation pour mettre au point un petit «spectacle» lucratif, qui ne laissait pas de surprendre les curieux de passage: un animal, en général un chien, était jeté de force au fond de la galerie, jusqu'à ce qu'il suffoque et perde connaissance; ramené à l'air libre dans un état de mort apparente, il se voyait ensuite plongé dans l'eau du lac et recouvrait peu à peu ses esprits, au grand étonnement des badauds. Quelque chose d'imperceptible et de potentiellement mortel occupait cette excavation.

> **Pour le chimiste flamand Van Helmont, la grotte contenait un «Gas»**

Vers le milieu du XVIe siècle, les historiens Benedetto Di Falco et Leandro Alberti furent parmi les premiers à évoquer cette «attraction» dans leurs ouvrages respectifs consacrés à la description de l'Italie, et plus particulièrement aux merveilles antiques de la région de Naples. Puis, au début des années 1580, une magnifique estampe du peintre flamand Georg Hoefnagel, maintes fois rééditée et copiée par la suite, en fournit une représentation pour ainsi dire canonique: l'image invita les plus téméraires au voyage et fit rêver nombre de sédentaires (*voir pages 74-75*). Ainsi naquit le mythe de la *Grotta del Cane* («Grotte du chien»).

LA SCIENCE DES MOFETTES

Des savants tentèrent d'élucider ce double mystère: quelle était la nature de ces «vapeurs»? Et d'où venaient-elles? Le chimiste flamand Jan Baptist Van Helmont fut le premier à émettre une hypothèse satisfaisante. Mais, trop en avance sur son temps, sa proposition ne fit pas école. Ayant fait brûler 62 livres de charbon de bois dans son laboratoire, Van Helmont n'avait récolté, en tout et pour tout, qu'une livre de cendres. Il en avait conclu que 61 livres d'un «esprit sauvage» (*spiritus silvestris*) invisible s'étaient dégagées. Il avait

Dans la *Grotta del Cane*, le dioxyde de carbone émanait de crevasses et de fissures au sol. Plus lourd que l'air, il stagnait au sol, piégé par la pente de la grotte, comme l'illustre ce dessin de 1832.

© A. S. Taylor, «An account of the Grotta del Cane; with remarks on suffocation by carbonic acid», Lond. Med. Phys. J., vol. 13(76), pp. 278-285, 1832

Jusqu'au XIXe siècle, la Grotte du chien italienne attira de nombreux curieux, avant de tomber dans l'oubli après le drainage du lac d'Agnano.

nommé «Gas» cet esprit et proposé que ce dernier explique les effets funestes des cavités méphitiques comme la *Grotta del Cane*. Mais il ne l'avait pas démontré.

D'autres, moins visionnaires, se rendirent sur place pour y réaliser des expériences souvent redondantes: ce fut le cas, par exemple, du prélat espagnol Juan Caramuel y Lobkowitz, ou encore de l'encyclopédiste allemand Athanasius Kircher qui fit l'hypothèse que les «vapeurs» toxiques pouvaient avoir leur origine dans «l'ocre, le sable, l'orpiment et l'arsenic».

La science des «mofettes», mot également tiré du latin *mephitis*, utilisé ici pour désigner certaines cavités asphyxiantes, battait désormais son plein. Elle eut bientôt son maître incontesté: le médecin napolitain Leonardo Di Capua, cofondateur de l'*Accademia degli investiganti*. Ses *Lezioni intorno alla natura delle mofete* («Leçons sur la nature des mofettes»), publiées à Naples en 1683, puis à Cologne en 1714, firent longtemps autorité. Selon ce savant, la «vapeur» qui se dégageait de ces cavités était due à la décomposition de résidus d'origines minérale, végétale voire animale. Son origine volcanique ne faisait pas encore consensus. À leur décharge, les investigateurs du XVIIe siècle ne disposaient pas d'instruments adaptés et se trouvaient donc dans l'impossibilité d'isoler les substances accumulées au fond de la grotte.

Les progrès vinrent du Royaume-Uni. En 1755-1756, le jeune Écossais Joseph Black parvint à mettre en évidence un gaz qu'il baptisa («peut-être improprement», reconnaissait-il en toute humilité) «air fixé» ou «air fixe» (*fixed air*). À défaut de se parer de son nom moderne, le dioxyde de carbone venait d'acquérir ses premières lettres de noblesse (*voir l'encadré page 78*).

Quelques années plus tard, le Britannique Henry Cavendish démontra que cet «air fixe» était plus dense que l'air, ce qui expliquait son accumulation dans les zones basses des celliers, pressoirs et autres cavités méphitiques.

Enfin, en 1770, un jeune médecin écossais et ancien élève de Black, John Mervin Nooth, se rendit à la *Grotta del Cane* à l'occasion d'un séjour en Italie: il démontra, au terme d'expériences malheureusement mal documentées, que l'«air fixe» était bien à l'origine des incidents constatés.

Bien plus tard, au début du XXe siècle, grâce entre autres au physiologiste écossais John Scott Haldane, on comprit que la dangerosité du dioxyde de carbone résultait de sa fixation sur l'hémoglobine, la protéine qui transporte dans le sang les gaz respiratoires (l'oxygène et le dioxyde de carbone), et que l'oxygène pouvait aisément lui être substitué: de là, l'explication des mystérieuses «résurrections» canines...

SOUS LA PLUME DE DUMAS

La résolution de l'énigme scientifique ne mit pas pour autant fin au mythe de la *Grotta del Cane*, bien au contraire! Pendant plus d'un siècle, elle continua à attirer de nombreux >

© «La Grotte du chien près de Pouzzoles», dans A. Mangin, Les Phénomènes de l'air, 1883, coll. CRTL

> savants et voyageurs : Mozart la visita avec son père en 1770, Goethe en 1787, ainsi que Sade (1776), Flaubert (1851), Twain (18[illegible]...

Il faut dire que depuis le XVIII[e] siècle, la mode était aux cabinets de curiosités et aux démonstrations publiques des prodiges de la science. Le « spectacle curieux » des effets produits par le gaz carbonique participa de ce mouvement de vulgarisation, au même titre que les merveilles de l'électricité et de l'astronomie. Dans le même temps, la vogue du « Grand Tour », ce voyage d'initiation à travers l'Europe que s'accordaient les jeunes élites, culminait. La *Grotta del Cane* se situait à la croisée de ces deux engouements complémentaires.

En 1835, Alexandre Dumas se rendit à Agnano avec son ami Louis Godefroy Jadin. Il relata cette excursion quelques années plus tard dans *Le Corricolo* (1843) : « Le tour du malheureux chien était venu. Son maître le plongea dans la grotte sans qu'il opposât aucune résistance ; mais, une fois dedans, son énergie lui revint, il bondit, se dressa sur ses pieds de derrière pour élever la tête au-dessus de l'air méphitique qui l'entourait. Mais tout fut inutile : bientôt un tremblement convulsif s'empara de lui, il retomba sur ses quatre pattes, vacilla un instant, se coucha, roidit ses membres, les agita comme dans une crise d'agonie, puis tout à coup resta immobile. Son maître le tira par la queue hors du trou ; il resta sans mouvement sur le sable, la gueule béante et pleine d'écume. Je le crus mort. »

Dumas assista ensuite au « miracle » maintes fois rapporté par les auteurs des siècles antérieurs : « Bientôt l'air extérieur agit sur lui, ses poumons se gonflèrent et battirent comme des soufflets ; il souleva sa tête, puis l'avant-train, puis le train de derrière, demeura un instant vacillant sur ses quatre pattes comme s'il eût été ivre ; enfin, ayant tout à coup rassemblé toutes ses forces, il partit d'un trait et ne s'arrêta qu'à cent pas de là. »

Les manuels scolaires de la seconde moitié du XIX[e] siècle s'emparèrent à leur tour de ce qui s'apparentait désormais de plus en plus à un poncif : désormais, point d'exposé sur le « gaz carbonique » sans qu'il fût fait référence à cette caverne singulière ! Anton Tchekhov s'en moqua gentiment dans une nouvelle

An experiment on a bird in the air pump, gravure d'après Joseph Wright (1768). Au XVIII[e] siècle, les démonstrations scientifiques publiques des pompes à air et de l'effet de sa raréfaction sur de petits animaux ou des modèles de poumons étaient répandues en Grande-Bretagne.

LES DÉBUTS DE LA « CHIMIE DES GAZ »

Pour sa thèse de médecine soutenue en 1754, l'Écossais Joseph Black était penché, entre autres, sur les propriétés chimiques de la *magnesia alba* (ancien nom du carbonate de magnésium $MgCO_3$). Une version retravaillée de sa dissertation fut lue l'année suivante devant les membres de la *Philosophical Society* d'Edimbourg, puis imprimée en 1756 dans la revue de cette société savante, *Essays and observations : Physical and literary*. Elle marque la découverte du dioxyde de carbone (CO_2).

Au cours de ses expériences, Black avait constaté que lorsque la *magnesia alba* subissait l'action d'un acide (par exemple l'« esprit de sel » ou HCl), il se dégageait un « air » spécial qu'il était parvenu à isoler et à peser au moyen d'une balance de précision. Par ailleurs, cet « air » pouvait être « fixé » par la chaux vive (CaO), d'où le nom d'« air fixe » ou « fixé » que lui attribua le chimiste. On représente aujourd'hui ces réactions de la manière suivante :

$MgCO_3 + 2\,HCl \rightarrow MgCl_2 + H_2O + CO_2$

$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$

Black entrevu un siècle plus tôt par Jan Baptist Van Helmont qui il rendit un vibrant hommage au savant flamand. Il reprit également à son compte les hypothèses du maître, en particulier celle qui attribuait à cet « air fixe » les effets funestes des celliers et de la *Grotta del Cane*. Mais là encore, sans le démontrer formellement, puisqu'il n'eut pas l'occasion de se rendre sur place...

© Wellcome Collection (CC BY 4.0)

intitulée *Zinotchka* (1887). Le jeune Pétia, âgé de 8 ans, en venait à douter de l'étendue de la culture scientifique de sa répétitrice: « [...]te malheureuse Grotte du chien, près de Na[...]s, constitue, en chimie, le fin du fin au-[...]à duquel toute gouvernante décide de n[...]pas s'aventurer. Zinotchka défendait toujours [...]vec chaleur l'utilité des Sciences naturelles, [...]is je doute qu'elle connût en chimie autre [...]se que cette grotte. »

Le déclin de cette curiosité pluriséculaire était amorcé. Le lac d'Agnano fut [...]aîné entre 1865 et 1870 afin d'assainir la région, où sévissait le paludisme. L'ancien sentier lacustre, jadis si propice à la rêverie et à la découverte, fut dès lors déserté et la grotte retomba peu à peu dans l'oubli. Elle fit même office de décharge sauvage dans la seconde moitié du XX[e] siècle !

Réhabilitée depuis peu par le *Gruppo archeologico napoletano*, elle suscite aujourd'hui un regain d'intérêt: le 16 juin 2019 s'est ainsi tenue à Naples une conférence scientifique intitulée «Dai campi flegrei a Marte: ricerche alla Grotta del Cane» («Des Champs phlégréens à Mars: recherches à la Grotte du chien»).

UNE RÉPLIQUE DANS LES MONTS D'AUVERGNE

La *Grotta del Cane* n'était évidemment pas la seule caverne méphitique dans le monde. D'autres, quoique moins renommées, étaient signalées ici et là, en particulier en France. La nature volcanique du Massif central et du Vivarais, démontrée au cours de la seconde moitié du XVIII[e] siècle, expliquait désormais l'existence de ces mofettes jusqu'alors tant redoutées par les paysans.

En 1830, à Montpensier, dans la vaste plaine de la Limagne, l'académicien des sciences Jean-Pierre-Joseph d'Arcet imagina de répliquer l'«attraction» napolitaine en faisant construire, au-dessus d'une «fontaine empoisonnée» (en pratique, une source carbogazeuse particulièrement riche en dioxyde de carbone), un petit bâtiment «présentant toutes les facilités désirables pour bien exécuter l'expérience qui [avait] fait la réputation de la Grotte du chien». Grâce à cet aménagement, assurait-il, «le pays [trouverait] un exemple utile des ressources que peut présenter l'industrie, et un encouragement pour augmenter l'intérêt [...] de son sol et de ses sites». Ce projet ne vit cependant pas le jour.

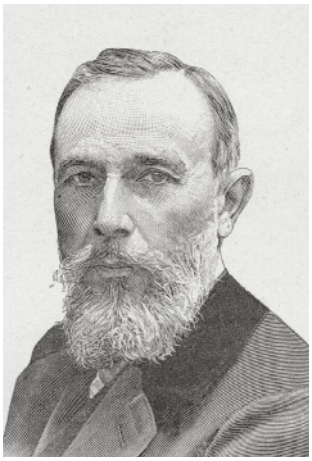
Vers 1875, un jeune médecin clermontois, Alexandre Petit, devint propriétaire d'une vaste cave de sinistre réputation, située à une centaine de mètres de la station thermale florissante de Royat où il avait pris l'habitude d'exercer durant la saison des cures. Cet «étouffis» (terme local pour désigner une mofette) était connu de longue date. La «grotte Saint-Mart», comme on l'appelait alors, donnait lieu à un phénomène similaire à celui de la *Grotta del Cane*: une couche de dioxyde de carbone d'une cinquantaine de centimètres environ, provenant de toute évidence des entrailles du petit puy de Dôme, y stagnait en permanence. On pouvait donc y reproduire la plupart des expériences qui avaient fait la réputation de l'excavation italienne: en particulier, les petits animaux, maintenus contre leur gré dans l'atmosphère délétère, perdaient connaissance au bout d'un délai variable selon les espèces.

La cave auvergnate bénéficiait cependant d'un avantage considérable sur son modèle italien, comme le rappelait en septembre 1855 un article de la *Gazette des eaux*: « La grotte Saint-Mart est plus curieuse encore que celle du Chien, à Naples, car celle de Naples n'a qu'un mètre de large et trois mètres de profondeur [*sic*], tandis que la grotte Saint-Mart a 18 mètres d'ouverture. »

Soucieux de mettre cette curiosité à la disposition des voyageurs et curistes, toujours plus nombreux en cette fin du XIX[e] siècle, Petit fit réaliser d'importants aménagements tant aux abords qu'à l'intérieur de la cave. Au fil des ans, la «Grotte du chien» (ce devint rapidement sa désignation commerciale) s'imposa comme un lieu de vulgarisation à part entière. [...] pittoresque, d'un petit «musée géologique» et d'une boutique où étaient mis en vente des «collections minéralogiques», des «pétrifications» et des ouvrages scientifiques ou à caractère historique.

> **Mozart visita la grotte de Naples en 1770, ainsi que Goethe, Sade, Flaubert, Twain...**

Une cour intérieure en plein air, conçue dans un style évoquant les vestiges des anciens thermes gallo-romains, était équipée de chaises et d'un petit banc. En attendant leur tour, les visiteurs pouvaient laisser errer leur regard sur une décoration des plus curieuses: ici, une stèle romaine; là, une statue antique; plus loin, sous un auvent, un grand panorama de 12 mètres carrés, réalisé par le peintre auvergnat Gaston Maurie et intitulé *Les Dernières Éruptions volcaniques des monts Dômes*.



À la fin du XIX[e] siècle, le médecin clermontois Alexandre Petit transforma une cave auvergnate sujette aux émanations de dioxyde de carbone en un lieu de vulgarisation qui, à son tour, attira de nombreux touristes

Le banc des belles-mères a-t-il contribué au succès de la Grotte du chien de Royat-Chamalières ? Peut-être, si l'on en croit l'une des premières affiches publicitaires du lieu…

BIBLIOGRAPHIE

T. Lefebvre et C. Reynal, *Voyage en Italie. De la Grotta del Cane de Naples à la Grotte du chien de Royat-Chamalières*, Glyphe, 2020.

B. Bensaude-Vincent et S. Loeve, *Carbone : ses vies, ses œuvres*, Le Seuil, 2018.

W. R. Halliday et A. Cigna, *The Grotta del Cane (Dog Cave), Naples, Italy*, *Cave and Karst Science*, vol. 33, n°3, 2006.

> Mais le clou était évidemment la visite proprement dite de la grotte, sous la conduite d'un guide, seul habilité à en ouvrir la porte et à en dévoiler le secret pluriséculaire. Là, installé sur une estrade dressée en surplomb de la nappe de gaz carbonique, le cicérone débitait son boniment dans une semi-pénombre propice au mystère. Il agrémentait ses propos d'expériences amusantes de physique et chimie : il remplissait un arrosoir de dioxyde de carbone et en versait le contenu sur une bougie allumée qui s'éteignait aussitôt ; il fabriquait des bulles de savon qui venaient rebondir sur la couche de gaz invisible ; il manipulait des feux de Bengale… Dans un coin de la grotte, le « banc des belles-mères », source intarissable de plaisanteries plus ou moins subtiles, ajoutait une touche d'ironie (*voir l'affiche ci-dessus*).

À ROYAT-CHAMALIÈRES, DU PUBLIC, MAIS PAS DE CHIEN !

Le spectacle était donc bon enfant. Surtout, on n'y torturait plus les chiens pour les besoins de la démonstration. En effet, depuis 1850, la « loi Grammont » (du nom du général Jacques Delmas de Grammont, député de la Loire, auquel il faut rendre ici hommage) interdisait en France ce genre de spectacle barbare. Au début du XX^e^ siècle, le *Guide Joanne* insistait lourdement sur ce point : « L'expérience du chien ne se fait pas ici : elle est interdite par la loi Grammont ; le gardien se borne à plonger dans le gaz une flamme qui s'éteint aussitôt. »

La Grotte du chien de Royat-Chamalières traversa tout le XX^e^ siècle, avec des hauts et des bas. Mais il fallut bientôt se rendre à l'évidence : la curiosité était passée de mode et son exploitation s'avérait peu rentable. L'adjonction d'une petite salle audiovisuelle, à l'étage du chalet d'accueil, n'y fit rien. Dans le même temps, les normes de sécurité et d'accessibilité devenaient de plus en plus contraignantes.

Cette « grotte scientifique unique en France » dut donc fermer définitivement ses portes en 2004. Depuis, le silence est retombé sur ce lieu jadis si animé, même si la ville de Chamalières, qui en est propriétaire, s'efforce de trouver une solution. À l'heure où l'on parle beaucoup de relocalisations, on ne peut que souhaiter la réouverture de ce lieu patrimonial, témoignage d'une époque où la science était une véritable fête. ■

© Coll. CRTL

Comment les sciences peuvent-elles nous aider à appréhender l'après-crise ?

Comment vivre avec le numérique dans le respect des règles éthiques primordiales pour notre liberté ?

« Et après ? », une collection de livres numériques pour penser le monde d'après

Éditions de L'Observatoire

LE SECRET D'ARSÈNE LUPIN : LES SUPER-PERMUTATIONS

RENDEZ-VOUS

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

Comment représenter toutes les permutations possibles d'un ensemble par une courte séquence ? Ce jeu de tassement n'intéresse pas seulement les mathématiciens : il peut aussi aider les étourdis, les cambrioleurs et les voyageurs de commerce.

L'AUTEUR

JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite à l'université de Lille et chercheur au laboratoire Cristal (Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille)

Certains problèmes simples passionnent les amateurs de mathématiques et les conduisent aux sommets de la recherche. Le problème dont nous allons parler dans cette rubrique est de cette catégorie. Plus étrange et plus rare une avancée dans les recherches menées sur les superpermutations provient d'un contributeur qui a souhaité rester anonyme. De surcroît, les mathématiques des superpermutations peuvent intéresser les cambrioleurs et les étourdis qui ont oublié leur code.

Les permutations d'un ensemble sont les différentes façons d'en classer les éléments. Il y a par exemple 6 permutations possibles d'un ensemble de trois éléments {1, 2, 3} qui sont : 123, 132, 213, 231, 312 et 321.

Dans le cas d'un ensemble ayant n éléments, il y a $n!=n(n-1)...3.2.1$ permutations possibles. Le nombre $n!$ («factorielle n») croît très rapidement avec n :

1! = 1 ; 2! = 2 ; 3! = 6 ; 4! = 24 ; 5! = 120 ; 6! = 720 ; 7! = 5040 ; 8! = 40320 ; 9! = 362880 ; 10! = 3628800 ; 11! = 39916800 ; 12! = 479001600 ; 13! = 6227020800 ; 14! = 87178291200 ; etc.

Le problème des superpermutations pour n consiste à proposer une suite d'entiers compris entre 1 et n, aussi courte que possible, dans laquelle on trouve chaque permutation de {1, 2, ..., n} comme séquence d'éléments côte à côte.

Pour $n=2$, la suite 121 de longueur 3 est une superpermutation, car on y trouve 12 et 21 qui sont les deux seules permutations de {1, 2}. En échangeant le rôle de 1 et de 2, on obtient une seconde superpermutation de longueur 3 : 212. Cette possibilité d'obtenir d'autres superpermutations de même longueur dès qu'on en a une fonctionne bien sûr pour tout n, et chaque superpermutation trouvée pour n en donnera $n!$ de même longueur, puisqu'il y a $n!$ façons de permuter les symboles de {1, 2, ..., n}.

PREMIÈRES SUPERPERMUTATIONS

Pour $n=2$, la séquence 123121321 est une superpermutation : on y trouve bien les 6 permutations 123, 132, 213, 231, 312, 321, dans l'ordre 123, 231, 312, 213, 132, 321.

Pour la construire, on a pris les 6 permutations et on les a mises les unes derrière les autres en choisissant un ordre permettant de les fusionner au mieux. Derrière 123, on a choisi de mettre 231, ce qui, en les fusionnant, donne 1231 et fait donc gagner 2 symboles par rapport à une juxtaposition sans fusion.

La superpermutation proposée pour $n=3$ a pour longueur 9. Est-il possible d'avoir plus court ? La réponse est non. Pour s'en persuader, il faut faire un petit raisonnement (*voir l'encadré 1*).

Pour des n supérieurs à 3, on peut procéder par tâtonnement ou en utilisant des programmes qui explorent tous les cas possibles. On va voir qu'on rencontre vite les limites de capacité de calcul de nos ordinateurs, car la croissance exponentielle de $n!$ est vraiment très rapide. Il existe cependant des raisonnements généraux donnant des informations sur

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

les superpermutations recherchées qui simplifient le traitement des cas particuliers.

Voici quelques-uns de ces résultats sur la longueur des superpermutations. Ils ont été trouvés à la fois par des chercheurs mathématiciens et par des amateurs passionnés par le problème – en particulier Greg Egan, auteur australien de science-fiction, à qui l'on doit le roman *Permutation City* et qui maintient à jour un excellent site internet sur le sujet (*voir l'encadré 5*).

TROUVER, POUR *N* DONNÉ, CELLE QUI EST LA PLUS COURTE

La plus courte superpermutation pour n comporte au moins $n!+n-1$ symboles. En effet, chaque symbole d'une superpermutation ne peut être le début que d'une permutation au plus : il faut donc au moins $n!$ symboles dans une superpermutation. Cependant les $n-1$ derniers symboles ne peuvent pas être le début d'une permutation, car il n'y a pas assez de symboles qui suivent : une superpermutation pour n comporte donc au moins $n!+n-1$ symboles.

Un raisonnement plus fin proposé en 1993 par les mathématiciens Daniel Ashlock et Jenett Tillotson montre que la longueur minimale est au mieux $n!+(n-1)!+(n-2)$. Un autre raisonnement, plus récent et plus efficace, donne le minorant : $n!+(n-1)!+(n-2)!+(n-3)$.

Ce résultat est le meilleur connu aujourd'hui pour la minoration de la longueur d'une superpermutation. Il a une histoire un peu étrange.

En 2011, sur le forum internet 4chan, des internautes échangeaient sur le problème de savoir comment il faut s'y prendre pour diffuser aussi rapidement que possible les épisodes d'une série télévisée qui en comporte *n*, de manière à ce qu'on puisse les voir dans tous les ordres possibles selon le moment où on commence à regarder la diffusion de la série. Le problème est exactement celui de trouver la plus courte superpermutation de *n* éléments.

Un internaute anonyme affirma qu'il était impossible de réussir en moins de $n!+(n-1)!+(n-2)!+(n-3)$ diffusions d'épisodes. Il donnait des arguments imparfaits, mais relativement précis tout de même.

Quelques années plus tard, en 2014, un groupe de mathématiciens composé de Robin Houston, Jay Pantone et Vince Vatter, préoccupés par le problème des superpermutations, a repris les idées du contributeur anonyme, les a rédigées de manière précise et complète, et les a publiées. Très honnête, le groupe de mathématiciens publia le résultat (https://oeis.org/A180632/a180632.pdf) sous leurs trois noms précédés d'un nom fictif, *Anonymous 4chan Poster*, pour l'amateur génial et toujours inconnu.

© Shutterstock.com/James Steidl

1 SUPERPERMUTATIONS ET OUVERTURE DE COFFRE-FORT

Une superpermutation d'ordre $n = 3$ est une suite de nombres pris parmi 1, 2 et 3 où l'on trouve toutes les permutations de 1, 2 et 3 : 123, 132, 213, 231, 312, 321. Bien sûr, en mettant les permutations les unes derrière les autres, on a ce qu'on cherche avec une suite de longueur 18 : 123132213231312321. On peut cependant faire mieux : la suite 123121321 convient. La longueur 9 est donc possible pour $n = 3$.

Démontrons qu'on ne peut pas faire mieux que 9. Supposons qu'une suite $n_1n_2n_3n_4n_5n_6n_7n_8n_9$ de 9 nombres convienne pour $n = 3$, c'est-à-dire que les 6 suites $n_1n_2n_3$, $n_2n_3n_4$, $n_3n_4n_5$, $n_4n_5n_6$, $n_5n_6n_7$, $n_6n_7n_8$ sont les 6 permutations de {1, 2, 3}, ce qui signifie, en particulier, qu'elles sont toutes différentes.

Pour que $n_1n_2n_3$ soit une permutation, il faut que n_1 soit différent de n_2 et différent de n_3. Pour que $n_2n_3n_4$ soit une permutation, il faut que n_4 soit différent de n_2 et de n_3. Donc nécessairement $n_1 = n_4$.

De même, en considérant $n_2n_3n_4$ et $n_3n_4n_5$, on conclut que $n_2 = n_5$; en considérant $n_3n_4n_5$ et $n_4n_5n_6$, on déduit que $n_3 = n_6$. Par conséquent on aurait $n_1n_2n_3 = n_4n_5n_6$, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse que les 6 suites $n_1n_2n_3$, $n_2n_3n_4$, $n_3n_4n_5$, $n_4n_5n_6$, $n_5n_6n_7$ et $n_6n_7n_8$ sont toutes différentes. Conclusion : il n'existe pas de superpermutation de longueur 8 pour $n = 3$.

Pour $n = 4$, on trouve 123412313214231243121342132413214321, de longueur 33, dont on montre aussi (c'est un peu plus compliqué) que c'est bien sûr !) qu'elle est la plus courte superpermutation possible pour $n = 4$.

Une application possible des superpermutations est l'ouverture d'un coffre-fort (cela donne aussi on a perdu la combinaison). Pour l'ouvrir, il faut positionner le curseur du coffre en lui faisant occuper 4 positions différentes successives qui constituent le code d'ouverture, par exemple 6 puis 2 puis 1 puis 3. On a oublié les 4 chiffres du code d'ouverture. On pourrait essayer les unes après les autres toutes les combinaisons en bougeant le curseur 4 fois pour chacune. On a $10 \times 9 \times 8 \times 7/(4 \times 3 \times 2) = 210$ sous-ensembles de 4 chiffres et pour chacun de ces sous-ensembles, il y a $4! = 24$ ordres possibles. Au total, on a donc $210 \times 24 \times 4 = 20\,160$ mouvements du curseur à faire par la méthode d'énumération naturelle.

En utilisant la superpermutation de {1, 2, 3, 4} de longueur 33, on peut cependant économiser beaucoup de mouvements. Pour chaque ensemble de 4 chiffres {*a*, *b*, *c*, *d*}, on copie la superpermutation de {1, 2, 3, 4} en remplaçant 1 par *a*, 2 par *b*, 3 par *c*, 4 par *d*, et on utilise la superpermutation de {*a*, *b*, *c*, *d*} pour essayer toutes les combinaisons. On fera ainsi 33 mouvements au lieu de $4 \times 24 = 96$. Au total, on ne fera (au maximum) que $33 \times 210 = 6\,930$ mouvements du curseur au lieu de 20 160, ce qui correspond à un gain de plus de 65 %. En faisant attention à l'ordre dans lequel on considère les sous-ensembles de 4 chiffres, on peut d'ailleurs gagner encore quelques mouvements.

> Connaître un minorant ne garantit pas qu'on trouvera une superpermutation de la longueur indiquée; c'est seulement l'affirmation qu'il est impossible de faire plus court. Après avoir cherché les minorants de la taille de la meilleure superpermutation, il est naturel de s'intéresser aux majorants en essayant cette fois de trouver les plus petits possible. Si l'on réussit à faire se rejoindre les minorants et les majorants, le problème sera résolu: on aura quelle est la longueur des plus courtes superpermutations pour tout n.

QUELLE EST LA LONGUEUR MAXIMALE D'UNE SUPERPERMUTATION?

Il est tout d'abord évident que pour tout entier n, il existe une superpermutation de longueur $n\times n!$, puisqu'en mettant les unes derrière les autres sans aucun fusion les $n!$ permutations qui ont chacune n symboles, on obtient une superpermutation de longueur $n\times n!$.

La superpermutation de longueur $n\times n!$ n'est vraiment pas astucieuse, car elle n'exploite aucune possibilité de fusion. Il faut tenter de faire mieux. C'est ce que propose le très beau résultat: «Pour tout entier positif n, il existe une superpermutation de longueur $n!+(n-1)!+\ldots+2!+1$.»

Le gain par rapport à $n\times n!$ est d'autant plus important que n est grand. Un petit calcul montre en effet que pour $n=3$ le gain est 9, pour $n=4$ le gain est 63, pour $n=5$ le gain est 447, pour $n=6$ le gain est 3447, pour $n=7$ le gain est 30 280, pour $n=8$ le gain est 322 560.

La démonstration que $n!+(n-1)!+\ldots+2!+1$ symboles suffisent toujours pour une superpermutation de $\{1, 2, \ldots, n\}$ résulte d'une construction qui permet de nombreuses fusions, et d'un magnifique raisonnement proposé en 2013 par Nathaniel Johnston, de l'université Mount Allison, à Sackville, au Canada. La construction exploite l'idée que d'une superpermutation pour n à la suivante pour $n+1$, on peut réexploiter les fusions qu'on a su faire et donc que les nouvelles fusions qu'on introduit à chaque étape et les fusions réussies à l'étape précédente se cumulent et permettent des économies de plus en plus importantes en nombre de symboles (*voir l'encadré 3*).

Pour récapituler, désignons par $S(n)$ la longueur de la plus courte superpermutation pour n. Pour $n=1$, 2, 3, le problème est réglé: $S(1)=1$ (évident); $S(2)=3$ (évident); $S(3)=9$ (on l'a expliqué plus haut et dans l'encadré 1).

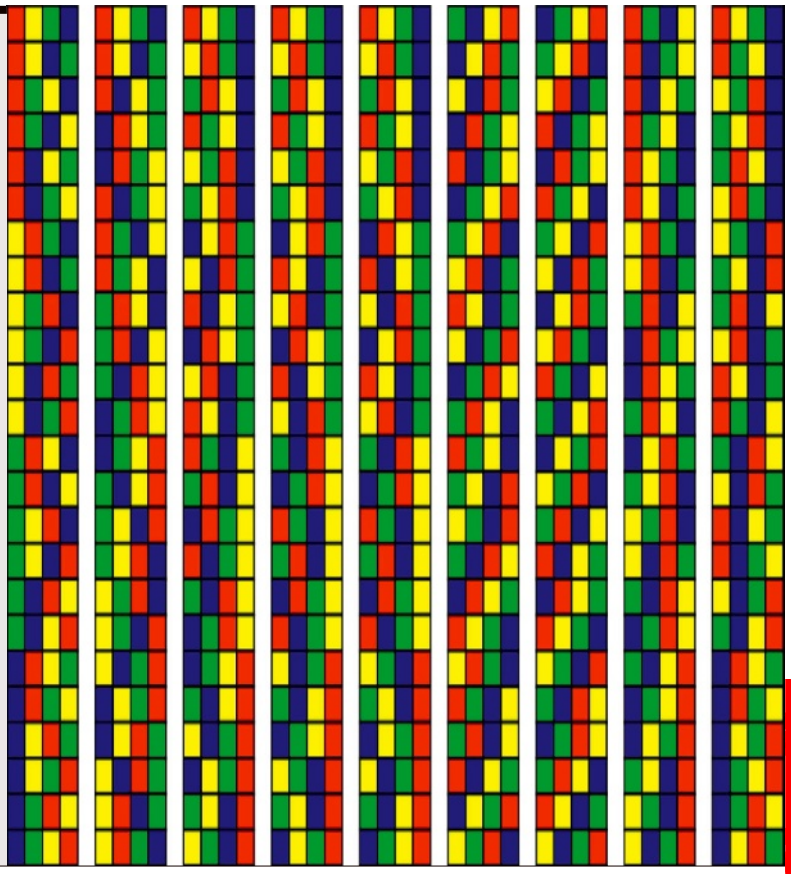
Compte tenu du meilleur minorant et du meilleur majorant connus, nous savons que pour

2 PERMUTATIONS ET FACTORIELLES

Les diverses façons de ranger un ensemble de n éléments, ou permutations de cet ensemble, sont au nombre de $n! = 1\times2\times3\times\ldots\times n$ (factorielle n) : on choisit l'élément à placer en première position (n possibilités), puis on choisit l'élément à placer en deuxième ($n-1$ possibilités) ; etc. La suite des factorielles croît très rapidement :

0	1
1	1
2	2
3	6
4	24
5	120
6	720
7	5 040
8	40 320
9	362 880
10	3 628 800
11	39 916 800
12	479 001 600
13	6 227 020 800
14	87 178 291 200
15	1 307 674 368 000
16	20 922 789 888 000
17	355 687 428 096 000
18	6 402 373 705 728 000

Il existe ainsi $4! = 24$ permutations de 4 éléments, et donc 24 ! façons de ranger ces permutations. Ci-contre, on a pris 4 couleurs et on a dessiné 9 des 24 ! façons d'ordonner les permutations de ces couleurs.



© J.-P. Delahaye/Pour la Science

tout $n \geq 4$, on a:
$n!+(n-1)!+(n-2)!+(n-3) < S(n) \leq$
$n!+(n-1)!+\ldots+2!+1$.

Pour $n=4$, cela signifie: $24+6+2+1=33 \leq S(4) < 24+6+2+1=33$. La superpermutation obtenue par la méthode décrite dans l'encadré 3 est 123412314231243121342132413214321. Sa longueur est 33, c'est donc le meilleur résultat possible.

Un calcul par programme donne des informations plus précises. Il permet de savoir que les seules autres superpermutations possibles sont les 4!=24 que l'on déduit de celle donnée ci-dessus par permutation des symboles et qu'il n'y en a pas d'autres. À titre d'exemple donnons l'une des superpermutations obtenue par permutation des symboles de la superpermutation donnée. Si on change 1 en 2, 2 en 3, 3 en 4 et 4 en 1, on obtient la superpermutation: 234123423142314232413243124321432.

Pendant près de vingt ans, l'hypothèse naturelle que la formule $n!+(n-1)!+\ldots+2!+1$ donnait la longueur minimale d'une superpermutation pour n a été admise, jusqu'à ce que l'étude des cas $n=5$ et $n=6$ change la situation.

Pour $n=5$, la méthode de l'encadré 3 fournit une superpermutation de longueur $5!+4!+3!+2!+1!=153$. Faire un programme assez efficace qui, pour $n=5$, essaie de trouver mieux sans rien oublier, ou montre qu'on ne peut pas faire mieux que 153, n'est pas facile. Pourtant, en mars 2014, Ben Chaffin a réussi, et son astucieux programme d'exploration a découvert 8 superpermutations de longueur 153 dont aucune ne se ramène à une autre par changement des noms des symboles. Chacune des 8 superpermutations donne 120=5! superpermutations par les changements des noms des symboles. Le programme montre aussi que 153 est impossible à améliorer. Voici l'une des huit superpermutations trouvées: 123451345123541234512435124531245134251243125431245312543125134251243512431254312543125134251243125431254312543125134251243125431254312543125134251243125

4

LE PROBLÈME DU VOYAGEUR DE COMMERCE

Un certain nombre de villes sont données, et on connaît le réseau des routes reliant ces villes. Quand il existe une route entre deux villes, on connaît la longueur de la route qui les relie.
Le problème du voyageur de commerce consiste à trouver un plan de tournée pour visiter toutes les villes, une seule fois chacune, en faisant le trajet le plus court possible.

Savoir si, pour une longueur L donnée, il existe une solution donnant un plan de voyage de moins de L kilomètres est un problème de la catégorie NP-complet. Cela signifie qu'on ne sait pas le résoudre rapidement (en temps polynomial), et que si on le savait, on saurait résoudre rapidement (en temps polynomial) tous les problèmes d'une large classe de problèmes (la classe NP), ce qui semble improbable. Dit d'une façon plus simple : on ne sait pas résoudre rapidement le problème général du voyageur de commerce et il est improbable qu'on le sache un jour ; il faut se contenter de méthodes lentes, ou de méthodes qui ne garantissent pas le meilleur résultat possible.

Il existe de telles méthodes ainsi que des programmes qui donnent des résultats assez bons, même si ce ne sont pas les meilleurs possible. Par exemple, Julien Coupey, qui travaillait sur la mobilité à l'institut Femto-ST de Besançon et qui travaille aujourd'hui pour la start-up Verso, développe un programme qui traite des tournées sur un assez grand nombre de villes. Ainsi, pour un problème concernant 93 villes françaises, son programme propose la solution figurée en haut.

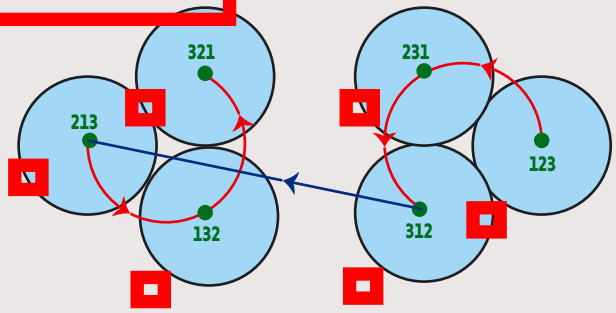
Or résoudre le problème des superpermutations se ramène à un problème de voyageur de commerce. Expliquons-le sur un exemple en prenant $n = 3$.

Les permutations de {1, 2, 3} sont 123, 132, 213, 231, 312, 321. Une superpermutation est comme un trajet reliant ces permutations. Entre deux permutations, la distance qui les sépare peut être 1, 2 ou 3 :
– entre 123 et 231, la distance est 1, car en fusionnant correctement 123 et 231, ce qui donne 1231, on n'allonge 123 que d'un seul symbole ;
– entre 123 et 312, la distance est 2, car en fusionnant les deux permutations, on obtient 1232, qui allonge 123 de deux symboles ;
– entre 123 et 132, la distance est 3, car aucune fusion n'est possible et donc si on veut les deux permutations l'une après l'autre, il faut prendre 123132 qui allonge 123 de trois symboles.

Cette façon de voir les permutations et leurs distances mutuelles définit l'équivalent d'une carte avec des distances. Le problème de trouver une superpermutation devient alors celui de trouver le plus court plan de tournées pour le voyageur de commerce qui veut visiter toutes les permutations sur cette carte.

Le dessin ci-dessous de Greg Egan représente la carte du voyageur de commerce pour $n = 3$: les « routes » de longueur 1 entre permutations sont dessinées en rouge, celle de longueur 2 (entre 312 et 213) est dessinée en bleu. Les autres « routes » ne sont pas dessinées. La superpermutation la plus courte possible, 123121321, de longueur 9, est représentée par la succession de cinq routes : deux en rouge, une en bleu, deux en rouge.

Le problème du voyageur de commerce est un problème important en mathématiques appliquées, car de nombreux problèmes s'y ramènent. On a développé et perfectionné les méthodes et programmes pour le résoudre. Ces méthodes ont été utilisées pour résoudre le problème des superpermutations et ont conduit à une série de records *(voir le texte principal)*.



© En bas : d'après Greg Egan ; en haut : http://map.vroom-project.org/

> (*voir l'encadré 4*) s'adaptent au problème, et que, grâce à ceux mis au point par les chercheurs en mathématiques appliquées, on montre qu'il existe une superpermutation de {1, 2, 3, 4, 5, 6} qui, au lieu d'avoir la longueur $6!+5!+4!+3!+2!+1 = 873$, n'a que 872 symboles. Le résultat est catastrophique pour le majorant théorique connu, car à partir de cette superpermutation pour $n=$ on peut, en utilisant la méthode de l'encadré 3, en trouver qui battent $n!+(n-1)!+\ldots+$ $!+1$ pour tout n supérieur à 6.

Un progrès théorique confirme ce que le calcul par ordinateur a montré. En utilisant une idée de 2013 du mathématicien canadien Aaron William, l'écrivain de science-fiction Greg Egan a en effet proposé une construction du même type que celle indiquée dans l'encadré 3, qui cette fois indique qu'on pourra pour tout $n \geq 6$ avoir une superpermutation dont la longueur ne dépassera pas $n!+(n-1)!+(n-2)!+(n-3)!+(n-3)$.

L'encadrement théorique de $S(n)$ est devenu meilleur: $n!+(n-1)!+(n-2)!+(n-3) \leq S(n) \leq n!+(n-1)!+(n-2)!+(n-3)!+(n-3)$.

Le côté droit et le côté gauche semblent proches. C'est une illusion, car l'écart entre les deux est $(n-3)!$, quantité qui croît très rapidement quand n augmente.

La méthode générale d'Aaron William et Greg Egan pour $n=7$ donne une superpermutation de longueur 5908, ce qui économise 5 symboles par rapport à $5913 = 7!+6!+5!+4!+3!+2!+1$. Pour $n=8$, la méthode donne une longueur de 46205, soit un gain de 28 par rapport à $46233 = 8!+7!+\ldots+2!+1$. Pour $n=9$, la méthode donne une longueur de 408966, soit 147 de moins que $409113 = 9!+8!+\ldots+2!+1$.

La nouvelle méthode est certainement très bonne, mais ce n'est pas la méthode ultime. En effet, pour $n=7$, un programme de Bogdan Coanda a trouvé une superpermutation de longueur 5907, meilleure que le 5908 de la méthode d'Aaron William et Greg Egan, record encore battu par une superpermutation de longueur 5906 trouvée récemment par un programme cette fois de Robin Houston.

Aujourd'hui, certains pensent qu'on est proche d'une solution définitive pour tout n, mais rien n'est gagné, et pour l'instant on n'a de certitude concernant $S(n)$ que pour $S(1)=1$, $S(2)=3$, $S(3)=9$, $S(4)=33$ et $S(5)=153$.

QUELQUES PROBLÈMES PROCHES

D'autres problèmes se posent ressemblant à celui des superpermutations.

Les suites de De Bruijn, auxquelles nous avons consacré une rubrique («Un tour de cartes mathémagique», *Pour la Science*, n° 441, juillet 2014), consiste à rechercher une séquence qui contient non pas toutes les permutations, mais toutes les séquences d'une longueur fixée k utilisant n symboles. Par exemple, la suite de De Bruijn 0000010010110 01111000110110101 contient les 32 suites possibles de longueur 5, composées de 0 et de 1. On y trouve donc 00000, 00001, 00010, 00011, … . Dans le problème de De Bruijn, on considère que la suite est refermée sur elle-même et donc qu'une fois arrivée au bout, on repart au début. C'est important, car la suite 10100 n'est obtenue qu'en prenant les trois derniers symboles et les deux premiers.

Le problème de la longueur des suites de De Bruijn est plus simple que celui des superpermutations, puisqu'on sait par exemple démontrer qu'il existe des suites de De Bruijn de longueur 2^k pour tout k dans le cas du problème des suites de 0 et de 1 de longueur k, et que ce résultat est le meilleur possible.

Un problème assez proche encore de celui des superpermutations est étudié par les mathématiciens en considérant la notion de suite extraite. Si on prend la suite 1232132 on y trouve 123, 132, 213, 231, 312, 321, mais cette fois ce n'est vrai qu'en acceptant de prendre les symboles recherchés même s'ils ne sont pas côte à côte (on parle de «suite extraite»). Par exemple, 231 s'obtient en prenant les symboles rouges dans 1232132 et 312 s'obtient en prenant les symboles rouges dans 1232132.

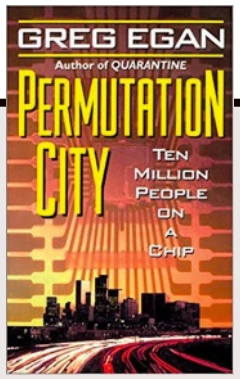
On a montré que le plus petit entier égalant ou dépassant $n^2-7n/2+19/2$ est toujours une longueur suffisante pour réussir à avoir une suite extraite pour chaque permutation de $\{1, 2, \ldots, n\}$. Ce nombre est cependant un simple majorant et, comme dans le cas des superpermutations, on ne sait pas exactement quelle est, avec certitude, la plus petite longueur suffisante pour n.

Les problèmes de tassement de données sont plus délicats qu'on ne l'avait imaginé ! ■

5

GREG EGAN

Greg Egan, né en 1961, est un auteur de science-fiction canadien, ainsi qu'un programmeur, qui s'intéresse au problème des superpermutations. Il propose un site internet sur Superpermutations/Superpermutations.htm. Il a publié un roman à succès traduit en français : *Permutation City* ou *La Cité des permutants*, qui traite des mondes multiples et qui, malgré son titre, ne traite pas de superpermutations !



BIBLIOGRAPHIE

Numberphile, [illegible], 2020 : www.youtube.com/embed/wJGE4aEWc28?end=176

N. Jonhston, **The Minimal Superpermutation Problem**, 10 avril 2013 : https://bit.ly/2LfGPQJ

P. Honner, **Unscrambling the Hidden Secrets of Superpermutations**, *Quanta Magazine*, 16 janvier 2019 : https://bit.ly/2zxRQiz

Anonymous 4chan Poster et al., **A lower bound on the length of the shortest superpattern**, 25 octobre 2018 : https://oeis.org/A180632/a180632.pdf

M. Engen et V. Vatter, **Containing all permutations**, prépublication arXiv :1810.08252, 2018 (https://arxiv.org/pdf/1810.08252.pdf).

R. Houston, **Tackling the Minimal Superpermutation Problem**, prépublication arXiv :1408.5108, 2014 (https://arxiv.org/pdf/1408.5108.pdf).

LES AUTEURS

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

FLUIDIFIER LE TRAFIC… EN COUPANT UNE ROUTE !

Quand plusieurs trajets sont possibles, en bloquer un peut améliorer la circulation sur le reste du réseau. Un paradoxe qui a notamment un analogue mécanique.

En coupant la petite ficelle noire du milieu dans le dispositif de suspension, la canette remonte, contrairement à ce à quoi on pourrait s'attendre.

En 1990, pour le jour de la Terre, le responsable de la circulation de New York décida de fermer la 42e rue qui était congestionnée en permanence. De nombreuses voix s'élevèrent contre cette initiative et prédisaient un cauchemar pour la circulation dans les rues alentour. Pourtant, le jour venu, le trafic était plus fluide qu'à l'accoutumée. Et cet exemple n'est pas isolé ! On a identifié de nombreuses situations où fermer une route à la circulation améliore l'état général du trafic. Ce phénomène est connu sous le nom de « paradoxe de Braess », d'après le mathématicien allemand Dieter Braess qui l'a étudié vers 1968 dans le cadre de la théorie des réseaux.

Afin de comprendre comment cela est possible, on peut analyser un système mécanique analogue : une masse suspendue par des ficelles et des ressorts peut remonter lorsqu'on coupe l'une des ficelles qui la retiennent (*voir le dessin et l'encadré ci-contre*).

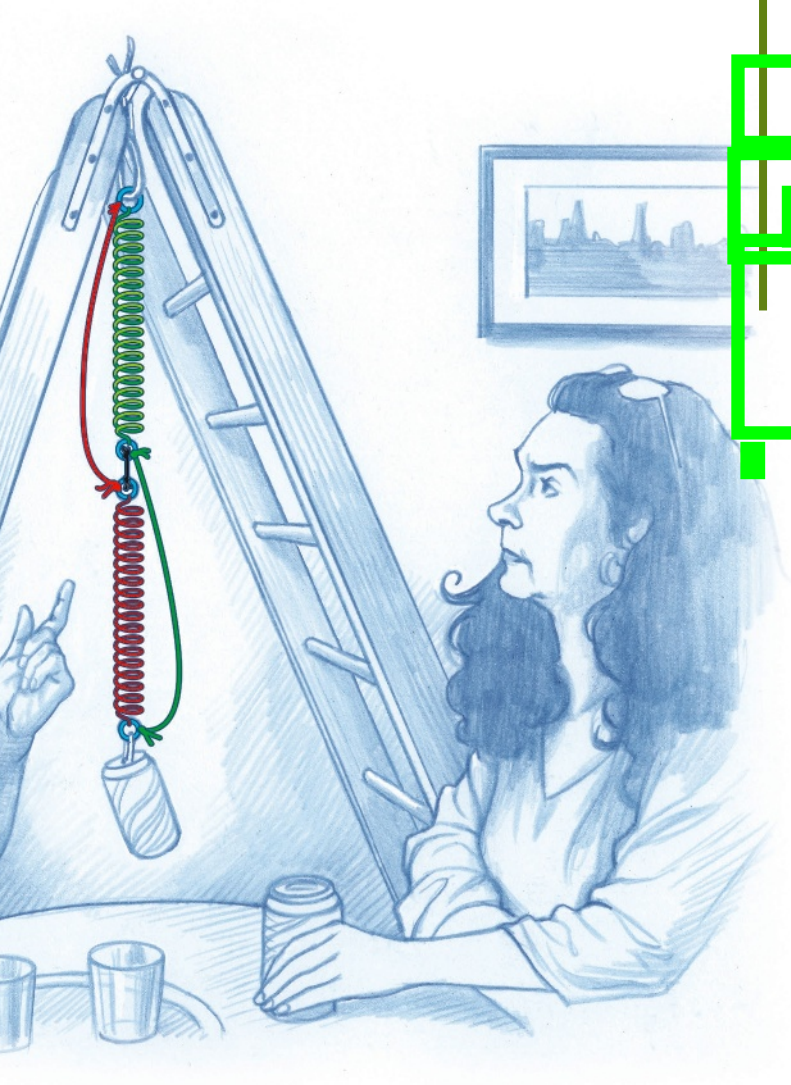
Pour construire chez soi ce système mécanique paradoxal, nous avons simplement besoin d'une masse, de deux élastiques (ou ressorts) identiques et de ficelle. La construction sera facilitée par l'utilisation d'élastiques et de ficelles colorés pour bien distinguer les divers éléments du réseau, ainsi que d'anneaux métalliques pour connecter entre eux les différentes parties. Une canette de soda de 33 centilitres fera office de masse, l'anneau de la languette d'ouverture facilitant son accroche.

DES ÉLASTIQUES OU RESSORTS ET DES BOUTS DE FICELLE

Pour commencer, attachons en partant du haut un élastique vert, puis un court morceau de ficelle noire, un élastique rouge et enfin la masse. Suspendons le tout. Soumis à une tension égale au poids de la canette, les deux élastiques (identiques à part leur couleur) s'allongent alors d'une certaine longueur ΔL. Dans cette configuration, si l'on coupe la ficelle intermédiaire noire, la canette tombe puisqu'elle n'est plus retenue.

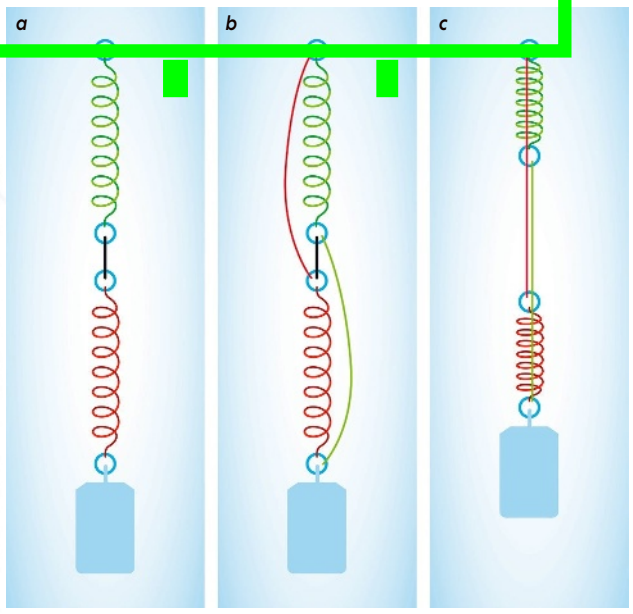
Ajoutons alors deux ficelles de sécurité pour la retenir. Nous choisissons comme longueur de chaque ficelle tout juste un peu plus que la somme de la longueur d'un élastique tendu et la longueur de la ficelle intermédiaire noire. La première ficelle, rouge, joint le point d'accroche du dispositif à l'extrémité haute de l'élastique inférieur (rouge). La seconde relie l'extrémité basse de l'élastique supérieur (vert) au point d'accroche avec la canette. La tension dans ces

© Dessins de Bruno Vacaro



D'UN MONTAGE EN SÉRIE À UN MONTAGE EN PARALLÈLE

Le dispositif mécanique qui illustre le paradoxe de Bra[illegible]ess [illegible]ux ressorts (ou élastiques) identiques montés en série [illegible]t reliés [illegible] l'un à l'autre par un petit morceau de ficelle *(a)*. On accro[illegible] ensuite deux ficelles de sécurité comme illustré *(b)*, la lo[illegible]gueur de chacune dépassant légèrement la somme de la longu[illegible] du ressort allongé et de celle de la ficelle noire. Lorsqu'on [illegible]oupe la ficelle noire, la masse se retrouve suspendue à deux sys[illegible]èmes ressort + ficelle parallèles *(c)*. Chacun de ces deux système[illegible] supporte alors la moitié du poids de la masse, et l'allonge[illegible]ent des ressorts est donc réduit de moitié : la masse remonte.



ficelles est nulle tant que la ficelle intermédiaire noire est présente.

Que se passe-t-il si l'on coupe cette dernière ? On s'attend à ce que la masse descende puisqu'on coupe un lien qui la soutient. Pourtant, non seulement la masse ne tombe pas, mais en plus elle remonte !

Pour comprendre ce comportement contre-intuitif, observons le nouveau système. Le réseau de ficelles et élastiques qui soutient la masse est maintenant formé de deux branches identiques constituées d'une ficelle et d'un élastique. Comme chacune de ces deux branches soutient la moitié du poids de la cassette, la tension est la moitié de ce qu'elle était qu'auparavant. Les élastiques sont donc moins tendus et la canette remonte. En termes de physiciens, on est passé d'une configuration où les ressorts étaient montés « en série » à une configuration où ils sont montés « en parallèle ».

REMONTÉE CONTRE-INTUITIVE

De combien la masse remonte-t-elle ? Considérons la situation idéale où la longueur de la ficelle noire ainsi que celles des anneaux de connexion sont négligeables. Pour qu'elles ne soient pas tendues, la longueur des ficelles de sécurité doit alors tout juste dépasser la longueur des élastiques tendus.

Sous ces hypothèses, la longueur totale du dispositif initial est égale à deux fois la longueur d'un élastique soutenant toute la canette. Lorsqu'on a coupé la ficelle intermédiaire, la longueur totale est la somme de la longueur d'une ficelle (presque égale à celle de l'élastique tendu) et d'un élastique soutenant la moitié du poids. Autrement dit, la masse remonte d'une hauteur égale à la moitié de l'allongement initial, soit $\Delta L/2$. Quel est le maximum que l'on puisse obtenir ? D'après un théorème général sur ce type de réseau, le raccourcissement ne peut >

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

> dépasser le quart de la longueur totale: ce maximum serait atteint ici si la longueur à vide (sans tension) des élastiques était nulle.

Remarquons, en outre, que la cavette ne remonte pas systématiquement dans la configuration que nous avons considérée. Pour qu'elle remonte, il faut en effet que la longueur des ficelles de sécurité soit plus longue que celle de l'élastique soutenant la moitié de la charge (sinon on est en régime parallèle dès la première situation), et plus courte qu'une fois et demie la longueur de l'élastique tendu (sinon, le raccourcissement des élastiques ne compense pas l'allongement qui se produit lorsque la ficelle se tend).

Ce paradoxe se retrouve dans bien des domaines de la physique, par exemple en électricité où résistances et diodes remplacent nos ressorts et ficelles. Mais il y a plus proche de notre quotidien: un réseau routier, dans des villes embouteillées ou sur le trajet des vacances.

BIEN RÉPARTIR LE TRAFIC

Supposons que, chaque matin, entre 7 heures et 8 heures, environ 1000 véhicules partent d'une ville A pour se rendre à la ville B, et que de chacune de ces deux villes partent une autoroute et une route étroite qui se rejoignent au niveau d'un pont commun (*voir l'encadré ci-contre*). L'autoroute tolère un fort trafic, mais le chemin est plus long; on suppose que la durée du trajet est de 20 minutes, indépendamment du trafic (tout comme la longueur des ficelles ne dépend pas de la charge suspendue). La route étroite est plus courte, mais davantage sujette aux embouteillages; imaginons que la durée du trajet en minutes est égale au flux horaire de véhicules divisé par 50 (c'est l'analogue de l'élastique, dont la longueur est proportionnelle à la tension). Le pont qui relie les deux points de jonction entre route et autoroute est l'analogue de la ficelle noire.

Tant qu'il y a moins de 1000 véhicules, le trajet par la petite route est plus rapide que par l'autoroute. Comme les automobilistes déterminent individuellement leur parcours, chacun d'eux choisira comme itinéraire la petite route verte puis, en passant par le pont, la petite route rouge. S'ils sont 1000, le temps de trajet total sera de 20+20=40 minutes.

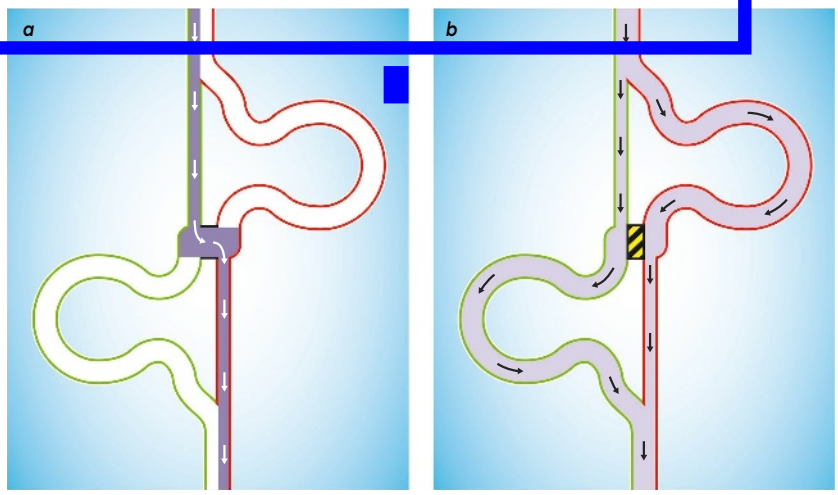
Si le pont est bloqué, le réseau présente alors deux parcours équivalents. Chaque nouvel automobiliste qui arrive a intérêt à prendre le trajet où le nombre de véhicules déjà présent est le plus petit, si bien que, statistiquement, ils se répartissent de façon égale entre les deux trajets. Il y aura donc 500 véhicules sur chaque trajet, dont la durée sera de 500/50+20=30 minutes, c'est à dire 10 minutes de moins qu'avec le pont!

L'analogie entre les deux situations n'est cependant pas parfaite: alors que la mécanique respecte scrupuleusement «les lois du monde», dans le cas du trafic routier, le résultat découle d'un choix où chacun décide ce qu'il estime le mieux pour lui. Comment se fait-il alors que le résultat global ne soit pas un temps de trajet optimal, comme l'illustre la situation avec le pont?

C'est parce que, comme Dieter Braess l'a fait remarquer, il faut bien distinguer une situation d'équilibre d'un optimum. Dans le cas du réseau routier, seule une optimisation collective permet de minimiser le temps de trajet: ce n'est que si tous les utilisateurs se mettent ensemble pour décider du chemin de chacun qu'ils peuvent réduire leur temps de trajet. Dans le cas contraire, il faut les empêcher de prendre le pont! Dans le monde réel, les recherches montrent que ce paradoxe est omniprésent dans des situations variées mais qu'il est difficile à identifier parce que l'optimisation des réseaux fait partie des problèmes dits «NP-complets», qui sont les plus complexes. ■

LE PARADOXE ROUTIER DE BRAESS

On considère le réseau routier illustré ici, reliant une ville *(en haut)* à une autre *(en bas)*. Lorsque le pont est ouvert *(a)*, le trajet le plus court est celui passant par les routes rectilignes (mais étroites). Tous les automobilistes seront tentés de l'emprunter, au prix d'une forte densité de trafic *(en violet foncé)*, voire d'embouteillages ; le trafic est alors nul *(en blanc)* sur les autoroutes, plus longues. Si le pont est fermé *(b)*, les deux trajets possibles prennent autant de temps : le trafic *(en violet clair)* se répartit alors équitablement entre les deux, ce qui évite la congestion du réseau.



BIBLIOGRAPHIE

A. E. Motter et M. T. Nishikawa, **Braess's paradox and other phenomena in network dynamics**, *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 9(1), pp. 463-484, 2018.

C. M. Penchina et L. J. Penchina, **The Braess paradox in mechanical, traffic, and other networks**, *American Journal of Physics*, vol. 73(5), pp. 479-482, 2005.

C. M. Penchina, **Braess paradox: Maximum penalty in a minimal critical network**, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, vol. 31(5), pp. 379-388, 1997.

J.-M. Courty, **Un paradoxe mécanique**, vidéo de l'expérience : https://youtu.be/GBuQxlfsnOo

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !

N° 512 (juin 20)
réf. PL512

N° 511 (mai 20)
réf. PL511

N° 510 (avril 20)
réf. PL510

N° 509 (mars 20)
réf. PL509

N° 508 (fév. 20)
réf. PL508

N° 507 (jan 20)
réf. PL507

N° 506 (déc. 19)
réf. PL506

N° 505 (nov. 19)
réf. PL505

N° 504 (oct. 19)
réf. PL504

N° 503 (sept. 19)
réf. PL503

N° 502 (août 19)
réf. PL502

N° 501 (juillet 19)
réf. PL501

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

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

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

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

TOTAL À RÉGLER ..... €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

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

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20013, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais de gestion.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services commandés et vous faire parvenir par courrier ou par e-mail des offres commerciales susceptibles de vous intéresser. 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-fr. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'AUTEUR

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

L'ART DU MIME HELICONIUS

Les motifs colorés des ailes de certains papillons *Heliconius* imitent à la perfection ceux de cousins. Un scénario évolutif tout tracé qui se répète ou une nouvelle histoire qui s'invente à chaque fois?

Les ailes des oiseaux, des insectes et des chauves-souris ont la même fonction: voler. Toutefois, les zoologistes ont vite compris que ces organes avaient des structures, et donc des origines, différentes. On nomme «convergence évolutive» le phénomène par lequel deux espèces distinctes ont, comme ces animaux, acquis indépendamment des traits communs, voire identiques, au fil de l'évolution. À l'échelle moléculaire, une évolution convergente mène ainsi parfois à des changements parfaitement identiques, comme la substitution d'un acide aminé d'une protéine ou d'un nucléotide dans une séquence d'ADN.

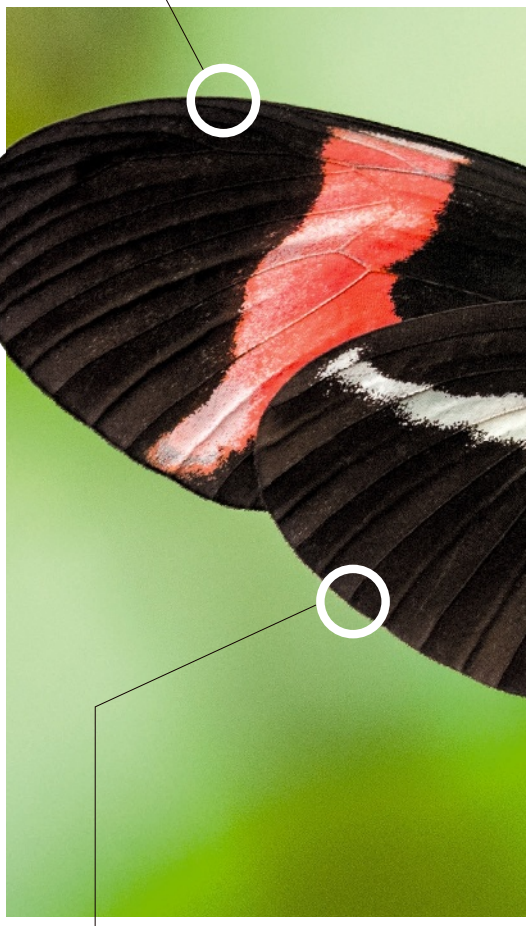
On a longtemps pensé que la convergence évolutive ne concernait que des espèces éloignées, lesquelles atteignaient alors le même objectif de différentes manières. *A contrario*, les espèces proches partageant des traits communs les auraient acquis en suivant des chemins identiques, ce que l'on a nommé «parallélisme». Mais des papillons nous apprennent à présent que les choses ne sont pas aussi simples.

Les prémices de cette découverte remontent au XIXe siècle. En mai 1848, deux jeunes naturalistes britanniques, Henry Bates et Alfred Wallace, débarquaient en Amazonie avec l'objectif d'y collecter des spécimens d'animaux et en particulier d'«étudier minutieusement toute une famille, principalement dans la perspective de la théorie de l'origine des espèces», comme l'écrivait Wallace à Bates en 1847 (Wallace qui, plus tard, élaborerait au même moment que Darwin l'idée de sélection naturelle).

Durant les onze années de son séjour, Bates s'intéressa, entre autres, aux papillons. Observateur de talent, il remarqua que les oiseaux ne chassaient jamais le monarque (*Danaus plexippus*), un papillon au vol lent et aux ailes colorées. Après avoir compris que cet insecte était toxique, Bates découvrit que ses vives couleurs avaient une fonction: elles avertissaient les prédateurs potentiels qui, ainsi, l'évitaient.

Peu à peu, Bates a défriché les secrets des colorations des ailes de ces papillons fascinants. Il s'est ainsi rendu compte que des animaux qui ne se ressemblaient pas

Toxique, il forme un couple de mimes avec *Heliconius erato*, un autre papillon toxique. On parle de «mimétisme mullérien». Chaque espèce compte environ 30 sous-espèces connues.



Ce papillon est une espèce répandue des forêts tropicales de l'Amérique centrale jusqu'au sud du Brésil.

© Getty Images/Ed Reschke

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

EN CHIFFRES :

8 000

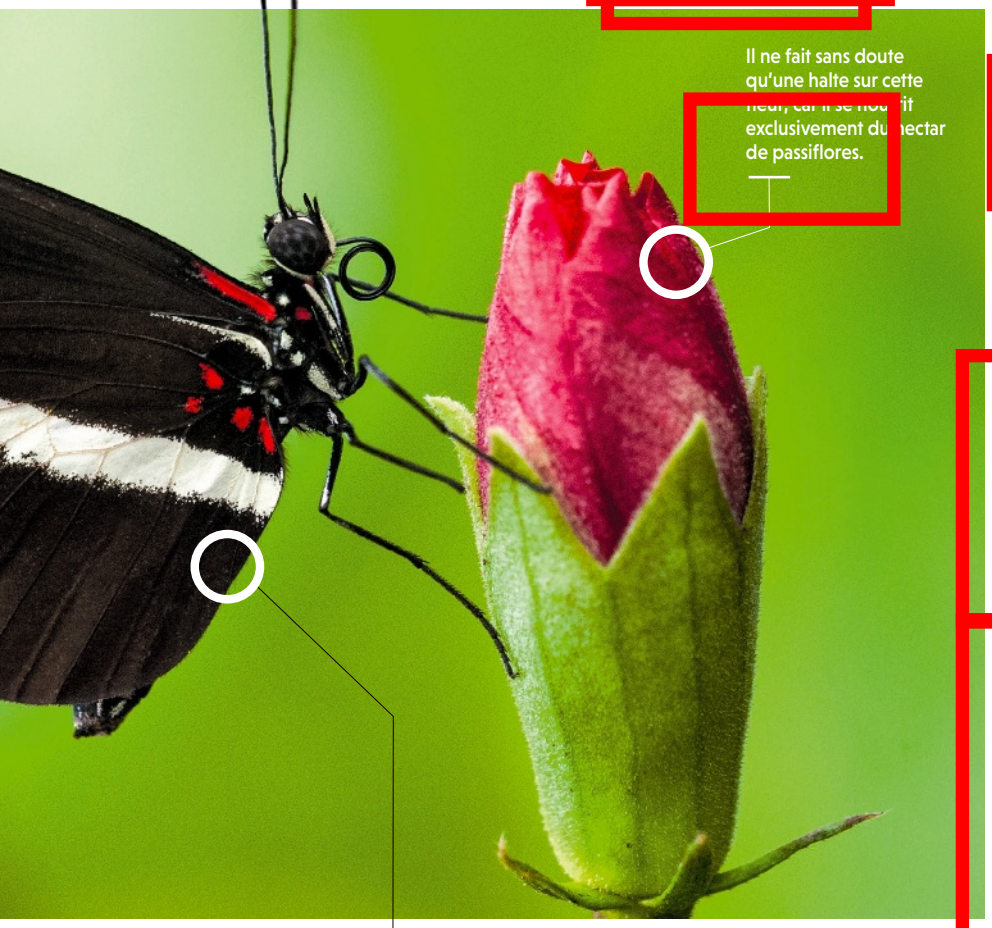
Durant son périple en Amazonie de 1848 à 1859, le naturaliste Henry Bates a collecté [illegible] (principalement des insectes), dont [illegible] nouvelles pour la science.

48

Aujourd'hui, 14 millions d'années après la divergence des papillons du genre *Heliconius* à partir de leur ancêtre commun, ce genre compte 48 espèces.

4

Quatre gènes majeurs modulent les motifs colorés des ailes des papillons *Heliconius* : *Optix*, qui active la couleur et [illegible]ence, *Aristaless 1*, qui réprime la pigmentation, *Cortex*, qui régule le développement des écailles et *WntA*, dont il est question ici.



Il ne fait sans doute qu'une halte sur cette fleur, car il se nourrit exclusivement du nectar de passiflores.

La larve de ce papillon est une chenille d'environ 1,5 cm au corps blanc constellé d'épines et de points noirs, terminé d'un côté par un postérieur jaune et de l'autre par une tête orange ornée de deux cornes noires.

Heliconius melpomene (en anglais, *postman butterfly*, [illegible])

Longueur des ailes antérieures : 35 [illegible] 39 mm

pouvaient appartenir à la même espèce, alors que des papillons qui, au premier abord, présentaient les mêmes motifs de coloration, étaient parfois d'espèces complètement différentes.

HELICONIUS, CHAMPIONS DE L'IMITATION

Par exemple, deux variétés de l'espèce *Heliconius melpomene* n'ont pas les mêmes couleurs sur l'aile antérieure : noire et rouge pour l'une (*H. m. melpomene*), noire, rouge et blanche pour l'autre (*H. m. thelxiope*). Bates pensait qu'il s'agissait d'espèces distinctes, jusqu'à ce qu'il en trouve des hybrides. Il avait aussi constaté que certains papillons aux ailes similaires appartenaient au même genre, tandis que d'autres étaient de genres totalement différents ! Ainsi, *Heliconius numata* ressemblait à *Mechanitis polymnia* qui ressemblait à son tour à *Dismorphia amphione*. Or les deux premières espèces étaient toxiques et la troisième, comestible. Ce phénomène, appelé « mimétisme », paraissait bien compliqué..

Bates comprit l'intérêt d'une espèce comestible à mimer une espèce toxique : les mêmes colorations d'avertissement trompaient un éventuel prédateur. Depuis, ce mimétisme est dit « batésien ». Il fallut attendre 1878 pour que le naturaliste allemand (vivant au Brésil) Fritz Müller explique pourquoi deux espèces toxiques ont aussi intérêt à se mimer : elles en bénéficient toutes deux, car les prédateurs apprennent alors plus vite à reconnaître une proie toxique et risquent moins de se tromper. C'est le mimétisme « mullérien ».

Dans le genre *Heliconius*, plusieurs espèces adoptent ce dernier. Comme celles-ci sont très proches évolutivement, il est tentant d'y voir un cas de parallélisme. D'autant que ces dix dernières années, différentes équipes ont mis en évidence le rôle majeur de quatre gènes dans la modulation des motifs de coloration des ailes d'*Heliconius*. Peu de gènes, des animaux très proches : on s'attendrait donc que des motifs identiques soient obtenus par les mêmes réseaux génétiques, contrôlés par les mêmes gènes majeurs – un véritable parallélisme. Mais comment vérifier cette assertion ?

Pour résoudre ce problème, une équipe internationale autour d'Owen >

> McMillan et Riccardo Papa, du Smithsonian Tropical Research Institute, au Panama, et d'Arnaud Martin, de l'université George-Washington, aux États-Unis, s'est focalisée sur l'un de ces gènes, *WntA*. Il code une glycoprotéine sécrétée dans l'espace intercellulaire, laquelle active une voie de signalisation de grande importance morphogénétique. En effet, cette voie est conservée chez tous les animaux, où son rôle dépend de la cible qu'elle contrôle. Par exemple, chez la drosophile, où elle a été découverte, elle influe sur la croissance tissulaire, la polarité et la forme.

Pour révéler le rôle de *WntA* dans la modulation des motifs des ailes d'*Heliconius*, les chercheurs ont muté ce gène de façon qu'il ne soit plus exprimé. En 2017, ils ont ainsi appliqué ce procédé à diverses espèces de papillons, dont deux *Heliconius*. Chez toutes les espèces testées, ils ont observé que l'extinction de *WntA* ne supprimait pas les motifs, mais faisait apparaître un nouveau patron coloré, comme si les réseaux génétiques conduisant aux motifs étaient régulés d'une autre manière. Chez une vanesse (*Vanessa cardui*), par exemple, le patron de rayures des ailes était altéré et un nouvel œil apparaissait; chez les deux *Heliconius*, les limites entre les champs noirs et colorés des ailes n'étaient plus au même endroit.

PARALLÉLISME OU CONVERGENCE ?

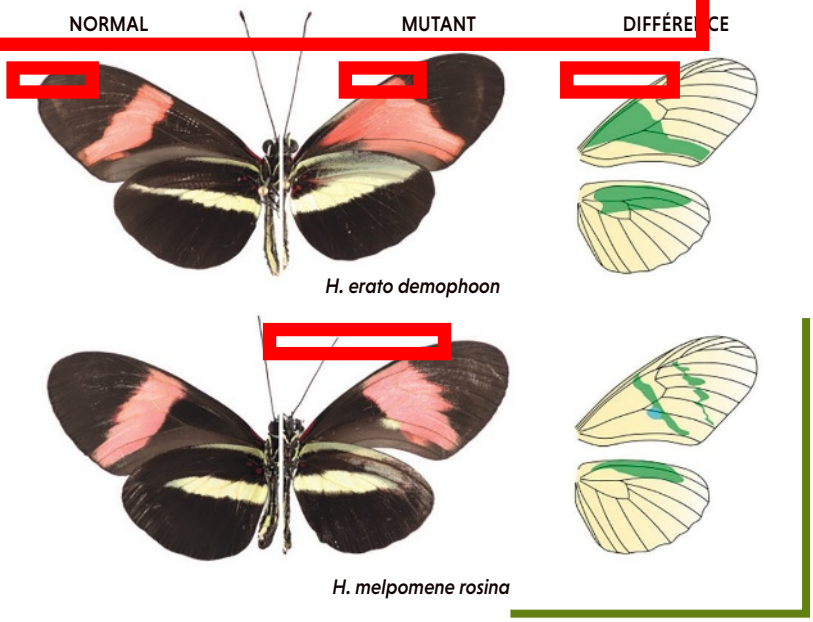
Restait à déterminer si des espèces d'*Heliconius* se mimant mutuellement arrivaient à leur patron commun de la même manière (parallélisme) ou non (convergence). Pour ce faire, en 2019, l'équipe s'est penchée sur plusieurs couples de mimes au sein du genre *Heliconius*. Le gène *WntA* étant hérité de l'ancêtre commun du genre *Heliconius*, deux hypothèses s'affrontaient. La première, celle du parallélisme, repose sur un scénario déterministe : les réseaux et interactions de gènes seraient identiques chez les deux mimes d'un même couple, par évolution parallèle. Par conséquent, éteindre *WntA* devrait révéler les mêmes patrons chez les mimes, signe que *WntA* est prédisposé à conduire certains patrons.

La seconde hypothèse, celle de la convergence, amène à postuler une flexibilité génétique. L'ancêtre du genre *Heliconius* date de 14 millions d'années, mais les cas de mimétisme ne remontent qu'entre 2,5 et 4,5 millions d'années d'après les arbres phylogénétiques construits à partir de l'analyse génomique de papillons *Heliconius*. Dans les diverses lignées autonomes depuis 14 millions d'années, les réseaux de gènes responsables des patrons colorés des ailes auraient eu le temps de largement diverger, et les régulations sous contrôle de *WntA* se seraient mises en place de manière différente. Dans ce cas, l'extinction de *WntA* démasquerait des patrons différents chez les mimes…

C'est ce qu'ont montré les expériences *(voir l'encadré ci-dessus)*. Ainsi, contre toute attente, bien que les espèces soient proches, on a ici un phénomène de convergence. L'évolution du mimétisme chez *Heliconius* correspond donc à un jeu mystérieux entre une flexibilité des réseaux de gènes et un certain déterminisme de la fonction de quelques gènes majeurs comme *WntA*, puisque les voies de signalisation qu'ils activent fonctionnent de la même façon d'une espèce à l'autre. Ce jeu ouvre de manière inattendue un vaste champ des possibles pour les réseaux de gènes et l'évolution en général. Et la combinatoire qu'il permet chez des animaux si proches interroge sur la frontière entre convergence et parallélisme. Voire sur l'existence du parallélisme… ■

MÊMES MOTIFS, DIFFÉRENTS MÉCANISMES

Il *eliconius erato demophoon* et *Heliconius melpomene rosina* sont difficiles à distinguer tant leurs ailes se ressemblent (ailes de gauche). Pourtant, quand on éteint le gène *WntA*, lequel contrôle les limites entre zones noires et colorées des ailes, ces papillons présentent des motifs différents (ailes de droite). En d'autres termes, les mécanismes que *WntA* contrôle diffèrent chez ces deux lépidoptères : des mécanismes identiques conduisent à des motifs différents. Ce n'est pas tant que cela, car bien que ces papillons soient du même genre, leurs lignées ont divergé il y a plus de 10 millions d'années.



BIBLIOGRAPHIE

C. Concha *et al.*, **Interplay between developmental flexibility and determinism in the evolution of mimetic *Heliconius* wing patterns**, *Current Biology*, vol 29, pp. 3996-4009, 2019.

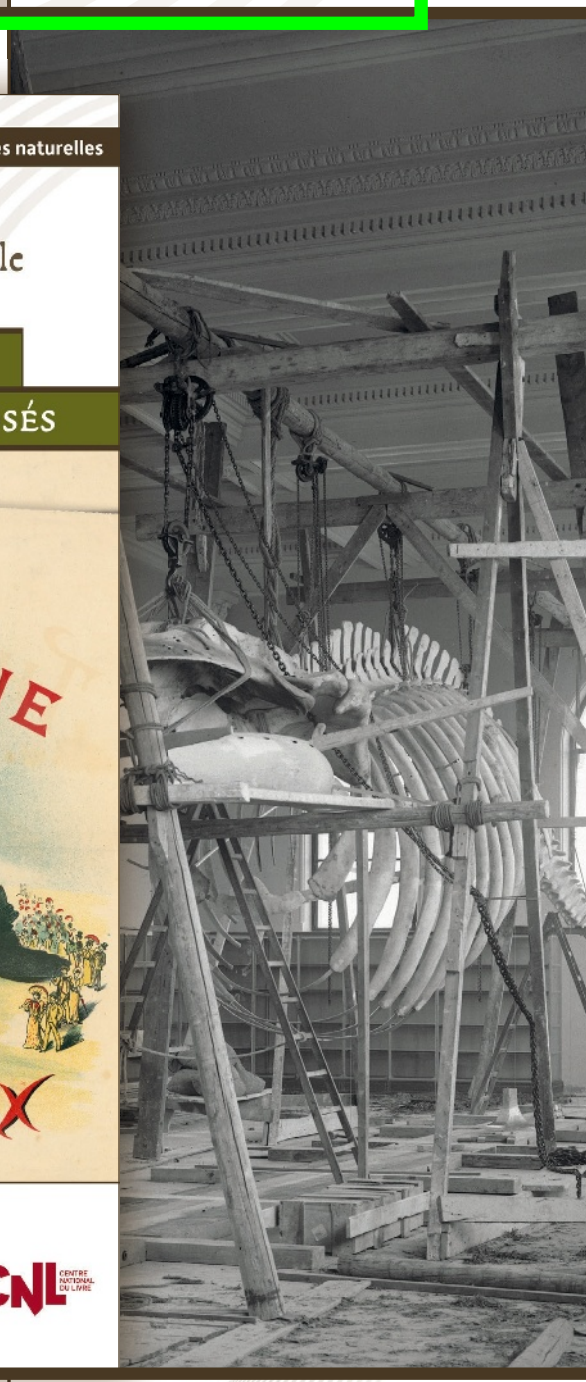
A. Mazo-Vargas *et al.*, **Macroevolutionary shifts of *WntA* function potentiate butterfly wing-pattern diversity**, *PNAS*, vol. 114(40), pp. 10 701-10 706, 2017.

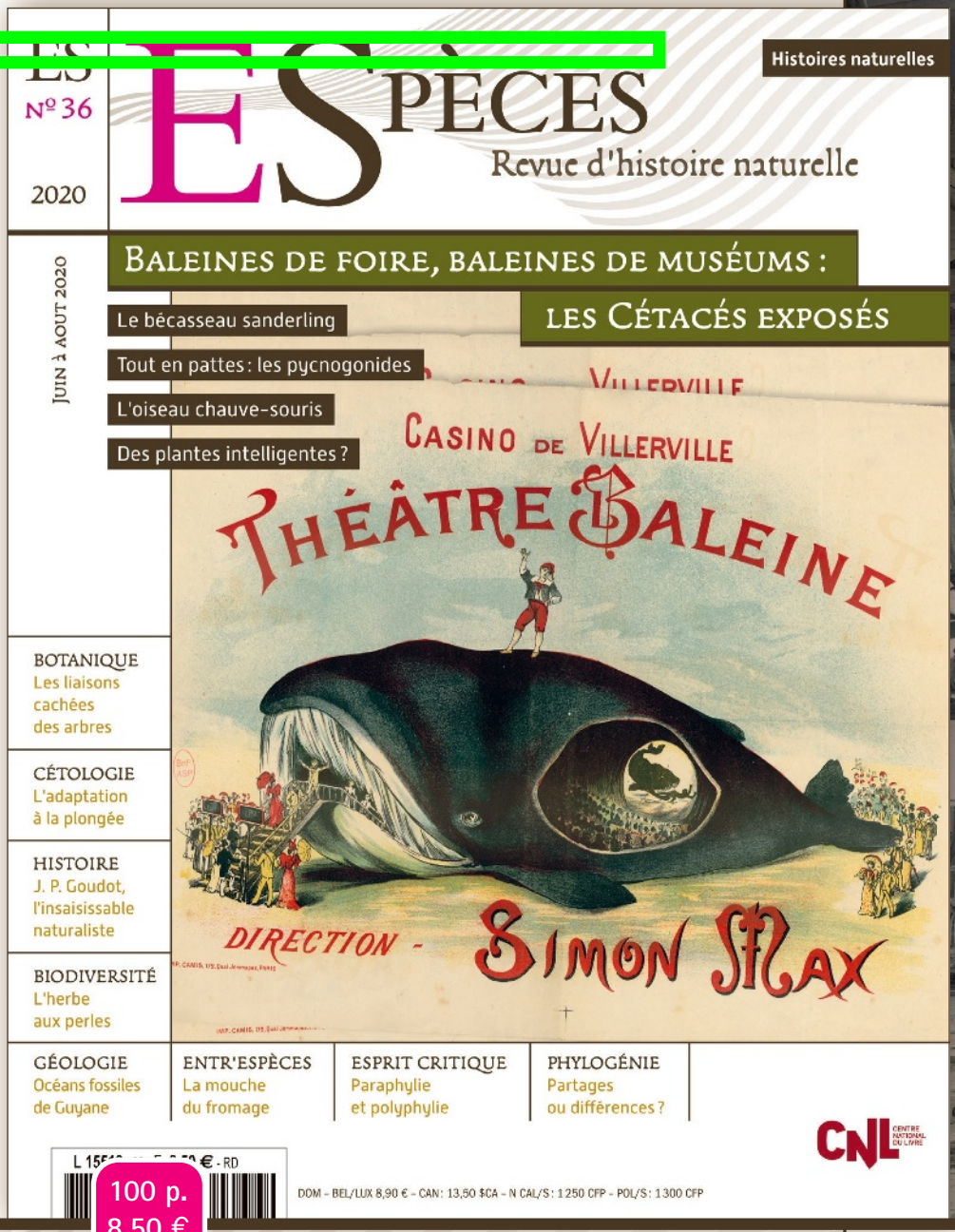
A. Martin *et al.*, **Diversification of complex butterfly wing patterns by repeated regulatory evolution of a *Wnt* ligand**, *PNAS*, vol. 109(31), pp. 12 632-12 637, 2012.

Reproduit d'après Current Biology, vol. 29, C. Concha et al., pp. 3996-4009, © 2019, avec la permission d'Elsevier

La revue des sciences de la vie et de la Terre

Botanique, zoologie, évolution… *Espèces* c'est toute l'actualité de la recherche proposée par les scientifiques eux-mêmes.





100 p.
8,50 €

especes.org

Pour vous abonner ou commander au numéro, version papier ou numérique.

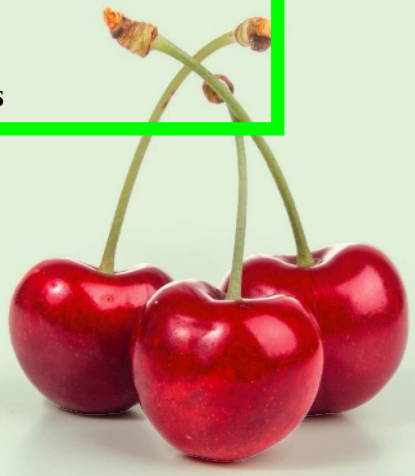
Vous y trouverez aussi des articles en accès libre, les éditoriaux, les sources et toutes les actualités de la revue… un concentré d'histoires naturelles !

L'AUTEUR

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

N'AYONS PAS PEUR DU TEMPS DES CERISES

Conservons à l'abri de la lumière les produits à goût de cerise ou d'amande pour éviter que leur principal composé odorant, le benzaldéhyde, se transforme en benzène.



Le benzaldéhyde naturellement présent dans les cerises, les amandes ou les aliments aromatisés ne libère du benzène qu'en présence de lumière. Ces produits sont à conserver dans l'obscurité, comme on le fait pour l'huile.

En matière alimentaire, pas une journée ne passe sans qu'une vague organisation ne choisisse à affoler les citoyens, au nom de la planète ou de la santé; certains craignent jusqu'aux «résidus de pesticides qui pourraient être cancérogènes». Cependant, il faut rappeler à ces vociférateurs et à nos élus qu'il ne s'agit pas de considérer le danger mais le risque: en matière de toxicologie, ce dernier inclut à la fois le danger lié à la substance et l'exposition à celle-ci.

Il y a quelques années, la découverte d'acrylamide en quantités minimes dans le pain ou dans les frites avait conduit à un séisme dans le monde de la science et de la technologie des aliments, et l'on avait vu fleurir les travaux sur cette question. Le chauffage d'ingrédients contenant l'acide aminé asparagine et de l'amidon conduit en effet à la formation d'acrylamide, composé reconnu comme cancérogène pour l'animal et cancérogène possible pour l'homme.

Mais les réévaluations des expositions se sont révélées moins importantes que prévu initialement, et l'on a finalement préconisé de surveiller l'huile de friture ou de cuisson pour qu'elle ne surchauffe pas, de ne pas faire dorer à l'excès les produits, de ne pas consommer les zones les plus brunies lors de la cuisson, qui sont les plus riches en acrylamide.

Oui, on a bien fait de limiter la température des friteuses pour ce qui concerne l'acrylamide; mais on ne doit pas oublier que le gras chauffé longtemps, qui imbibe les frites mal cuites, est redoutable: ne nous trompons pas de combat.

Un autre composé a inquiété: le benzaldéhyde, naturellement abondant dans de nombreux végétaux, surtout dans la cerise ou l'amande, et qui est le principal composé des aromatisants au goût de cerise ou d'amande. En 2013, une association de consommateurs allemands avait détecté 4,6 microgrammes de benzène par litre de boissons aromatisées à l'aide de benzaldéhyde et avait cru devoir alerter le public et les politiques. La quantité dosée était minime, car chacun d'entre nous respire environ 200 microgrammes de benzène par jour, et les fumeurs en inspirent dix fois plus. Mais les expositions à long terme de benzène provoquent des cancers, et la dose admise dans l'eau de boisson, en Allemagne, n'est que de 1 microgramme par litre.

D'où venait le benzène dosé? On savait que le benzène dans les aliments peut provenir de l'acide benzoïque (utilisé comme conservateur), qui libère le benzène en présence d'acide ascorbique (la vitamine C) et d'ions métalliques tels que le fer ou le cuivre. Et c'est ainsi que, dans les dernières années, on avait réduit la présence de benzène en évitant ces combinaisons défavorables. Toutefois, du benzène avait été trouvé, en l'absence d'acide benzoïque, dans des jus de carottes, puis dans les boissons aromatisées à la cerise.

À l'université technique de Munich, Stephanie Frank, Thomas Hofmann et Peter Schieberle ont testé 22 boissons contenant du benzaldéhyde ou du jus de cerises, et découvert que plus le benzaldéhyde était exposé à la lumière, plus se formait du benzène (*European Food Research and Technology*, vol. 245, pp. 1605-1610, 2019). Et le benzène ne se formait pas dans le jus de cerises, où la couleur sombre du jus protège de la lumière.

D'un petit mal naîtrait un bien? À l'avenir, le monde industriel conservera les produits (boissons, aromatisants...) contenant du benzaldéhyde dans des contenants opaques. Faisons de même avec nos aromatisants de pâtisserie, que nous garderons dans des placards fermés. ■

LA RECETTE

1 Dissoudre 5 grammes d'alginate de sodium dans 1 litre d'eau ; mixer.
2 Laisser l'alginate s'hydrater pendant deux heures.
3 À 200 grammes de jus de betterave, ajouter une pincée de sel, trois cuillères à soupe de sucre, une petite cuillerée à café d'acide citrique et quelques gouttes d'un aromatisant à l'amande amère.
4 Prendre une cuillerée à café de ce dernier liquide, et descendre doucement la cuillère dans le bain d'alginate : en trois minutes environ, une peau gélifiée se forme et l'on obtient une bille analogue à une cerise.
5 Répéter l'opération pour la totalité du jus de betterave.
6 Utiliser les billes à cœur liquide pour un clafoutis : dans un moule, avec un appareil fait d'œuf battu, sucré et légèrement farriné, cuire pendant 20 minutes à 200 °C.

©Unsplash/Thomas Q

UN

NE MEURT JAMAIS.

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

CITEO

Donnons ensemble une nouvelle vie à nos produits

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur www.pourlascience.fr

P.38

PERCOLATION

C'est le phénomène physique décrit l'écoulement d'un fluide à travers un milieu plus ou moins perméable, à l'image de l'eau qui traverse le café moulu pour préparer la boisson chaude. On l'utilise aussi pour décrire comment une civilisation extraterrestre pourrait se propager à travers la Galaxie.

P.

5 KM^3

C'est la quantité de lave déversée en un an environ par le nouveau volcan sous-marin à 50 kilomètres à l'est de Mayotte. Il mesure 5 kilomètres de diamètre et plus de 800 mètres de haut.

P.18

« *Le débat autour des applications de traçage, dans le contexte de l'épidémie de Covid-19, incite les chercheurs à développer de nouveaux protocoles présentant plus de garanties pour la vie privée* »

GILLES DOWEK
chercheur à l'Inria

P.

17 %

C'est la baisse maximale des émissions quotidiennes de CO_2 à l'échelle du globe qui a été constatée, par rapport à 2019, durant la période de confinement liée à la pandémie de Covid-19.

P.92

MIMÉTISME MULLÉRIEN

Chez les papillons, des ailes colorées sont souvent un signal de toxicité qui avertit les prédateurs. Quand une espèce non toxique présente le même motif qu'une espèce toxique, elle profite de son signal : on parle de « mimétisme batésien ». Si deux espèces toxiques partagent le même motif, le mimétisme est dit « mullérien ». L'intérêt : les prédateurs apprennent plus vite à les éviter.

P.

MASCARET

C'est cette vague qui remonte les cours d'eau (comme la Dordogne) et prisée des surfeurs a la même origine que le ressaut circulaire qui se forme au fond de l'évier quand le robinet coule. Elle se déclenche lors de la marée montante.

P.83

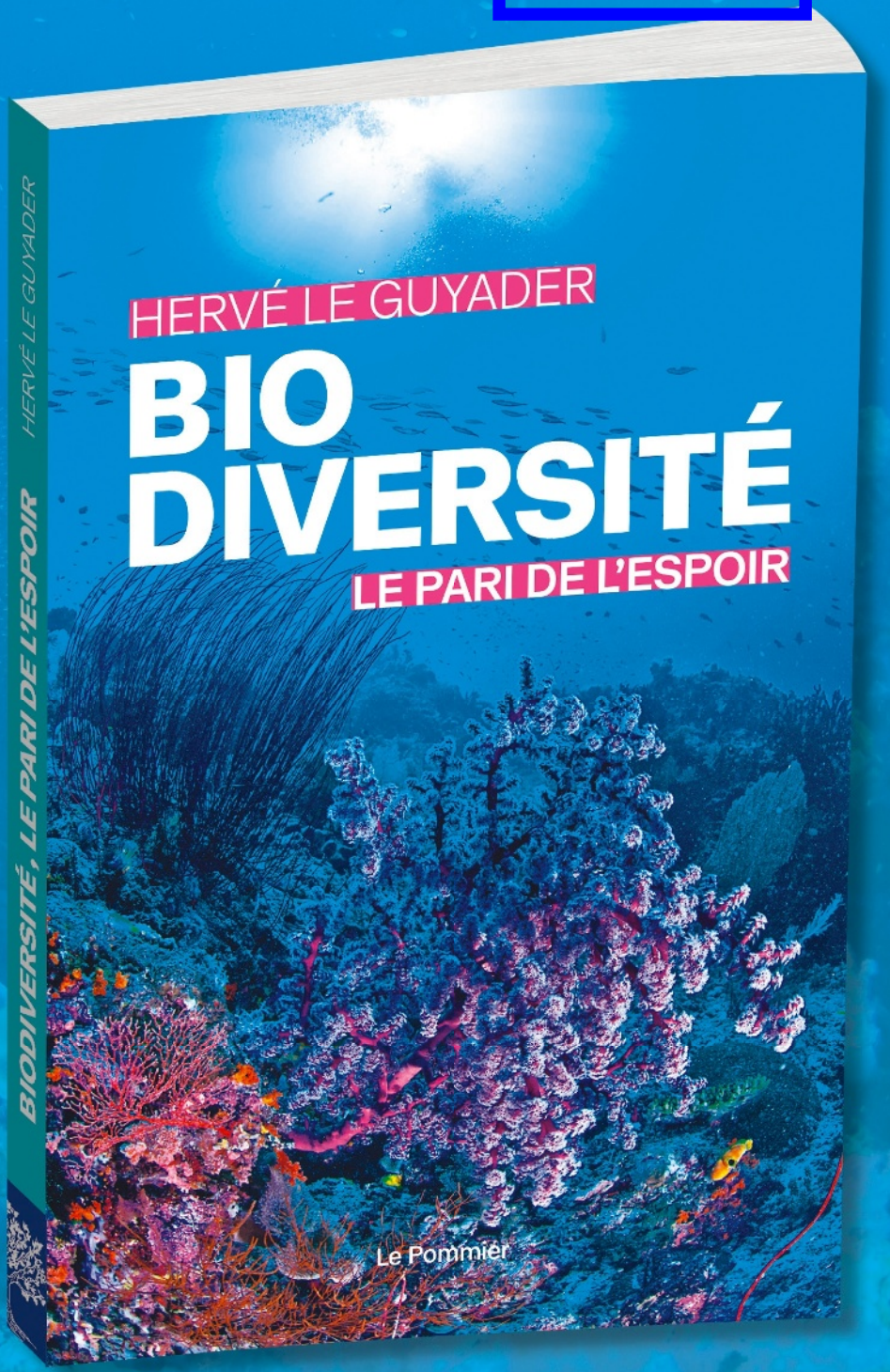
123121321

Cette séquence est une superpermutation de l'ensemble de trois éléments {1, 2, 3}. On y retrouve toutes les permutations de cet ensemble : 123, 132, 213, 231, 312, 321. Il suffirait de les concaténer, mais le défi est de créer la séquence la plus courte possible en autorisant des recouvrements partiels.

Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Juillet 2020 – N° d'édition M0770513-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 245 883 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mériot.

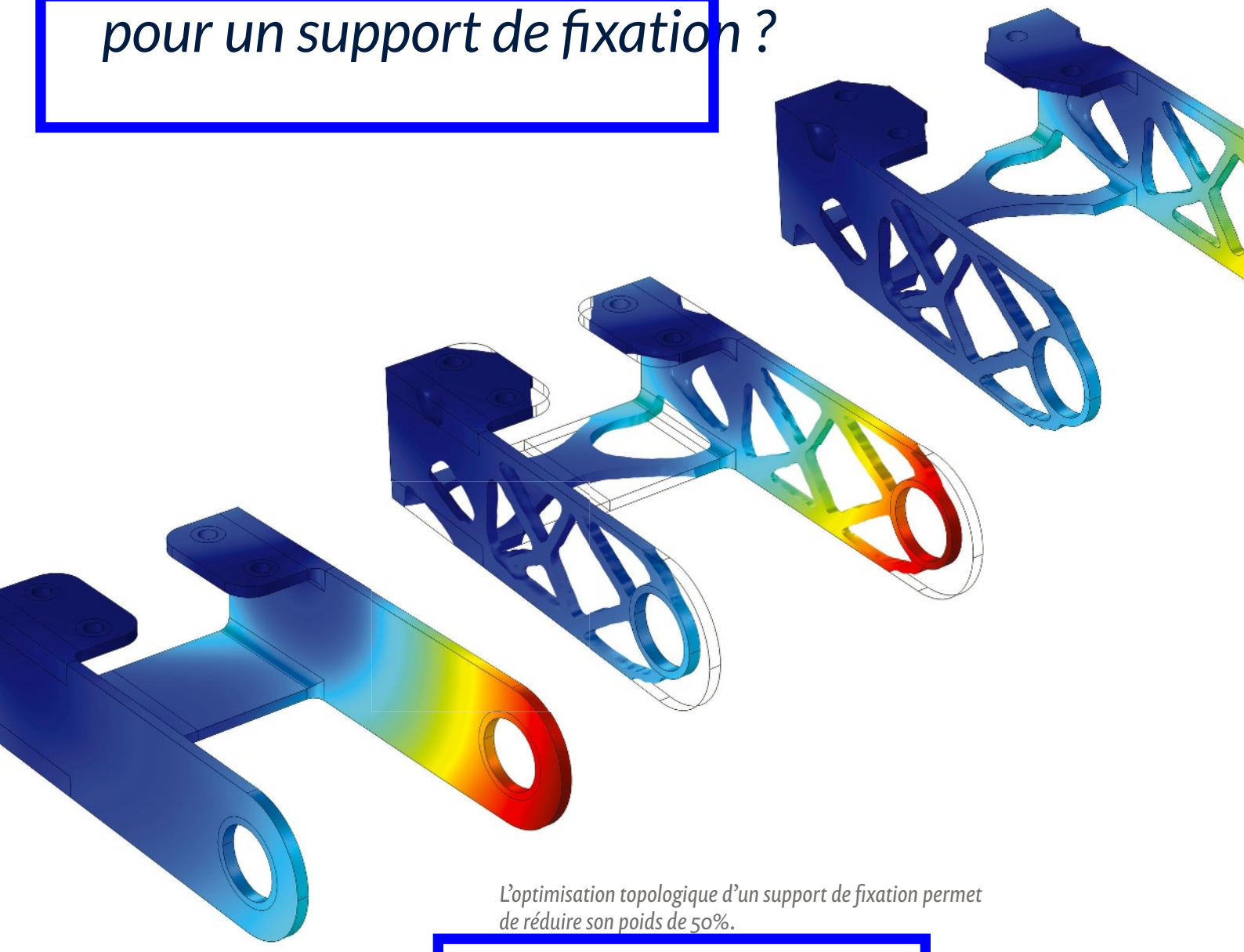
« Hervé Le Guyader explore ce concept complexe et explique comment nous pouvons encore, mais urgemment, agir pour sa préservation. »

Libération



Éditions Le Pommier
Un lieu à cultiver

Quel est le meilleur design pour un support de fixation ?



L'optimisation topologique d'un support de fixation permet de réduire son poids de 50%.

Cela dépend des objectifs de conception. Les méthodes d'optimisation topologique permettent de trouver la meilleure version possible d'une structure pour un usage spécifique. Un support peut être optimisé pour un seul type de chargement, tandis qu'un autre est optimisé pour huit. La fonctionnalité Density Model simplifie le processus d'optimisation topologique pour les ingénieurs en calcul de structure.

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 l'optimisation topologique.

comsol.blog/density-topology

COMSOL