POUR LA SCIENCE
Edition française de Scientific American

POUR LA SCIENCE

AOUT 2019
N° 502

CLIMATOLOGIE
UN GLACIER GÉANT DE L'ANTARCTIQUE MENACE LA PLANÈTE

PHYSIQUE
VOIR AU-DELÀ DE L'HORIZON… SUR UNE TERRE SPHÉRIQUE !

PALÉONTOLOGIE
IL Y A 600 MILLIONS D'ANNÉES, L'ESSOR DES ANIMAUX COMPLEXES

Après les trous noirs

La chasse aux TROUS BLANCS



TOUT EST AFFAIRE DE MOLÉCULES !



EN LIBRAIRIE

LE 11 SEPTEMBRE 2019

humenSciences

humensciences.com

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr
70 bis boulevard du Montparnasse – 75014 Pari
Tél. 0155428400

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions: Cécile Lestienn

POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef: Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnie
Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly
Stagiaires: Izia Pétillon, Nicolas Butor

HORS-SERIE POUR LA SCIENCE
Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangi

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

Conception graphique: William Londiche
Directrice artistique: Céline Lapert
Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament, Assya Monnet (stagiaire)
Réviseuse: Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion: Arthur Peys
Chef de produit: Charline Buché
Direction du personnel: Olivia Le Prévost
Secrétaire général: Nicolas Bréon
Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mério
Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique: Hervé This
Ont également participé à ce numéro: Maud Bruguière, Frédéric Chaput, Alain Danet, Lionel Favier, Aline Gerstner, Pierre Jouventin, Mazyar Mirrahimi, Lydie Morel, Antoine Tilloy, Teva Vernoux

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 0155428505

PUBLICITÉ France
Stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS
Abonnement en ligne: https://boutique.pourlascience.f
Courriel: pourlascience@abopress.fr
Tél. 0367079817
Adresse postale: Service des abonnements – Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

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

DIFFUSION
Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard
Tél. 04 88 15 12 48
Information/modification de service/réassort: www.direct-editeurs.fr

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

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

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

ÉDITO



MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

LA LUMIÈRE AU BOUT DU TUNNEL ?

En étudiant leurs équations censées décrire le monde réel, les physiciens découvrent parfois des solutions qui ne correspondent à rien d'observé. Puis, quelques mois ou des décennies plus tard, des chercheurs mettent en évidence un objet ou un phénomène qui est le pendant physique de la solution mathématique trouvée auparavant. Ce fut par exemple le cas avec le positron, identifié dans [illegible] opposée, était suggéré par l'une des solutions de l'équation que le Britannique Paul Dirac a proposée en 1928 pour tenter de décrire, en conformité avec la mécanique quantique et la relativité restreinte d'Einstein, l'électron.

Une telle prédiction théorique, suivie de la découverte correspondante, fait le bonheur des scientifiques. Cette situation n'est pas si rare et un autre exemple est celui des trous noirs. Ces objets astrophysiques dont rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper sont apparus en filigrane des équations dès l'avènement de la théorie de la relativité générale d'Einstein, vers 1915. Mais il a fallu plusieurs décennies pour que les solutions des équations soient correctement interprétées, que la notion de trou noir s'éclaircisse et que les observations astrophysiques mettent hors de doute l'existence de ces astres.

Le même scénario se reproduira-t-il avec les trous blancs, sortes de sosies inversés des trous noirs, eux aussi suggérés par les équations d'Einstein ? Tombés dans l'oubli, ces objets hypothétiques qui ne font qu'expulser de la matière et du rayonnement reviennent au goût du jour. Carlo Rovelli nous explique notamment (*pages 26 à 35*) que dans le cadre de la « gravité quantique à boucles », théorie quantique de la gravitation dont il est l'un des principaux bâtisseurs, les trous noirs pourraient se transformer en trous blancs par effet tunnel (un effet quantique connu par ailleurs). Et que l'existence des trous blancs résoudrait plusieurs énigmes de l'astrophysique et de la cosmologie. Bref, au bout du tunnel, on verrait la lumière… si toutefois ces objets étranges daignent un jour se montrer aux astrophysiciens. ■

SOMMAIRE

N° 502 /
Août 2016

ACTUALITÉS

P. 6
ÉCHOS DES LABOS
Comment la mort des cellules façonne les tissus
Comprendre l'origine de la chimiophobie
Un saut quantique suivi à la trace
Un banc d'alevins fossilisé
Les comètes seraient bien la source de l'eau terrestre
Arthrose : panser les cartilages
Faible démographie néandertalienne
La première BD à l'Angoulême
Une disposition des feuilles qui dépend de leur âge
L'arbre des paresseux revisité

P. 18
LES LIVRES DU MOIS

P. 20
AGENDA

P. 22
HOMO SAPIENS INFORMATICUS
Des algorithmes instinctifs
Gilles Dowek

P. 24
QUESTIONS DE CONFIANCE
Le frisson poétique de la science
Virginie Tournay

POUR LA SCIENCE.FR
LETTRE D'INFORMATION
NE MANQUEZ PAS LA PARUTION DE VOTRE MAGAZINE GRÂCE À LA NEWSLETTER
Notre sélection d'articles
Des offres préférentielles
Nos autres magazines en kiosque
Inscrivez-vous www.pourlascience.fr



En couverture:
© pixelparticle/Shutterstock.com
Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



P. 36
ANTHROPOLOGIE
GUERRE ET CHASSEURS-CUEILLEURS, LE CAS DES ABORIGÈNES
Christophe Darmangeat
Contrairement aux agriculteurs-éleveurs, les chasseurs-cueilleurs étaient pacifiques, lit-on souvent. L'exemple des Aborigènes guerriers de l'Australie précoloniale bat en brèche cette hypothèse.



P. 54
CLIMATOLOGIE
LE GÉANT THWAITES VA-T-IL FONDRE ?
Richard Alley
Grand comme un tiers de la France, le glacier de Thwaites, en Antarctique, est menacé par le réchauffement climatique. Sa fonte ferait monter le niveau des mers de plus de 3 mètres en quelques décennies.





P. 44
NEUROSCIENCES
COMMENT LE CERVEAU CODE LES VISAGES
Doris Y. Tsao
Nous repérons et distinguons très facilement des milliers de visages. Comment notre cerveau réussit-il cet exploit ? L'étude de l'activité neuronale chez le singe suggère que cette étonnante faculté repose sur des opérations assez simples.

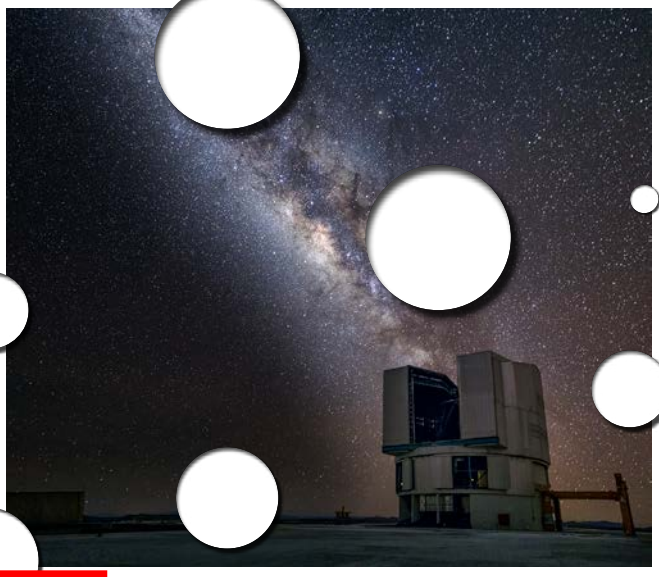
P. 62
PALÉONTOLOGIE
L'ESSOR DES PREMIERS ANIMAUX
Rachel A. Wood
La découverte de nouveaux fossiles d'animaux complexes et l'analyse de la chimie des anciens océans révèlent les racines étonnamment lointaines de l'explosion cambrienne.



P. 72 PORTFOLIO
HISTOIRE DES SCIENCES
LES FOLLES INVENTIONS DE L'ANCÊTRE DU CNRS
Luce Lebart

Électrification des plantes, hangar gonflable, projecteur sur nuage… En France, entre 1915 et 1938, la Direction des inventions intéressant la défense nationale, ancêtre lointain du CNRS, a recensé des milliers de fabuleuses trouvailles. Et les a photographiées. Les images les plus étonnantes sont exposées cet été à Arles.

À LA UNE



P. 26
PHYSIQUE THÉORIQUE
LA CHASSE AUX TROUS BLANCS
Carlo Rovelli

Les trous blancs ? Des sosies inversés des trous noirs qui expulsent la matière sans jamais en absorber. Ces astres correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale et pourraient être le destin ultime des trous noirs. Leur détection ouvrirait une fenêtre inédite sur la gravitation quantique.

RENDEZ-VOUS

P. 80
LOGIQUE & CALCUL
LA PSYCHOLOGIE DE LA COMPLEXITÉ
Jean-Paul Delahaye

En s'appuyant sur une définition algorithmique de la complexité, des expériences de psychologie explorent nos capacités à percevoir le hasard et la complexité, ainsi que la modification de ces capacités avec l'âge.

P. 86
ART & SCIENCE
UN HAVRE POUR LES ABEILLES
Loïc Mangin



P. 88
IDÉES DE PHYSIQUE
VERS L'HORIZON, ET AU-DELÀ !
Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

P. 92
CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION
ET L'ÉVOLUTION FRAPPA DEUX FOIS
Hervé Le Guyader

P. 96
SCIENCE & GASTRONOMIE
DÉLICIEUX OXYMORES THERMIQUES
Hervé This

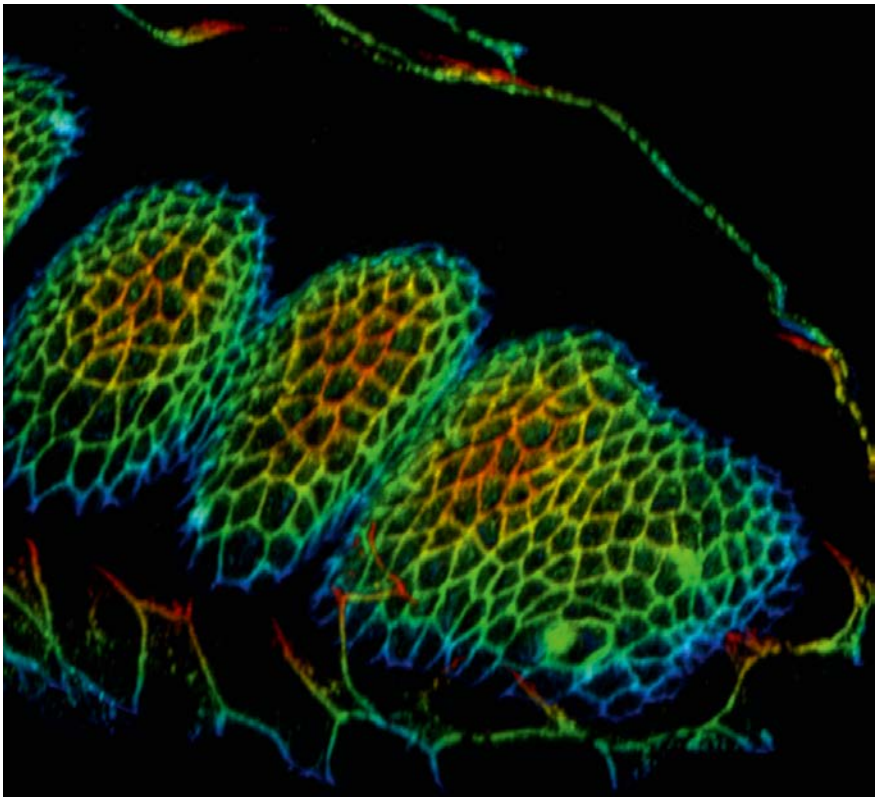
P. 98
À PICORER

ACTUALITÉS

P.6 *Echos des labos*
P.18 *Livres du mois*
P.20 *Agenda*
P.22 *Homo sapiens informaticus*
P.24 *Questions de confiance*

BIOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT

COMMENT LA MORT DES CELLULES FAÇONNE LES TISSUS



Lors de la formation des pattes de la drosophile, les tissus cellulaires de la larve se plissent peu à peu en des endroits précis qui donneront les articulations.

Lors du développement animal, des cellules sur le point de mourir produisent une force qui déforme le tissu alentour. Leur rôle joue un rôle essentiel dans ce processus.

Comment un embryon, au départ rond comme une bille, se plisse-t-il progressivement au fil de son développement, jusqu'à former les différents organes? Nombre de biologistes se sont [illegible], pour la plupart, ces dernières années, un mécanisme s'est dessiné: à l'endroit d'un futur pli, les cellules constituant un tissu se rétractent à l'aide du même type de couple de protéines qui contracte les muscles: l'actine, un constituant du squelette des cellules, et une myosine, un moteur moléculaire capable de se déplacer le long de l'actine polymérisée en filaments. Ce faisant, ces cellules entraînent leurs voisines *via* les molécules qui les lient les unes aux autres, et créent ainsi un creux dans le tissu.

Toutefois, on s'est aussi aperçu que ce mécanisme n'est pas le seul à l'œuvre. En 2015, notamment, Magali Suzanne et Bruno Monier, du Centre de biologie intégrative (CNRS, université de Toulouse), à Toulouse, et leurs collègues ont observé chez la drosophile que dans le tissu qui deviendra une patte, l'apoptose – la mort programmée des cellules – produit sur les cellules alentour une force similaire de contraction qui les déforme et est nécessaire à la formation de la patte. La même équipe vient à présent de déterminer comment cette force est produite.

Depuis longtemps, les biologistes savent que l'apoptose intervient à des stades précis du développement et contribue au façonnage des organes. Chez les vertébrés, notamment, les doigts se dessinent grâce à la mort des cellules situées entre ceux-ci. L'apoptose est aussi impliquée dans le repliement sur lui-même du tube neural, le système nerveux primitif. On pensait alors que l'élimination des cellules suffisait à remodeler les tissus. Mais en 2015, en se concentrant sur le rôle de l'apoptose dans la formation d'un pli précis – qui devient une articulation d'une patte – lors du développement de la drosophile,

Comprendre l'origine de la chimiophobie

Quelle image a-t-on des produits de synthèse et de leur toxicologie en Europe ? Une étude met en relation l'état des connaissances du grand public et la « chimiophobie ». Christophe Cartier dit Moulin, chargé de mission pour la communication scientifique à l'Institut de chimie du CNRS, commente ce rejet de la chimie dans la population générale.



Propos recueillis par MARTIN TIANO

CHRISTOPHE CARTIER DIT MOULIN
directeur de recherche au CNRS

Que nous apprend cette étude ?

Que la chimiophobie, définie comme la peur irrationnelle découlant de la surévaluation des risques liés aux produits issus de l'industrie chimique, est largement partagée et concerne tous les publics, y compris parmi les plus instruits.

L'étude a été menée par Angela Bearth, de l'École polytechnique fédérale de Zurich, et ses collègues en interrogeant 5 631 personnes dans 8 pays d'Europe. Elle confirme en outre que les connaissances en chimie sont assez faibles. Par exemple, la dichotomie erronée entre « chimique » et « naturel » est très présente. Ainsi, 82 % des participants de l'étude estiment qu'il y a une différence entre le sel (NaCl) synthétique et celui extrait de la mer. Certaines notions fondamentales en toxicologie, comme la relation dose-effet, sont quasi inconnues. Ce manque de connaissances de base instaure une méfiance et c'est le facteur décisif dans la chimiophobie, même si d'autres éléments entrent aussi en ligne de compte.

Pourquoi la chimie est-elle confrontée à une telle situation ?

Il me semble que la chimie souffre de trois maux : elle est mal aimée, mal comprise, mal traitée. Mal aimée car, contrairement à d'autres technologies, elle ne fait pas rêver : elle est trop proche du quotidien, elle est partout ! Lorsqu'il faut trouver un coupable face à des inquiétudes sur la santé, par exemple, les produits chimiques de synthèse sont faciles à montrer du doigt. Mal comprise car, comme le soulignent les auteurs, le terme même de « chimique » est polysémique, et sa véritable définition, « science qui étudie les propriétés, la constitution des corps et les réactions qui peuvent se produire entre eux », échappe la plupart du temps au grand public. Mal traitée enfin parce que, quels que soient les modes de communication mis en place, l'image de la chimie reste mauvaise, même quand les différents acteurs du domaine mettent, par exemple, l'accent sur une chimie écoresponsable.

Comment expliquer la situation encore plus dramatique en France ?

Il semble y avoir des différences culturelles entre pays européens, et j'ai le sentiment qu'en France, nous sommes à la recherche du « risque zéro ». La notion de balance bénéfice/risque, essentielle en toxicologie, reste de ce fait exclue du discours public. En résulte une plus grande inquiétude pour tout ce qui véhiculerait la moindre image de risque. Par ailleurs, je pense que la parole des scientifiques s'est affaiblie. En exagérant un peu, le grand public n'a pas beaucoup plus confiance en nous qu'en des politiciens. Les discours rigoureux, modérant la perception des risques, sont peu audibles dans les médias. Cette méfiance renforce davantage encore le sentiment de danger face aux produits chimiques de synthèse. Et parler de sujets polémiques comme le glyphosate ou les vaccins devient impossible.

Quels moyens pourrait-on mettre en œuvre pour sortir de la chimiophobie ?

L'enseignement des notions de base de la toxicologie et de la chimie en fait partie, ce qui à mon avis devrait se traduire en France par une réhabilitation de l'enseignement de la chimie, trop souvent présentée comme une sous-discipline de la physique.

Les scientifiques ne doivent pas chercher à convaincre mais simplement à expliquer, et accompagner le public dans les débats sociétaux que la chimie soulève. Point positif, depuis quelques années, j'observe que les scientifiques sont plus dans l'échange et le partage avec le grand public, et n'hésitent plus à discuter des limitations et du rapport bénéfices/risques de leurs avancées. ■

A. Bearth *et al.*, *Food and Chemical Toxicology*, vol. 131, article 110560, 2019.

l'équipe toulousaine a montré qu'avant de mourir, une cellule en apoptose produit une force qui creuse le tissu en entraînant les cellules voisines. Dans sa nouvelle étude, l'équipe révèle que de nouveau le couple actine-myosine intervient dans la production de cette force, mais qu'un acteur inattendu l'accompagne : le noyau cellulaire.

Le tissu de la patte est constitué de cellules « épithéliales », des cellules qui, serrées les unes contre les autres sur une seule couche, forment une sorte de tapis d'une épaisseur de 20 à 30 micromètres reposant sur d'autres tissus. Par vidéomicroscopie et à l'aide de marqueurs fluorescents, les biologistes ont suivi pas à pas l'apoptose de cellules individuelles du tissu. Ils ont ainsi observé qu'un câble d'actine et de myosine se forme à partir du sommet de la cellule et s'allonge jusqu'à rejoindre le noyau, lui-même ancré à l'opposé, à la base de la cellule, par un réseau de filaments d'actine relié à la membrane basale. Lorsque le câble se contracte, il tire d'un côté sur le sommet de la cellule et de l'autre sur le noyau. Le sommet s'enfonce dans le tissu, entraînant les cellules voisines, tandis que le noyau remonte. Mais si l'on détruit l'ancre d'actine qui le relie à la base, le tissu ne se déforme plus.

Or les cellules non apoptotiques (c'est-à-dire qui ne sont pas sur le point de mourir) ont un aspect assez différent : alors que les cellules apoptotiques ressemblent à des poires, avec le noyau en bas, les cellules non apoptotiques sont inversées, leur partie supérieure, plus large, contenant le noyau. En d'autres termes, lorsque l'apoptose se déclenche, le noyau migre à la base de la cellule et y reste attaché. Il sert ainsi de point d'ancrage au câble contractile, lui permettant de transmettre à la face supérieure du tissu la force qu'il produit en se contractant. Puis la cellule se détache de ses voisines et est évacuée par la base du tissu. Mais le pli, lui, reste…

L'équipe essaye maintenant de comprendre si de tels mécanismes de génération de force impliquant le noyau sont mis en jeu dans d'autres organismes, comme le poulet, ou d'autres types de cellules, telles celles qui quittent leur épithélium d'origine pour migrer à distance. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

A. Ambrosini *et al.*, *Developmental Cell*, en ligne le 13 juin 2019.

PHYSIQUE

UN SAUT QUANTIQUE SUIVI À LA TRACE

Grâce à un dispositif ultrarapide, des physiciens ont observé le passage d'un système quantique de son état initial à un autre.

En 1913, Niels Bohr présentait son modèle de l'atome, composé d'un noyau entouré d'électrons sur des orbites distinctes ayant chacune une énergie bien définie. L'idée révolutionnaire du physicien danois était que seules certaines valeurs d'énergie sont [illegible] peuvent néanmoins passer d'une orbite (ou état) à une autre, par un «saut quantique», si elles absorbent ou émettent un photon d'énergie exactement égale à l'écart d'énergie des deux états. Or Zlatko Minev et ses collègues, de l'université Yale, aux États-Unis, ont mené une expérience qui permet d'étudier ce qui se passe pendant un tel saut quantique.

Le modèle de Bohr préfigurait une vision encore plus radicale, celle de la physique quantique, développée au cours des années 1920. Cette théorie stipule qu'un saut quantique se déclenche de façon aléatoire, mais les détails du déroulement d'un tel saut, déjà vivement débattus à l'époque de Bohr, restent obscurs aujourd'hui.

En effet, comment étudier un saut quantique alors qu'une mesure perturbe inévitablement le système? L'équipe de l'université Yale a conçu un système reposant sur un «atome artificiel» constitué d'éléments supraconducteurs. Sur le plan mathématique, le dispositif est équivalent à un atome présentant trois états d'énergie: l'état fondamental (celui de plus basse énergie), un état dit «sombre» et un état dit «brillant». Le choix de ces mots tient au fait que l'appareil est capable de détecter quand le système est dans l'état brillant. Ce signal est associé à un «clic», comparable au bruit que fait un compteur Geiger.

En revanche, les physiciens ne peuvent pas directement savoir si le système est dans l'état sombre. Leur dispositif leur indique seulement si l'atome est dans l'état brillant ou non. Dès lors, dans le cas non brillant, les chercheurs préservent le mélange quantique entre les états fondamental et sombre et ne perturbent pas la dynamique lors d'un saut quantique entre ces niveaux d'énergie.

Dans l'expérience, l'atome artificiel est placé dans une cavité remplie de photons microondes. Ceux-ci stimulent le système, qui passe le plus souvent de l'état fondamental à l'état brillant.



À l'image d'un chat de Schrödinger se trouvant dans une superposition de deux états, des chercheurs ont trouvé un moyen de détecter les débuts du processus où le système saute d'un état à l'autre.

8 MICROSECONDES

C'EST LA DURÉE DU SAUT QUANTIQUE ENTRE L'ÉTAT FONDAMENTAL ET L'ÉTAT « SOMBRE ». GRÂCE À UN SYSTÈME ULTRARAPIDE, IL EST POSSIBLE DE DÉTECTER QU'UN SAUT EST EN TRAIN DE COMMENCER ET DE LUI ENVOYER UNE ONDE POUR L'ARRÊTER.

Lorsque le système est dans l'état brillant, les chercheurs enregistrent un clic, à peu près toutes les microsecondes. Mais parfois, ces signaux s'interrompent, environ toutes les 220 microsecondes, sur une durée moyenne de 3 microsecondes. Cela signifie que le système a effectué un saut quantique de l'état fondamental à l'état sombre, où il reste un certain temps.

Étant donné sa résolution temporelle de 8 nanosecondes, le dispositif expérimental est assez rapide pour détecter le début d'une période «silencieuse». Les chercheurs ont alors mesuré ce qui se passe précisément au cours du saut quantique vers l'état sombre. En effectuant des mesures à différents instants du saut sur près de 7 millions de sauts, les physiciens ont constaté que l'état de superposition du système change continûment au cours du saut, selon une «trajectoire» bien définie. Il est dominé par sa composante fondamentale au début du saut, puis la part sombre augmente progressivement.

Si ce résultat n'est pas une surprise – il était prévu par la théorie –, c'est la première fois qu'on observe cette dynamique pendant le saut, lequel conserve son caractère aléatoire puisqu'on ne peut pas anticiper son déclenchement. ■

SEAN BAILLY

Z. K. Minev *et al.*, *Nature*, vol. 570, pp. 200-204, 2019

PHYSIQUE

EN BREF

UN PENTAQUARK MOLÉCULAIRE

Les quarks sont les briques élémentaires de la matière. En trio, ils forment les baryons (protons, neutrons, etc.). En paires quark-antiquark, ils constituent des mésons. En 2016, *LHCb*, une expérience du LHC, au Cern, a identifié un pentaquark, avec quatre quarks et un antiquark, dont l'existence était prévue depuis longtemps. Mais comment les quarks s'organisent-ils dans le pentaquark ? Est-ce un quintet solidement lié ou une association d'un baryon et d'un méson ? L'équipe de *LHCb* vient de montrer que la bonne option est la seconde.

LES MONARQUES NÉS EN CAPTIVITÉ NE MIGRENT PAS

Aux États-Unis, pour faire face au déclin du papillon monarque, des particuliers et des entreprises libèrent des individus élevés en captivité. Mais l'équipe d'Ayse Tenger-Trolander, de l'université de Chicago, a montré que ces papillons ont perdu leur capacité à migrer vers le Mexique à l'automne pour se reproduire. Cette perte s'expliquerait par des différences génétiques entre les populations commercialisée et sauvage, et par l'absence de repères environnementaux liés à l'élevage en intérieur.

UN PALAIS SORTI DES EAUX

Sur le site de Kemune, au bord du Tigre iraquien, un palais était immergé dans les eaux du réservoir du barrage de Mossoul. En 2018, un épisode de sécheresse l'a rendu de nouveau accessible. L'archéologue Hasan Ahmed Qasim et des collègues de l'université de Tübingen en ont profité pour étudier ce bâtiment. Il date de l'empire Mittani, aux XVe et XIVe siècles avant notre ère. Ils y ont trouvé des peintures murales, rarement préservées, et dix tablettes d'argile avec du texte cunéiforme.

ÉCOLOGIE

FUIR FACE À UNE ESPÈCE INVASIVE

Les espèces invasives constituent l'une des principales causes d'érosion de la biodiversité. Or si l'on appréhende mieux [illegible] espèce de devenir envahissante, il est très souvent difficile d'étudier une invasion biologique, car on ne la détecte qu'une fois l'écosystème modifié. D'où l'intérêt des travaux de Todd Palmer, de l'université de Floride, et ses collègues : ils ont suivi l'arrivée de deux espèces de reptiles exotiques qu'ils ont introduites dans des petites îles de l'archipel des Bahamas.

Ces îles abritent une espèce de lézard arboricole, l'anole brun, qui se nourrit d'insectes. Les chercheurs ont apporté une espèce concurrente, l'anole vert, lui aussi insectivore et arboricole. Très vite, les deux espèces de reptiles ont développé des modes de vie complémentaires, limitant ainsi la compétition : l'anole brun vit et se nourrit au sol ou sur les troncs des arbres, tandis que l'anole vert reste dans les cimes.

Les chercheurs ont ensuite introduit une troisième espèce, l'iguane caréné à queue bouclée, insectivore et reptilivore. Ce dernier étant exclusivement terrestre, il ne pouvait s'attaquer qu'aux anoles bruns. Mais étonnamment, ce sont les anoles verts qui ont quasiment disparu sur les îles étudiées. Pour Todd Palmer et ses collègues, l'introduction des iguanes aurait entraîné la fuite des lézards bruns en hauteur, ces derniers entrant alors en compétition directe avec les anoles verts. De fait, sur les îles colonisées par l'iguane, la proportion des lézards bruns aperçus au sol a diminué de 28 % en six ans.



Un anole brun, espèce de lézard qui s'est adaptée à la présence de deux espèces de lézards volontairement introduites dans de petites îles des Bahamas.

Le dernier rapport international sur la biodiversité de l'IPBES, paru le 6 mai 2019, rappelle l'urgence d'établir des outils de surveillance des espèces invasives. Néanmoins, la modification volontaire d'un écosystème, telle celle menée par Todd Palmer et ses collègues, suscite un autre débat : la fin justifie-t-elle tous les moyens ? ■

CORALINE MADEC

K. M. Pringle *et al.*, *Nature*, vol. 570, pp. 58-64, 2019.

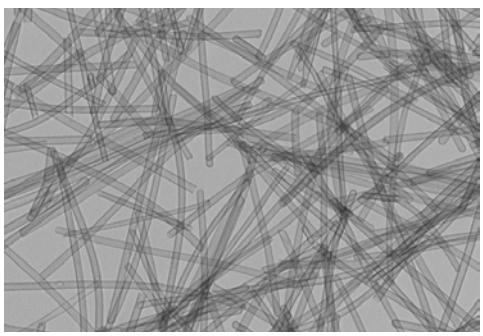
CHIMIE

ISOLANT INSPIRÉ DES OURS BLANCS

Les poils des ours polaires ont la particularité d'être creux, ce qui les rend à la fois légers et bien plus isolants que les poils [illegible] sujet de nombreux travaux en science des matériaux, ils servent notamment de modèle pour les matériaux isolants thermiques ou acoustiques. Hui-Juan Zhan et ses collègues, de l'université de science et technologie de Chine, à Hefei, ont mis au point un matériau constitué exclusivement de carbone et inspiré de ces structures fibreuses creuses ; ses propriétés isolantes et mécaniques surpassent celles de la fourrure naturelle.

Les chercheurs ont réalisé un aérogel, réseau solide de macromolécules entourées d'air (au lieu d'eau dans un gel). Ici, le rôle des macromolécules est joué par des tubes de carbone creux interconnectés. Comme tout aérogel, il est peu dense et un bon isolant thermique. Mais grâce à sa composition en carbone, ce matériau est aussi très hydrophobe, insensible à l'humidité. Il est aussi élastique et mécaniquement résistant. ■

M. T.



Cet aérogel en carbone s'inspire des poils d'ours polaire et pourrait être un bon isolant thermique en milieu humide.

Hui-Juan Zhan *et al.*, *Chem*, vol. 5, pp. 1-12, 2019.

UN BANC D'ALEVINS FOSSILISÉ

La fossilisation du corps d'un animal est déjà un événement rare, alors celle d'un banc de poissons ! C'est pourtant ce genre de cas que Nobuaki Mizumoto, de l'université Josai, au Japon, et ses collègues pensent avoir découvert dans les collections du musée des Dinosaures de la préfecture de Fukui, dans la ville de Katsuyama. Ils y sont tombés sur une mince dalle grisâtre à [illegible] calcaire.

Cette dalle mesure 57 par 37,5 centimètres. Elle provient d'une formation géologique datant de l'Éocène (56 à 33,9 millions d'années). Cette formation dite de la Green River, parce qu'elle longe cette rivière des États-Unis traversant le Colorado, le Wyoming et l'Utah, résulte de la sédimentation au sein d'un vaste bassin versant qui alimentait un ancien groupe de lacs de montagnes.

L'examen des squelettes des alevins a montré que ceux-ci appartiennent à l'espèce éteinte *Erismatopterus levatus*. Leurs tailles varient entre 10,6 et 23,5 millimètres, tandis que 257 des 259 individus de la plaque se dirigent dans des directions très proches, tout en étant toujours séparés par des distances inférieures à la longueur de leurs corps. Une telle organisation ressemble fortement à celle qu'adoptent les poissons évoluant en banc. Cela suggère qu'un groupe d'alevins nageant tout près du fond dans une eau très peu profonde y a été enseveli très vite.

Un scénario imaginable ? Oui, car les bancs d'alevins se déplacent souvent tout contre le fond à de faibles profondeurs. Si le lac ou la rivière où vivaient ces alevins d'*Erismatopterus levatus* étaient bordés par une dune de sable, le passage d'un gros animal a pu suffire à déclencher une avalanche qui aura enseveli les poissons. Nous ne saurons jamais si ce scénario est le bon, mais la trouvaille a en tout cas le mérite de montrer que la fossilisation fige parfois des situations très fugaces. ■

FRANÇOIS SAVATIER

N. Mizumoto *et al.*, *Proc. R. Soc. B*, vol. 286, article 20190891, 2019





ASTROPHYSIQUE

LES COMÈTES SERAIENT BIEN LA SOURCE DE L'EAU TERRESTRE

La mesure du rapport isotopique hydrogène/deutérium de l'eau de la comète 46P/Wirtanen fournit un argument de poids dans le débat sur l'origine de l'eau présente sur notre planète

Océans, mers, rivières, glaciers, brouillard...: l'eau est omniprésente sur la Terre. Ce n'était pourtant pas le cas au début. En effet, la planète s'est formée il y a 4,5 milliards d'années par la collision de planétésimaux [illegible] (leur proximité au Soleil). L'eau serait venue après, et la piste la plus probable était celle d'un bombardement par des comètes, composées à 50% de glace. Ces dernières années, pour confirmer la provenance de l'eau terrestre, les scientifiques ont mesuré le rapport d'abondance des molécules H_2O et d'eau semi-lourde HDO, où un atome d'hydrogène est remplacé par un de ses isotopes, le deutérium. Mais pour la grande majorité des comètes, on a obtenu des valeurs du rapport isotopique deutérium/hydrogène (D/H) deux à trois fois plus élevées que dans l'océan terrestre. Dès lors, ces corps semblaient n'avoir contribué qu'à une faible fraction de l'eau sur la planète. Toutefois, de nouveaux résultats de Dominique Bockelée-Morvan, du Lesia, à l'Observatoire de Paris, et de ses collègues contredisent aujourd'hui cette conclusion.

En 2018, grâce à *Sofia*, l'Observatoire stratosphérique pour l'astronomie infrarouge embarqué à bord d'un Boeing 747, cette équipe a mesuré le rapport D/H de la comète 46P/Wirtanen lors de son passage à moins de 12 millions de kilomètres de la Terre. Depuis les couches supérieures de l'atmosphère, le télescope a pu étudier la comète dans l'infrarouge sans être perturbé par l'air terrestre. Le résultat est surprenant: 46P/Wirtanen est la troisième comète au rapport D/H compatible avec celui des océans.

L'explication viendrait du fait que cette comète appartient à la famille des comètes hyperactives. Celles-ci émettent plus de vapeur d'eau que la taille de leur noyau ne semble le permettre. Cette particularité résulte de la présence de grains de glace dans l'atmosphère de la comète qui se subliment (c'est-à-dire passent de l'état solide à l'état gazeux) à l'approche du Soleil.

En analysant plusieurs comètes, Dominique Bockelée-Morvan et ses collègues ont montré que plus la comète est hyperactive, plus son rapport D/H s'approche de celui des océans terrestres. De plus, l'hyperactivité s'observe



Les comètes, corps riches en glace d'eau, pourraient avoir apporté l'eau sur Terre après sa formation. Les analyses semblaient contredire cette piste, mais une explication se dessine...

uniquement pour des petites comètes, ayant un noyau mesurant moins de 1,2 kilomètre. Pour expliquer l'hyperactivité, les chercheurs suggèrent que les fragments de glace seraient arrachés du noyau lorsque ce dernier commence à se vaporiser. Le dégazage exercerait des forces de pression que la cohésion gravitationnelle du corps ne pourrait compenser, d'où la présence dans l'atmosphère cométaire de ces morceaux de glace provenant directement du noyau.

Reste à expliquer le lien entre le rapport D/H et l'hyperactivité des comètes. Les chercheurs supposent que la sublimation normale du noyau d'une comète implique un fractionnement isotopique. Les molécules d'eau contenant du deutérium auraient plus de chance de se vaporiser, ce qui augmenterait le rapport D/H dans l'atmosphère de ces comètes. Dans le cas des comètes hyperactives, la sublimation complète des morceaux de glace directement dans l'atmosphère rétablirait alors un rapport D/H plus représentatif de celui du noyau. De nouvelles observations seront nécessaires pour tester ce scénario, mais, s'il se confirme, il impliquerait que les comètes ont toutes un noyau dont la glace présente un rapport D/H compatible avec celui des océans terrestres. Dans ce cas, les comètes seraient bien la source de l'eau de la planète bleue! ■

LAURENT SACCO

D. C. Lis *et al.*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 625, L5, 2019

Document protégé par copyright

L'ART DE FAIRE DES CRÊPES

Comment réaliser la crêpe parfaite d'épaisseur égale et sans trou ? Édouard Boujo, de l'École polytechnique, et Mathieu Sellier, de l'université de Canterbury, en Nouvelle-Zélande, ont fait appel à la théorie de la commande optimale pour trouver la réponse. Cette approche permet de calculer une contrainte, l'épaisseur égale de la crêpe, en fonction d'autres paramètres, dont les mouvements de la poêle, tout en prenant en compte le fait que la viscosité de la pâte augmente au cours de la cuisson. Les chercheurs montrent qu'il faut verser le liquide sur la poêle très inclinée, et réaliser un mouvement circulaire pour répartir la pâte tout en redressant peu à peu la poêle. Ce résultat intéressera les industriels, pour étaler des peintures par exemple.

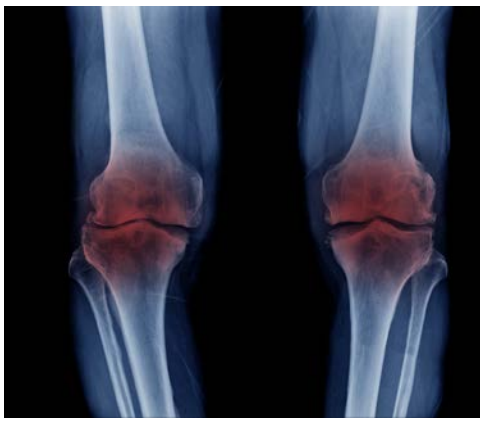
ARTHROSE : PANSER LES CARTILAGES

En 2017, 10 millions de Français étaient atteints d'arthrose, selon l'Inserm. Cette maladie se caractérise par la dégradation [illegible] notamment l'os adjacent, l'« os sous-chondral ». La prise en charge actuelle de l'arthrose vise uniquement à en limiter les symptômes et le développement. Aussi la mise au point d'un traitement est-elle un enjeu majeur de santé publique.

Nadia Benkirane-Jessel, de l'université de Strasbourg, et son équipe ont élaboré un implant capable de régénérer les articulations. Il est composé de deux couches distinctes. La première s'applique comme un pansement sur la lésion articulaire où des nanoréservoirs libèrent un facteur de croissance de l'os sous-chondral à des concentrations physiologiques. La seconde couche est un hydrogel contenant des cellules souches de l'organisme. Celles-ci se différencient en chondrocytes, les cellules responsables de la formation et du maintien du cartilage.

L'équipe a testé l'implant sur des brebis et observé qu'il assure la régénération du cartilage, mais aussi de l'os. Sa pose peut se faire par une arthroscopie : une opération bien moins contraignante que les autres interventions chirurgicales contre cette maladie. Au vu de ces résultats très encourageants, les chercheurs estiment que l'implant est prêt pour des tests sur un groupe d'une vingtaine de personnes ! ■

J. P.



L'arthrose est une affection chronique douloureuse. Une nouvelle approche permettrait de traiter la maladie

[illegible] Keller *et al.*, *Nature Communications*, vol. 10, article 2156, 2019



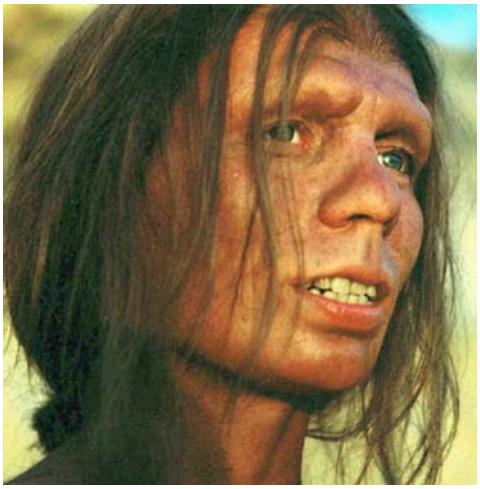
PRÉHISTOIRE

FAIBLE DÉMOGRAPHIE NÉANDERTALIENNE

C'est un fait: *Homo neanderthalensis* a disparu en quelques millénaires il y a environ 40 000 ans, à l'époque où *H. sapiens* faisait [illegible] quoi? Les scénarios invoquant des facteurs extérieurs à l'espèce sont légion et pas toujours plausibles: génocide, cancer de la peau, choc bactérien, etc. Avec des collègues, Anna Degioanni, de l'université Aix-Marseille, a voulu modérer cette frénésie explicative en soulignant l'importance d'un facteur de disparition interne à l'espèce: sa fragilité démographique.

Répartis de la Grande-Bretagne à la Sibérie, les Néandertaliens n'ont, suivant un compromis largement partagé, jamais dépassé les 70 000 individus. Les chercheurs ont bâti un modèle fondé sur les méthodes utilisées en écologie pour décrire la démographie d'une population animale, qu'ils ont adaptées au cas des chasseurs-cueilleurs. Pour ce faire, leur premier souci a été de déterminer le jeu de paramètres – nombre d'enfants par femme, mortalité, migration… – pour lequel le modèle décrit la stabilité de la population. Ils ont ensuite joué avec les valeurs de ces paramètres en suivant divers scénarios afin de reproduire une disparition en 10 000, 6000 ou 4000 ans. Après avoir écarté les hypothèses peu vraisemblables (guerres, épidémies…) parce qu'entraînant une disparition trop rapide, ils sont parvenus, après des milliers de simulations, à la conclusion qu'une très légère baisse de la fertilité des Néandertaliennes les plus jeunes suffit à entraîner la disparition de la population dans l'intervalle attendu. Il reste à examiner quels facteurs externes ont pu causer une telle baisse de fertilité. Une fois de plus, les possibilités sont légion: stress climatique et donc alimentaire, concurrence avec *H. sapiens*, perturbation des réseaux conjugaux néandertaliens… ■

S. S.



Une restitution d'artiste de l'une des jeunes femmes sur qui reposait la fragile démographie néandertalienne.

A. Degioanni *et al.*, *PLoS One*, en ligne le 29 mai 2019

MÉDECINE

ECZÉMA CHRONIQUE ET LYMPHOCYTES

L'eczéma, en particulier lié à des allergies, se redéclenche souvent sur les mêmes zones de la peau. L'équipe de Marc [illegible] recherche en infectiologie, à Lyon, vient de montrer que certaines cellules du système immunitaire, les lymphocytes mémoire, interviennent dans l'eczéma chronique.

Ces lymphocytes mémoire jouent un rôle essentiel dans l'organisme. Après une infection, une partie des lymphocytes T effecteurs, qui éliminent les agents pathogènes, se transforment en cellules mémoire, capables de remobiliser l'organisme plus rapidement en cas de nouvelle infection. Marc Vocanson et ses collègues ont montré chez la souris que de tels lymphocytes, qui persistent dans la peau cicatricielle d'anciennes lésions d'eczéma, contribuent aux récidives et à la sévérité de cette maladie. Mais les chercheurs ont aussi mis en évidence que l'activité de ces cellules est contrôlée dans le tissu, ce qui limiterait la survenue de réactions intempestives. Les lymphocytes ne sont réactivés qu'au-dessus d'un certain seuil d'allergène. ■

NOËLLE GUILLON



Pourquoi les plaques d'eczéma liées au contact avec un allergène réapparaissent-elles aux mêmes endroits?

F. Gamradt *et al.*, *J. Allergy Clin. Immunol.*, vol. 143(6), pp. 2147-2157, 2019

EN BREF

LE VOL EFFICACE DES DUOS DE PIGEONS

Grâce à la formation de vol en V, les oiseaux migrateurs économisent de l'énergie. Lucy Taylor, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont montré que les pigeons voyageurs préfèrent un vol à deux à un vol solitaire pour de tout autres raisons. Un vol commun force le duo à battre plus vite des ailes, ce qui assure probablement un meilleur contrôle, mais réclame plus d'énergie. En revanche, le duo est moins menacé par la prédation et s'oriente beaucoup mieux, ce qui réduit de 9 % le temps de vol.

UN MICROBIOTE CONTRE L'OBÉSITÉ

La bactérie *Akkermansia muciniphila* est moins présente dans le microbiote intestinal des personnes souffrant de surpoids ou de formes résistantes de diabète de type 2. Prise par voie orale en complément alimentaire, cette bactérie, soumise à une pasteurisation, est-elle sans risque ? Clara Depommier, de l'université catholique de Louvain, en Belgique, et ses collègues ont suivi une trentaine de personnes prenant ce complément alimentaire ou un placebo pendant trois mois. Les chercheurs ont constaté une amélioration du taux d'insuline et de cholestérol dans le sang, sans effets secondaires.

LE BOUCLIER DE LA CREVETTE-MANTE

Les crevettes-mantes sont capables de produire avec leurs pinces des ondes de choc dévastatrices. Elles se livrent des combats sans merci pour obtenir un refuge dans les récifs coralliens. Nicholas Yaraghi, de l'université de Californie à Riverside, et ses collègues ont découvert qu'un segment de leur queue avait évolué en conséquence : son architecture hélicoïdale résiste aux impacts en absorbant l'énergie du choc. Cette structure pourrait inspirer la conception de matériaux résistants !

ARCHEOLOGIE

SAINT LOUIS : PESTE OU SCORBUT ?

Le roi Saint Louis serait mort de la peste durant la huitième croisade, lors du siège de Tunis, en 1270. Mais Philippe Charlier, [illegible] Saint-Quentin-en-Yvelines, et son équipe soupçonnent une mauvaise traduction du terme de « pestilence » qu'il faut comprendre comme « infection ». Les récits historiques mentionnent en effet des symptômes caractéristiques du scorbut, maladie due à une carence en vitamine C. Pour vérifier leur hypothèse, les chercheurs ont étudié la mâchoire inférieure de Saint Louis, conservée dans le trésor de Notre-Dame-de-Paris. Ils ont confirmé son authenticité et ont révélé des lésions osseuses indicatrices de scorbut. Il semblerait donc que cette maladie ait gravement détérioré l'état de santé du roi, ce qui l'aurait rendu plus vulnérable à une épidémie à laquelle il aurait finalement succombé. ■

P.

P. Charlier *et al., J. Stomatol. Oral Maxillofac. Surg.*, en ligne le 8 juin 2019

SANTE PUBLIQUE

SANTÉ ET ALIMENTS ULTRATRANSFORMÉS

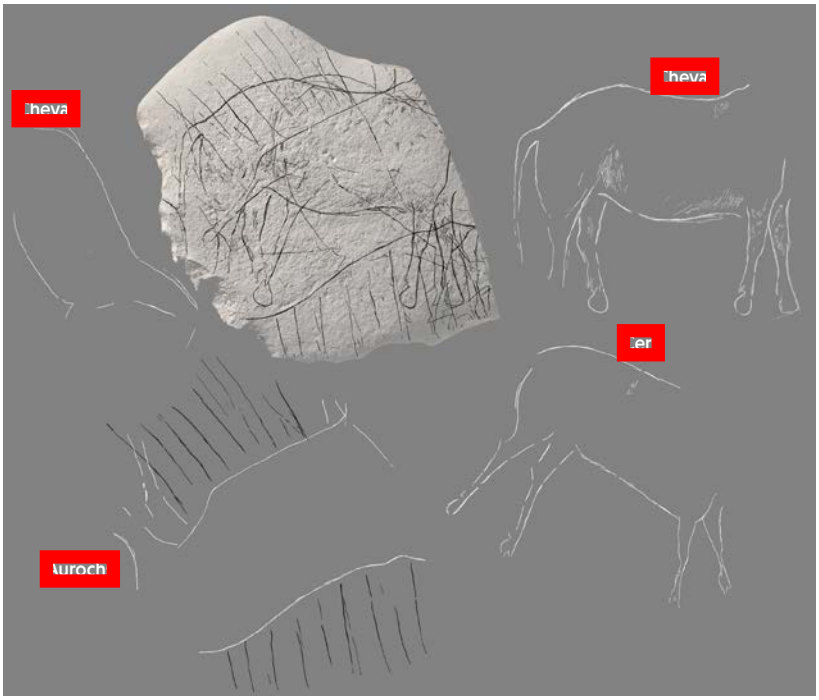
Pour diverses raisons – économiques, sociales, environnementales, médicales… –, mieux vaut éviter de consommer [illegible] préparés industriellement. Leur impact négatif sur la santé, notamment, a été confirmé par plusieurs études scientifiques. La dernière en date, réalisée par une équipe dirigée par Mathilde Touvier, de l'Inserm à Bobigny, s'est intéressée au lien entre consommation d'aliments dits ultratransformés (sodas sucrés ou édulcorés, steaks végétaux avec additifs, saucisses, soupes déshydratées, etc.) et maladies cardiovasculaires. L'étude a porté sur plus de 100 000 participants de la cohorte française NutriNet-Santé, suivis entre 2009 et 2018. Elle montre, sans toutefois prouver le lien de causalité, qu'une augmentation de 10 % de la part des aliments ultratransformés dans le régime alimentaire est associée à une augmentation de 12 % du risque de maladie cardiovasculaire. ■

MAURICE MASHAAL

S. Srour *et al., British Medical Journal*, vol. 365, article l1451, 2019

PREHISTOIRE

LA PREMIÈRE BD D'ANGOULÊME



La plaque azilienne découverte à Angoulême porte quatre dessins d'animaux superposés : un cheval, un cerf, un second cheval et un aurochs entouré de rayons.

Au début, la fouille de sauvetage menée par l'Inrap près de la gare ennuyait Jean-François Dauré, le président de la communauté de communes du Grand Angoulême. Aujourd'hui, il avoue que les découvertes qui se sont enchaînées sur ce site majeur – désormais la référence pour la période azilienne (12 000 à 9 600 ans avant le présent) ! – l'ont fasciné. La dernière, une petite plaque de 23 centimètres sur 18, datée d'environ 12 000 ans et portant des gravures d'animaux [illegible] iste » a persisté pendant l'Azilien, alors que l'on pensait que la représentation réaliste s'était achevée avec le Magdalénien (17 000 à 12 000 avant le présent).

Alors que le chantier devait s'arrêter, l'équipe de Miguel Biard, de l'Inrap, a découvert cette plaque de 450 grammes presque fortuitement dans la strate azilienne. Ce n'est qu'en la lavant avant de lui donner une cote que les chercheurs ont remarqué le dessin d'un cheval, puis un cerf, très réaliste, dessiné sous un angle de 30°, puis un second cheval, plus schématique, lui aussi décalé de 30°, et finalement, à 180° par rapport au premier cheval, un aurochs au corps entouré de rayons, motif azilien caractéristique. Selon Valérie Feruglio, du laboratoire Pacea, à Pessac, en Gironde, ce n'est pas le tableau final, peu lisible, qui comptait, mais le fait de « poser à un moment donné une représentation sur la pierre », comme si l'artiste avait voulu raconter une histoire, ou du moins illustrer un thème complet. En somme, « Angoulême est la capitale internationale de la bande dessinée depuis l'Azilien ! », résume Jean-François Dauré. De l'histoire dessinée certainement, mais pas tout à fait en bande: pendant l'Azilien, on racontait plutôt les histoires en faisant tourner les pierres à graver… ■

F. S.

Communiqué de l'Inrap du 4 juin 2019, https://bit.ly/2XpiFTJ

BIOLOGIE VÉGÉTALE

UNE DISPOSITION DES FEUILLES QUI DÉPEND DE LEUR ÂGE

Des chercheurs japonais ont mis au point une nouvelle formule qui décrit et explique la plupart des motifs d'implantation des feuilles sur les tiges de plantes.

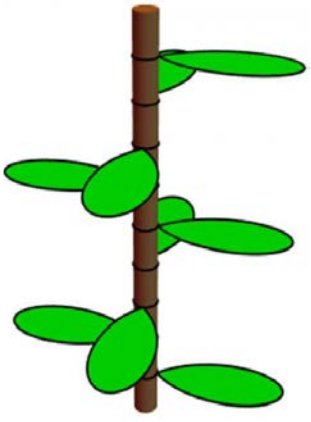
Grâce à leur diversité de formes, de couleurs, etc., les feuilles aident à identifier l'espèce à laquelle une plante appartient. Un autre indicateur est à prendre en compte : l'ordre dans lequel les feuilles s'insèrent sur la tige. Pourtant, la façon exacte par laquelle les plantes définissent l'agencement de leurs feuilles, ce que les botanistes nomment la phyllotaxie, n'est pas encore pleinement comprise. Dans une récente étude, Munetaka Sugiyama, de l'université de Tokyo, et son équipe ont proposé une nouvelle formule qui décrit l'agencement foliaire de la plupart des plantes.

Pour définir la phyllotaxie d'une plante, les botanistes mesurent l'angle qui sépare les feuilles, en remontant la tige de la feuille la plus âgée à la plus jeune. Cette méthode a permis, au fil des années, de dégager des motifs communs répandus qui se caractérisent par leur symétrie. Parmi eux, on trouve l'arrangement en intervalles de 90 degrés, en intervalles de 180 degrés, ou encore en spirales d'or (dont la progression est associée à la suite de Fibonacci, suite de nombres où chaque terme est la somme des deux précédents).

L'équipe de Munetaka Sugiyama s'est intéressée à *Orixa japonica*, un arbrisseau originaire du Japon, de la Chine et de la péninsule coréenne, qui présente une phyllotaxie particulière. En effet, les feuilles de cette plante sont séparées par une succession définie d'angles qui se répète : 180 degrés, 90 degrés, 180 degrés et 270 degrés, puis le motif se réinitialise et l'angle suivant est à nouveau de 180 degrés. Ce type d'arrangement se retrouve chez au moins quatre espèces de plantes non apparentées. Pour les botanistes, ce motif résulterait de la machinerie cellulaire à la disposition des plantes, mais comment expliquer que ce soit cette phyllotaxie qui se manifeste, plutôt qu'une autre plus fréquente ?

En 1996, Stéphane Douady et Yves Couder, physiciens à l'École normale supérieure, à Paris, ont proposé une formule mathématique qui modélise les différents arrangements foliaires. Ses diverses variables représentent la relation entre les organes des plantes ou encore la puissance de leurs signaux chimiques.





La plante *Orixa japonica (en haut)* présente une phyllotaxie rare (*schématisée ci-dessus*). Les feuilles sont disposées selon un motif angulaire qui se répète : en partant de la feuille du bas, on tourne de 180 degrés pour aller à la suivante, puis de 90 degrés, de 180 degrés, de 270 degrés, de nouveau 180 degrés, et ainsi de suite.

Cependant, la formule est insuffisante pour reproduire un motif comme celui d'*Orixa japonica*. L'un des postulats utilisés pour obtenir cette formule stipule que chaque feuille émet un signal constant qui inhibe la croissance d'autres feuilles à proximité. Dans son étude, l'équipe japonaise prend en compte le fait que la puissance de ce signal chimique n'est pas constante, mais qu'elle varie avec l'âge. Pour tester cette idée, ils ont changé dans une simulation le potentiel inhibiteur de ce signal en fonction de l'âge et ont remarqué que la formule ainsi modifiée était capable de modéliser le motif particulier d'*Orixa japonica* lorsque les feuilles les plus âgées émettaient un signal chimique inhibiteur plus puissant.

Avec cette nouvelle formule, notée EDC2 pour *expanded Douady and Couder 2*, les chercheurs ont modélisé des milliers de motifs d'arrangements foliaires et ont remarqué que l'équation produisait plus fréquemment les motifs qui sont les plus communs dans la nature, et plus rarement des cas comme celui d'*Orixa japonica*. Néanmoins, certains motifs phyllotaxiques rares échappent encore à EDC2. Les botanistes s'attellent donc désormais à concevoir une formule qui sera capable d'englober l'ensemble des motifs connus. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

T. Yonekura *et al.*, *PLoS Computational Biology*, en ligne le 6 juin 2019.

MÉDAILLE D'OR DU CNRS 2019

THOMAS EBBESEN RÉCOMPENSÉ

Professeur à l'université de Strasbourg, le physico-chimiste franco-norvégien Thomas Ebbesen vient de recevoir la médaille d'or du CNRS pour ses travaux en nanosciences. Ses activités de recherche se distinguent notamment par leur dimension interdisciplinaire.

Plusieurs de ses découvertes ont marqué les nanosciences. Par exemple, en 1992, il a développé une méthode de synthèse à grande échelle de nanotubes de carbone. En 1998, il a décrit pour la première fois la transmission extraordinaire, un phénomène optique où la lumière passe avec une grande efficacité par un réseau de trous de taille plus petite que la longueur d'onde lumineuse. Cette découverte a eu de nombreuses applications, de la chimie à l'optoélectronique. Actuellement, il s'intéresse à la physique et à la chimie de systèmes hybrides matière-lumière. Une carrière riche, à n'en pas douter. ■

S. B.

PALÉONTOLOGIE

UN ÉTRANGE LOUP À MUFLE D'OURS

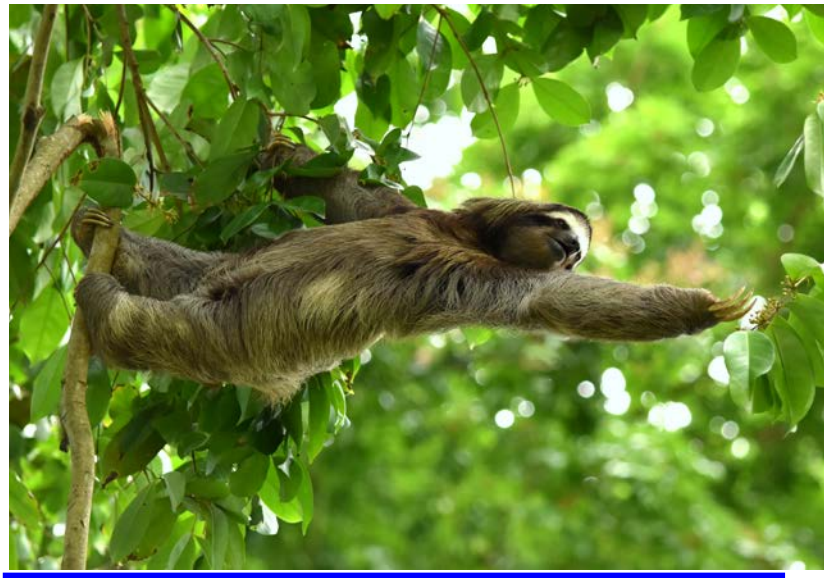
Un chasseur d'ivoire a découvert dans le pergélisol de Yakoutie une étrange tête de loup parfaitement conservée et vieille de [illegible]. Reliée à la Sibérie par un pont terrestre, il pourrait s'agir d'un spécimen de *Canis dirus*, un loup robuste, différent du loup commun, qui hantait l'Amérique au Paléolithique. Ce n'est pourtant pas ce que pense Albert Protopopov, de l'Académie des sciences de la république de Sakha (Yakoutie), qui coordonne l'étude de la trouvaille. En effet, selon Love Dalén, du Muséum d'histoire naturelle de Stockholm, chercheur qui va étudier l'ADN de l'animal, «une lignée apparentée au loup actuel (*Canis lupus*), mais distincte, vivait dans l'hémisphère Nord pendant la dernière période glaciaire. Légèrement plus gros que le loup actuel, ces animaux étaient aussi dotés de mâchoires plus robustes.» De fait, la gueule du loup yakoute découvert fait davantage penser au mufle d'un ours qu'à celui, triangulaire et pointu, d'un loup actuel. ■

S. S.

Siberian Times, 12 juin 2019, https://bit.ly/2wBbLzA

ÉVOLUTION

L'ARBRE DES PARESSEUX REVISITÉ



Les paresseux actuels, petits mammifères arboricoles, ont eu des parents géants vivant au sol et aujourd'hui disparus. L'étude de la morphologie seule ne permet pas de construire l'arbre [illegible]

Tout le monde connaît les paresseux, ces mammifères arboricoles d'Amérique du Sud qui se déplacent avec lenteur et passent le plus clair de leur temps suspendus à l'envers dans les arbres. Fait surprenant, ces petits animaux nonchalants sont apparentés à d'immenses ancêtres, de taille proche de celle des éléphants, au mode de vie terrestre, comme le paresseux géant *Megatherium*. Au vu de leurs différences anatomiques, les scientifiques ont longtemps pensé que les [illegible] de leurs lointains parents qui vivaient au sol. Cette conception est remise en question par de nouveaux résultats.

Frédéric Delsuc, de l'université de Montpellier, et ses collègues ont séquencé l'ADN mitochondrial de dix spécimens fossiles représentant six genres de paresseux terrestres aujourd'hui éteints: *Megatherium*, *Megalonyx*, *Nothrotheriops*, *Mylodon*, *Acratocnus* et *Parocnus*. Ils ont comparé ces données avec l'ADN des paresseux modernes, représentés par le genre *Choloepus* (les espèces dotées de deux doigts), et le genre *Bradypus* (les espèces à trois doigts). Résultat: les paléogénéticiens ont été surpris de découvrir que le genre *Bradypus*, que les études morphologiques considéraient comme une lignée évolutive distincte des autres paresseux, appartient en fait à un groupe réunissant des paresseux terrestres éteints, dont le géant *Megatherium*. Plus surprenant encore: les paresseux des Caraïbes *Acratocnus* et *Parocnus*, qui étaient considérés comme des proches parents des paresseux à deux doigts actuels, constituent en fait une troisième grande lignée de paresseux. Ces résultats soulignent que l'analyse de l'ADN indique parfois des arbres de parenté différents de ceux déduits uniquement à partir de critères morphologiques et anatomiques. ■

V. R.-P.

F. Delsuc *et al.*, *Current Biology*, vol. 29(12), pp. 2031-2042, 2019









ÉCOLOGIE-GÉOGRAPHIE

L'AMAZONIE : HISTOIRE, GÉOGRAPHIE, ENVIRONNEMENT

François-Michel Le Tourneau

CNRS Editions, 2019
328 pages, 27 euros

Les livres sur l'Amazonie en français sont si rares que chaque nouvelle parution est une perle. Cette somme académique est proposée par un auteur qui connaît bien l'Amazonie brésilienne pour l'avoir souvent parcourue. Après un survol de l'environnement et de l'histoire ancienne de cette région, le texte s'étend amplement sur les récents problèmes socioéconomiques, politiques ou écologiques, offrant une synthèse claire et efficace de la situation actuelle. Un véritable manuel de géographie de cette immense région équatoriale en résulte.

Y sont dévoilés les contresens les plus néfastes mis en place depuis des siècles par des politiques inadaptées de gestion, ou plutôt d'exploitation, de ce biotope dynamique mais fragile, aujourd'hui en grand péril. L'équilibre même de l'écosystème amazonien frôle son point de rupture, sans que le Brésil ne semble vouloir freiner sa politique ultralibérale désastreuse. Bien au contraire, le nouveau président Jair Bolsonaro a exprimé sa volonté d'intensifier la déforestation pour la grande joie des lobbies agroalimentaires. Des thèmes moins rebattus sont toutefois également abordés, par exemple l'exode rural accompagné d'une urbanisation exponentielle de la jungle. Les grandes villes tendent ainsi à devenir des mégapoles sylvicoles. Qui aurait soupçonné, au regard de la déforestation massive, que l'Amazonie souffrirait d'une désertion rurale?

La question: «L'Amazonie est-elle encore une "frontière"?» est posée en conclusion. On peut dire que la réponse est «oui» pour le géographe, puisqu'il s'en tient aux limites géopolitiques actuelles du Brésil, ignorant les huit autres pays amazoniens, point de vue qui n'empêchera pas cette somme de devenir une référence incontournable.

STEPHEN ROSTAIN
CNRS, LABORATOIRE ARCHÉOLOGIE DES AMÉRIQUES

NEUROSCIENCES

LE BUG HUMAIN

Sébastien Bohler

Robert Laffont, 2019
370 pages, 20 euros

Réchauffement climatique, surexploitation de la planète… Nous en avons conscience, mais pourquoi ne parvenons-nous pas à réagir? Parce que notre comportement est principalement déterminé par le striatum, non par la raison, écrit Sébastien Bohler. Voilà qui choquera bien des philosophes! Mais l'auteur s'explique. Le striatum, structure nerveuse dans le cerveau, est inondé de dopamine lorsque nous éprouvons un plaisir. La dopamine accentue le plaisir, ce qui nous incite puissamment à renouveler les expériences agréables. Celles-ci relèvent de cinq types: manger, se reproduire, acquérir du pouvoir, minimiser les efforts, nous informer sur notre environnement. Développer ces aptitudes était vital lorsque l'espèce humaine, éparse, habitait un monde de rareté, si bien que la sélection a privilégié les individus au striatum le plus performant. Celui-ci nous pousse à vouloir toujours plus. Or, depuis qu'une grande part de l'humanité vit dans l'abondance, la raison serait de résister à une telle injonction. Dans un monde de nourriture rare, manger le plus possible quand l'occasion se présentait était utile; dans un monde d'abondance, c'est néfaste. Lorsque les hommes vivaient en petits groupes, une hiérarchie était nécessaire pour organiser la chasse; aujourd'hui, la volonté d'être dominant multiplie les conflits. Tous les penchants que, au cours des âges, le striatum a récompensés, donc renforcés, jouent désormais contre l'humanité. Comme la sélection a fait survivre les individus au striatum le plus impérieux, nous sommes incapables de lui résister. C'est le «bug humain».

Notre obéissance au striatum est inconsciente. Un premier pas pour se dégager de son emprise et répondre aux défis environnementaux est donc d'amener ses injonctions à la conscience.

DIDIER NORDON
ESSAYISTE

CHIMIE

LA PRODIGIEUSE HISTOIRE DU NOM DES ÉLÉMENTS

Pierre Avenas

EDP Sciences, 2019

272 pages, 19 euros

Publié à l'occasion de l'année internationale du tableau [illegible], ce petit livre jubilatoire offre nombre d'histoires à tiroirs, et de rebondissement en rebondissement, les liens inattendus se créent. Chaque chapitre est une enquête où l'auteur décortique un nom, ses dérivés et ses successeurs. Que ce soit sur les éléments des anciens, le quinquina, le polystyrène ou l'oganesson, l'élément 118 nommé d'après son découvreur russe en 2015, les détours se font dans des rebonds élégamment introduits.

Voilà un auteur qui fait de la science sans vouloir paraître savant, mais qui jamais ne lasse le lecteur, nous dirions l'auditeur, car ce livre abondamment illustré en couleurs s'entend autant qu'il se lit. Et chacun peut apprendre en se divertissant.

Donnons quelques exemples. Ainsi l'ammoniac, le dieu Amon, la gomme ammoniaque et les ammonites ont des liens de parenté insoupçonnés: tout part d'un temple de l'Égypte ancienne à la frontière de la Lybie. Prenons encore le salpêtre ou sel de pierre utilisé pour la poudre à canon, le sal ou sel de mer de Pline l'Ancien qui a donné salaire, le nitrum ou sel de terre, qui permettait de fabriquer du verre, devenu natron dérivant de l'arabe natrūn, qui n'est autre que le carbonate de sodium.

Des alcalis obtenus par combustion comme le soda des végétaux marins ou le kali des végétaux terrestres, trois noms d'origine arabe ont donné le symbole K du potassium, dont le nom dérive de *pot ashes*, cendres du pot, et le sodium de symbole Na dont natron est l'origine. Les lutins, ou kobolds, hantant les mines ont donné le cobalt, et les nains Querg ou Zweg ont donné le quartz ou le cristal de roche... Le ruban se défile sans fin pour la joie du lecteur ou de la lectrice. Un ouvrage qui réconcilie avec les jours tristes et fait briller les jours gais!

DANIELLE FAUQUE
CHDSO, UNIVERSITÉ PARIS-SUD

SOCIOLOGIE-ENVIRONNEMENT

TOXIQUES LEGAUX

Henri Boullier

La Découverte, 2019

200 pages, 19 euros

Nous vivons dans un univers toxique. De très nombreuses [illegible] de notre quotidien, car elles entrent dans la composition des vêtements, des jouets, des cosmétiques, des produits d'entretien et de multiples produits manufacturés d'usage courant. Malgré l'adoption en 2006 du règlement européen Reach, pesticides et perturbateurs endocriniens sont toujours présents dans notre environnement immédiat. Leur légitime interdiction est en effet quasiment toujours assortie de dérogations pour «usages spécifiques» qui permettent aux industriels de fabriquer et de commercialiser des molécules dangereuses, exposant ainsi la population à des effets cancérigènes, mutagènes et à des pathologies de la reproduction.

Comment une telle situation a-t-elle pu se pérenniser? Ce livre rend compte de la minutieuse enquête d'un sociologue, portant sur trois produits choisis parmi plus de 100000 toxiques connus et présents dans notre environnement: les phtalates (DEHP), le trichloréthylène et le sulfate de nickel.

L'auteur y dresse un réquisitoire sévère à l'encontre des États, aussi bien aux États-Unis qu'en Europe. Il montre comment Reach a organisé, de fait, le maintien de ces toxiques sur le marché en déléguant la fabrique de l'expertise aux industriels eux-mêmes. La puissance publique se révèle ainsi incapable, malgré une réglementation contraignante, de s'opposer aux lobbies de la chimie, qui minimisent les risques d'exposition et exercent, grâce à des données insuffisantes, confuses et obsolètes, un chantage aux potentielles retombées économiques et sociales délétères en cas d'interdiction.

En décortiquant les ressorts de cette impuissance administrative et de ce désengagement de l'État, ce livre contribue à la remise en cause de pratiques perverses.

BERNARD SCHMITT
CERNH, LORIENT

ET AUSSI



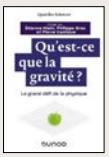
LES TEMPS GÉOLOGIQUES

Frédéric Simien

BRGM Editions, 2019

108 pages, 15 euros

Le géochimiste et responsable des éditions du BRGM nous offre un petit livre efficace d'introduction aux temps géologiques. Dans cet ouvrage sans prétention, joliment illustré, il passe en revue les grandes ères en commençant par... la naissance de l'Univers et celle du Système solaire. Un chapitre d'histoire résume la construction de l'échelle des temps géologiques. Les principaux marqueurs fauniques ou géologiques de chaque période sont présentés. La période actuelle, caractérisée par une emprise géologique humaine, est brièvement abordée à la fin de l'ouvrage.



QU'EST-CE QUE LA GRAVITÉ?

Étienne Klein, Philippe Brax et Pierre Vanhove (dir.)

Dunod, 2019

224 pages, 18,90 euros

Les directeurs de cet ouvrage ont souhaité faire le point sur les réflexions relatives à la gravitation. Ce « plus grand défi de la physique », comme le proclame le sous-titre, a suscité la théorie newtonnienne, dont la limitation a conduit à la théorie einsteinienne, en contradiction avec la théorie quantique. Puis, depuis la fin du XXe siècle, matière noire et énergie noire sont entrées dans le tableau... de notre ignorance. Car, ce que nous apprend ce livre, c'est avant tout qu'il n'y a pas encore de réponse à la question posée par son titre!



OBJETS ET STRUCTURES GÉOLOGIQUES EN TROIS DIMENSIONS

Dominique Frizon de Lamotte *et al.*

Dunod, 2019

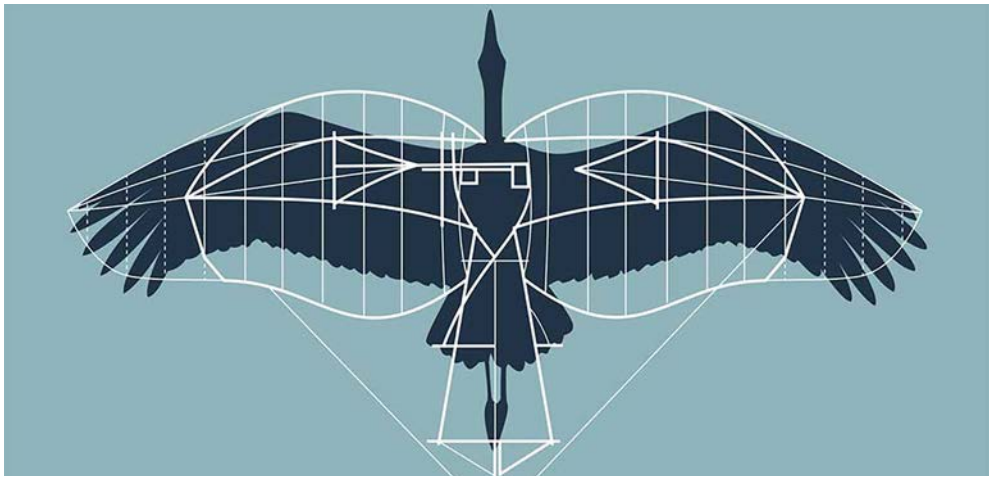
192 pages, 24 euros

Strates, couches, horizons... Dans une première acception, les structures géologiques sont bidimensionnelles. En réalité, il est question en géologie de failles, de fenêtres, de glissements, de discordance, de synclinaux, de vergence... Bref, le géologue doit savoir penser et décrire les structures qu'il rencontre ou étudie en trois dimensions. Voici un merveilleux manuel très bien illustré pour apprendre comment faire. Ses auteurs y présentent les principales structures géologiques tridimensionnelles, comment les dater et comment les décrire.

MONTBÉLIARD

JUSQU'AU 5 JANVIER 2020
Musée du château des ducs de Wurtemberg
www.montbeliard.fr

OVNI, objets volants naturellement inspirés



Chute ralentie, vol plané, vol battu: certains éléments végétaux, comme les graines de pissenlit ou d'érable, et plusieurs groupes d'animaux pratiquent l'une ou l'autre de ces formes de vol. L'homme a depuis longtemps tenté de les imiter. Ces tentatives se sont développées au XIXe siècle, et l'exposition présente, après une première partie consacrée à la diversité du vol dans la nature, des maquettes des objets volants inspirés des animaux et proposés à l'époque, comme le planeur de Derwitz ou l'*Éole* de Clément Ader.

Une troisième partie est consacrée à l'innovation bio-inspirée dans ce domaine. Les visiteurs trouveront là des exemples de réalisations actuelles, avec des prototypes de minirobots volants ne mesurant que quelques centimètres et ne pesant que quelques grammes: le drone Libellule de la société bisontine SilMach, ceux de l'entreprise allemande Festo, le XTim... ■

ROUEN

JUSQU'AU 20 OCTOBRE 2019
Muséum d'histoire naturelle, Rouen
https://museumderouen.fr

Wildlife Photographer of the year



Les plus belles images de ce célèbre concours de photographies de nature, organisé par le Muséum d'histoire naturelle de Londres, sont présentées sur plus de cent panneaux rétroéclairés – un format inédit en France.
L'exposition est également visible dans un autre musée, proche de Rouen, la Fabrique des savoirs, à Elbeuf. ■

FIGEAC (LOT)

JUSQU'AU 29 SEPTEMBRE 2019
Musée Champollion
www.musee-champollion.fr

Égypte, premières impressions



Cette exposition présente des clichés provenant d'une collection privée et pris en Égypte dans les années 1850-1880, juste après l'invention de la photographie. Ils illustrent les sites archéologiques tels qu'ils ont été découverts par les premiers archéologues. Des objets provenant des fouilles de l'époque les accompagnent. ■

ET AUSSI

Du 2 au 9 août
Fleurance (Gers)
festival-astronomie.fr

FESTIVAL D'ASTRONOMIE DE FLEURANCE

La 29e édition de ce festival désormais bien connu propose, entre maintes autres animations, un cycle de conférences sur la Lune, 50e anniversaire de la mission *Polo 11* oblige.

Jusqu'au 14 août
Espace Mendès-France, Poitiers
www.emf.fr

SAUTER, TOUTE UNE SCIENCE !

Explications, expériences ou plateformes de force font comprendre comment les basketteurs et autres grands sportifs du saut réalisent leurs prouesses.

Lundi 26 août, 17 h
Jardin du Lautaret, Villar-d'Arêne (05)
jardinalpindulautaret.fr

REPRÉSENTATIONS MATHÉMATIQUES DE LA NATURE

Marc Ohlmann, doctorant au Laboratoire d'écologie alpine, explique l'intérêt, notamment pour les politiques de conservation, de la modélisation mathématique de la biodiversité.

Jusqu'au 29 août
Abbaye de Silvacane, La Roque-d'Anthéron (13)
www.artinresearch.com

IMAGES D'AIR

Galerie d'art originale dédiée à la photographie scientifique, AiR - Art in Research (l'anglais, c'est tellement mieux...) expose dans ce beau lieu 27 tirages de superbes photos prises par des chercheurs.

Jusqu'au 8 septembre
Pavillon des sciences, Montbéliard
pavillon-sciences.com

MILLE MILLIARDS DE FOURMIS

Cette petite exposition montre comment l'anatomie, l'organisation sociale et les remarquables comportements collectifs ont assuré le succès des quelque 12 000 espèces connues de fourmis.

NÎMES

JUSQU'AU 6 OCTOBRE 2019
Musée de la Romanité
www.museedelaromanite.fr

Pompéi, un récit oublié



Le 24 août (ou octobre ?) de l'an 79, le Vésuve entrait en éruption. Quelques heures plus tard, Pompéi et Herculanum étaient ensevelis. Depuis la base navale de Misène, Pline [illegible] pour sauver les habitants de Pompéi. L'exposition revient sur cet épisode méconnu, considéré aujourd'hui comme le premier cas documenté de sauvetage de civils entrepris par une force militaire. Elle raconte le drame à travers les yeux de Pline l'Ancien, à l'aide de plus de 250 objets archéologiques, de reconstitutions, de décors, de dispositifs multimédias interactifs...

TOULOUSE

EXPOSITION SEMI-PERMANENTE
Muséum de Toulouse
www.museum.toulouse.fr



Oka Amazonie

Cette exposition fait partie [illegible] des événements organisés par le Muséum de Toulouse autour de l'Amazonie, à l'occasion de l'Année internationale des langues des peuples autochtones que l'Unesco a décrétée pour 2019. Elle présente, autour d'une soixantaine d'objets traditionnels (vanneries, poteries...), la vie des Amérindiens dans la forêt amazonienne. Une vie en relation étroite avec la nature, mais confrontée à une modernité qui met en péril les coutumes, les langues et le savoir-faire des peuples autochtones.

PARIS

JUSQU'AU 10 NOVEMBRE 2019
Fondation Cartier pour l'art contemporain
www.fondationcartier.com

Nous les arbres



Le végétal est dans l'air du temps, notamment grâce aux succès de librairie qui mettent en exergue les découvertes botaniques, comme la révélation d'une « intelligence des plantes ». En écho avec le nouveau regard porté par la science et le grand public sur le monde végétal, et en particulier les arbres, la fondation Cartier présente une exposition qui croise les regards des scientifiques et des artistes sur les arbres et leurs relations avec les humains.

L'exposition déroule trois fils narratifs : la connaissance des arbres, leur esthétique et leur dévastation. Les visiteurs pourront voir plusieurs ensembles de dessins, peintures, photographies, films et installations d'artistes de provenances variées – Amérique latine, Europe, États-Unis, Iran, communautés indigènes d'Amazonie... Certaines des œuvres présentées, comme les planches du botaniste voyageur Francis Hallé, ont pour auteurs ou coauteurs des scientifiques.

SORTIES DE TERRAIN

Dimanches d'août et septembre, 14 h
Sentheim (Haut-Rhin)
Tél. 06 47 29 16 20
www.geologie-alsace.fr

SENTIER GÉOLOGIQUE DE SENTHEIM
Excursion de près de 4 heures sur 5-6 kilomètres pour retracer 340 millions d'années d'histoire géologique d'un site d'intérêt international.

Jeudi 8 août, 14 h 30
Briouze (Orne)
Tél. 02 33 62 34 65
randonnee-normandie.com

VOLTIGE EN EAUX TROUBLES
Une balade de deux heures dans le marais du Grand Hazé, entre mare et rivière, pour découvrir les libellules et les demoiselles.

Jeudis 1, 8 et 22 août, 18 h
Saint-Michel-en-Brenne
Tél. 02 54 28 12 13
parc-naturel-brenne.fr

LA RÉSERVE DE CHÉRINE
La réserve naturelle nationale de Chérine, dans la Brenne, comporte des étangs, des prairies, des landes, des bois... Cette animation, en petit groupe de 8 personnes, offre le privilège d'y pénétrer au cœur et de rencontrer une partie de sa faune.

Samedi 24 août, à 8 h
Près de Plan-d'Aups (Var)
Tél. 04 42 20 03 83
www.cen-paca.org

SUR LA PISTE DU GUIGNARD D'EURASIE
Sur les crêtes du massif de Sainte-Baume, une sortie à la journée pour bons marcheurs à la rencontre de cet oiseau rare mais peu farouche, ainsi que d'autres membres de la gent ailée.

Samedi 24 août, le soir
Domaine de Montauger, Essonne
Tél. 01 60 91 97 34
montauger.essonne.fr

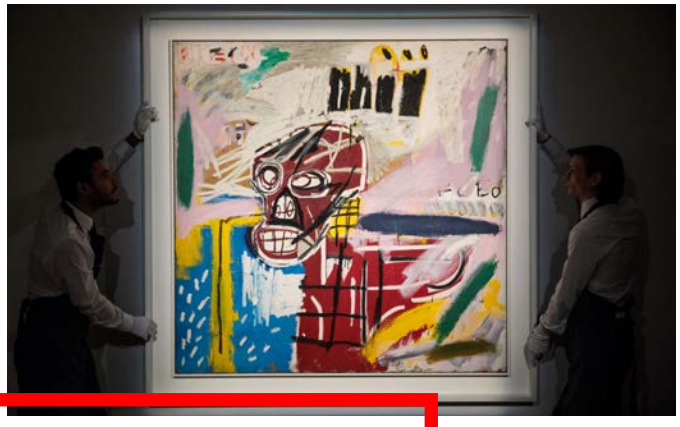
NUIT INTERNATIONALE DE LA CHAUVE-SOURIS
C'est la 23e nuit de ce nom. Comme pour les autres, c'est l'occasion de mieux connaître ces mammifères volants en allant sur le terrain.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

DES ALGORITHMES INSTINCTIFS

Les algorithmes d'apprentissage automatique suscitent une révolution en informatique. Mais il est difficile d'« expliquer » pourquoi un algorithme de ce type donne tel ou tel résultat.



Jean-Michel Basquiat, artiste new-yorkais iconique des années 1980, a laissé une œuvre unique, que l'on reconnaît en un coup d'œil sans y penser. C'est cet « instinct » que reproduisent les algorithmes d'apprentissage profond.

L'adjectif « instinctif » fait partie de ces mots du langage courant que tout le monde comprend mais que personne ne sait définir avec rigueur et qui sont, de ce fait, souvent écartés du vocabulaire [illegible] ment des algorithmes d'apprentissage automatique (*machine learning*) pourrait nous inciter à donner une seconde vie à cet adjectif.

Pour comprendre pourquoi, faisons une expérience : choisissons deux peintres, par exemple Ambrogio Lorenzetti et Jean-Michel Basquiat, et montrons à un groupe d'enfants deux tableaux de chacun de ces artistes, en leur indiquant à chaque fois qui en est l'auteur. Soumettons-leur ensuite un cinquième tableau et demandons-leur de l'attribuer à un peintre ou à l'autre. Il est probable qu'ils trouvent aussitôt la réponse. Demandons-leur ensuite comment ils ont fait ou, ce qui revient au même, de décrire la méthode qui permet d'attribuer une œuvre à un peintre ou à un autre. Il est probable qu'ils restent muets.

Cette situation est à comparer avec cette autre : demandons aux mêmes enfants d'additionner les nombres 98 et 99. Non seulement ils trouveront le résultat, mais ils sauront expliquer comment ils ont fait : ils ont ajouté le 8 et le 9, posé le 7, retenu le 1, etc.

> **Nous ne savions pas programmer un ordinateur pour qu'il distingue un chat d'un chien**

Ces deux situations sont très différentes. Dans le cas de l'opération arithmétique, la résolution du problème est consciente – les enfants savent comment ils ont fait. Dans celui de l'attribution d'un tableau, elle est inconsciente – ils ne savent pas comment ils ont fait. De plus, pour effectuer l'addition, les enfants ont manipulé des symboles : 8, 9, 7, 1… Il semble que ce ne soit pas le cas lorsque nous attribuons un tableau à un peintre – et s'il y a des symboles, nous ne savons pas lesquels.

Pendant longtemps, cette différence a été à l'origine d'un paradoxe : nous savions programmer un ordinateur pour qu'il additionne deux nombres d'un million de chiffres – ce qui, pour un être humain, est très difficile –, mais nous ignorions comment programmer un ordinateur pour qu'il distingue un chien d'un chat – ce qui, pour un être humain, est très facile.

Les algorithmes d'apprentissage automatique ont résolu ce paradoxe. Une méthode parmi d'autres pour distinguer les œuvres de Lorenzetti et de Basquiat consiste à définir une « distance » entre les images, c'est-à-dire d'associer, à chaque paire d'images, un nombre d'autant plus grand que les images sont différentes. Pour attribuer tel tableau à un peintre, il suffit de calculer sa distance à toutes les œuvres de Lorenzetti et à toutes les œuvres de Basquiat d'une base de données : si le tableau est statistiquement plus proche des œuvres de Basquiat, il a de grandes chances d'avoir été réalisé par l'artiste new-yorkais.

Ces algorithmes ne manipulent pas de symboles, sinon les chiffres qui expriment les nombres mesurant les distances, et, comme les enfants de l'expérience ci-avant, nous avons du mal à expliquer pourquoi ces programmes attribuent une œuvre à un peintre plutôt qu'à un autre. Ils apportent un argument statistique, mais ils ne sont pas en mesure de justifier leur résultat.

Nous avons sans doute besoin d'un adjectif pour qualifier ces algorithmes non symboliques et non conscients, afin de les distinguer des autres, tel l'algorithme de l'addition. Or, il existe en français un adjectif qui qualifie les impulsions souvent irraisonnées qui déterminent nos actes : l'adjectif « instinctif ». ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

l'Observatoire de Paris | UFE

L'Observatoire de Paris propose deux Diplômes d'Université:

Lumières sur l'Univers

Formation en ligne en astrophysique - Niveau (L1-M1) - Diplômante

- Cours et nombreux exercices interactifs - **Tutorat personnel individualisé** assuré par des **astrophysiciens professionnels.**
- Ouvert à tous (niveau bac minimum) : passionnés, animateurs, étudiants…
- Validation possible sous forme d'un Diplôme d'Université ou de Crédits de Licence ou de Master (ECTS)

Des parcours spécialisés adaptés à tous

Des étoiles aux planètes : niveau L1-L2
Cosmologie et Astrophysique extragalactique : niveau L2
Mécanique Céleste : niveau L3
Fondamentaux pour l'astronomie et l'astrophysique : niveau L3
Sciences Planétaires : niveau L3
Fenêtres Sur l'Univers : niveau M1
Instrumentation, chaîne de mesure et projets : niveau M1



Inscriptions 2019 - 2020 ouvertes jusqu'au 7 Septembre 2019 :
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe
Contenus visibles ici : https://media4.obspm.fr/portail/

contact.dulu@obspm.fr

Explorer et Comprendre l'Univers

Formation en présentiel ou à distance en vidéo, Diplômante

Objectifs

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

Contenu

Cours le mardi soir de 17h à 20h à Paris : Mécanique Céleste, Ondes et instruments, Histoire, Soleil, Planétologie comparée, Traitement de données, Etoiles et milieu interstellaire, Galaxies, Cosmologie, Epistémologie.
Ces cours peuvent être suivis en présentiel ou à distance en vidéo (en direct ou en différé).

Un stage de travaux pratiques est proposé en mars à l'Observatoire de Meudon (en option ; nombre de places limitées).

Un stage d'observation de 4 nuits est proposé à l'Observatoire de Haute Provence en été (en option réservé en présentiel ; nombre de places limitées).



Publics concernés

Cette formation s'adresse à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.

Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 7 septembre sur le site d'inscription en ligne :
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

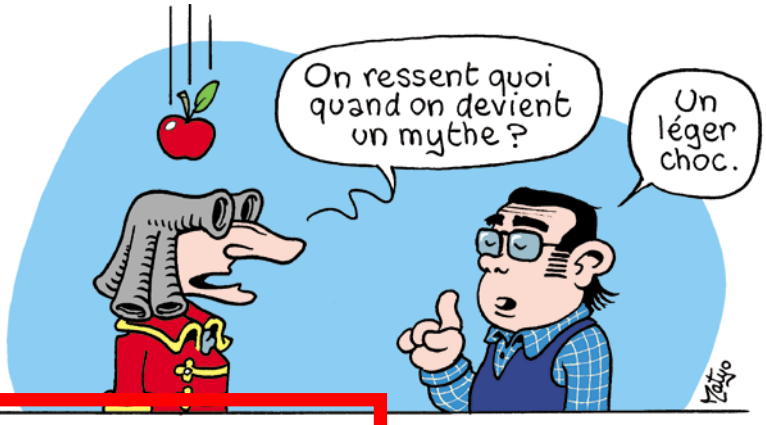
http://ufe.obspm.fr/DU/DU-en-presentiel/
contact.duecu@obspm.fr - Tél. : 01.45.07.78.87



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LE FRISSON POÉTIQUE DE LA SCIENCE

Pour que la culture scientifique soit vivante, la popularisation des découvertes devrait s'ancrer dans des récits intégrant des composantes mythiques



Qu'ont en commun des personnages aussi différents que Galilée ou Isaac Newton, Michel-Ange, Jean-Sébastien Bach, ou, plus récemment, Albert Einstein, Marie Curie et [illegible] intemporels de savoirs et de beauté, ces grandes figures ont formulé un rapport de l'homme au monde qui a marqué leur temps et le nôtre.

Qu'elle soit scientifique ou esthétique, l'universalité de leur proposition fut vécue comme une révélation de l'harmonie de «la création» ou, au contraire, comme une remise en cause des autorités spirituelles de leur temps. La gravitation, l'héliocentrisme, la molécule d'ADN composent aujourd'hui notre mémoire collective du progrès à travers une succession de récits épiques mettant en scène des figures que l'on veut héroïques, quitte à occulter leurs failles humaines.

D'où provient la force de cette narration historique et que nous apprend-elle sur notre rapport à la science? De la «grande horloge» de l'Univers à la «musique des sphères» célestes en passant par les «secrets de la vie», l'empreinte sociale de ces modèles n'est pas détachable d'éléments mystiques. Mais l'histoire aime les paradoxes. Si Newton fut lui-même profondément religieux, sa physique permit aux naturalistes d'affranchir leur discipline de la tutelle théologique en favorisant l'éclosion d'une véritable science du vivant au début du XIXe siècle: la biologie.

> Les progrès récents ont été acquis au prix d'un assèchement de nos représentations du monde

Le spirituel se loge cependant dans les détails. Dans les premiers temps de la génétique moléculaire, la réduction du vivant à ce que le médecin et philosophe Henri Atlan qualifia de «tout génétique», fut difficile à combattre: la molécule d'ADN était pensée détenir les secrets de la vie.

Henri Atlan nous a aussi enseigné que la popularisation des découvertes est toujours liée à celle d'une nouvelle représentation du monde qui, sans être nécessairement religieuse, s'inscrit dans la rationalité du mythe. Incompatible avec la méthode scientifique, l'explication par le mythe s'appuie sur une vision de l'Univers qui donne sens à l'expérience humaine. Le grand récit collectif de la science comprend ainsi des éléments du merveilleux, propres au conte, qui concourent à faire de la culture scientifique un des ciments du lien social.

Ce constat fait apparaître un paradoxe dans la culture scientifique, qui doit ainsi s'ancrer dans un imaginaire collectif pour être vivante. Or les progrès incontestables de la biomédecine, de la chirurgie robotisée ou des révolutions agricoles ont été acquis ces dernières décennies au prix d'un assèchement grandissant de nos représentations du monde.

La logique mythique alimente hélas surtout de nombreuses sectes et thèses pseudoscientifiques. Une majorité de «platistes» sont convaincus de l'harmonie entre leur croyance en une Terre plate et le texte biblique. Le regret de Gaïa, la «Terre-Mère» à l'origine d'une nature «bonne et idéale», se retrouve chez les écologistes radicaux, les antispécistes et certains mouvements antivaccins. En réponse, des recherches en médiation scientifique se multiplient ces dernières années afin d'intégrer des narrations innovantes et ludiques dans la communication scientifique et de recréer du sens. L'histoire des transplantations d'organes est l'exemple emblématique d'un grand récit scientifique jalonné par l'intérêt général, le bien commun et le civisme. Reconquérir la culture scientifique, c'est peut-être retrouver dans les avancées de la science ce frisson comparable au vers de Paul Éluard, *La Terre est bleue comme une orange*. ■

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

POUR LA SCIENCE
THEMA

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet

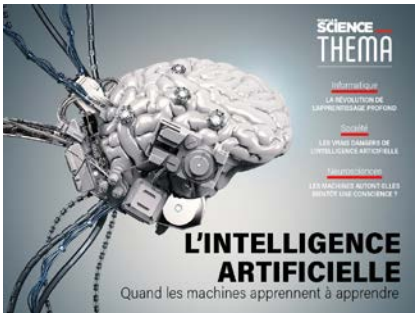
Une lecture adaptée sur écrans



3,99 €

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

Dans la collection *Thema* découvrez aussi













Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client

boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.htm

L'ESSENTIEL

- Comme les trous noirs, les trous blancs sont des solutions des équations de la relativité générale. Alors rien ne s'échappe d'un trou noir, rien ne pénètre dans un trou blanc.
- La matière qui s'est effondrée dans un trou noir ressort de l'astre lorsque celui-ci se transforme en trou blanc.
- Selon la théorie de la gravité quantique à boucles, les trous blancs seraient le destin ultime des trous noirs.
- S'il n'y a pour l'instant aucune preuve de l'existence des trous blancs, différentes pistes sont explorées en lien avec la matière noire et les rayons cosmiques.

L'AUTEUR



CARLO ROVELLI
Professeur à l'université d'Aix-Marseille, chercheur au Centre de physique théorique de Luminy

La chasse aux trous blancs

Les trous blancs ? Des sosies inversés des trous noirs qui expulsent la matière sans jamais en absorber. Ces astres correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale et pourraient être le destin ultime des trous noirs. Leur détection ouvrirait une fenêtre inédite sur la gravitation quantique.

Le 10 avril 2019, l'humanité a admiré pour la première fois une image réelle d'un trou noir : une tache noire entourée d'un anneau brillant et déformé. Grâce à ce « cliché » obtenu par le projet *Event Horizon Telescope* après traitement de données observationnelles, nous avons maintenant une preuve visible et directe de l'existence de ces objets exotiques et extrêmes.

Si l'existence des trous noirs ne fait aujourd'hui guère de doute, de nombreuses décennies ont été nécessaires pour que les physiciens en soient persuadés. Les trous noirs étaient une sorte de curiosité mathématique, une des solutions possibles des équations de la relativité générale d'Einstein, mais sans existence réelle dans l'Univers. En 1972, dans son manuel *Gravitation and Cosmology*, le futur Prix Nobel Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, qualifiait encore ces objets de « très hypothétiques ».

Les indices de leur réalité physique ont cependant fini par s'accumuler. Dans les années 1970, les radioastronomes ont détecté des sources de rayonnement électromagnétique, comme Sagittarius A* au centre de la Voie lactée, que l'on a par la suite clairement identifiées comme provenant des disques de gaz et de poussières chauffés à blanc qui s'accumulent autour des trous noirs. Deux décennies plus tard, le statut de trou noir de Sagittarius A* a été confirmé grâce à l'observation d'étoiles évoluant sur des orbites proches du trou noir, ce qui a permis d'estimer sa masse à 4 millions de masses solaires. Plus récemment, les interféromètres laser géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté des ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, dont la forme correspond exactement à celle produite quand deux trous noirs tombent l'un sur l'autre en spiralant jusqu'à fusionner.

Cette histoire de la reconnaissance des trous noirs comme constituants de l'Univers pourrait se répéter avec les trous blancs. Ces astres sont des objets aussi surprenants et exotiques que les trous noirs. Comme ces



a transformation explosive
de trous noirs en trous blancs
pourrait expliquer certaines
observations astrophysiques.

derniers, ils correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale. Pour les décrire de façon très simple, ce sont des trous noirs évoluant à l'envers : des trous noirs dont le film de la vie serait projeté en partant de la fin. Malgré cette différence, pour un observateur extérieur à un tel astre, il est difficile de distinguer un trou blanc d'un trou noir. Les deux sont massifs et dotés d'un champ gravitationnel attractif. Ils peuvent donc tous deux soutenir un disque d'accrétion et être entourés d'objets en orbite. Mais si l'on voyait le « trou » expulser une gerbe de matière, on saurait aussitôt qu'il s'agit d'un trou blanc.

La différence serait tout aussi évidente si, d'aventure, un vaisseau spatial s'approchait du bord d'un tel astre. Dans le cas du trou noir, il pourrait y pénétrer, mais il serait alors piégé par le champ gravitationnel intense, incapable d'en ressortir. Même la lumière est incapable de fuir hors d'un trou noir, d'où son nom. À l'inverse, avec un trou blanc, le vaisseau serait incapable de pénétrer dans l'astre. Lors de son approche, il rencontrerait un flot de matière sortante et il lui faudrait une énergie infinie pour pénétrer dans le trou blanc.

NES D'ÉTOILES EN FIN DE VIE

Nous savons comment des trous noirs peuvent naître. Par exemple, lorsqu'une étoile très massive arrive en fin de vie, son « carburant » s'épuise et elle s'effondre sous son propre poids. Dans une explosion gigantesque, une supernova, les couches externes de l'astre sont projetées dans le milieu interstellaire, tandis que son cœur se comprime et devient si dense qu'il forme un trou noir. Ce dernier est délimité par un « horizon » qui marque la frontière à partir de laquelle il est impossible de ressortir.

Quant aux trous blancs, à l'inverse, on imaginait difficilement comment de tels objets pouvaient se former. D'où les doutes sur leur existence. Comme Steven Weinberg pour les trous noirs, Robert Wald, de l'université de Chicago, éminent spécialiste de la relativité générale, a écrit en 1984 dans son livre *General Relativity* qu'il n'y avait pas d'arguments pour penser qu'il existe des trous blancs.

Cependant, un certain nombre de physiciens, dont je fais partie, commencent à prendre au sérieux la possibilité que les trous blancs existent réellement : ils se formeraient à la fin de la vie d'un trou noir. Ce dernier pourrait mourir et se transformer en trou blanc. La matière et l'énergie tombées dans le trou noir réémergeraient alors en sortant du trou blanc.

Cette idée vient naturellement dans le cadre de la théorie sur laquelle je travaille, la « gravitation quantique à boucles ». Et elle apporte une réponse à deux questions ouvertes que les physiciens tentent de résoudre depuis des décennies.

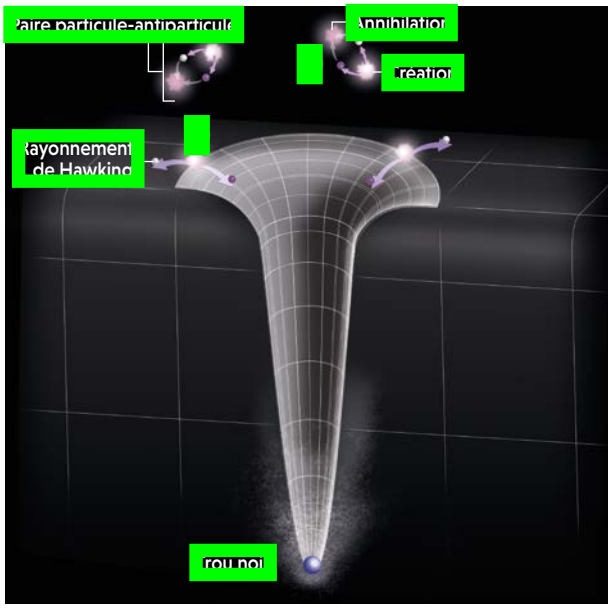
La première est : que se passe-t-il au centre d'un trou noir ? Les observations astronomiques nous révèlent que de grandes quantités de matière tombent en spirale sur un trou noir. Toute cette matière continue sa chute vers le centre de l'astre. Mais après, peut-elle s'y accumuler à l'infini ?

La deuxième question est : que se passe-t-il quand un trou noir termine sa vie ? Dans les années 1970, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement, dit de Hawking (*voir l'encadré ci-dessous*), ce qui les conduit à perdre lentement leur masse jusqu'à devenir très petits. Que se passe-t-il ensuite ? Nul ne le sait.

La relativité générale d'Einstein explique très bien le comportement observé des trous noirs, mais elle est insuffisante pour répondre à ces deux questions. Cette théorie décrit la dynamique de la matière et de l'espace-temps : la matière se déplace en fonction de la géométrie de l'espace-temps, tandis que l'espace-temps se déforme en présence de matière. L'espace-temps n'est donc plus un cadre passif où s'inscrit la réalité : sa géométrie, variable, détermine les mouvements de la matière d'une telle façon qu'on les interprète comme étant

RAYONNEMENT DE HAWKING

La physique quantique implique que le vide est en fait le siège d'une formidable activité : des paires particule-antiparticule apparaissent spontanément et s'annihilent très vite. C'est le principe d'incertitude de Heisenberg qui autorise cette violation temporaire de la conservation de l'énergie. En 1974, Stephen Hawking a remarqué que si une paire est créée juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir, une particule tombe dans le trou noir tandis que l'autre s'échappe ; elles ne peuvent donc plus s'annihiler 2. Pour un observateur lointain, le trou noir semble émettre un rayonnement. Le trou noir perd ainsi de la masse : il s'évapore



dus à une «force gravitationnelle». Par exemple, la géométrie de l'espace-temps autour de nous est courbée par la Terre, et c'est ce qui nous fait tomber vers le bas.

Einstein a écrit les équations finales de sa théorie en 1915. Quelques mois plus tard, à sa grande surprise, le physicien et mathématicien allemand Karl Schwarzschild a trouvé une solution exacte de ces équations. Cette solution décrit la géométrie de l'espace-temps autour d'un corps sphérique, comme une étoile ou la Terre. Mais il a fallu des décennies pour donner une interprétation physique complète de cette solution mathématique. Parce que si la masse du corps est concentrée dans un volume dont le rayon est plus petit qu'une valeur particulière, nommée aujourd'hui rayon de Schwarzschild, des choses très étranges se passent.

La situation s'est peu à peu clarifiée, notamment grâce au Britannique Arthur Eddington et surtout à l'Américain David Finkelstein: lorsque la masse est concentrée dans le volume défini par le rayon de Schwarzschild, on obtient un trou noir. La surface définie par le rayon de Schwarzschild est nommée l'horizon du trou noir et marque la frontière de non-retour pour tout ce qui y tombe. Ces dernières années, grâce aux ondes gravitationnelles et à l'*Event Horizon Telescope*, nous avons accumulé de nombreuses preuves empiriques que la solution de Schwarzschild décrit bien la réalité.

UNE SINGULARITÉ GÊNANTE

La solution de Schwarzschild ne nous dit pas ce qui se passe au centre du trou noir, ni ce qui se passe dans le futur lointain. La matière qui traverse l'horizon continue de tomber à l'intérieur, vers le centre de l'astre. D'après la relativité générale, elle s'y accumule de sorte que la densité devient infinie, donnant lieu à une «singularité» qui marquerait la fin de la réalité. Toute chose deviendrait néant et le temps lui-même se figerait.

Cependant, cette prédiction extrême est très certainement erronée. En effet, à l'approche du centre du trou noir, on sort du domaine de validité de la relativité générale. Dans la région centrale, la gravité est si intense que l'on ne peut plus négliger les effets de la physique quantique. Plus précisément, nous devons prendre en compte les effets quantiques sur l'espace-temps. Pour comprendre ce qui se passe au cœur du trou noir, il faut une théorie quantique de la gravitation.

On peut espérer que la prise en compte de la physique quantique dans le voisinage de la singularité fasse disparaître les grandeurs physiques infinies, et donc la singularité. L'application de la physique quantique a souvent résolu des problèmes de ce genre. Par exemple, au début du XX^{e} siècle, la description classique de l'atome suggérait que l'électron en orbite autour du noyau devait perdre de

HORIZON OU HORIZON DES ÉVÉNEMENTS ?

L'horizon des événements définit de façon rigoureuse la frontière d'un trou noir : si elle est franchie, il n'est plus possible d'échapper à la gravité du trou noir et donc d'en ressortir. Cette définition est simple et ne présente pas d'ambiguïté quand il s'agit d'un trou noir statique et sans charge électrique. Il en va autrement quand on considère des trous noirs réalistes, dotés par exemple d'un mouvement de rotation. On peut alors définir plusieurs types d'horizon.
Et si l'on parle de trous blancs, la définition doit être inversée, car la frontière à définir correspond à la limite qu'il est impossible de franchir pour pénétrer dans le trou blanc. Dans le cadre de cet article, on a choisi de parler simplement d'horizon, sans préciser.

l'énergie progressivement et finir sa trajectoire dans une spirale jusqu'à percuter le noyau atomique: cette instabilité n'aurait pas permis l'existence des atomes. La physique quantique a résolu le problème en indiquant que, dans l'atome, l'énergie de l'électron est discrétisée. Cette particule n'accède qu'à des valeurs particulières d'énergie en partant d'une valeur minimale seuil, ce qui l'empêche de tomber sur le noyau.

Que deviendrait la singularité du trou noir dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation? La réponse est loin d'être acquise, car nous n'avons pas encore une telle théorie qui fasse consensus. Les physiciens théoriciens explorent deux principales pistes. La première est la théorie des cordes, qui suppose que les particules fondamentales ne sont pas des objets ponctuels mais de petites cordes vibrantes. La seconde, celle qui nous intéresse ici, est la gravité quantique à boucles, qui stipule que l'espace-temps est lui-même soumis aux phénomènes quantiques.

Avec sa théorie de la relativité, Einstein a montré que l'espace-temps n'est pas une scène figée où évolue l'Univers, mais est lui-même un acteur de cette évolution. Non seulement l'espace-temps dicte le mouvement de la matière, mais il réagit à sa présence (en se courbant, se dilatant ou se contractant). La gravité quantique à boucles étend la vision d'Einstein à la réalité quantique du monde: les concepts quantiques qui s'appliquent aux particules s'appliquent aussi à l'espace-temps.

UN ESPACE-TEMPS QUI DEVIENT DISCRET

La gravité quantique à boucles a été développée à partir des années 1980. Les physiciens ont d'abord reformulé la relativité générale pour qu'elle ressemble à une théorie de l'électromagnétisme. L'idée est que nous connaissons une procédure qui permet de transformer une théorie classique, comme l'électromagnétisme, en une théorie quantique. Dès lors, les boucles de la nouvelle théorie sont les analogues des «lignes de force», ou lignes de Faraday, des champs électrique et magnétique. Et dans la formulation quantique des lignes de force de la gravitation, on trouve que l'espace y est discrétisé, composé d'éléments individuels, ou *quanta*, minuscules mais de taille finie.

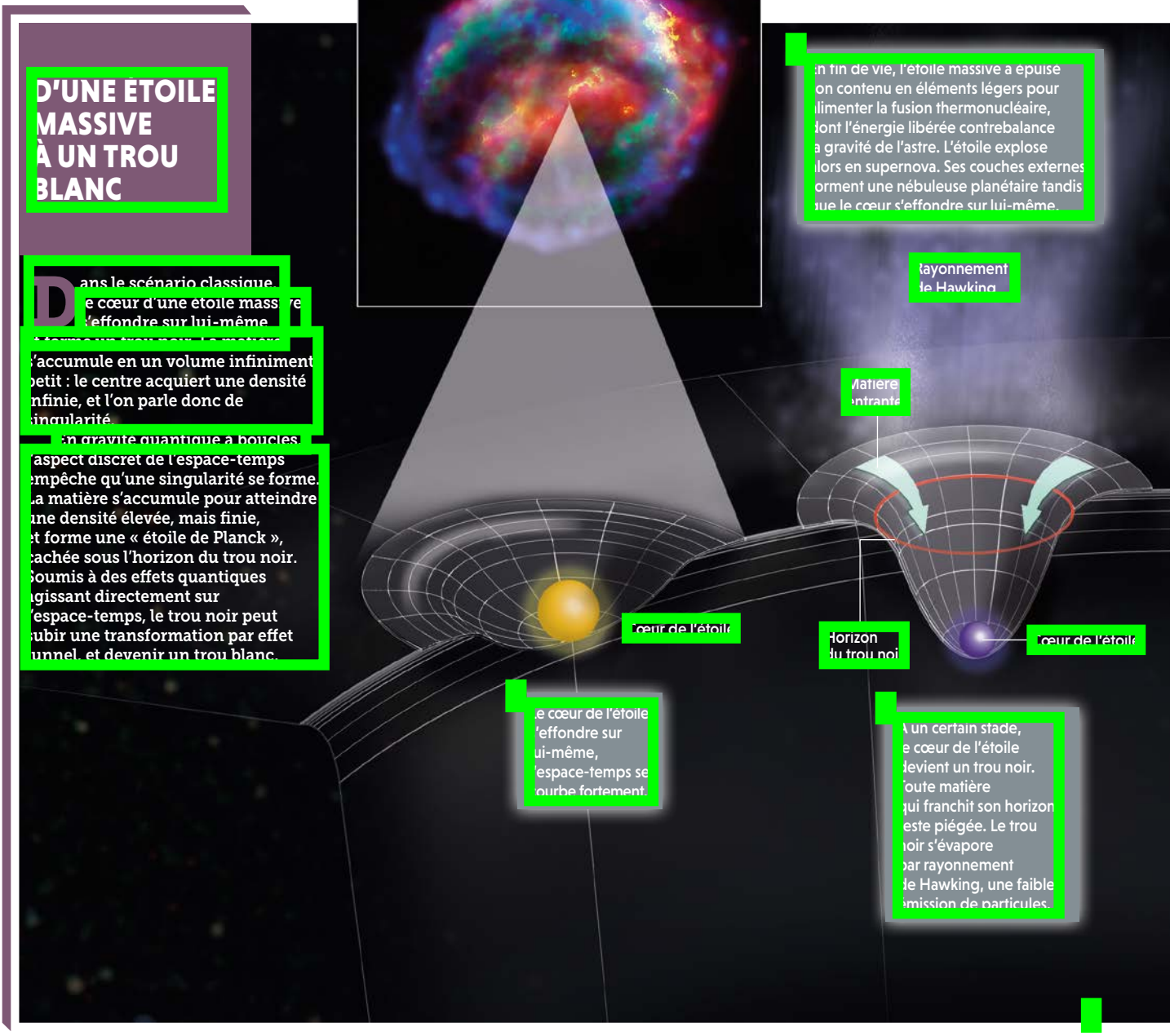
A grande échelle, la trame est tellement serrée que l'espace-temps apparaît comme un continuum, dont l'évolution est décrite par les lois de la relativité générale. Mais quand la densité d'énergie devient très élevée, comme au cœur d'un trou noir, on ne peut plus négliger la structure discrète de l'espace-temps et les prédictions de la gravité quantique à boucles diffèrent de celles de la relativité générale classique.

Cet espace-temps discrétisé a un effet direct sur le cœur du trou noir. Il n'est pas possible d'avoir une singularité, un volume infiniment petit où règne une densité infinie. En 2014, j'ai étudié avec Francesca Vidotto, aujourd'hui à l'université de Western Ontario, au Canada, la possibilité que la matière s'effondrant dans un trou noir forme un objet de taille minimale finie, où la densité est extrême mais reste finie: une «étoile de Planck». La gravité quantique exerce une pression suffisante pour empêcher que l'effondrement de la matière se poursuive et forme une singularité. La densité de l'étoile de Planck serait le maximum qu'il est physiquement possible d'atteindre.

Mais que deviendrait ensuite la matière qui continue de tomber dans le trou noir? Elle ne peut faire qu'une chose: rebondir! Ce scénario semble contredire la vision classique d'un trou noir où, par définition, tout objet ne peut que tomber vers le centre. Mais au cœur du trou noir, les effets quantiques ont une influence non seulement sur la matière, mais aussi sur l'espace-temps lui-même. La gravité quantique autorise l'espace-temps du trou noir à rebondir, la géométrie peut changer et donner lieu à une nouvelle région d'espace-temps de caractéristiques différentes de celles du trou noir.

LE FUTUR DU TROU NOIR

Avec Hal Haggard, du Bard College, aux États-Unis, nous avons montré que, contrairement à ce que l'on pensait auparavant, les équations de la relativité générale d'Einstein

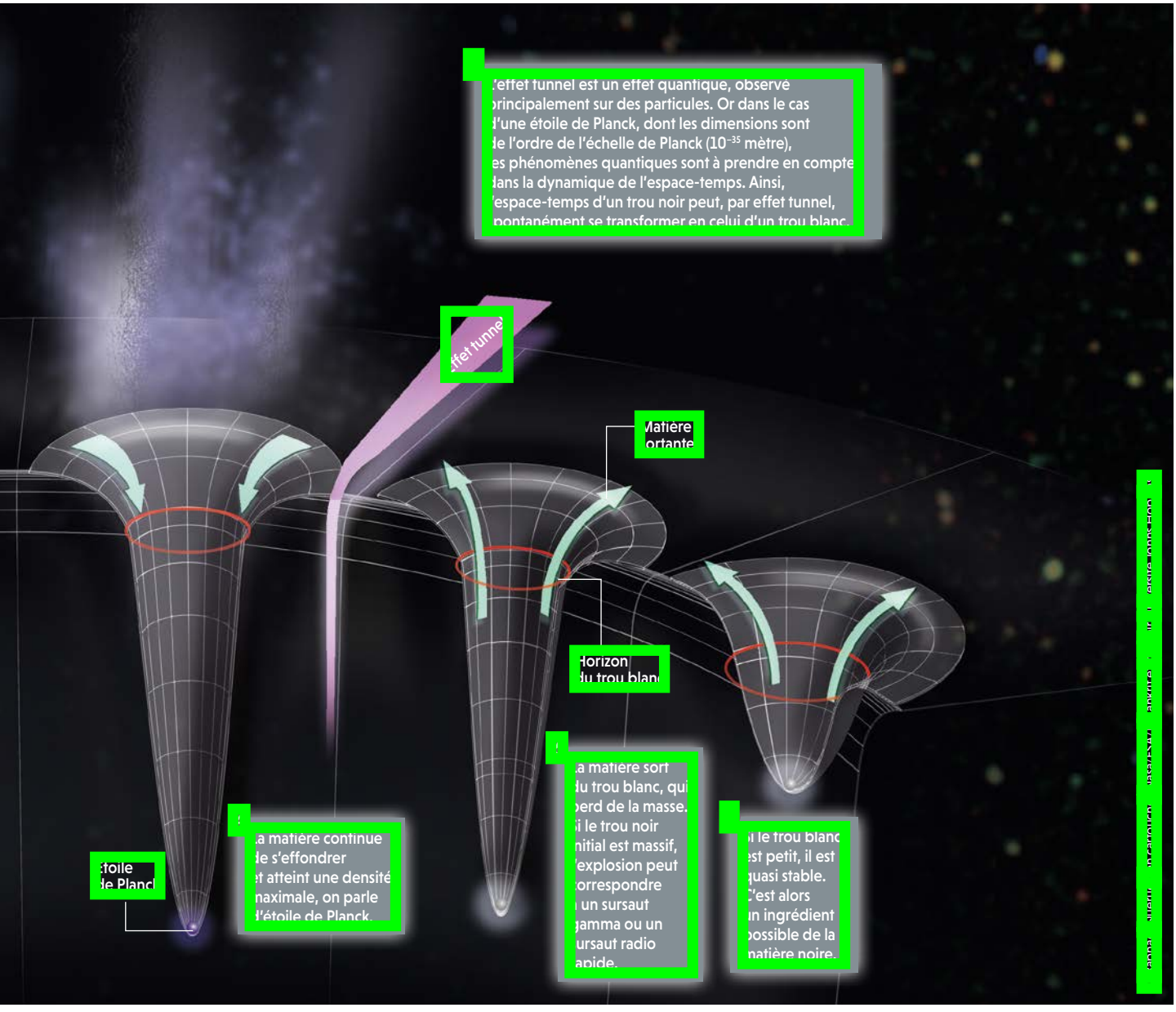


sont compatibles avec la possibilité qu'un trou noir devienne un trou blanc dans le futur, en passant par une brève phase quantique. Pour comprendre un peu plus ce qui se passe, prenons la trajectoire d'une balle qui tombe et touche le sol. Le rebond ressemble à la chute, mais visionnée à l'envers. Il en serait de même avec un trou blanc. Cet objet serait bien l'*alter ego* d'un trou noir, mais observé en remontant le temps.

Dans les années 1930, le physicien irlandais John Lighton Synge a été l'un des premiers à étudier l'intérieur d'un trou noir, même si cette notion n'était pas encore claire à l'époque. Il a montré qu'avec un petit ajustement des équations de la relativité générale, il était possible de prolonger la géométrie d'un trou noir en celle d'un trou blanc. La gravité quantique à boucles confirme que la physique quantique autorise ce petit ajustement.

Où est situé le trou blanc produit par un trou noir? Est-il très éloigné, relié au trou noir par un trou de ver dans le tissu de l'espace-temps, ou même dans un univers différent? Rien d'aussi spectaculaire. Le trou blanc reste au même endroit que le trou noir, tout simplement dans son futur. Il est difficile de se représenter comment l'espace-temps évolue à l'intérieur de l'astre lors de ce changement, mais, vu de l'extérieur, tout est simple: dans la première partie de sa vie, le trou est noir et la matière tombe dedans sans pouvoir s'en échapper; puis, dans la seconde partie, après la transition quantique, il est blanc et la matière ne peut qu'en sortir.

Concrètement, pour que cela se produise, il doit y avoir un instant où l'horizon du trou noir



devient celui d'un trou blanc. C'est la physique quantique qui permet cette transformation grâce à l'effet tunnel. Ce phénomène correspond à une brève violation des équations classiques de la physique (ici, celles de la relativité générale). Connu depuis les années 1920, l'effet tunnel permet d'expliquer, par exemple, la radioactivité alpha. Dans le noyau atomique, la particule alpha (deux protons et deux neutrons liés) ne peut *a priori* pas s'échapper du fait du potentiel nucléaire dû aux interactions forte et électromagnétique exercées par le noyau. Mais grâce à l'effet tunnel, elle peut «passer sous le mur du potentiel» et s'extraire du noyau.

En 2018, grâce à des calculs quantiques détaillés, Marios Christodoulou, Fabio D'Ambrosio, Simone Speziale et moi, à Marseille, en collaboration avec Ilya Vilensky, de l'université de Floride atlantique, Eugenio Bianchi, à l'université d'État de Pennsylvanie, et Hal Haggard ont montré que la transition du trou noir au trou blanc par effet tunnel est possible dans le cadre de la gravité quantique à boucles. En même temps, Abhay Ashtekar, de l'université d'État de Pennsylvanie, Xavier Olmedo et Parampreet Singh, de l'université d'État de Louisiane, ont montré que la transition de trou noir à trou blanc est possible au plus près du centre du trou noir. En combinant ces deux résultats avec la solution des équations d'Einstein en dehors de la région où les effets quantiques sur l'espace-temps sont importants, on obtient une description complète de ce qui peut arriver à un trou noir: la conclusion est qu'il meurt et se transforme en trou blanc.

AU BOUT DU TUNNEL, UN TROU BLANC !

Un phénomène qui dépend de l'effet tunnel prend du temps à se réaliser, car la probabilité d'occurrence est très faible. Certains éléments radioactifs, en principe instables, ont ainsi des durées de vie qui dépassent des milliers d'années. De la même façon, les trous noirs ne deviennent pas des trous blancs immédiatement. Ils ont une durée de vie très grande, et d'autant plus grande que le trou noir a une masse élevée. En effet, l'effet tunnel étant un phénomène quantique, il a plus de chance de se produire sur de petites échelles, donc sur de petits trous noirs.

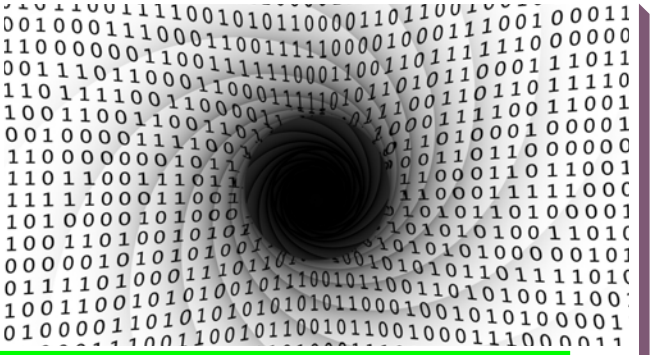
Si les trous noirs étaient décrits uniquement par les lois classiques, ils seraient

L'INFORMATION EST-ELLE CONSERVÉE PAR UN TROU NOIR ?

L'existence des trous noirs a été une confirmation éclatante de la théorie de la relativité générale, mais ces corps posent un problème quand on s'intéresse à la conservation de l'information. Un objet contient de l'information, et lorsqu'il tombe dans un trou noir, il est perdu, *a priori*, à jamais pour le reste de l'Univers car il ne peut pas ressortir du trou noir. La seule façon d'accéder à cette information est de se jeter aussi dans le trou noir, mais il sera alors impossible de renvoyer l'information vers le reste de l'Univers. Dès lors, les trous noirs semblent être des régions du cosmos où l'information se perd : elle n'est pas conservée. Mais est-ce vraiment le cas ? Les physiciens ont longtemps débattu de cette question. Le scénario du trou blanc comme destin du trou noir offre une solution simple, puisque tout ce qui tombe dans le trou noir finit par ressortir une fois que celui-ci s'est transformé en trou blanc. Cette solution est cependant confrontée à un argument qui mérite d'être analysé plus en détail. Dans les années 1970, Jacob Bekenstein et Stephen Hawking ont montré qu'un trou noir a une entropie proportionnelle à l'aire de son horizon. Cette entropie permet de définir la température du trou noir et implique que celui-ci rayonne, comme tout corps chaud. Or, d'après les travaux de Boltzmann, l'entropie est aussi une mesure de l'information. L'aire d'un trou noir pourrait donc indiquer une quantité maximale d'information qu'il peut stocker. Certains physiciens ont pris au sérieux cette relation entre aire et quantité maximale d'information, et en ont fait un principe absolu, nommé principe holographique. Or, quand le trou noir s'évapore, son aire diminue. Et dès qu'il a perdu environ la moitié de sa masse par évaporation, son horizon est trop petit pour conserver l'information présente à l'intérieur. Il y aurait alors nécessairement une perte d'information.

Mais il y a peut-être une erreur dans ce raisonnement, qui confond deux notions distinctes d'entropie : celle qui mesure l'information accessible par l'extérieur avant la transition quantique en trou blanc (information qui détermine le comportement thermodynamique du trou noir) et celle qui mesure la totalité de l'information interne. La première est donnée par l'entropie de Bekenstein et Hawking et diminue avec l'évaporation. La seconde reste grande.

L'information mesurée par l'entropie de Bekenstein et Hawking n'est pas l'information qui est entrée dans le trou noir, mais seulement l'information qui reste accessible sur sa surface. Alors que le trou noir est créé, la matière à l'intérieur continue de s'effondrer et l'espace s'étire en un long « tube ». Le volume de ce tube augmente, alors même que le rayonnement de Hawking tend à diminuer la surface de l'horizon. Le volume interne du trou noir peut conserver l'information, qui sera intégralement restituée dans l'Univers quand le trou noir deviendra blanc.



Lorsque de la matière tombe dans un trou noir, c'est de l'information qui semble perdue pour le reste de l'Univers. Pas nécessairement...

pourlascience.com/pour-imagi



DES MONSTRES GALACTIQUES

Les astronomes ont repéré dans l'Univers de nombreux trous noirs, tels que celui, supermassif, qui occupe le centre d'une galaxie active *(vue d'artiste)*. Un tel astre a peu de chance de se transformer en trou blanc du fait de sa masse très élevée. Mais si un trou noir plus léger devenait blanc, les signes de l'explosion associée seraient peut-être détectables.

éternels. Mais rien n'est éternel. Comme nous l'avons déjà évoqué, Stephen Hawking, a montré en 1974 que les trous noirs émettent un faible rayonnement. Pour un observateur lointain, le trou noir perd de la masse : il s'évapore *(voir l'encadré page 28)*.

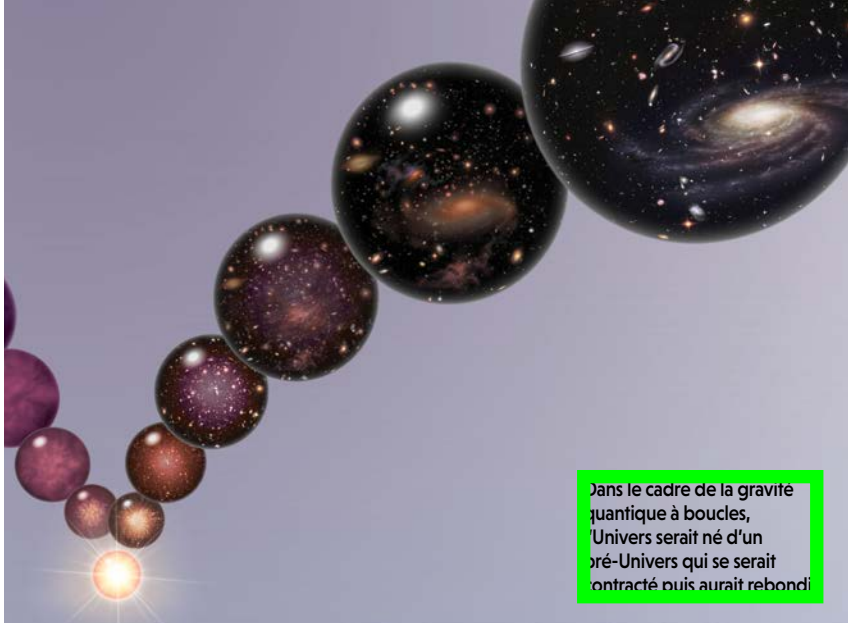
Plus le trou noir diminue de taille grâce à ce processus d'évaporation, plus la probabilité qu'il réalise la transition vers un trou blanc par effet tunnel augmente. À un certain point, cela se produit et l'espace-temps lui-même opère sa transformation par effet tunnel et sa géométrie change. Au lieu de continuer à se comporter comme le voudraient les équations de la relativité générale classique, le trou noir subit la transition et devient un trou blanc. Après, sous cette forme, il recommence à suivre les équations de la relativité générale classique.

UN PARADOXE TOUT RELATIF

Il y a un aspect *a priori* incohérent entre les deux descriptions que j'ai données de la naissance du trou blanc. D'un côté, la transition par effet tunnel prend du temps, et effectivement nous voyons dans le cosmos des trous noirs qui sont âgés de millions d'années, et probablement beaucoup plus pour certains. D'un autre côté, quand une étoile s'effondre pour former un trou noir, la matière se précipite vers le centre en moins d'une milliseconde, elle atteint le stade de l'étoile de Planck avant de rebondir, également en moins d'une milliseconde. Dans un cas, la transformation est lente, dans l'autre elle est quasi immédiate ! Comment la transformation d'un trou noir en un trou blanc peut-elle être à la fois si lente et si rapide ?

Le paradoxe n'est qu'apparent, car l'ensemble est en fait bien cohérent dans le cadre de la relativité générale, où le temps est très « flexible ». Un objet massif courbe l'espace-temps de telle façon qu'il ralentit (dilate) le temps. Par exemple, sur Terre, le temps s'écoule plus lentement au niveau de la mer qu'au sommet des montagnes. L'effet est infime sur la planète bleue, mais il devient beaucoup plus marqué près d'un trou noir. Un intervalle de temps très court à l'intérieur du trou noir est perçu comme très long pour quelqu'un en dehors. Le rebond qui se produit en quelques millisecondes est vu de l'extérieur comme au ralenti. Les trous noirs que nous observons dans le cosmos peuvent donc être des objets en train de s'effondrer et de rebondir, perçus par nous comme dans un film ralenti à l'extrême.

Ce scénario de la transformation d'un trou noir en trou blanc est intéressant à bien des égards. Il offre une vision cohérente de l'évolution des trous noirs et apporte une réponse au problème de la conservation de l'information *(voir l'encadré page ci-contre)*. Il présente >



Dans le cadre de la gravité quantique à boucles, l'Univers serait né d'un pré-Univers qui se serait contracté puis aurait rebondi

UN UNIVERS REBONDISSANT

Dans l'Univers, les galaxies s'éloignent les unes des autres, entraînées par l'expansion de l'espace-temps. Dès lors, si l'on remonte le temps, ces structures se rapprochent les unes des autres, la matière s'accumule et la densité augmente jusqu'à devenir infinie il y a 13,7 milliards d'années, ce qui marque le début de l'Univers. Mais on atteint là les limites de la relativité générale. Pour décrire correctement l'Univers à cette époque, il est nécessaire de prendre en compte les effets quantiques de l'espace-temps, ce qui nécessite une théorie quantique de la gravitation.

La théorie dite de gravité quantique à boucles est l'une des pistes explorées. Une conséquence de cette approche est que l'espace-temps est discret : il prend la forme d'un maillage discontinu avec des quanta d'espace-temps, analogues aux quanta d'énergie que s'échangent les particules en physique quantique. La taille de ces quanta est de l'ordre de la longueur de Planck, soit environ 10^{-35} mètre.

La structure discrète de l'espace-temps modifie le comportement de la gravitation. Les quanta d'espace-temps ne peuvent accumuler qu'une quantité finie d'énergie. Dès lors, quand la densité d'énergie devient trop élevée, comme au cœur d'un trou noir ou au début de l'Univers, la gravitation devient répulsive. Dans ce cadre, il n'est plus possible qu'une singularité se forme, ni dans un trou noir ni au début de l'Univers. La conséquence est aussi que l'Univers dans lequel nous vivons n'est pas apparu de rien. En 2007, Martin Bojowald, à l'université d'État de Pennsylvanie, a proposé qu'un pré-Univers se serait effondré sur lui-même. Sa densité aurait atteint la valeur critique où la gravitation devient répulsive. Le pré-Univers aurait alors rebondi pour donner naissance à notre Univers. Le Big Bang serait l'instant de ce rebond. Cette idée de rebond se retrouve dans d'autres approches quantiques de la gravitation, comme la théorie des cordes. Il est cependant très difficile de la tester, car le rebond a effacé toute trace du pré-Univers. Mais selon Carlo Rovelli et ses collègues, certains trous blancs seraient nés dans le pré-Univers et auraient traversé le rebond. Une idée très spéculative, mais qui offre une piste intéressante pour comprendre l'Univers.

aussi un parallèle intéressant avec le scénario de l'Univers en rebond également proposé dans le cadre de la gravité quantique à boucles (*voir l'encadré ci-dessus*). Mais cette théorie implique-t-elle que le ciel est truffé de trous blancs et, si oui, peut-on les voir ?

La réponse est : peut-être. Parmi les trous noirs que l'on a détectés, on distingue plusieurs catégories. La première est formée des trous noirs supermassifs (de l'ordre de 1 million de masses solaires) qui se nichent au centre des galaxies spirales. La deuxième est représentée par plusieurs trous noirs détectés grâce aux antennes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo* : ces corps ont des masses supérieures à celles des étoiles (plusieurs dizaines de fois celles du Soleil), et leur origine n'est pas encore claire. Ils auraient connu une croissance accélérée durant les millions d'années de leur existence ou ils seraient plus anciens, c'est-à-dire qu'ils seraient des trous noirs « primordiaux », nés dans les débuts tumultueux de l'Univers. La troisième catégorie de trous noirs est constituée des restes de l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie. Dans les trois cas, les trous noirs sont trop massifs pour avoir une chance de se transformer en trou blanc par effet tunnel aujourd'hui.

Seuls des trous noirs vraiment petits ont une chance non négligeable de subir cette transformation quantique. Or de tels astres pourraient bien eux aussi peupler le cosmos. Ils seraient nés peu de temps après le Big Bang, quand l'Univers était très dense, chaud et en expansion rapide. Des fluctuations de densité auraient provoqué des accumulations localisées de matière amenant à la formation de trous noirs de masses très variées. Nous n'avons pas une idée précise du nombre de ces trous noirs apparus dans les premiers instants de l'Univers, d'où la difficulté de faire des prédictions sur les populations de trous blancs.

UNE DURÉE DE VIE À GÉOMÉTRIE VARIABLE

Autre obstacle : dans le cadre de la gravité quantique à boucles, la durée de vie d'un trou noir dépend du rayonnement de Hawking et de la probabilité de transformation en trou blanc par effet tunnel. Elle n'est pas encore déterminée avec précision. Les calculs sont complexes et nécessitent des approximations pour être menés à leur terme. En l'état, nous pouvons extraire des calculs une borne supérieure sur la durée de vie quand nous prenons juste en compte l'évaporation de Hawking (le trou noir perd alors toute sa

masse par cet effet) et une borne inférieure, si l'on prend seulement en compte la probabilité de transformation par l'effet tunnel. Il est alors possible de tirer quelques conclusions.

Si la durée de vie est longue, seuls les plus petits trous noirs primordiaux, de masses comprises entre 10^7 et 10^{12} kilogrammes (ce qui correspond à des masses comprises entre celle du *Titanic* et dix fois celle du barrage des Trois-Gorges, en Chine), sont devenus blancs et seraient observables aujourd'hui. Dans ce cas, la plupart des trous blancs dans le ciel sont de taille minimale (de l'ordre de la longueur de Planck, environ 10^{-35} mètre).

DES TROUS BLANCS POUR LA MATIÈRE NOIRE ?

Ce résultat est une possibilité intéressante, dans la mesure où de tels trous blancs sont assez stables: grâce à des effets quantiques qui les empêchent de perdre toute la matière qu'ils contiennent, leur durée de vie est comparable à celle de l'Univers. Ils contribueraient alors à la matière noire, une composante de l'Univers qui représente cinq à six fois la part de la matière ordinaire, composée d'atomes. De nombreuses observations indirectes attestent de la présence de cette matière noire, mais sa nature reste à déterminer. La plupart des hypothèses envisagées, les «candidats» à la matière noire, impliquent des modifications des lois de la physique bien établies. Par exemple, elles reposent sur des théories qui prédisent l'existence de nouvelles entités, comme les particules supersymétriques; mais les expériences de détection de ces particules ont échoué à les observer, ce qui met en doute la validité de ces théories.

Le scénario de petits trous blancs (et noirs) constituant la matière noire est relativement peu contraint par les observations. Dans la région entourant le Système solaire, la densité de matière noire serait de 0,01 masse solaire par parsec cube (Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, se trouve à 1,3 parsec). Pour satisfaire à cette valeur, il suffirait d'un trou blanc par 10 000 kilomètres cubes.

Si, à l'inverse, la durée de vie des trous noirs est courte, les corps d'origine primordiale se transformant par effet tunnel actuellement auraient une masse comparable à celle d'une petite planète et exploseraient violemment, en transformant une grande partie de leur masse en rayonnement. Un tel événement émettrait de grandes quantités de rayons cosmiques sous la forme de signaux très brefs dans la gamme des microondes ou des ondes radio. Or plusieurs types de phénomènes astrophysiques transitoires restent mal compris, parmi lesquels les sursauts gamma ou les sursauts radio rapides. Diverses explications ont été proposées, mais il n'est pas impossible qu'une fraction de ces événements

Observer la naissance de trous blancs serait une façon de voir la gravité quantique en action

proviennent de la transformation d'un trou noir en trou blanc.

Il existe une signature qui nous permettrait de reconnaître les signaux venant des trous blancs: un décalage vers le rouge, ou *redshift*, «aplati». Deux phénomènes contribuent à décaler les longueurs d'onde de la lumière d'un astre lointain vers le rouge: l'expansion de l'Univers (plus la lumière vient de loin, et donc de l'Univers jeune, plus elle est décalée vers le rouge) et le décalage gravitationnel (plus l'astre qui émet le rayonnement est massif, plus sa lumière subit un décalage vers le rouge). Or les premiers trous noirs à devenir blancs étaient plus légers que ceux qui se sont transformés plus tard. En conséquence, leur décalage vers le rouge gravitationnel est moindre, mais l'effet de l'expansion est plus fort. En fin de compte, on observerait un «*redshift* aplati» que l'on pourra peut-être mettre en évidence grâce à des analyses statistiques, en accumulant de grandes quantités de données sur les rayons cosmiques ou les sursauts radio rapides.

La découverte d'une preuve de l'existence des trous blancs (dans les rayons cosmiques ou la matière noire) serait une avancée spectaculaire dans notre compréhension du monde. Observer la naissance de trous blancs serait une façon de voir la gravité quantique en action. On ouvrirait ainsi une fenêtre sur l'un des problèmes les plus importants de la physique théorique: comprendre les aspects quantiques de l'espace-temps.

Les idées récentes sur les trous blancs éclairent sous un nouveau jour de nombreux aspects de la physique théorique et de la cosmologie. Pour l'instant, l'hypothèse de la transformation de trous noirs en trous blancs n'a été que peu explorée et de nombreuses questions associées restent ouvertes. Et elles le resteront tant que nous n'aurons pas réussi à identifier un trou blanc. Espérons que cela prendra moins de temps que celui qui a été nécessaire pour nous convaincre de l'existence des trous noirs! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Ashtekar *et al.*, **Quantum transfiguration of Kruskal black holes**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, 241301, 2018.

C. Rovelli et F. Vidotto, **Small black/white hole stability and dark matter**, *Universe*, vol. 4, 127, 2018.

H. M. Haggard et C. Rovelli, **Quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 104020, 2015.

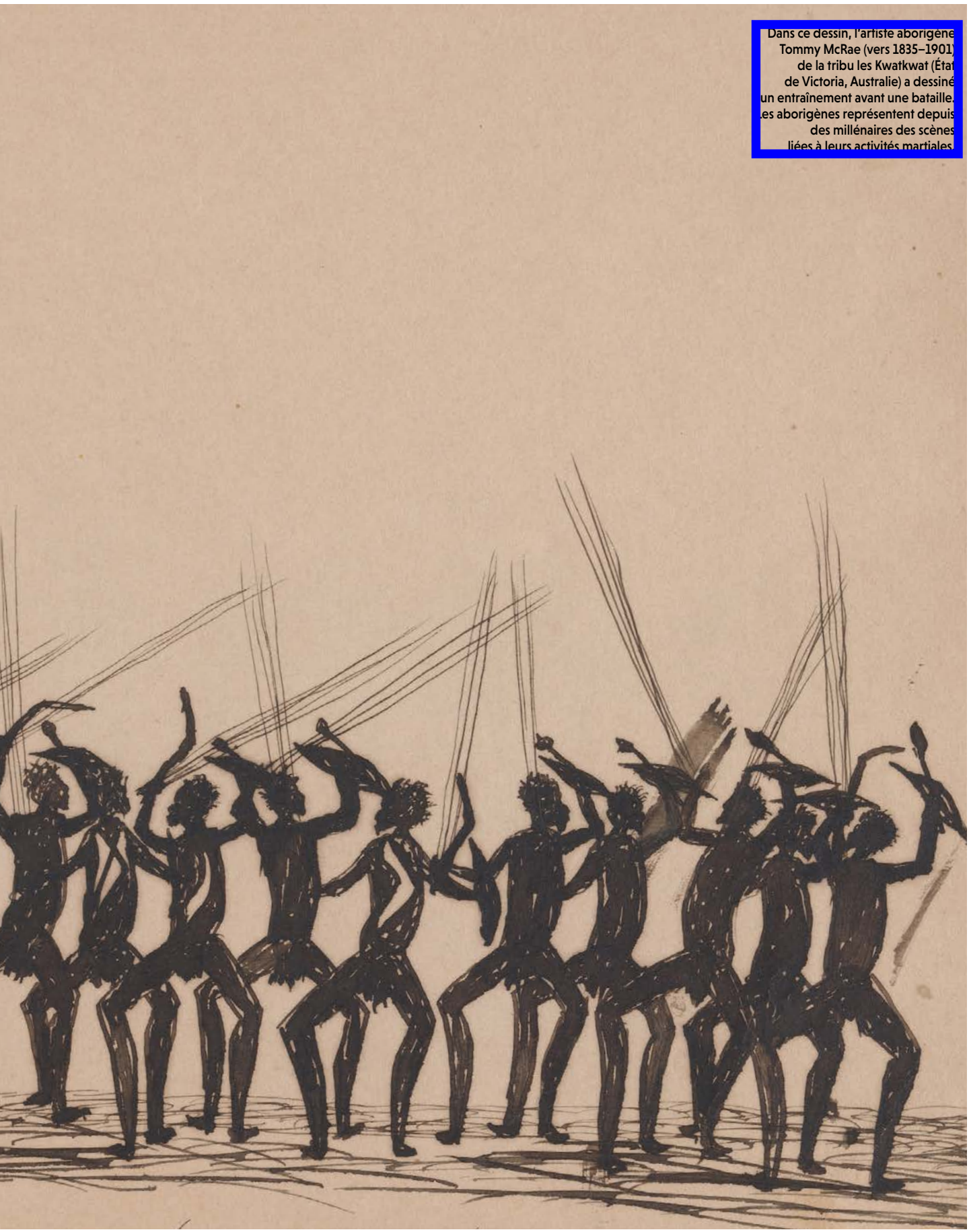
C. Rovelli et F. Vidotto, **Planck stars**, *Int. J. Mod. Phys. D*, vol. 23, 1442026, 2014.

M. Bojowald, **L'Univers rebondissant**, *Pour la Science*, n° 375, janvier 2009.

Guerre et chasseurs-cueilleurs
Le cas des Aborigènes

Le chasseur-cueilleur était pacifique, l'agriculteur-éleveur était belliqueux, dit-on souvent lorsqu'on s'interroge sur l'origine de la guerre. L'exemple des Aborigènes guerriers de l'Australie précoloniale bat en brèche cette hypothèse.





Dans ce dessin, l'artiste aborigène Tommy McRae (vers 1835–1901), de la tribu les Kwatkwat (État de Victoria, Australie) a dessiné un entraînement avant une bataille. Les aborigènes représentent depuis des millénaires des scènes liées à leurs activités martiales.

L'ESSENTIEL

- Selon une idée répandue parmi les archéologues et les anthropologues, la guerre est apparue avec l'agriculture ou la sédentarisation.
- Or les chasseurs-cueilleurs qui peuplaient l'Australie précoloniale étaient des nomades qui, s'ils n'ont jamais cultivé ni élevé d'animaux, pratiquaient la guerre.
- Le cas de ces belliqueux groupes aborigènes suggère que la guerre a fort bien pu apparaître dès le Paléolithique, bien avant les premières sociétés d'agriculteurs.

L'AUTEUR



CHRISTOPHE DARMANGEAT, économiste et anthropologue à l'université de Paris

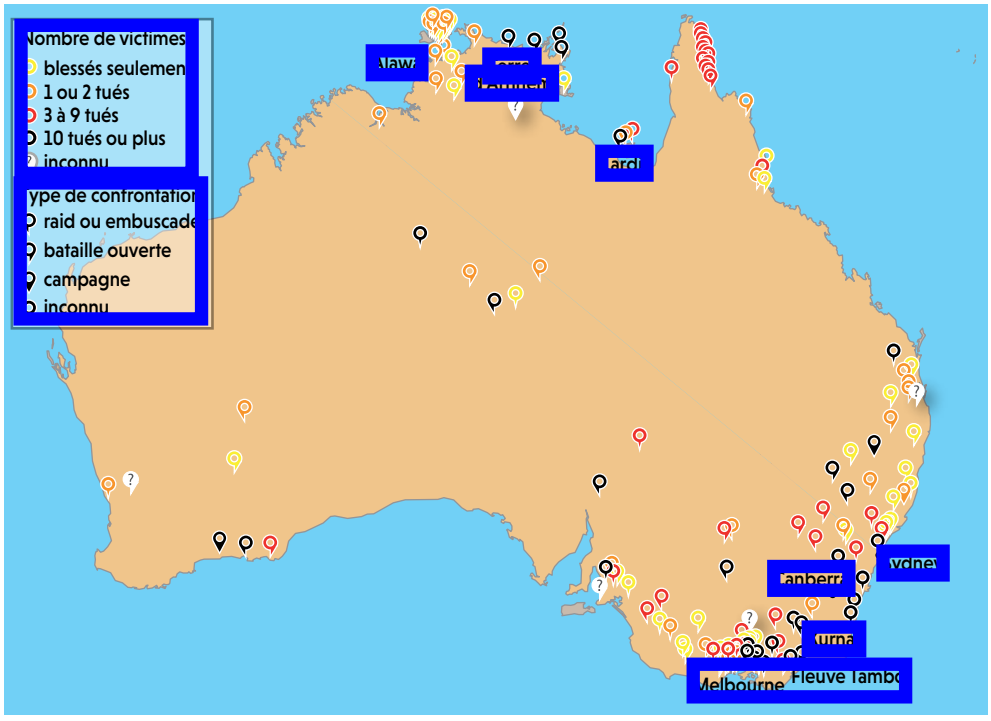
Un jour, au milieu du XIXe siècle, une tribu pénétra sans s'annoncer sur le territoire du groupe de Billy Thorpe. Sitôt la nouvelle connue, racontait cet Aborigène quelques décennies plus tard, tous les adultes valides partirent à sa rencontre « munis de leurs armes de guerre, c'est-à-dire de lances barbelées, de massues, et de boomerangs tueurs ». La bataille, « terrible », se déroula « à l'embouchure du fleuve Tambo », faisant « des deux côtés un grand nombre de morts et de blessés ». Parmi eux les propres parents de Billy Thorpe, tués dans l'affrontement.

Cet épisode guerrier entre groupes dans l'Australie précoloniale est loin de constituer un cas isolé. Or ces batailles défient l'opinion répandue parmi les paléoanthropologues selon laquelle la guerre – c'est-à-dire les conflits collectifs organisés et homicides – serait une innovation tardive. Selon ces « colombes », comme on les surnomme, les premiers affrontements vraiment meurtriers ne seraient survenus au plus tôt qu'avec les premières sociétés sédentaires, en particulier avec le Néolithique (10000 ans avant notre ère au Proche-Orient et 6000 ans avant notre ère en Europe). La guerre proprement dite – le développement du conflit intergroupe en une activité sociale spécifique – ne serait véritablement apparue qu'à l'âge du bronze (1800 à 700 ans avant notre ère en Europe). Souvent citée comme le premier instrument exclusivement destiné à tuer des humains, l'épée de Bronze est d'ailleurs souvent présentée comme preuve de « l'invention » de la guerre à cette époque.

Pour soutenir leur thèse, les colombes s'appuient sur deux arguments principaux. Le premier est tout simplement la quasi-absence de traces archéologiques de guerre au Paléolithique. Le second, qui s'articule avec le précédent, procède d'une logique sociologique : pratiquant des systèmes égalitaires de répartition des ressources, les chasseurs-cueilleurs nomades n'auraient eu aucune raison valable de se faire la guerre. Leur mobilité incessante, qui limitait leurs possessions matérielles et leur faible démographie les auraient systématiquement portés à préférer l'évitement à l'affrontement. Et surtout, toutes les motivations ordinaires des guerres modernes leur faisaient défaut : leurs rapports sociaux rendaient absurde l'idée de se battre pour accaparer richesses et territoires, pour s'emparer d'esclaves ou imposer un tribut, et même pour établir une domination politique.

Si convaincante qu'elle puisse paraître, cette argumentation se heurte à un cas ethnographique au moins, et non des moindres : celui des Aborigènes australiens. Un exemple d'autant plus intéressant qu'au moment du contact avec l'Occident, vers la fin du XVIIIe siècle, il constituait le plus vaste ensemble de chasseurs-cueilleurs qui fut jamais observé. Environ 500 tribus se partageaient alors une île-continent vaste comme les États-Unis actuels, aux climats et aux environnements variés. L'effectif que cette population représentait est mal connu, mais l'estimation moyenne est de 750000 individus. Or, avant la colonisation,

Cette riche documentation illustre sans ambages que ces sociétés n'étaient en rien pacifiques



Cette carte situe 165 épisodes d'affrontements collectifs entre Aborigènes. La plupart se sont déroulés entre 1800 et 1950, de sorte que les dates des observations reflètent l'avancée des Occidentaux. La densité des combats suggérée par cette compilation correspond globalement à celle de la population australienne précoloniale estimée.

aucune de ces tribus n'avait jamais interagi avec une société étatique. Au nord, on repère la trace de quelques contacts avec des cultivateurs (notamment un flux de gènes indiens il y a plus de 4000 ans), mais probablement trop réduits pour avoir influencé significativement les sociétés aborigènes.

DES TEMOIGNAGES DE GUERRES

Ainsi, les Aborigènes précoloniaux vivaient-ils de chasse, de pêche et de cueillette, et s'ils se livraient à certaines pratiques d'aménagement de leur territoire, ils ignoraient toute forme d'agriculture ou d'élevage. Leurs chiens (les dingos), apportés il y a 3500 ans par les migrations mélanésiennes, n'étaient qu'à moitié domestiqués. Pour le chercheur, ces sociétés ont en outre l'avantage d'avoir été relativement bien documentées malgré l'impact dévastateur de la colonisation. Qu'ils émanent d'ethnographes professionnels ou, dans les premières décennies, de voyageurs, de missionnaires, de fonctionnaires de la Couronne, de colons, voire de naufragés ou de bagnards évadés recueillis durant plusieurs années par les locaux – auxquels s'ajoutent, dans une période plus récente, de précieuses autobiographies rédigées par des Aborigènes eux-mêmes –, les témoignages se comptent par centaines.

Or, cette riche documentation illustre sans ambages qu'une partie au moins de ces sociétés n'étaient en rien pacifiques. Un recensement le plus systématique possible aboutit à 165 mentions de conflits collectifs depuis la fin du XVIIIe siècle (*voir la carte ci-dessus*). La collecte (ou, dans certains cas, l'estimation) du nombre de victimes révèle que dans 32 cas, le nombre de tués fut égal ou supérieur à 10. Bien entendu, certaines des relations de ces épisodes procèdent probablement d'une exagération, voire d'une affabulation, mais la plupart résistent bien à l'examen et leur réalité ne peut être mise en doute.

Mentionnons par exemple ces deux batailles consécutives à des déclarations de guerre en bonne et due forme, enregistrées par l'anthropologue Lloyd Warner, dans les années 1920, en Terre d'Arnhem, et qui firent respectivement 14 et 15 morts – un chiffre considérable à l'échelle de groupes ne comprenant jamais plus de quelques dizaines de personnes. Citons aussi l'épisode survenu au nord de Melbourne en 1845, rapporté par le colon et fin connaisseur des Aborigènes Edward Curr. Un jeune Aborigène très populaire étant mort en tombant d'un arbre, on accusa une tribu voisine de sorcellerie. Une troupe d'une quinzaine de vengeurs se constitua qui, après avoir voyagé plusieurs jours en territoire étranger, lança une attaque nocturne sur le campement du sorcier présumé, ne laissant aucun survivant. Les femmes et les enfants, qui avaient fui dès les premiers coups, ne furent pas épargnés : les assaillants se cachèrent et attendirent leur retour pour les exécuter eux aussi…

D'autres épisodes font état de bilans encore plus sévères : alors qu'il était enfant, en 1830, un certain Martin Lynch avait assisté à une bataille dans les environs de Sydney, où des

«assauts intermittents» durant trois jours et trois nuits avaient entraîné près d'une centaine de morts. Un autre engagement est signalé la même année dans les environs de Canberra, avec un bilan estimé à 60 tués. Quelques Aborigènes livrèrent des souvenirs d'enfance comportant des épisodes similaires – dont Billy Thorpe, mentionné au début de cet article. D'autres firent état d'épisodes guerriers fameux survenus dans un passé plus ou moins lointain pendant lesquels un héros local avait organisé la déroute d'une tribu ennemie. Notons que si ces récits vantent le courage et la ruse du brave guerrier, ils ne lui prêtent aucun pouvoir surnaturel: il ne s'agit en aucun cas de mythes.

On pourrait objecter que ces conflits, si réels soient-ils, ne représentent qu'un phénomène déclenché par les effets déstructurants de la domination occidentale sur les sociétés locales. Cette possibilité ne peut être balayée d'un revers de main, et il est probable que l'examen attentif de chacun des événements concernés révélerait peut-être un rôle direct ou indirect joué par les Européens dans le déclenchement de tel ou tel conflit. Pour autant, la réalité est que l'interdiction de la violence tribale par la loi britannique a contribué à faire cesser rapidement les affrontements. Par ailleurs, l'arrivée des virus et des bactéries européennes a tragiquement diminué le nombre des combattants...

DES GUERRES CAUSÉES PAR LA COLONISATION?

Au demeurant, si l'influence occidentale avait causé les conflits armés rapportés par les observateurs, celle-ci devrait se retrouver dans leurs motifs: on se serait battu pour des territoires devenus trop petits, pour contrôler une route commerciale, pour mettre la main sur des marchandises importées, pour devenir ou rester l'interlocuteur reconnu des nouveaux maîtres du pays. Or, on y reviendra, les données ne disent rien de tel: la lutte pour les ressources territoriales restait exceptionnelle, celle pour les richesses totalement inconnue. Les conflits éclataient pour des raisons dans lesquelles les Occidentaux et leurs biens matériels n'interviennent ni directement ni indirectement.

En outre si les affrontements avaient réellement connu un accroissement notable avec la pénétration coloniale, cette évolution – ou plutôt, ce bouleversement – des relations traditionnelles n'aurait pas manqué de se traduire dans les discours des intéressés. Dans cette hypothèse, on devrait rencontrer des témoignages rapportant que selon les anciens, tout était différent auparavant, que jadis, l'on vivait en paix, que depuis quelque temps, les choses avaient bien changé, etc. Or, pas une seule source ne va dans ce sens. Toutes présentent au contraire ces affrontements comme profondément ancrés dans les traditions, insistant sur le caractère immémorial de certaines inimitiés, et transmettant le souvenir d'épisodes martiaux si violents qu'ils avaient reconfiguré les équilibres locaux entre tribus. Du reste, le mythe fondateur de la condition humaine de la tribu des Lardil de l'île Mornington (Queensland, nord de l'Australie) affirme que la violence armée est aussi vieille que le monde lui-même, puisqu'elle vient en tête des moyens par lesquels Dewallewul, l'«être du Temps du Rêve» a condamné les hommes à mourir.



L'ARMEMENT ABORIGÈNE

Quelques pièces d'armement aborigènes, notamment ci-dessus un boomerang, des massues et le type de bouclier à poignée servant à se protéger contre les gourdins. Page de droite, d'autres massues et tout à fait à droite, le redoutable boomerang à crochet décrit par Waipuldanya qui pivote autour du bouclier qui tente de le parer

BATAILLES RÉGULÉES ET BATAILLES LIBRES

Une partie importante des combats collectifs australiens consistaient en batailles rangées encadrées par des règles strictes. Après s'être dûment invectivés, les protagonistes s'envoyaient lances et boomerangs avant de s'affronter au corps à corps. Tout en mobilisant parfois des effectifs considérables – jusqu'à environ un millier d'hommes, lorsque plusieurs clans se regroupaient –, ces batailles régulées faisaient assez peu de victimes. Aux premières blessures sérieuses, les combats s'interrompaient et les deux camps célébraient leur amitié retrouvée. Ces épisodes fréquents, spectaculaires, et aux conséquences relativement mineures (même s'ils occasionnaient



L'armement confirme que l'on pratiquait la guerre avec l'intention de tuer le plus possible

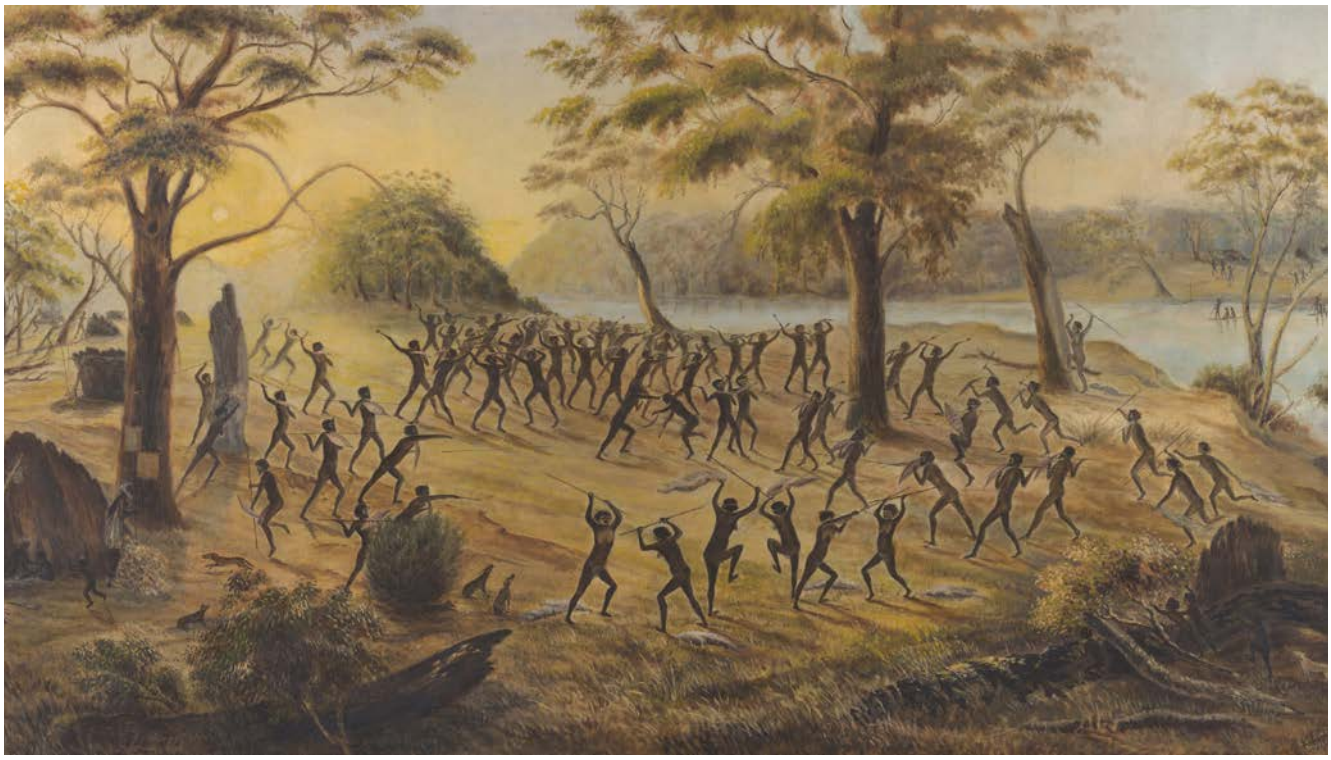
régulièrement quelques morts et invalidités permanentes) ont conduit nombre d'observateurs à affirmer que, chez les Aborigènes comme chez tant d'autres peuples, la guerre se limitait à ces combats strictement encadrés et qu'elle n'en était donc pas vraiment une.

Or, il existait aussi des circonstances où l'on cherchait à infliger les plus grandes pertes possible à l'adversaire, que ce soit en usant de surprise, lors d'un raid ou d'une embuscade, ou de manière convenue d'avance entre les deux parties. Les données confirment d'ailleurs que tandis que les batailles rangées forment l'essentiel des affrontements les moins sévères, les raids et les embuscades sont surreprésentés parmi les affrontements les plus létaux. On pratiquait donc bien la guerre avec l'intention de tuer !

Ce que confirment les armes employées : dans presque tout le continent, tout adulte possédait des boucliers. Il en existait deux types : l'un, d'une facture pour nous familière, était destiné à se protéger des projectiles, en particulier des sagaies. L'autre, plus original à nos yeux, était constitué d'une pièce de bois étroite et massive dans laquelle on sculptait une poignée. Il servait à parer des coups de massue pendant les corps à corps.

Les armes de guerre étaient aussi offensives : on réservait notamment pour le combat les lances les plus lourdes, en les dotant si possible de barbelures. Celles-ci étaient parfois sculptées à même le bois – un travail aussi long que fastidieux. Sur une autre arme, connue sous le nom de « lance de mort », on fixait le long de la pointe deux rangées de fragments de quartz ou de coquillages tranchants. En plus d'accroître la force de pénétration, cette modification rendait presque impossible l'extraction de la sagaie sans laisser dans la blessure des corps étrangers facteurs d'infections.

Les boomerangs, eux aussi, étaient adaptés pour la guerre. Les mémoires de Waipuldanya, [illegible]



Vers 1895, la peintre australienne Caroline Le Souëf représente d'après des souvenirs une « bataille aborigène sur la rivière Goulburn en 1842 ». Au premier rang, on note des femmes elles aussi en train de tenter de s'assommer à coups de gourdins...

un Aborigène de la tribu Alawa, rapportent la terreur qu'inspiraient les modèles à crochet utilisés par leurs ennemis traditionnels: toute tentative de parer ces projectiles augmentait leur vitesse de rotation et aggravait les blessures qu'ils provoquaient.

Construites à partir de matières organiques, toutes ces armes n'apparaissent presque jamais dans les fouilles archéologiques. Même lorsque c'est le cas, on peut tout au plus inférer qu'elles servaient au combat; mais, faute de charniers collectifs – et s'agissant de chasseurs-cueilleurs mobiles, de tels charniers sont hautement improbables –, leur nature exacte, en particulier le fait qu'elles servaient dans d'authentiques guerres, est impossible à prouver.

LES MOTIFS DES GUERRES

Si la guerre existait chez les Aborigènes précoloniaux mais ni pour des objectifs de pillage, ni de mise en sujétion, ni de mainmise sur des ressources territoriales, quels étaient ses motifs ? Les données indiquent sans ambiguïté la cause la plus fréquente: les droits sur les femmes. Rien d'étonnant compte tenu de l'importance que ces sociétés attachaient aux prérogatives liées au mariage. On ne trouve aucune mention d'expéditions collectives pour voler des épouses, mais lorsqu'un homme estimait que ses droits matrimoniaux avaient été lésés – ce qui était loin d'être rare! –, une escalade prenant un tour collectif s'ensuivait souvent.

Autre motif des conflits : la vengeance contre un meurtre réel ou supposé. Les Aborigènes ne considéraient en effet que peu de morts comme naturelles, et attribuaient facilement un décès à une action maléfique appelant à une rétorsion.

La guerre australienne se menait donc pour des motifs totalement étrangers à ceux du monde de la richesse, des inégalités économiques et de l'exploitation du travail humain. Elle existait surtout, voire uniquement, comme un prolongement de la justice.

Ainsi qu'on l'a vu, il ne s'agissait nullement d'un phénomène marginal ou anecdotique. Elle se nourrissait d'un sentiment général de profonde méfiance et d'hostilité à l'égard des groupes considérés comme ennemis – et toute tribu inconnue ou lointaine tombait invariablement dans cette catégorie. L'anthropologue anglais Lorimer Fison, l'un des meilleurs connaisseurs des Aborigènes, pouvait ainsi écrire au XIXe siècle que pour un Kurnai, tous les membres des tribus voisines, rassemblés sous le vocable dévalorisant de « Brajerak » (l'équivalent de notre « sauvage ») ne méritaient que de passer de vie à trépas: « Les éliminer chaque fois que l'occasion s'en présentait était un acte méritoire, et ils ne laissaient jamais une occasion se perdre. »

Dans quelle mesure pareil bellicisme est-il un trait commun ou, au contraire, exceptionnel parmi les chasseurs-cueilleurs vivant dans des sociétés sans richesses? Qu'en était-il en ce qui concerne les chasseurs-cueilleurs du Paléolithique? Autant de questions anciennes que le cas des Aborigènes australiens pousse à réenvisager. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Darmangeat, **Vanished wars of Australia : the archeological invisibility of aboriginal collective conflicts**, *J. of Arch. Method and Theory*, en ligne le 24 mai 2019.

C. Pardoe, **Conflict and territoriality in aboriginal Australia : evidence from biology and ethnography**, *Violence and Warfare among Hunter-Gatherers*, Walnut Creek, Left Coast Press, pp. 112-132, 2014.

W. Lloyd Warner, **A black civilization ; a social study of an Australian tribe**, Harper Torchbooks, 1969.

Pour retrouver en ligne la carte des conflits : https://cdarmangeat.ghes.univ-paris-diderot.fr/australia/wars-map.html

franceculture.fr/
@Franceculture



Un été en Antarctique

PAR NICOLAS MARTIN
7H25 - 17H55

Carnet de voyage
avec les hivernants
de la base Dumont d'Urville
en Terre Adélie

france culture

L'esprit d'ouverture.

Réécoutez, podcastez
sur franceculture.fr

L'ESSENTIEL

- Comprendre la vision est l'un des grands défis des neurosciences. Un aspect clé de ce problème concerne la façon dont le cerveau identifie les visages, qui ont une grande importance sociale.
- Les neurones appartenant à de petites régions du cortex cérébral, nommées zones faciales, sont dédiés à la reconnaissance des visages.
- La découverte du système de zones faciales a été le prélude à celle des opérations effectuées par le cerveau pour identifier les visages.
- Ce code neuronal, mis en évidence chez le singe, servira peut-être de pierre de Rosette pour la représentation d'autres objets que les visages.

LES AUTEURS



DORIS Y. TSAO
professeure de biologie à l'institut de technologie de Californie (Caltech), et chercheuse à l'institut médical Howard-Hughes

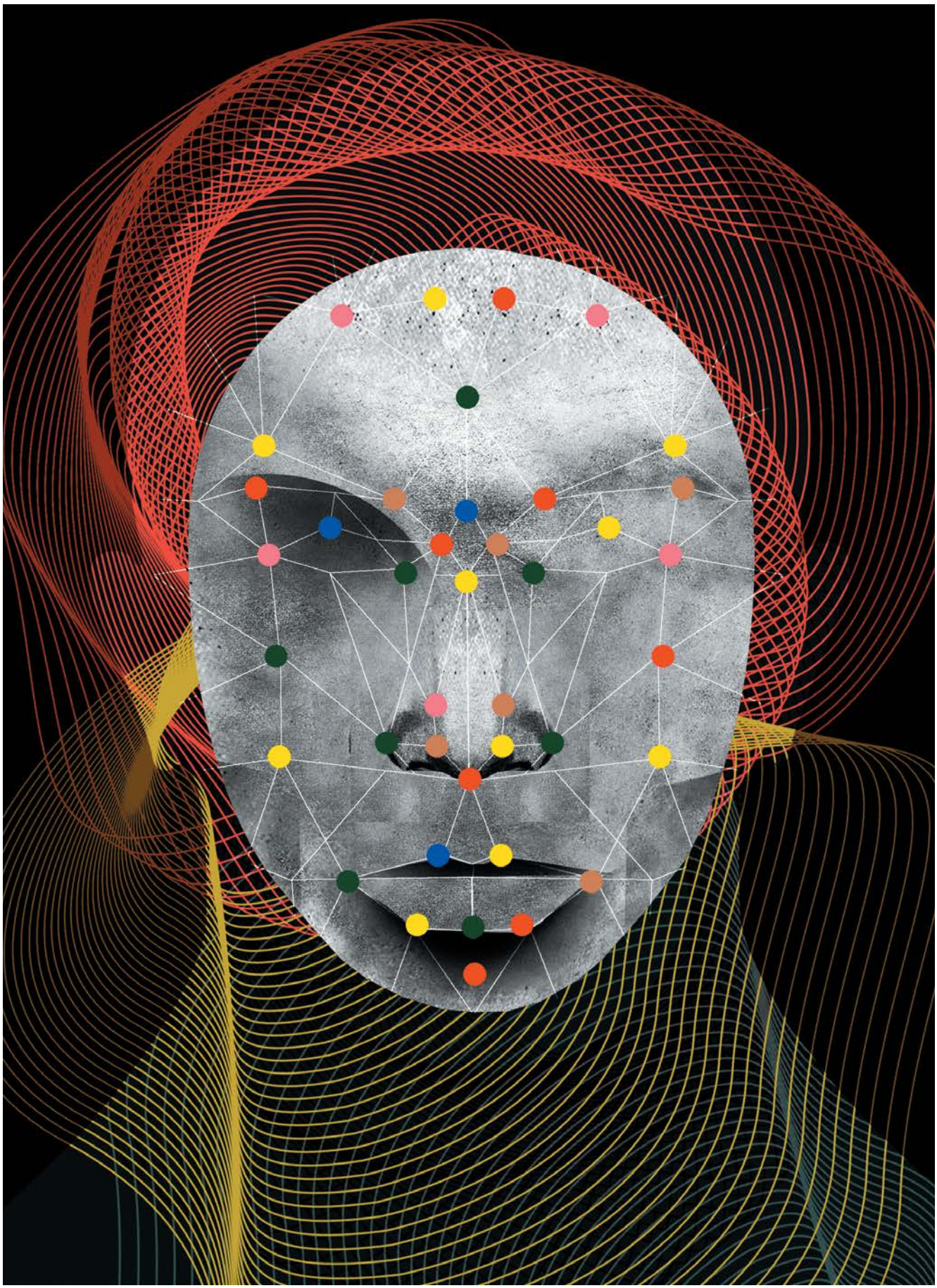
Comment le cerveau code les visages

Nous repérons et distinguons très facilement des milliers de visages. Comment notre cerveau réussit-il cet exploit ? L'étude de l'activité neuronale chez le singe suggère que cette étonnante faculté repose sur des opérations assez simples

Un jour, au lycée, j'ai découvert la notion de densité de courbes lors d'un cours d'introduction au calcul différentiel. Une simple paire d'équations différentielles qui modélisent l'interaction entre la population d'un prédateur et celle d'une proie, peut donner lieu à une infinité de courbes fermées (imaginez par exemple une infinité de cercles concentriques nichés les uns dans les autres, comme sur une cible). De plus, la densité de ces courbes sur le plan varie de point en point.

Cela m'a semblé très étrange. Je pouvais facilement imaginer un nombre fini de courbes qui se rapprochent ou s'écartent. Mais comment une infinité de courbes peut-elle être plus dense à un endroit et moins dense à un autre ? J'ai vite appris qu'il existe différents types d'infini, aux propriétés paradoxales, comme avec l'« hôtel de Hilbert » (dont toutes les chambres sont occupées, mais qui peut toujours héberger de nouveaux clients) ou avec le paradoxe de Banach-Tarski (on peut diviser une boule en cinq morceaux qui, réarrangés, donnent deux boules ayant chacune le même volume que l'originale). J'ai passé des heures à me pencher sur les démonstrations de ces propriétés. Je les ai finalement acceptées comme une magie symbolique sans conséquences réelles, mais ma curiosité était piquée.

Plus tard, étudiante à l'institut de technologie de Californie (Caltech), j'ai pris connaissance des expériences de David Hubel et Torsten Wiesel (lauréats du Nobel en 1981) et de leur découverte historique sur la façon dont le cortex visuel primaire, une aire du cerveau, extrait des contours à partir d'images transmises par les yeux. Je me suis rendu compte que ce qui m'avait réellement mystifiée au lycée, c'était le fait d'essayer d'*imaginer* différentes densités d'infini. Contrairement aux courbes mathématiques que j'évoquais plus haut, les contours décrits par Hubel et Wiesel résultent d'un traitement par les neurones de la vision et existent donc bel et bien dans le cerveau. J'ai ainsi acquis la conviction que la neurobiologie de la vision était un moyen de comprendre comment on perçoit consciemment une courbe.



Captivée par ce défi, j'ai entrepris de découvrir comment les profils d'activité électrique dans le cerveau codent la perception d'objets visuels – pas seulement des lignes et des courbes, mais aussi des objets difficiles à définir tels que des visages. Pour ce faire, il fallait repérer les régions du cerveau dédiées à la reconnaissance faciale et déchiffrer leur code neuronal, c'est-à-dire les profils d'impulsions électriques qui nous permettent d'identifier les personnes de notre entourage.

Cette quête a débuté en 2002 à l'université Harvard, où j'ai étudié le mécanisme de la vision en relief, qui exploite les différences entre les images fournies par les deux yeux. Un jour, je suis tombée sur un article de Nancy Kanwisher, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), et de ses collègues; cet article relatait la découverte d'une région du cerveau humain qui réagit beaucoup plus fortement aux images de visages qu'aux images de tout autre objet, lors d'enregistrements de l'activité cérébrale en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Cela me semblait bizarre. La notion de zone spécifiquement consacrée au traitement des visages semblait trop simple pour être vraie.

DES ZONES DU CERVEAU DÉDIÉES AUX VISAGES

Au cours de mes travaux de doctorat, j'avais utilisé l'IRMf sur des singes pour identifier les zones activées par la perception du relief. J'ai décidé de montrer des images de visages ainsi que d'autres objets à un singe. En comparant l'activité du cerveau du singe en réaction aux différentes images, j'ai repéré plusieurs zones du lobe temporal (la zone située sous les tempes), en particulier dans une région nommée cortex inférotemporal (IT), qui s'activaient seulement à la vue de visages. Au début des années 1970, Charles Gross, pionnier dans le domaine de la vision, avait découvert des neurones spécifiques des visages dans le cortex IT des macaques. D'autres travaux ont par la suite montré que ces cellules ne se répartissaient pas au hasard dans le cortex IT, mais se concentraient dans certaines sous-régions.

Après avoir publié, en 2006, une telle étude effectuée par IRMf, on m'a invitée à donner une conférence là-dessus, dans le cadre d'une candidature à un poste de professeur à Caltech. Cette candidature n'a pas abouti. L'IRMf, qui mesure localement le flux sanguin, suscitait à l'époque beaucoup de scepticisme. On faisait valoir que le fait de montrer une augmentation du flux sanguin dans une zone cérébrale lorsqu'un sujet regarde des visages est bien loin de clarifier ce que les neurones de cette zone codent vraiment, car la relation entre le flux sanguin et l'activité électrique n'est pas claire. Peut-être était-ce simplement par hasard que ces zones contenaient un nombre légèrement plus grand de neurones sensibles aux visages?

Comme j'avais réalisé l'expérience d'imagerie sur le singe, je pouvais directement répondre à cette préoccupation en insérant une électrode dans une zone identifiée par IRMf et en déterminant quelles images déclenchent le plus efficacement les neurones de cette région. J'ai effectué cette expérience avec Winrich Freiwald, alors postdoctorant dans le laboratoire de Margaret Livingstone à Harvard, où j'avais été doctorante. Nous avons présenté des visages et d'autres objets à un singe. Une électrode enregistrait l'activité électrique de neurones individuels; ces signaux électriques étaient amplifiés, puis convertis en un signal sonore pour suivre les réponses en temps réel.

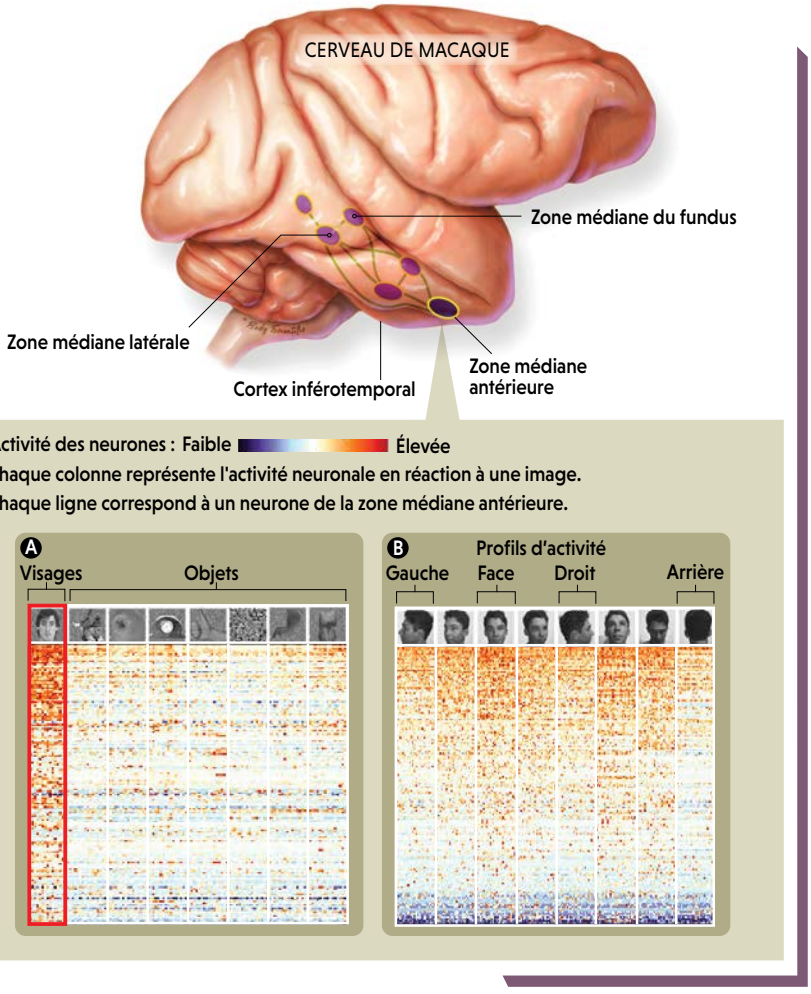
Cette expérience a révélé un résultat étonnant: presque toutes les cellules de la zone identifiée par IRMf étaient dédiées au traitement des visages. Je me souviens de l'enthousiasme suscité par notre premier enregistrement, en entendant le «pop» que faisait, l'une après l'autre, chaque cellule réagissant fortement aux visages et très peu aux autres objets. Nous avons senti que nous tenions là quelque chose d'important, un morceau de cortex susceptible de révéler comment le cerveau code les objets visuels.

Je me souviens aussi d'avoir été surprise. Je m'étais attendue à ce que la «zone faciale» contienne des cellules réagissant sélectivement à des individus particuliers, de façon analogue aux cellules d'orientation du cortex visuel primaire qui répondent chacune à une orientation particulière d'un bord dans une image. En fait, plusieurs études bien connues avaient suggéré que des neurones individuels peuvent être remarquablement sélectifs pour les visages de personnes familières. Or, au contraire, chaque cellule semblait s'activer fortement pour presque tous les visages.

Plusieurs zones du cortex inférotemporal s'activent à la vue d'un visage

Au cours de ces premières expériences, j'ai découvert que les cellules réagissaient non seulement aux visages d'humains et de singes, mais également à des dessins très simplifiés de visages.

OÙ SONT LES DÉTECTEURS DE VISAGE ?



Un ensemble de six nœuds dans le cortex inférotemporal (IT) des deux hémisphères cérébraux est spécialisé dans la perception des visages. Ces « zones faciales » fonctionnent comme une chaîne de montage : dans les zones médiane latérale et médiane du fundus, un neurone peut s'activer lorsque les visages sont vus de face ; un autre pourrait s'activer au vu de visages tournés vers la droite. À la fin de la chaîne de montage, dans la zone médiane antérieure, les différentes vues sont rassemblées. Les neurones de cette zone s'activent à la vue du visage d'un individu particulier, que la vue soit de face ou de côté. Ci-contre sont montrés les profils d'activation d'une zone faciale chez un singe. L'activité est intense à la vue d'un visage, mais pas d'autres objets (A), et les profils d'activité varient selon l'angle de vue du visage (B).

J'ai alors décidé de créer des dessins simples de visages dotés de 19 caractéristiques qui semblaient pertinentes pour définir l'identité d'un visage, par exemple la distance entre les yeux, le rapport hauteur/largeur du visage, la hauteur de la bouche, caractéristiques que nous faisions varier. Chaque cellule répondait à la plupart des visages, mais pas exactement avec la même fréquence d'activation pour tous. Au lieu de cela, leur réponse variait de façon systématique : il y avait une réponse minimale pour une caractéristique extrême (la plus petite distance entre les yeux, par exemple) et une réponse maximale pour l'extrême opposé (le plus grand écart des yeux) avec des réponses intermédiaires pour les valeurs médianes.

J'ai à nouveau été invitée à donner une conférence à Caltech. Cette fois, j'avais plus à offrir que des images d'IRMf. Avec les nouveaux résultats d'enregistrements monocellulaires, il était clair pour tout le monde que ces zones faciales étaient réelles et jouaient probablement un rôle important dans la reconnaissance faciale. De plus, comprendre leurs processus neuronaux sous-jacents semblait être un moyen d'en apprendre plus sur la question plus générale de la manière dont le cerveau représente les objets visuels. Cette fois, j'ai décroché le poste.

À Caltech, mes collègues et moi avons approfondi la question de savoir comment ces cellules faciales détectent les visages. Nous nous sommes inspirés d'un article de Pawan Sinha, spécialiste de la vision et des neurosciences computationnelles au MIT, qui suggère qu'il est possible de distinguer les visages en se fiant aux relations particulières de contraste entre différentes régions du visage (si la région du front est plus lumineuse que la région de la bouche, par exemple). Pawan Sinha proposait un moyen astucieux de déterminer quels rapports de contraste utiliser pour reconnaître un visage : ils doivent être insensibles aux changements d'éclairage. Par exemple, « l'œil gauche plus sombre que le nez » est un trait utile pour détecter un visage, car peu importe la direction de l'éclairage : l'œil gauche est toujours plus foncé que le nez.

LE RÔLE CLÉ DES CONTRASTES

Sur le plan théorique, cette idée fournit un mécanisme simple et élégant de reconnaissance faciale, et nous nous sommes demandé si les cellules faciales l'utilisaient. En mesurant la réponse de ces neurones à des visages dans lesquels la luminosité variait selon les régions, nous avons constaté que les cellules avaient

souvent une préférence marquée pour un contraste particulier.

À notre grande surprise, presque toutes les cellules avaient les mêmes préférences de contraste (une seule cellule enregistrée préférait la polarité opposée). De plus, les caractéristiques préférées étaient précisément celles identifiées par Pawan Sinha comme étant insensibles aux changements d'éclairage. L'expérience a donc confirmé que les cellules faciales utilisent des relations de contraste pour détecter les visages.

Plus largement, ce résultat a confirmé que ces neurones étaient véritablement des cellules faciales. Auparavant, lors des discussions, les sceptiques demandaient: «Comment le savez-vous? Vous ne pouvez pas tester tous les stimulus possibles. Comment pouvez-vous être sûrs que c'est une cellule faciale et non une cellule pour grenade ou une cellule pour tondeuse à gazon? Ce résultat a été décisif pour moi. La correspondance précise entre la réaction des cellules et la prédiction informatique de Pawan Sinha était spectaculaire.

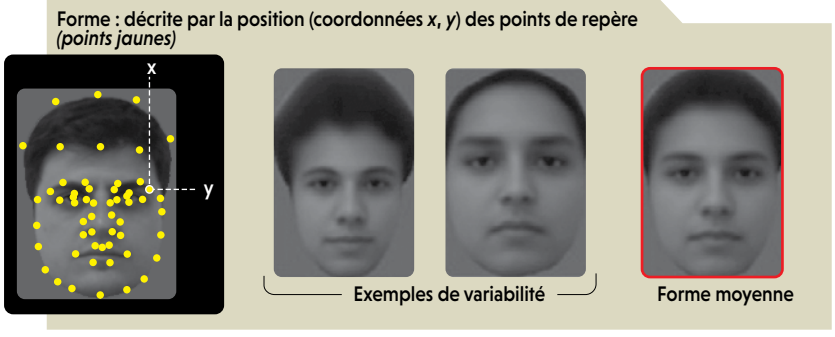
Nos premières expériences avaient mis en évidence deux zones corticales proches réagissant aux visages. Mais après une analyse supplémentaire (avec l'aide d'un agent de contraste multipliant la robustesse du signal), il est apparu qu'il y avait en réalité six zones faciales dans chacun des deux hémisphères du cerveau (soit un total de douze). Elles sont réparties sur toute la longueur du lobe temporal (*voir l'encadré page 47*). De plus, cette répartition dans le cortex IT n'est pas aléatoire. Les six zones sont situées à des endroits similaires dans les deux hémisphères de chaque animal. D'autres travaux ont en outre montré qu'il existe chez d'autres primates, tels que les ouistitis, un schéma similaire de zones faciales s'étendant sur le cortex IT.

UNE SORTE DE CHAINE DE MONTAGE

L'existence d'un tel profil stéréotypé de zones faciales suggère que celles-ci pourraient constituer une sorte de chaîne de montage pour le traitement des visages. Si tel est le cas, on

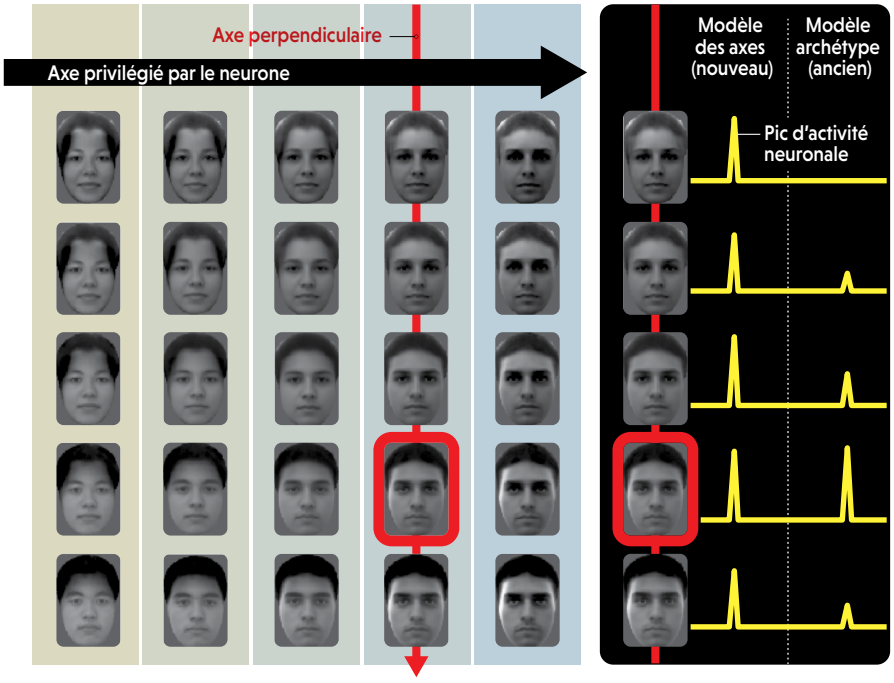
FORME + ASPECT = VISAGE

Pour découvrir comment le cerveau code les visages, identifier les zones faciales n'était qu'un premier pas. Il a fallu ensuite explorer ce qui se passe dans les neurones au sein de chaque zone. Nous caractérisons quantitativement des images d'oeuvre de l'auteure a déterminé 25 caractères de forme et 25 caractères d'aspect pouvant être utilisés par chaque neurone d'une zone faciale. Ces caractères forment un espace à 50 dimensions. Les caractères de forme peuvent être considérés comme ceux définis par le squelette (largeur de la tête, écartement des yeux...). Les caractéristiques d'aspect spécifient la texture de la surface du visage (teint, couleur des yeux, couleur des cheveux...).



DES VISAGES CODÉS DANS UN ESPACE À 50 DIMENSIONS

On peut décrire la réponse des neurones faciaux du singe à un visage humain donné à l'aide d'un code qui utilise 50 coordonnées caractérisant la forme et l'aspect du visage. L'activité de ces neurones s'active avec une intensité particulière en réponse à un certain visage *(contours rouges)*, correspondant à une certaine position le long de l'« axe privilégié » du neurone dans l'espace à 50 dimensions. L'intensité de l'activation augmente linéairement avec la position le long de l'axe privilégié. De plus, cette réponse est la même pour tous les visages situés sur le même axe perpendiculaire à l'axe privilégié. Ce modèle de codage facial fondé sur des axes diffère du modèle précédent, où chaque neurone répond avec une intensité maximale pour un visage unique



s'attendrait à ce que les six zones soient connectées les unes aux autres et que chaque zone remplisse une fonction distincte.

Pour explorer les connexions neuronales entre ces zones, nous avons stimulé électriquement des régions cérébrales avec de très faibles intensités de courant (technique appelée microstimulation) pendant que le singe était à l'intérieur d'un scanner d'IRMf. Il s'agissait de déterminer quelles autres parties du cerveau sont activées lorsqu'on stimule une zone faciale. Nous avons découvert que chaque fois que nous stimulions une zone faciale, les autres étaient activées, mais pas le cortex environnant, ce qui indique que les zones faciales sont bel et bien fortement interconnectées.

De plus, nous avons constaté que chaque zone assurait une fonction différente. Nous avons présenté aux singes les photos de 25 personnes, chacune présentant huit orientations différentes de la tête, et enregistré les réponses de cellules situées dans trois régions: les zones médiane latérale et médiane du fundus (ML/MF), la zone latérale antérieure (LA) et la zone médiane antérieure (MA).

Nous avons constaté des différences frappantes entre ces trois régions. Dans les zones ML/MF, les cellules répondent sélectivement à une orientation particulière. Par exemple, une cellule réagit plutôt aux visages regardant de face, tandis qu'une autre opte pour les visages regardant à gauche. Dans la zone LA, les cellules sont moins spécifiques de l'orientation. Une partie des cellules répondent aux visages regardant vers le haut, le bas et droit devant; une autre répond aux visages regardant à gauche ou à droite. Dans la zone MA, les cellules réagissent aux visages d'individus particuliers, qu'ils soient vus de face ou de profil. Ainsi, à la fin du réseau, dans la zone MA, les représentations spécifiques à une orientation s'assemblaient avec succès en une représentation indifférente à l'orientation.

Apparemment, c'est donc bien en agissant comme une chaîne de montage que les zones faciales relèvent l'un des grands défis de la vision: reconnaître les objets qui nous entourent malgré leur aspect variable. Une voiture peut être de n'importe quelle marque ou couleur, apparaître sous n'importe quel angle et à n'importe quelle

DES PHOTOS QUI VALENT 205 NEURONES

Pour un visage donné, on peut prédire comment un neurone facial réagira en prenant une somme pondérée des [illegible] coordonnées décrivant le visage. Ainsi, deviner à partir de l'activité neuronale quel visage le singe a vu, il suffit d'inverser le calcul : connaissant la réponse des 205 neurones faciaux enregistrés, on peut calculer les 50 coordonnées définissant le visage présenté et ainsi reconstituer celui-ci avec précision.

Photos originales de la base de données



Visages correspondants reconstruits à partir de l'activité neuronale

distance, et même être partiellement masquée par des objets plus proches tels que des arbres ou d'autres voitures. Reconnaître un objet malgré ces transformations visuelles est le «problème de l'invariance», et il nous semble clair qu'une fonction majeure du réseau des zones faciales est de surmonter cet obstacle.

Étant donné la grande sensibilité des cellules des zones faciales aux variations de l'aspect d'un visage, on pourrait s'attendre à ce qu'une altération de la réponse de ces cellules modifie la perception des visages chez l'animal. En 2012, Jacques Jonas et ses collègues, de l'université de Lorraine et du CHRU de Nancy, avaient stimulé électriquement une zone faciale chez des sujets humains à qui on avait implanté des électrodes afin de déterminer la source des crises d'épilepsie. Ils avaient montré que cette stimulation entraînait une perte de reconnaissance du visage par le patient.

Nous nous sommes demandé si nous retrouverions le même effet chez les singes en stimulant les zones faciales. Cela n'affecterait-il que la perception des visages ou y aurait-il également une incidence sur la perception d'autres objets? La frontière entre un visage et un autre objet est floue (on peut voir un visage dans un nuage ou dans une prise électrique). Nous voulions utiliser la microstimulation électrique comme un outil permettant de caractériser précisément ce qui définit un visage pour une zone faciale. Nous avons alors entraîné des singes à indiquer si deux visages présentés l'un après l'autre étaient identiques ou différents. Conformément aux résultats obtenus chez l'humain, nous avons constaté que la microstimulation des zones faciales déformait fortement la perception, de sorte que l'animal signalait toujours deux visages identiques comme étant différents.

Il est intéressant de noter que la microstimulation n'a pas d'effet sur la perception de nombreux objets n'ayant rien à voir avec des visages, mais qu'elle altère notablement la réponse à des objets dont la forme pourrait être associée à un visage, les pommes par exemple.

Pourquoi cette stimulation influe-t-elle sur la perception d'une pomme? Il est possible que les zones faciales servent généralement à représenter non seulement des visages, mais aussi d'autres objets ronds, telles les pommes. Une autre hypothèse est que les zones faciales ne soient normalement pas utilisées pour représenter ces objets, mais que la stimulation donne à une pomme l'apparence d'un visage. Il reste à déterminer si les zones faciales sont utiles pour détecter des objets autres que les visages.

DÉCHIFFRER LE CODE NEURONAL

La découverte de l'organisation du système de zones faciales et des propriétés des neurones qui les composent était un accomplissement majeur. Mais mon rêve, quand nous avons commencé à enregistrer l'activité neuronale des zones faciales, allait bien plus loin. J'avais l'intuition que cela nous permettrait de déchiffrer le code neuronal de l'identité faciale. C'est-à-dire de comprendre comment les neurones traitent les visages, avec un niveau de détail permettant de prédire la réponse d'une cellule à un visage donné ou de décoder l'identité d'un visage en s'appuyant uniquement sur l'activité neuronale.

Le principal défi consistait à décrire les visages quantitativement et avec précision. Le Chang, alors postdoctorant dans mon laboratoire, a eu la brillante idée d'adopter une technique du domaine de la vision par ordinateur nommée «modèle actif d'apparence». Dans cette approche, un visage est décrit par deux ensembles de caractères, un pour la forme et un autre pour l'aspect (*voir l'encadré page 48*). Les caractéristiques de la forme sont, en gros, celles définies par le squelette (la largeur de la tête, l'écart des yeux...). Les caractéristiques d'aspect définissent la texture de la surface du visage (teint, couleur des yeux ou des cheveux...).

EXTRAPOLER DU MACAQUE À L'HUMAIN ?

Les travaux de Doris Tsao et son équipe constituent une prouesse technique dont seuls sont capables quelques laboratoires au monde. Se pose toutefois la question de leur validité pour élucider les mécanismes neuronaux de la reconnaissance des visages chez l'homme.

Celui-ci se fonde essentiellement sur le visage pour reconnaître des individus et faire la différence entre des visages connus et inconnus. Alors qu'un adulte est capable de reconnaître plusieurs milliers de visages rapidement et automatiquement, le singe rhésus ou le macaque a besoin de centaines d'essais d'entraînement avec les mêmes images pour atteindre des performances modestes. De plus, contrairement à l'homme, les performances du macaque sont identiques pour un visage présenté à l'endroit ou à l'envers et ne dépendent pas du degré de familiarité du visage *(voir l'article de B. Rossion et J. Taubert cité en bibliographie)*.

Cela n'est guère surprenant : l'homme et le macaque diffèrent par 25-30 millions d'années d'évolution, et le cerveau humain compte 16 fois plus de neurones. Surtout, le macaque ne possède pas les structures cérébrales clés pour la reconnaissance du visage chez l'homme, en particulier le gyrus fusiforme du cortex occipitotemporal ventral, et une dominance de l'hémisphère droit. Pourquoi, dès lors, trouve-t-on des régions qui répondent spécifiquement aux visages dans la partie latérale du lobe temporal du macaque et parvient-on à y décoder des « identités faciales » ? D'une part, parce que cette espèce décode dans le visage de congénères de simples expressions faciales, l'orientation de la tête et du regard. D'autre part, parce que le bombardement d'images de visages (humains) à discriminer dans des conditions artificielles de laboratoire entraîne, ou augmente, l'activité de régions cérébrales pour ces catégories d'images dans le cerveau du macaque. Il n'est alors pas surprenant que des images physiques différentes activent des réponses de populations de neurones différentes dans ces régions, permettant un décodage fiable de leur « identité ».

Les capacités de reconnaissance du visage chez l'homme vont cependant bien au-delà de la discrimination d'images 2D ; elles se fondent sur des propriétés physiques, mais également sémantiques et contextuelles. Cela permet de reconnaître un visage familier malgré les différences importantes entre les diverses vues de ce visage, celle d'une caricature par exemple.

Malgré l'intérêt des travaux sur les singes, il nous semble que la compréhension des mécanismes de reconnaissance des visages chez l'humain passera essentiellement par l'étude de notre espèce, par exemple de patients cérébrolésés ayant perdu la capacité de reconnaissance faciale (prosopagnosie), la neuroimagerie et les enregistrements intracérébraux.

BRUNO ROSSION, JACQUES JONAS ET LAURENT KOESSLER
CNRS (CRAN, UMR7039), université de Lorraine et service de neurologie du CHRU de Nancy

Pour générer ces caractères de forme et d'aspect, nous sommes partis d'une grande base de données de photos de visages. Pour chaque visage, nous avons placé un ensemble de marqueurs sur les traits principaux. La position de ces marqueurs décrit la forme du visage. À partir de ces formes variées, nous avons calculé un visage moyen. Nous avons ensuite transformé chaque photo de la base de données afin que ses principaux traits correspondent exactement à ceux du visage moyen.

Les images résultantes constituent l'aspect des visages indépendamment de la forme. Nous avons ensuite effectué une « analyse en composantes principales », sur les caractères de forme et sur les caractères d'aspect, pour l'ensemble des visages. Il s'agit d'une technique mathématique qui détermine les axes, ou dimensions, décrivant le mieux la variabilité au sein d'un ensemble complexe de données.

En prenant 25 composantes principales pour la forme et 25 composantes principales pour l'aspect, nous avons créé un espace facial à 50 dimensions (*voir l'encadré page 49*). Chaque visage est représenté dans cet espace par un point (ou vecteur) ayant 50 coordonnées (ou composantes), alors que dans l'espace usuel, chaque point représente une position et est repéré par 3 coordonnées.

Dans notre expérience, nous avons pris au hasard 2000 visages et les avons présentés à un singe tout en enregistrant les neurones de deux zones faciales. Nous avons constaté que presque chaque cellule présentait des réponses dépendant linéairement d'un sous-ensemble des 50 caractères, ce qui est cohérent avec mes expériences précédentes sur les visages dessinés. Mais nous avions une meilleure idée de la raison pour laquelle cela est important. Si une cellule faciale présente une réponse linéaire à différents traits, on peut approximer sa réponse par une simple somme pondérée des traits faciaux, les poids de cette somme caractérisant la dépendance linéaire de la réponse. En termes plus précis, les réponses des neurones sont données par la relation :

Réponses des cellules faciales = (M) × (50 traits faciaux), où M est la matrice de pondération, tableau de nombres où chaque ligne correspond aux poids associés à une cellule faciale. On peut alors simplement inverser cette équation pour prédire le visage montré au sujet à partir des réponses des cellules faciales :

(50 traits faciaux) = (M^{-1}) × (réponses des cellules faciales)

Pour tester cette relation, nous avons utilisé les réponses à tous les 2000 visages sauf un afin de déterminer la matrice de pondération, puis nous avons calculé les 50 traits du visage exclu à partir des réponses des cellules faciales et de notre formule. Étonnamment, la prédiction s'est révélée presque indistinguable du visage réel.

Lors d'une conférence tenue en 2015 à Ascona, en Suisse, j'ai présenté nos

découvertes sur la reconstitution de visages à partir de l'activité neuronale. Après mon exposé, Rodrigo Quian Quiroga, actuellement à l'université de Leicester, en Angleterre, qui avait découvert en 2005 le célèbre « neurone Jennifer Aniston » (un neurone unique qui s'active à la vue de photos de l'actrice Jennifer Aniston) dans le lobe temporal médian, m'a posé une question. Il m'a demandé comment je faisais le lien entre mes cellules et son idée selon laquelle des neurones individuels réagissent au visage de personnes particulières, comme le « neurone Jennifer Aniston ».

UN PARI GAGNANT-GAGNANT

Je lui ai répondu que je pensais que nos cellules pourraient être les éléments de base de ses cellules, sans trop réfléchir à la façon dont cela fonctionnerait. Cette nuit-là, privée de sommeil à cause du décalage horaire, j'ai pris conscience d'une différence majeure entre nos cellules faciales et les siennes. J'avais décrit dans mon exposé que nos cellules faciales calculent leur réponse comme des sommes pondérées de différentes caractéristiques faciales. Or ce calcul revient à une opération mathématique nommée produit scalaire, dont la représentation géométrique est la projection d'un vecteur sur un axe (à l'instar de l'ombre d'un piquet projetée sur le sol par la lumière du soleil).

Grâce à mes souvenirs d'algèbre linéaire, je me suis rendu compte qu'il était alors possible de construire pour chaque cellule un vaste ensemble de visages distincts tous représentés dans l'espace à 50 dimensions par des vecteurs perpendiculaires à l'axe de projection, donc de projection nulle. Ainsi, tous ces visages activeraient la cellule exactement de la même façon.

Et cela suggérerait que les cellules des zones faciales sont fondamentalement différentes des cellules envisagées par Rodrigo. Cela démolissait la vague intuition que tout le monde partageait au sujet des cellules faciales, à savoir qu'elles réagiraient à des visages particuliers.

Au petit-déjeuner du lendemain matin, j'espérais trouver Rodrigo pour lui en parler. Étonnamment, quand il est arrivé, il m'a dit avoir eu exactement la même idée. Rodrigo m'a alors proposé une sorte de pari gagnant-gagnant. Si une cellule donnait effectivement la même réponse à différents visages, j'enverrais une bonne bouteille de vin à Rodrigo. Si, au contraire, la prédiction ne se vérifiait pas, il m'enverrait du vin comme prix de consolation.

De retour à notre laboratoire à Caltech, Le Chang a d'abord déterminé l'axe privilégié par un neurone donné (l'axe de projection évoqué plus haut) à partir de ses réponses aux 2 000 visages. Il a ensuite généré une gamme de visages tous représentés par des vecteurs perpendiculaires à l'axe privilégié. De façon remarquable, tous ces visages ont suscité exactement la même réponse du neurone. La semaine suivante, Rodrigo a reçu une excellente bouteille de cabernet. Cette découverte prouvait que les cellules faciales du cortex IT ne codent pas l'identité de personnes particulières. Au lieu de cela, elles effectuent une projection vectorielle sur un axe, un calcul beaucoup plus abstrait.

Il semblerait alors que le neurone Jennifer Aniston n'existe pas, du moins pas dans le cortex IT. Mais des neurones individuels répondant sélectivement à des individus familiers pourraient être à l'œuvre dans une partie du cerveau qui traite le signal de sortie des cellules faciales. Les régions de stockage de la mémoire, l'hippocampe et les zones adjacentes, pourraient contenir des cellules permettant de reconnaître un individu.

La reconnaissance faciale dans le cortex IT repose donc sur un ensemble d'environ 50 nombres représentant les mesures d'un visage le long d'un ensemble de 50 axes d'un espace abstrait. Et la découverte de ce code extrêmement simple pour l'identification des visages a des implications majeures pour notre compréhension de la représentation visuelle des objets en général. Il est possible que tout le cortex IT soit organisé selon le même principe que les zones faciales, des groupes de neurones codant différents ensembles d'axes afin de représenter un objet. Nous menons actuellement des expériences pour tester cette hypothèse.

PIERRE DE ROSETTE NEURONALE

Si vous vous rendez au British Museum, à Londres, vous verrez un objet étonnant, la pierre de Rosette, sur laquelle le même décret de Memphis est gravé en trois langues différentes : en hiéroglyphes égyptiens, en démotique et en grec ancien. C'est grâce à cette pierre de Rosette, parce que les philologues connaissaient le grec ancien, qu'ils ont pu déchiffrer les hiéroglyphes égyptiens et démotiques.

De même, les visages, les zones faciales et le cortex IT constituent une pierre de Rosette neuronale, mais qui est encore en cours de déchiffrement. En montrant des photos de visages à des singes, nous avons découvert des zones faciales et appris comment leurs neurones détectent et identifient les visages. À son tour, la compréhension des principes de codage dans le réseau des zones faciales aidera peut-être à comprendre l'organisation de tout le cortex IT et à révéler ainsi comment le cerveau assure cette fonction essentielle consistant à identifier les objets, qu'il s'agisse d'un visage, d'un animal, d'une chaise ou d'un caillou. Peut-être même comprendra-t-on aussi comment les objets *imaginés* – à l'instar des courbes qui m'avaient intriguée lorsque j'étais au lycée – sont codés par le cerveau. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Rossion et J. Taubert, **What can we learn about human individual face recognition from experimental studies in monkeys ?**, *Vision Research*, vol. 157, pp. 142-158, 2019.

L. Chang et D. Y. Tsao, **The code for facial identity in the primate brain**, *Cell*, vol. 169(6), pp. 1013-1028, 2017.

R. Quian Quiroga, **How do we recognize a face ?**, *Cell*, vol. 169(6), pp. 975-977, 2017.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an)	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an)		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an)			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an)			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	4,90 € PAR MOIS 29 %	6,50 € PAR MOIS 31 %	8,20 € PAR MOIS 43 %

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

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

PAG19STD

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

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° du magazine papier
4,90 € PAR MOIS -29 % DPV4E90

☐ FORMULE **PAPIER + HORS SÉRIE**
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
6,50 € PAR MOIS -31 % PPV6E50

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne
8,20 € PAR MOIS -43 % IPV8E20

2 / Mes coordonnées

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

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

3 / Mandat de prélèvement SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

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

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

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

Date et signature

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

4 / MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au Service abonnement. Ne rien inscrire

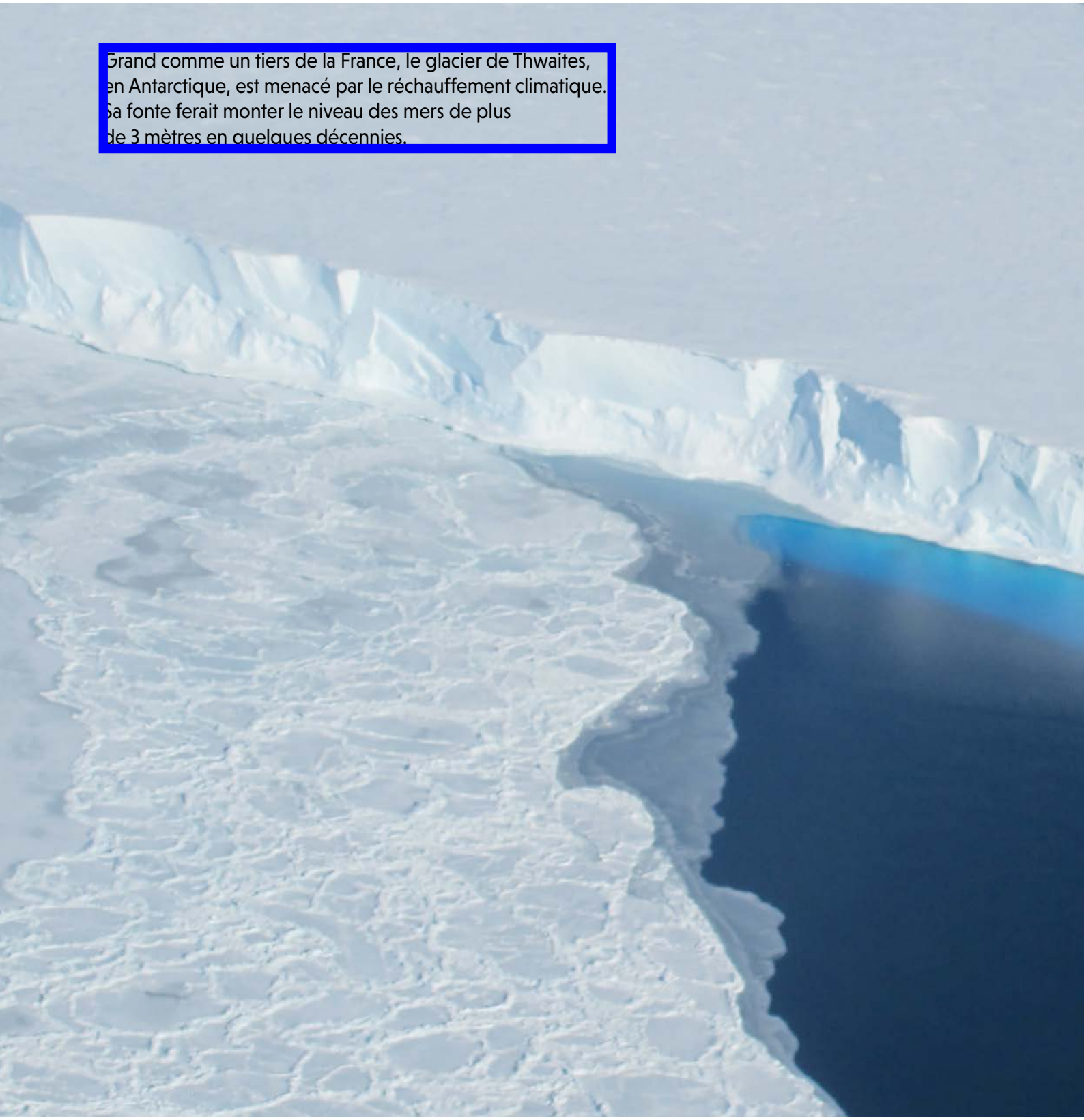
Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de votre 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 (UE) 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 5814Z

Le géant Thwaites

Grand comme un tiers de la France, le glacier de Thwaites, en Antarctique, est menacé par le réchauffement climatique. Sa fonte ferait monter le niveau des mers de plus de 3 mètres en quelques décennies.



va-t-il fondre?



Cette vue aérienne montre la plateforme du glacier de Thwaites, en Antarctique occidental, encadrée par la banquise. Les falaises de ce glacier, qui s'étend à grande profondeur, font plusieurs centaines de mètres de hauteur.

L'ESSENTIEL

- De grands glaciers groenlandais, tel le Jakobshavn, s'écoulent vite dans l'océan, ce qui élève un peu le niveau de la mer.
- L'écoulement du glacier géant de Thwaites, situé à l'ouest de l'Antarctique, s'accélère. L'évolution de ce glacier dépendra de l'éventuel repli de son front jusqu'à la fosse océanique que recouvre sa partie centrale.
- Les hautes falaises qui en résulteraient pourraient alors émettre en série des icebergs géants dans l'océan, ce qui élèverait en quelques décennies le niveau marin de plus de 3 mètres.

L'AUTEUR



RICHARD ALLEY
professeur de géosciences à l'université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis

Les glaciers fondent et les mers montent. Nous savons déjà que les eaux océaniques vont envahir des terres de la côte est des États-Unis ou de la côte méditerranéenne française. Il en va de même en de nombreuses régions du monde. Dès lors, les chercheurs essaient d'estimer l'urgence, c'est-à-dire l'ampleur et la rapidité de la submersion. Sommes-nous entrés dans une débâcle glaciaire rapide ? Si oui, quelle est sa vitesse ? La montée des eaux représentera-t-elle quelques centimètres ou plusieurs mètres ? La réponse à ces questions dépend en grande partie du comportement d'un géant de glace dont le nom est Thwaites – un immense glacier de l'ouest de l'Antarctique.

Le réchauffement climatique en cours entraîne la fonte des glaciers de montagne et de la glace polaire, ce qui fait monter l'océan. Le niveau moyen des océans de la planète a augmenté d'environ 3 millimètres par an au cours des 25 dernières années, soit environ 30 centimètres par siècle. La fonte complète de ce qui reste des glaciers de montagne élèverait le niveau de la mer d'un peu plus de 30 centimètres. Et l'eau que retiennent les énormes calottes glaciaires terrestres de l'Arctique et de l'Antarctique représente une hausse possible du niveau de la mer de plus de 61 mètres. Étant donné ce potentiel, une petite variation dans la façon dont cette masse fond signifie de grands changements sur nos côtes. En certains endroits de la planète, pourvu que les conditions le favorisent, des falaises de glace à la fois très longues et hautes de plusieurs centaines de mètres pourraient se former et s'effondrer régulièrement, ce qui élèverait le niveau marin de façon significative.

Pour le moment, les estimations bien établies de l'élévation du niveau marin au cours du XXIe siècle prévoient une montée des eaux relativement modeste : si le réchauffement climatique reste modéré, le niveau de l'océan pourrait s'élever de 60 centimètres ; s'il est important, l'océan ne s'élèvera de pas plus de 1,2 mètre. Les chercheurs ont cependant des indices du fait qu'un réchauffement se poursuivant à long terme ajoutera beaucoup à la hausse prévue. Pire : si les fronts des calottes glaciaires reculent, la planète pourrait connaître une débâcle glaciaire plus rapide encore.

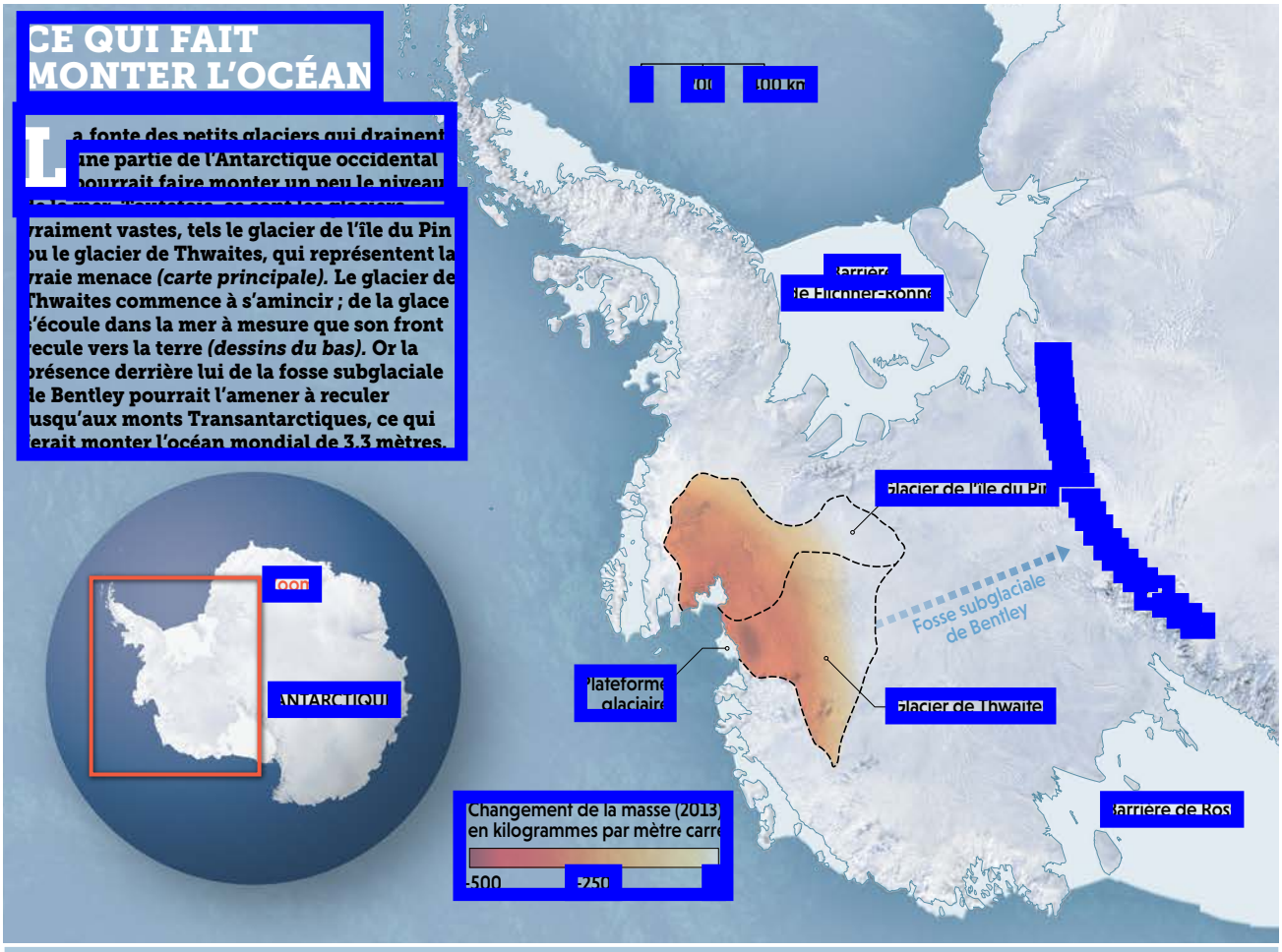
Rappelons que, écrasés sous leur propre poids, les glaciers s'écoulent vers la mer, dans laquelle ils vêlent (c'est-à-dire produisent des icebergs) ou fondent, tandis que la compaction des précipitations de neige produit de la nouvelle glace partout sur eux. Lorsque plus de glace disparaît qu'il ne s'en forme, le front glaciaire recule, ce qui réduit le volume de la calotte glaciaire terrestre et contribue à élever l'océan. Or les indices fournis par les changements spectaculaires qui se sont déclenchés il y a une vingtaine d'années dans une partie importante de l'inlandsis groenlandais – le glacier Jakobshavn – nous renseignent sur la dynamique de ce phénomène.

Au cours des années 1980, le glacier Jakobshavn était l'un des plus rapides connus. Il s'écoulait très vite dans la baie de Baffin, où il s'était étendu sur la mer en flottant ; il formait

Une hausse de la température océanique d'environ 1 °C a disloqué la banquise autour du glacier Jakobshavn

CE QUI FAIT MONTER L'OCÉAN

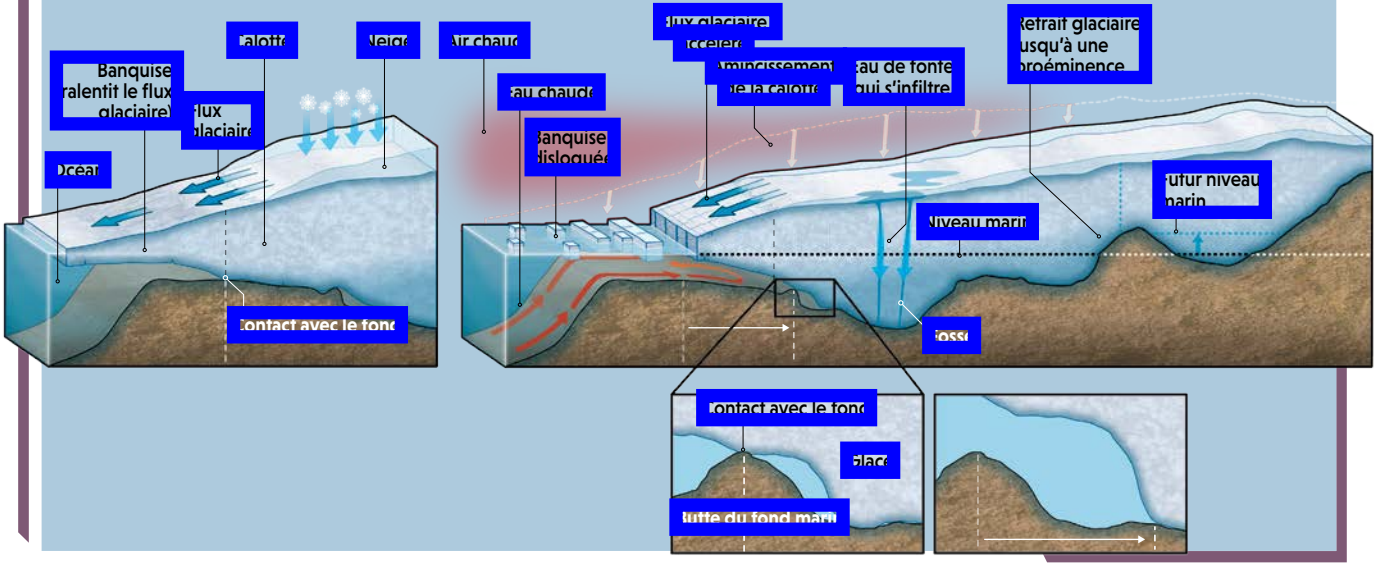
La fonte des petits glaciers qui drainent une partie de l'Antarctique occidental pourrait faire monter un peu le niveau [illegible] vraiment vastes, tels le glacier de l'île du Pin ou le glacier de Thwaites, qui représentent la vraie menace *(carte principale)*. Le glacier de Thwaites commence à s'amincir ; de la glace s'écoule dans la mer à mesure que son front recule vers la terre *(dessins du bas)*. Or la présence derrière lui de la fosse subglaciale de Bentley pourrait l'amener à reculer jusqu'aux monts Transantarctiques, ce qui ferait monter l'océan mondial de 3,3 mètres.



COMMENT SE DÉFAIT UN GLACIER

Chaque année, de nouvelles précipitations neigeuses recouvrent la calotte glacière, de sorte que la glace qui s'y forme et s'y accumule par compaction de la neige s'écoule sous l'effet [illegible].

Les inlandsis de l'Antarctique occidental perdent chaque année un peu plus de masse qu'ils n'en gagnent, ce qui fait monter la mer. Une plateforme glaciaire flottant sur l'océan en avant de leur front ralentit cependant leur écoulement, mais si les réchauffements de l'air et de l'eau la désintègrent, l'écoulement de la calotte terrestre s'accélère et elle s'amincit *(illustrations à droite ci-dessous)*. Le front glaciaire se met alors à reculer. Si un bassin océanique profond se trouve en arrière du front glaciaire, le recul se poursuit sans entrave jusqu'à une proéminence du fond marin, voire à une élévation de terrain à l'intérieur des terres et le niveau marin s'élève considérablement.



ainsi ce que l'on nomme une plateforme glaciaire. Or l'effet de telles plateformes est de ralentir l'écoulement de la calotte qui les alimente. Ainsi, quand dans les années 1990, une hausse d'environ 1 °C de la température océanique a démantelé ce frein naturel, le Jakobshavn s'est mis à s'écouler deux fois plus vite à terre. Aujourd'hui, il recule et s'amincit considérablement. Cela en fait l'un des plus grands contributeurs à l'élévation actuelle du niveau de la mer. Des enregistrements géologiques dans les roches montrent que ce glacier a déjà connu des événements comparables dans le passé. Nos observations actuelles révèlent des évolutions similaires dans d'autres glaciers du Groenland.

LA PIRE MENACE : LE GLACIER DE THWAITES

Toutefois, c'est en Antarctique qu'un glacier énormément plus grand que le Jakobshavn – le glacier de Thwaites – fait peser la pire menace de ce genre. Si ce géant devait lui aussi se défaire à la manière du Jakobshavn, alors le niveau de la mer pourrait s'élever de plus de trois mètres en quelques décennies. Dès lors, risquons-nous une élévation catastrophique de l'océan dans un futur proche ou ce risque est-il surestimé? Comment savoir comment le glacier de Thwaites va se comporter? Les données nécessaires pour répondre sont en train d'arriver.

Estimer la menace représentée par le glacier de Thwaites est complexe. Une métaphore nous aidera à comprendre pourquoi. Imaginez que vous préparez des gaufres. Vous versez la pâte sur le gaufrier et elle s'étale sur les motifs en creux du fer. Son poids la pousse à s'écouler vers l'extérieur du gaufrier malgré la résistance de la grille de motifs. Sa propagation ralentit soit avec l'avancement de la cuisson, soit parce que vous la retenez à l'aide de votre spatule.

Les calottes glaciaires terrestres – que l'on nomme aussi des inlandsis – sont comparables à de gigantesques gaufres, épaisses de trois kilomètres et larges comme un continent… La neige qui s'y accumule est petit à petit comprimée en glace par le poids des précipitations successives. L'énorme masse glaciaire qui en résulte est très solide: j'y ai déjà atterri à bord d'avions de transport militaires lourds équipés de skis. Pour autant, elle s'écoule! En effet, la température de la glace est souvent quelques degrés seulement au-dessous de 0 °C, ce qui l'amollit assez pour rendre possible un lent déplacement depuis la région centrale et élevée de la calotte vers ses bords. Là, amincie, elle fond et se disloque facilement. Les calottes plus épaisses ou plus pentues, telles celles du Groenland et de l'Antarctique, avancent plus vite.



De l'eau de fonte pénètre dans l'inlandsis du Groenland et accélère sa progression vers la mer. Cela préfigure le sort des glaciers de l'Antarctique.

Laissée à elle-même, une calotte glaciaire croît jusqu'à une épaisseur et une pente suffisantes pour provoquer son écoulement vers ses bords, où elle fond et se disloque, ce qui compense les chutes de neige. Un inlandsis peut ainsi conserver sa taille pendant très longtemps, mais il semble que sur notre planète en voie de réchauffement, ce ne soit plus le cas. L'eau (d'origine marine) qui s'accumule chaque année sur le Groenland et sur l'Antarctique équivaut à une couche d'un peu plus de 6 millimètres d'épaisseur.

Aujourd'hui, la fonte des glaces et les icebergs émis par les calottes glaciaires introduisent dans les océans une quantité d'eau supérieure d'environ 15 %, ce qui élève un peu le niveau marin. Si la fonte n'est plus compensée par les chutes de neige pendant assez longtemps, une calotte glaciaire peut entièrement disparaître. Au rythme constaté aujourd'hui, cela prendrait près de 100 000 ans. Mais si le réchauffement climatique poursuit sur sa lancée, la fonte continuera à accélérer, comme elle le fait déjà aujourd'hui.

La façon dont s'écoule une calotte glaciaire dépend de la viscosité de sa glace (de sa résistance à l'écoulement), de la lubrification de sa base et du frein que constitue la « spatule », c'est-à-dire la plateforme glaciaire qui flotte en avant d'elle dans la mer. Le réchauffement général de l'atmosphère peut ramollir la glace et dégeler sa base, ce qui facilite la progression de la calotte vers la mer. Toutefois, l'évacuation de la chaleur à travers une épaisseur de glace de plusieurs kilomètres demande du temps. Ainsi, les grandes calottes actuelles continuent de réagir au réchauffement climatique initié à la fin de la dernière glaciation, il y a plus de 10 000 ans!

CATARACTES GEANTES, VÊLAGE D'ICEBERGS…

Un processus bien plus rapide de réchauffement des calottes existe: l'infiltration de l'eau fondue en surface à travers les crevasses qui traversent la glace. En certains endroits des flancs de l'inlandsis groenlandais, par exemple, l'eau de fonte s'accumule en été à la surface de la glace au sein de magnifiques lacs bleus. Plus dense que la glace, elle a tendance à ouvrir et à élargir des crevasses et, de proche en proche, parvient au lit glaciaire. Le lac se draine alors d'un seul coup. Un lac en expansion peut percer huit cents mètres de glace ou plus, créant soudainement une plus grande cataracte que celle des chutes du Niagara. En une heure, l'arrivée d'autant d'eau réchauffe davantage la base glaciaire qu'en 10 000 ans…

Nous étudions de très près ce mécanisme de réchauffement de la base de la glace dans le cas des inlandsis. Toutefois, il ne représente pas la pire menace pesant sur les habitants de nos côtes, car les calottes terrestres sont ralenties dans leurs progressions par les irrégularités de relief de leurs lits.

Le même mécanisme est en revanche beaucoup plus dangereux lorsqu'il se produit sur une plateforme glaciaire. Dans les régions très froides, la glace qui parvient à l'océan y progresse en flottant, tout en restant attachée au glacier. De tels endroits sont presque toujours des baies ou des fjords protégés, où le mouvement de la plateforme glaciaire est ralenti par sa friction sur les rives et par les protubérances du fond marin, là où elle est en contact avec lui.

Comme sur les inlandsis, le réchauffement atmosphérique conduit à la formation de lacs à la surface des plateformes glaciaires. Lorsque ces lacs ouvrent la glace et la traversent, la plateforme peut s'effondrer.

C'est par exemple ce qui est arrivé en 2002 dans la péninsule Antarctique lorsque la barrière de Larsen B, une plateforme glaciaire située au nord du glacier de Thwaites, s'est disloquée presque complètement. En seulement cinq semaines, elle a vêlé des icebergs en série, qui tombaient dans la mer comme des dominos.

Puisque cette plateforme, qui s'étend le long de la côte orientale de la péninsule Antarctique, flottait, cela n'a pas fait monter immédiatement le niveau de la mer, mais a entraîné l'accélération de l'écoulement de l'inlandsis situé en amont de la plateforme à terre.

Dans la fosse de Bentley, la calotte glaciaire s'étend à plus de 2500 mètres sous la mer

un peu comme si, lors de la préparation d'une gaufre, le retrait de la spatule permettait soulagement à la pâte de s'étaler. Tout d'un coup, la glace s'est mise à avancer vers la mer de six à huit fois plus vite qu'avant. Il n'y en avait heureusement pas beaucoup à terre en amont de la barrière de Larsen, de sorte que le niveau de la mer n'a guère augmenté. L'événement nous a toutefois fait prendre conscience du fait que la désintégration des plateformes glaciaires libère les glaciers qui les alimentent, qu'elles freinaient auparavant.

Les banquises peuvent aussi fondre par le bas sous l'influence du réchauffement de l'eau marine, ce qui s'est produit dans le cas de Jakobshavn. Bien que le spectacle impressionnant de l'écroulement d'une grande falaise glaciaire réjouisse les passagers des paquebots de croisière qui se rendent en Alaska ou en d'autres régions froides, le phénomène accélère la disparition des inlandsis. Aujourd'hui, à Jakobshavn, les icebergs naissent d'une falaise qui domine l'océan de plus de 100 mètres – l'équivalent d'un immeuble de 30 étages – et s'enfonce environ neuf fois plus sous l'eau. Lorsque ces icebergs se retournent, ils créent des vagues hautes comme 50 étages et déclenchent des tremblements de terre perceptibles jusqu'aux États-Unis.

UN POINT DE BASCULE POUR LE GLACIER

Pour le moment, la dislocation des plateformes glaciaires et le débitage des falaises de glace qu'elles forment sur la mer n'a que peu contribué à l'élévation du niveau marin. Toutefois, s'agissant du glacier de Thwaites, le même processus pourrait conduire à une hausse beaucoup plus dramatique, car il est très particulier: il s'avance en effet depuis les terres antarctiques occidentales au-dessus d'un énorme et profond fjord qu'il a entièrement rempli: la fosse subglaciale de Bentley. Or un accident géologique y a placé un «point de bascule».

Un matin d'automne 1956, Charles Bentley – qui, des années plus tard, dirigera mon doctorat – soutint sa thèse à l'université Columbia. Le lendemain, il sautait dans un train en direction du Panama, puis embarquait à bord d'un navire se dirigeant vers le sud afin de participer à un projet de recherche de l'Année géophysique internationale visant à analyser la planète Terre. Après deux ans en Antarctique occidental, il constata à son retour que son diplôme ne lui avait toujours pas été délivré parce qu'il n'avait pas eu le temps de payer ses frais de thèse avant de partir... Pendant son séjour en Antarctique, lui et son équipe ont parcouru près de 5000 kilomètres sur la glace, soit pour se rendre à la station Byrd (station de recherche américaine estivale située à quelque 500 kilomètres dans les terres antarctiques), soit pour en revenir ou pour arpenter les étendues glacées de la région.

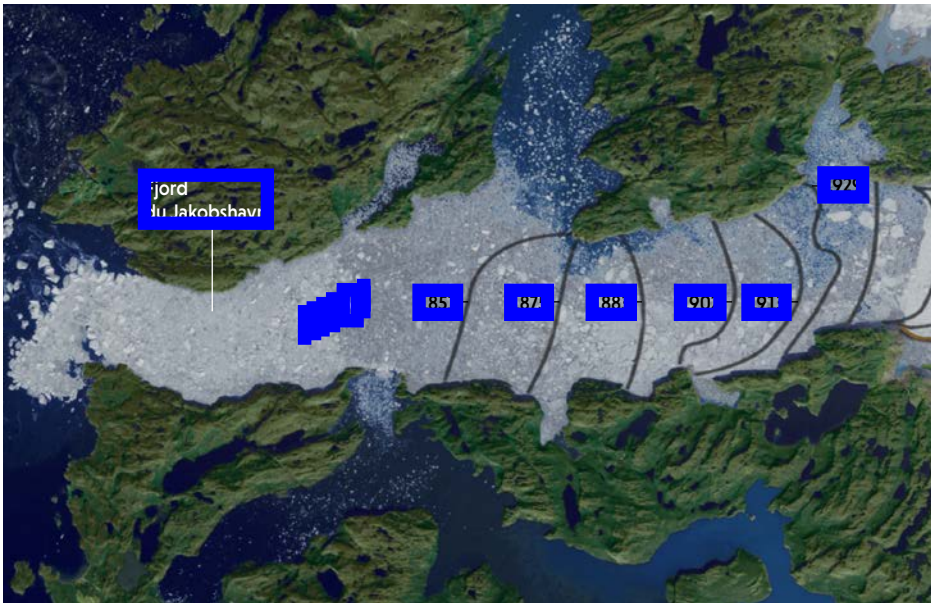
S'agissant de la question qui nous occupe, la plus importante des nombreuses mesures et découvertes faites par son équipe est celle de l'épaisseur des calottes. Après avoir déclenché de petites explosions à la surface d'une calotte, Bentley et son équipe ont utilisé des sismomètres pour écouter les sons se réfléchissant à

a base de la glace. Ils mirent ainsi en évidence que l'Antarctique de l'ouest n'est pas une mince couche de glace recouvrant un continent élevé, comme certains le pensaient, mais une couche de glace parfois très épaisse. Ils découvrirent aussi que la calotte glaciaire qui occupe la fosse de Bentley plonge à plus de 2500 mètres sous la mer tout en atteignant plus de 1600 mètres au-dessus du niveau de la mer ! En fait, la base de cette très haute calotte constitue le point le plus bas de la surface de la Terre non recouvert par les eaux marines.

Bentley et les glaciologues qui ont travaillé après lui ont aussi découvert un point de bascule du sort de la calotte. La grande fosse océanique et les bassins adjacents sous-tendent en effet la vaste zone centrale de l'inlandsis. Si le front du glacier de Thwaites devait reculer face à la côte et se retirer vers l'intérieur de la fosse, une falaise de plusieurs milliers de mètres de haut pourrait se constituer, du fond de la fosse jusqu'à la surface du glacier. Beaucoup plus grande que celles de Jakobshavn ou d'ailleurs, une telle falaise pourrait, en se disloquant, produire de très hauts icebergs susceptibles de sortir de la fosse (entourée de terres) pour aller fondre en mer. Cela entraînerait une hausse considérable du niveau marin.

Des décennies de recherches ont confirmé la plausibilité de ce mécanisme et les effets majeurs de son enclenchement. John Anderson, de l'université Rice, et plusieurs de ses étudiants en thèse ont inlassablement cartographié le plateau continental sous l'océan autour de l'Antarctique à l'aide de sonars à balayage latéral et d'autres instruments. Ils ont mis en évidence qu'au cours des périodes glaciaires, la glace antarctique s'est considérablement étendue dans toutes les directions et a subi un retrait à la fin des périodes glaciaires. Le plancher océanique entourant l'Antarctique aujourd'hui était autrefois le socle sur lequel reposait la calotte antarctique. Les traces qu'elles ont laissées sur le fond marin nous donnent le récit exact de leurs évolutions.

Il est aussi apparu qu'en raclant le fond de la mer, les calottes glaciaires en expansion charrient des sédiments avec elles, qui s'amoncellent en certains endroits. La glace se stabilise lorsqu'elle atteint une crête ainsi formée sur le plancher océanique – ce que l'on nomme un cordon morainique –, puis elle croît vers le haut en empilant des débris rocheux sur ce haut-fond. De longues parois morainiques poussent ainsi là où se termine la glace. En ces endroits, cette dernière pourra résister pendant des centaines voire des milliers d'années aux faibles efforts tendant à la déloger. Mais si un réchauffement suffisant se produit, elle commencera à disparaître derrière l'obstacle qui l'a limitée, puis régressera jusqu'à avoir atteint un nouveau cordon, qui pourra éventuellement se trouver très en arrière. Pendant ce temps, des icebergs flottent au-dessus de la crête morainique abandonnée par la glace au fond de l'océan.



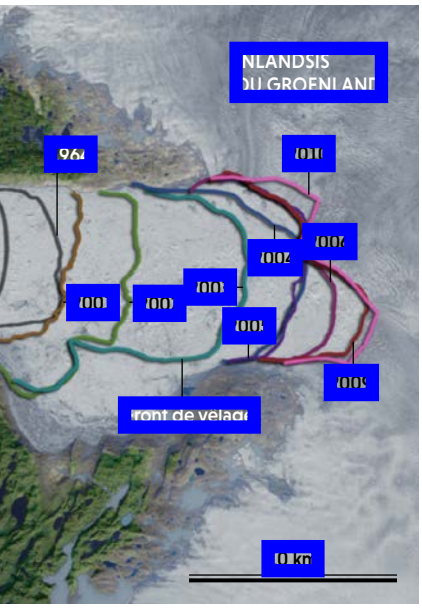
Les chercheurs suivent de près le glacier Jakobshavn parce que son retrait s'accélère alors qu'il draine à lui seul près de 10 % des glaces du Groenland. En 1997, après une stabilité de plusieurs décennies, il a commencé à s'amincir et à accélérer, ce qui a entraîné l'éjection fréquente d'icebergs. Entre 1997 et 2003, il s'est ainsi aminci de 15 mètres par an alors que les autres glaciers groenlandais ne perdaient qu'environ 1 mètre chaque année. Il progresse aujourd'hui vers la mer plus vite qu'avant (de 15 kilomètres par an), tandis que son front de vêlage recule de 10 kilomètres en 10 ans).

Ce phénomène se produit actuellement en de nombreux endroits de l'Antarctique et du Groenland. Le Jakobshavn a ainsi « sauté » un ancien haut-fond morainique et recule au sein de son fjord, ce qui lui a ouvert un chemin vers l'inlandsis. Lorsque les premiers explorateurs européens ont visité Glacier Bay, en Alaska, ce magnifique fjord était rempli d'un vaste glacier se terminant sur un grand banc de moraines. Depuis, la glace s'est retirée de cette crête quelque 100 kilomètres à l'intérieur des terres pour atteindre le terrain élevé suivant, c'est-à-dire, dans ce cas, le rivage du fond de la baie.

UNE MONTÉE DU NIVEAU MARIN DE 3,3 MÈTRES ?

La plupart de ces retraits glaciaires n'ont heureusement qu'un effet limité sur le niveau océanique. Même un grand glacier de la taille d'une baie glaciaire est petit comparé à l'océan. Jakobshavn n'est qu'un des dizaines de grands bassins-versants existant autour de la calotte glaciaire du Groenland, et son évolution ne déstabilise pas vite ses cousins des fjords voisins. Il ne se termine pas non plus trop loin à l'intérieur des terres, là où son lit s'élève. De même, l'Antarctique est drainé par un grand nombre de glaciers qui s'écoulent chacun dans une vallée. Si le réchauffement climatique est suffisant, beaucoup d'entre eux pourraient connaître un retrait, mais aucun d'eux n'a, à lui seul, de grande influence sur l'océan.

La tranchée de Bentley, dans l'Antarctique occidental, et quelques autres régions profondes de l'Antarctique oriental, notamment



es bassins de Wilkes et d'Aurora, sont des cas différents. Le retrait de seulement l'un d'eux jusqu'à la proéminence précédant celle où ils sont installés aurait un effet mondial. Les modèles indiquent le glacier de Thwaites comme le chemin le plus probable vers la tranchée de Bentley et les bassins qui lui sont adjacents. Si, comme le Jakobshavn l'a fait, il commençait à se retirer vers l'intérieur de sa vallée, sa fonte pourrait, avant qu'il ne se soit restabilisé au-dessus d'une zone élevée, faire monter le niveau de la mer de 3,3 mètres. Les bassins glaciaires de l'Antarctique oriental pourraient à eux seuls élever le niveau de la mer plus que le glacier de Thwaites, mais un réchauffement plus fort est nécessaire pour que s'amorce leur retrait des hauts-fonds marins qui les stabilisent actuellement.

Notons qu'il n'y a rien d'étrange à cela. Un réchauffement provoque le retrait de la glace, normalement jusqu'à la première proéminence en retrait. Ce phénomène a été observé à maintes reprises dans le passé et dans le présent. Si le glacier de Thwaites se réchauffe assez pour commencer à se comporter comme les glaciers du Groenland et de l'Alaska, alors il reculera.

UN SORT ENCORE INCERTAIN

À quelle vitesse le glacier de Thwaites pourrait-il évoluer? Quel réchauffement climatique pouvons-nous nous permettre sans qu'il ne commence à se retirer? Mes collègues David Pollard, de l'université d'État de Pennsylvanie, et Robert DeConto, de l'université du Massachusetts, ont élaboré un modèle physique d'écoulement de la glace, que l'on peut faire tourner sur de gros calculateurs afin d'obtenir des prédictions sur les évolutions à long terme des grandes calottes. Je les ai un peu aidés quant à la physique de l'effondrement des grandes falaises de glace, notamment dans les cas où de l'eau de fonte ouvre des crevasses.

David Pollard et Robert DeConto ont optimisé leur modèle afin qu'il décrive correctement les données géologiques du passé et afin d'évaluer les impacts de diverses intensités de réchauffement d'origine humaine. Ils ont déterminé que, même avec un réchauffement rapide, nous avons probablement quelques décennies avant que le glacier de Thwaites ne commence à s'effondrer à la suite de la perte de sa plateforme glaciaire et de l'élargissement de ses crevasses par la circulation de l'eau de fonte de surface. Il faudrait environ un siècle pour que le glacier de Thwaites s'effondre complètement.

David Pollard et Robert DeConto ne sachant pas à quelle vitesse la glace pouvait se briser, ils ont adopté un chiffre égal à celui du Jakobshavn. En fait, le glacier de Thwaites étant plus épais, il formera des falaises bien plus hautes que le Jakobshavn; or plus une falaise est haute, plus elle a tendance à se disloquer. Il se pourrait donc que nous sous-estimions le pire des scénarios.

Le modèle fonctionne bien, mais David Pollard et Robert DeConto ou d'autres vont certainement l'améliorer encore. Il reste à espérer que le glacier de Thwaites pourra se stabiliser sur une proéminence située en arrière de son front actuel sur la pente descendante de la tranchée, plutôt que de reculer davantage. Ou encore, que les icebergs formés s'accumuleront pendant un certain temps derrière la crête actuelle où la glace commence maintenant à flotter. Cela pourrait conduire à la formation d'une banquise qui limiterait la perte de glace.

Pour répondre à ces questions et à d'autres, la National Science Foundation des États-Unis et le Natural Environment Research Council du Royaume-Uni ont lancé, en association avec des collaborateurs internationaux, un effort majeur pour en apprendre encore plus sur l'histoire du glacier de Thwaites, sur la façon dont il s'écoule et sur le fond marin sur lequel il progresse. Cela devrait nous aider à mieux prévoir son avenir.

Les données produites réduiront nos incertitudes, mais il restera difficile de répondre à certaines questions. Pensez à toutes les tasses à café en céramique que vous avez vues tomber sur un sol dur. Certaines rebondissent, d'autres se fendent et d'autres encore se brisent en mille morceaux. Les processus physiques à l'origine de ces divers types de fracturation sont bien connus et faciles à décrire, et le comportement moyen d'une fracture est prévisible. Cependant, jamais vous ne parieriez quelque chose d'important pour vous sur le sort de la prochaine tasse qui tombera.

L'avenir du glacier de Thwaites dépend beaucoup de la façon dont il se fracturera. Sa plateforme glaciaire va-t-elle se séparer de la glace qui l'alimente aujourd'hui, ce qui lui ferait dépasser la protubérance qui le stabilise actuellement et le ferait reculer dans de profonds bassins? D'énormes icebergs seront-ils débités si la perte de la plateforme de glace produit un front de vêlage plus haut que n'importe quelle falaise actuelle, entraînant un recul plus rapide que tout ce que nous avons jamais vu? L'eau de fonte est importante, mais quelle quantité d'eau s'écoulera dans les rivières jusqu'à la mer, et quelle quantité s'infiltrera dans la neige et regèlera? À quelle vitesse l'air se réchauffera-t-il? En comparaison, prédire le sort d'une tasse n'est pas difficile!

Si l'humanité parvient à se mobiliser assez, le ralentissement, voire l'arrêt, du réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre freinera la hausse du niveau de la mer et réduira le coût croissant des submersions côtières. Si toutefois le glacier de Thwaites devait commencer à se retirer rapidement, alors il sera urgent d'agir et de limiter les dégâts associés. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Milillo *et al.*, **Heterogeneous retreat and ice melt of Thwaites Glacier, West Antarctica**, *Science Advances*, vol. 5, eaau3433, 2019.

T. A. Scambos *et al.*, **How much, how fast ? : A science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites glacier in the 21st century**, *Global and Planetary Change*, vol. 153, pp. 16-34, 2017.

R. DeConto et D. Pollard, **Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise**, *Nature*, vol. 531, pp. 591-597, 2016.

R. Alley *et al.*, **Oceanic forcing of ice-sheet retreat : West Antarctica and more**, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 43, pp. 207-231, 2015.

L'ESSENTIEL

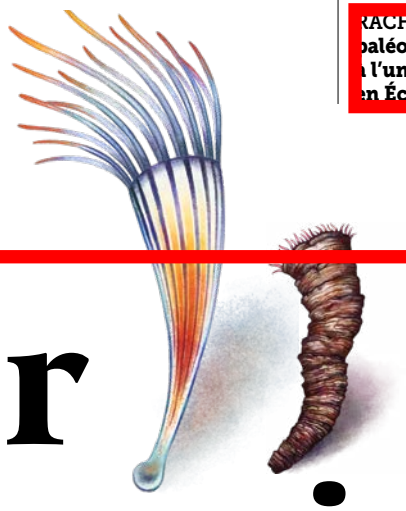
- Les chercheurs ont longtemps pensé que les animaux complexes étaient apparus au cours de l'explosion du vivant survenue au Cambrien, il y a environ 540 millions d'années.
- De nouvelles techniques pour reconstituer la chimie des anciens océans ont livré des indices sur les pressions environnementales qui ont façonné cette diversification primitive.
- Mais de plus en plus de fossiles suggèrent qu'en réalité, ils ont émergé des millions d'années auparavant, durant l'Édiacarien.

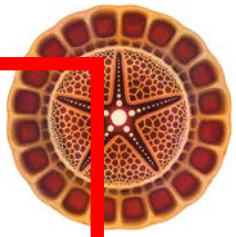
L'AUTEURE



RACHEL A. WOOD
paléontologue et géologue à l'université d'Édimbourg, en Écosse





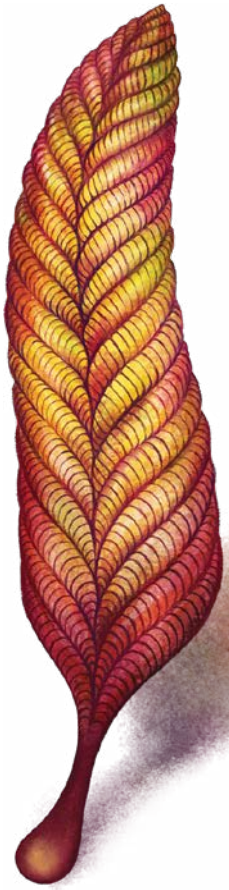


L'essor des premiers animaux

La découverte de nouveaux fossiles d'animaux complexes et l'analyse de la chimie des anciens océans révèlent les racines étonnamment lointaines de l'explosion cambrienne.

Grimpez en haut des falaises blanches et escarpées qui surplombent les grandes rivières de Sibérie. Au sommet, vos pieds fouleront les vestiges d'un tournant de l'histoire de la vie sur Terre : la limite géologique, vieille de 541 millions d'années, entre les périodes précambrienne et cambrienne. Les roches situées en dessous de cette ligne contiennent peu de restes fossiles : des empreintes fantomatiques d'organismes à corps mou et quelques formes de coquilles. Mais cassez n'importe quelle roche juste au-dessus de la limite, elle regorgera de coquilles. Un peu plus haut encore, des organismes fossilisés familiers, comme les trilobites, apparaissent. Ces changements documentent ce que l'on nomme l'explosion cambrienne, l'un des événements les plus importants de l'évolution, mais qui reste encore mal compris.

Des décennies durant, les chercheurs ont pensé que l'origine des animaux complexes – des organismes multicellulaires aux tissus différenciés – remontait à l'explosion cambrienne. De fait, une profusion de formes nouvelles ont vu le jour à cette période, dont les ancêtres de beaucoup des groupes majeurs d'animaux actuels. Cependant, de récentes découvertes en Sibérie, en Namibie et ailleurs montrent que les animaux complexes sont en réalité apparus des millions d'années avant l'explosion cambrienne, au cours du dernier chapitre du Précambrien, une période appelée l'Édiacarien. Parmi ces découvertes, on compte les plus anciens organismes connus dotés de squelettes interne et externe composés de tissu >





Les plus anciens animaux complexes connus, vieux de plus de 550 millions d'années, avaient des formes variées et mesuraient quelques centimètres, voire plus.



minéralisé, une innovation clé de l'évolution visible chez beaucoup des animaux actuels.

La présence de ces organismes équipés de leur «armure» si loin dans le passé – il y a 550 millions d'années – indique que les pressions écologiques et environnementales supposées avoir présidé à l'explosion cambrienne étaient déjà à l'œuvre bien avant. Découvrir comment ces facteurs ont modelé l'évolution des premiers animaux complexes durant l'Édiacarien est crucial pour comprendre l'incroyable explosion de diversification de la vie qui a suivi au cours du Cambrien.

Les registres fossiles du Cambrien ont fait l'objet de recherches intenses pendant plus de 150 ans. Les modèles généraux décrivant quand et où sont apparus les fossiles du Cambrien sont donc relativement bien établis: des fossiles similaires ont fait leur apparition sur de nombreux continents à peu près au même moment, et ils ont subi la même succession de changements évolutifs de façon plus ou moins synchrone. Mais ce n'est que récemment, à la lumière des découvertes des fossiles plus anciens de l'Édiacarien, que l'on commence à distinguer les racines de l'explosion cambrienne. Grâce, en partie, au développement de nouvelles techniques géochimiques qui ont révolutionné notre compréhension de la chimie changeante des océans de l'époque, on perçoit aussi pourquoi elle a eu lieu à ce moment.

Ce n'est que tout récemment que l'on a pu intégrer les informations issues des registres géochimique et fossile pour montrer comment la biosphère, la géosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère, qui ensemble constituent le système Terre, ont fonctionné durant cette période. Mais l'on peut d'ores et déjà esquisser une image saisissante de la manière dont, des dizaines de millions d'années avant l'explosion cambrienne, le fond marin s'est peu à peu peuplé d'organismes toujours plus complexes, devenant le terreau de la vie animale telle que nous la connaissons.

LES PREMIERS ANIMAUX

La plus ancienne preuve de l'existence d'animaux ne vient pas de fossiles identifiables, mais de restes de composés organiques appelés biomarqueurs. Il y a une dizaine d'années, des géologues ont découvert l'un de ces biomarqueurs, une forme particulière de stérane, dans des roches très bien préservées d'une série sédimentaire connue sous le nom de Supergroupe de Huqf, à Oman, vieille d'au moins 650 millions d'années. Certains experts ont avancé que ces stéranes étaient propres à un groupe particulier d'éponges et que la présence de ces molécules dans les roches de Huqf documentait ainsi l'existence de ces animaux déjà à cette époque. Cependant, tous les chercheurs n'acceptent pas leur postulat. En effet, une étude publiée en avril suggère que les stéranes seraient caractéristiques d'un groupe d'amibes unicellulaires.

Les plus vieilles traces susceptibles d'être des fossiles d'animaux, qui proviennent d'une couche géologique de roches du sud de la Chine nommée la Formation de Lantian et remonteraient à 635 millions d'années, sont contestées de la même manière. Certains pensent que ces minuscules formes à corps mou ont un lien de parenté avec les coraux ou les méduses, car ils présentent des structures en forme de tentacules; mais la conservation de ces fossiles n'est pas suffisamment bonne pour en permettre une interprétation non équivoque, ce qui laisse de nombreux chercheurs dubitatifs sur le fait qu'ils correspondent à des animaux.

Les restes d'animaux les plus anciens sur lesquels presque tout le monde s'accorde sont les fossiles de Terre-Neuve, âgés d'environ 571 millions d'années. Ces animaux vivaient donc peu après la dernière glaciation de type «Terre boule de neige», qui a recouvert une bonne partie de la planète sous une couche épaisse de glace. Des organismes à corps mou mesurant jusqu'à un mètre de hauteur ou de largeur dominaient cette faune édiacarienne. Certains avaient la forme de grandes feuilles semblables à des plumes, avec des tiges verticales qui les ancraient au fond marin. D'autres s'étendaient sur le sol océanique, leur corps plat montrant une architecture fractale, avec des ramifications qui présentaient les mêmes motifs à toutes les échelles. Tous ces plans d'organisation maximisent la surface, ce qui suggère que ces animaux absorbaient des nutriments issus de l'eau environnante.

Des organismes à corps mou mesurant jusqu'à un mètre de hauteur dominaient cette faune

Cette faible diversité de la faune a prévalu pendant plus de dix millions d'années. Mais ensuite, le cours de l'évolution animale s'est accéléré. Le registre fossile indique qu'il y a environ 560 millions d'années, le biote édiacarien a commencé à se diversifier et à inclure des formes mobiles qui peuplaient les mers peu profondes. Certains fossiles conservent des

marques d'éraflures qui suggèrent que ces animaux broutaient des tapis d'algues. D'autres se sont peut-être traînés à travers les algues, absorbant les nutriments *via* la face inférieure de leur corps. Les premières galeries apparaissent aussi à cette époque, preuve que les animaux avaient commencé à se mouvoir et à déplacer les sédiments du fond marin.

Les plus anciens fossiles révélant des squelettes externe et interne apparaissent soudain dans des roches calcaires (principalement constituées de carbonate de calcium) vieilles de 550 millions d'années. On trouve ces fossiles, déjà de tailles et de formes variées, dans des lieux aussi éloignés que la Sibérie, le Brésil et la Namibie. La présence, partout dans le monde et au même moment, de squelettes chez autant de groupes d'animaux sans liens de parenté témoigne d'une force évolutive majeure opérant à l'échelle mondiale. On ne connaît pas sa nature avec certitude, mais on en a une petite idée. Fabriquer un squelette est coûteux en énergie. Aussi, pour qu'un animal se lance dans une telle entreprise, les bénéfices doivent surpasser les coûts. Les raisons susceptibles de favoriser la présence de squelettes sont nombreuses, mais la principale est, de loin, le besoin de se protéger des prédateurs. Bien qu'il n'existe pas de preuve fossile de prédateurs de cette époque, l'apparition de squelettes pourrait refléter la première manifestation d'animaux qui en mangeaient d'autres à une large échelle.

UN ANCIEN CONSTRUCTEUR DE RÉCIFS

Des analyses récentes de ces anciens squelettes ont livré des indices séduisants sur l'aspect de leurs propriétaires et sur leur mode de vie. Connu à partir de fossiles de son délicat squelette tubulaire qui mesurait jusqu'à 70 millimètres de long et ressemblait à un empilement de cornets de glace, un organisme nommé *Cloudina* occupe une place importante dans nos reconstitutions des écosystèmes de l'Édiacarien. *Cloudina* a été découvert pour la première fois en Namibie en 1972, et on a longtemps pensé qu'il se développait fixé au fond marin. Mais ces dernières années, des chercheurs ont identifié de nombreux nouveaux spécimens de *Cloudina* dans des sites de par le monde, qui ont changé ce point de vue. Le travail de mon équipe sur des spécimens de Namibie a montré que *Cloudina* croissait de différentes manières. Il pouvait se fixer à des tapis de microbes liés aux sédiments mous du fond marin ou s'ancrer à des couches superposées de cyanobactéries. Mieux, les individus *Cloudina* étaient capables de se cimenter les uns aux autres et de former un récif. Cette découverte a permis d'établir que *Cloudina* était l'un des plus anciens animaux constructeurs de récifs, reculant le record de ce mode de vie de quelque vingt millions d'années.





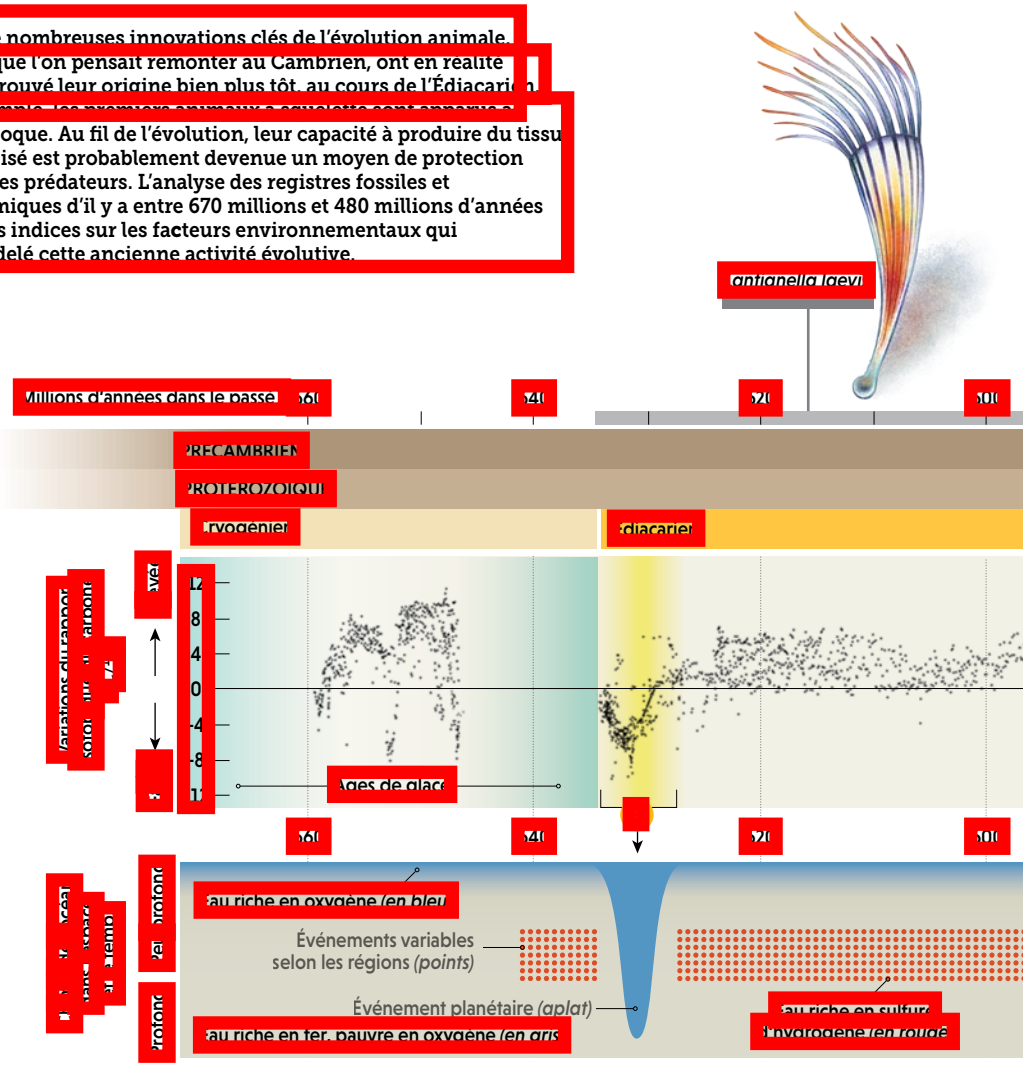
Des fossiles clés d'animaux complexes proviennent de roches de l'Édiacarien sur les rives de la rivière Youdoma, en Sibérie (1) et en bordure du désert du Namib, en Namibie (2).

On ignore si *Cloudina* a un lien de parenté avec des constructeurs de récifs modernes, tels les coraux. Mais comme les coraux constructeurs de récifs, il vivait à proximité d'un certain nombre d'autres animaux. Des indices sur cette association étroite ont été retrouvés à partir d'autres fossiles à squelettes, découverts dans des roches du même âge que celles qui contiennent les fossiles de *Cloudina*. Un organisme nommé *Namacalathus*, connu dans divers sites fossilifères autour du globe, semble avoir été l'un des compagnons de *Cloudina*. Son squelette, qui pouvait atteindre 50 millimètres de long, était composé d'une délicate tige à paroi fine surmontée d'une coupe munie d'une ouverture centrale sur le dessus et de plusieurs autres sur les côtés. Les tissus mous de l'animal se trouvaient probablement en grande partie à l'intérieur de la coupe, bien qu'ils n'aient jamais été préservés. Les fossiles de *Namacalathus* indiquent qu'il croissait enraciné à un tapis microbien, souvent près de *Cloudina*.

Namapoikia, un organisme connu uniquement à partir de sites namibiens, côtoyait lui aussi *Cloudina*. Cet animal est remarquable par >

AVANT L'EXPLOSION CAMBRIENNE

De nombreuses innovations clés de l'évolution animale, que l'on pensait remonter au Cambrien, ont en réalité trouvé leur origine bien plus tôt, au cours de l'Édiacarien. Par exemple, les premiers animaux à squelette sont apparus à cette époque. Au fil de l'évolution, leur capacité à produire du tissu minéralisé est probablement devenue un moyen de protection contre les prédateurs. L'analyse des registres fossiles et géochimiques d'il y a entre 670 millions et 480 millions d'années livre des indices sur les facteurs environnementaux qui ont modelé cette ancienne activité évolutive.



PREUVES GÉOCHIMIQUES

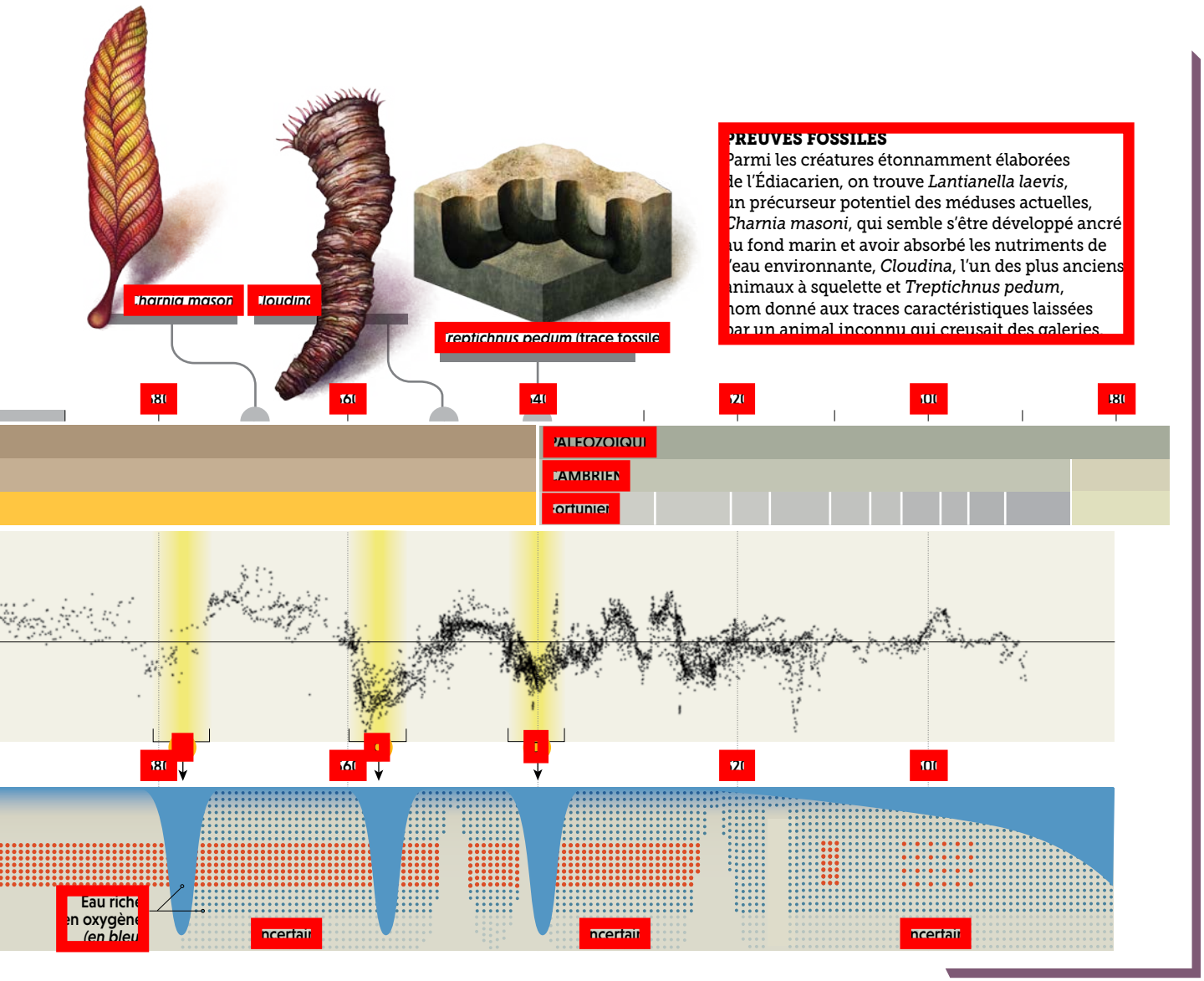
Les animaux ont besoin d'oxygène pour survivre. La diversification survenue au cours de l'Édiacarien a eu lieu alors que la concentration en oxygène dans les océans de la planète fluctuait beaucoup. L'étude des isotopes du carbone dans les roches de l'Édiacarien montre que le cycle de cet élément était instable et fluctuait beaucoup. Des analyses des diverses formes du fer présentes dans ces roches révèlent quant à elles que l'oxygène dissous dans les océans a probablement atteint un seuil ou une série de seuils au cours de l'Édiacarien, ce qui a permis aux animaux de se diversifier en comblant leurs besoins métaboliques, qui croissaient à mesure qu'ils devenaient plus actifs. Les chercheurs pensent désormais que les mers se sont oxygénées *via* non pas une augmentation lente et progressive, mais plutôt une série d'événements (A, B, C et D) qui semblent coïncider avec les variations des isotopes du carbone. Cette tendance s'est poursuivie durant l'Édiacarien et probablement bien au-delà.

sa grande taille – jusqu'à un mètre de diamètre – et son squelette robuste. D'après sa forme, nous pensons que *Namapoikia* était une éponge et arborait ainsi un squelette interne et non externe, comme c'était probablement le cas de *Cloudina* et *Namacalathus*. Curieusement, *Namapoikia* se développait dans les recoins cachés des récifs, s'incrustant dans les parois verticales des fissures et des crevasses ouvertes. Dans les récifs actuels, les communautés d'animaux et de plantes vivant à la surface de ces édifices diffèrent de celles qui occupent les grottes, les crevasses et le dessous des falaises. Nos découvertes de fossiles édiacariens indiquent que cette distinction est aussi ancienne que les récifs d'origine animale eux-mêmes.

Ces observations sont importantes, car la construction de récifs représente une innovation écologique essentielle. En se développant à proximité, voire en se soudant ensemble, les individus deviennent mécaniquement plus forts, s'élèvent au-dessus du fond marin à l'écart des concurrents, augmentent l'efficacité de leur prise de nourriture et acquièrent une protection contre les prédateurs. Ainsi, comme l'apparition des tout premiers squelettes dans les registres fossiles de l'Édiacarien, celle de récifs pourrait indiquer que des pressions écologiques complexes grandissantes étaient déjà à l'œuvre. L'explosion cambrienne, ainsi qu'une course aux armements entre proies et prédateurs, avait donc peut-être déjà commencé.

LE RÔLE CLÉ DE L'OXYGÈNE

Au milieu des années 2010, il est devenu clair que le Cambrien ne se démarquait pas aussi clairement de l'Édiacarien que les experts l'avaient longtemps envisagé. Non seulement des chercheurs avaient commencé à accumuler des preuves indiquant que les squelettes et les récifs étaient apparus plus tôt qu'on ne le pensait, mais nous avions aussi développé des modèles d'écosystèmes montrant que les communautés animales de l'Édiacarien partageaient de nombreux



PREUVES FOSSILES
Parmi les créatures étonnamment élaborées de l'Édiacarien, on trouve *Lantianella laevis*, un précurseur potentiel des méduses actuelles, *Charnia masoni*, qui semble s'être développé ancré au fond marin et avoir absorbé les nutriments de l'eau environnante, *Cloudina*, l'un des plus anciens animaux à squelette et *Treptichnus pedum*, nom donné aux traces caractéristiques laissées par un animal inconnu qui creusait des galeries.

traits écologiques avec celles du Cambrien. La mèche qui avait allumé l'explosion cambrienne se révélait bien plus longue qu'on ne le pensait.

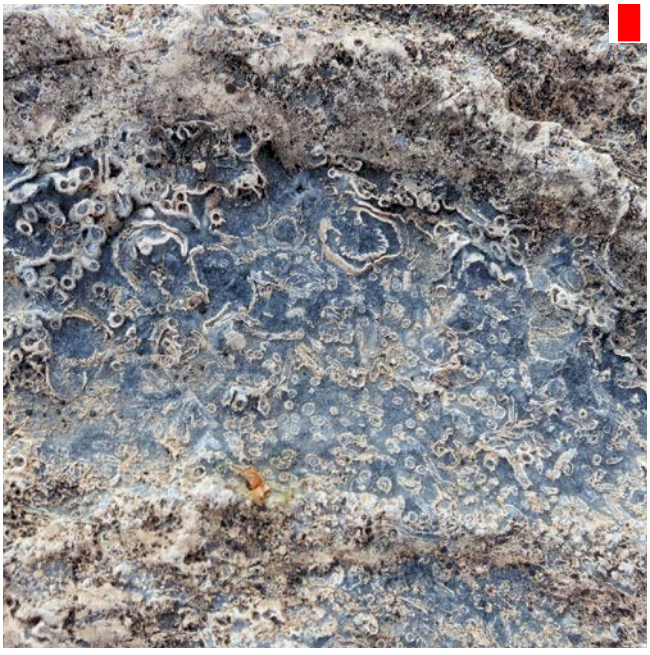
Puis, il y a quelques années, certaines découvertes clés en Sibérie et en Chine ont brouillé encore davantage les frontières entre les mondes édiacarien et cambrien. En 2016, Ben Yang, de l'Académie chinoise de sciences géologiques, à Beijing, et des collègues chinois et allemands ont montré que *Cloudina* avait perduré durant le Cambrien. Mon groupe, quant à lui, avec des collègues de Russie et de Chine, a découvert en 2017, dans des roches édiacariennes, des fossiles que l'on pensait propres au Cambrien. Pour nous, ces découvertes signifiaient une chose : pour résoudre le mystère de l'explosion cambrienne, nous devions comprendre les dynamiques du monde édiacarien qui avaient donné naissance à ces animaux.

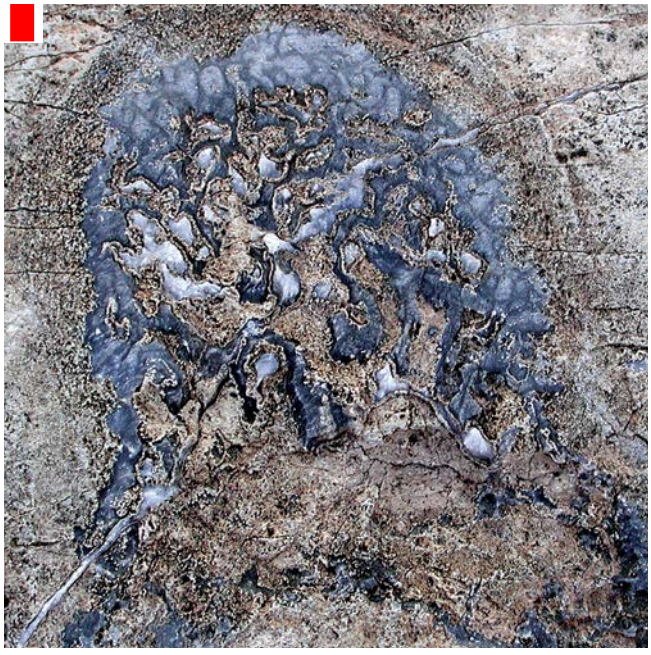
Le rôle potentiel des variations de l'oxygène disponible dans ces dynamiques, en particulier, intéressait les chercheurs. En effet, les animaux ont besoin d'oxygène. Aussi, une question centrale, ces dernières années, a consisté à déterminer si, à un moment de la période couvrant l'Édiacarien et le Cambrien, la concentration en oxygène dans les océans a augmenté au-delà d'un certain seuil critique qui aurait permis aux animaux d'y prospérer. La question est plus compliquée qu'elle n'en a l'air, car les animaux n'ont pas tous les mêmes besoins en oxygène. Les organismes simples et immobiles, comme les éponges, sont susceptibles d'avoir besoin de moins d'oxygène que les animaux mobiles, et ils en ont certainement moins besoin que les prédateurs actifs et qui nagent vite. Nous avons gardé cela à l'esprit au cours de nos recherches.

Par chance, nombre de nouvelles méthodes géochimiques pour estimer la quantité d'oxygène dans ces mers anciennes se sont développées ces dernières années. Une technique particulièrement efficace, la spéciation du fer, exploite les caractéristiques des diverses formes du fer, qui se comportent différemment









Cloudina est l'un des plus anciens organismes dotés un squelette externe. Il est connu grâce à des fossiles qui préservent sa délicate « armure » tubulaire *(1)*. Les individus *Cloudina* étaient capables de se cimenter les uns aux autres et de former des récifs. *Namacalathus* est un autre organisme primitif possédant un squelette, dont les parties dures en forme de coupe sont préservées en masse *(2)*. *Cloudina* et *Namacalathus* sont souvent retrouvés ensemble *(3)*. *Namapoikia*, une éponge primitive, était l'un des autres compagnons de *Cloudina* et se développait dans les failles cachées des récifs *(4)*.

en présence ou en l'absence d'oxygène. Cette méthode permet de voir à une échelle locale où et quand la quantité d'oxygène était suffisante pour subvenir aux besoins d'une vie complexe. Les études menées en utilisant cette approche ont conduit à un large consensus : l'oxygène dissous dans l'océan a probablement atteint un seuil ou une série de seuils au cours de l'Édiacarien, ce qui a permis aux animaux de se diversifier en comblant leurs besoins métaboliques, qui croissaient à mesure qu'ils devenaient plus mobiles et actifs.

Les chercheurs ont désormais rassemblé assez de données géochimiques pour que l'on reconstitue la répartition de l'oxygène non seulement dans les différents sites édiacariens d'une même époque, mais de façon globale au cours du temps. Au fil de l'Édiacarien et du début du Cambrien, ce travail révèle des répartitions qui diffèrent notablement de celle d'aujourd'hui, avec de nombreuses zones constituées d'une couche fine d'eaux peu profondes bien oxygénées, au-dessus d'une couche plus épaisse d'eau de mer plus profonde et probablement totalement dénuée d'oxygène – un état dit anoxique.

Ces données géochimiques montrent également que la frontière entre les eaux anoxiques et oxiques était particulièrement dynamique au cours de cette période, s'élevant et s'abaissant avec les variations du niveau marin. Les zones du fond marin peu profond habitables pour les animaux primitifs étaient par conséquent encore

UNE EXPLOSION DE VIE POSTGLACIAIRE



À la base de la butte de Nankoweap, dans le Grand Canyon, de fins bancs calcaires alternent avec des niveaux argileux. Les biomarqueurs proviennent de la matière organique contenue dans ces derniers.

Comme le précise Rachel Wood, l'avancée des techniques d'analyse a permis aux paléontologues et aux géologues d'effectuer un pas majeur dans la compréhension de l'origine de la vie sur Terre et de son évolution. Outre les informations paléontologiques, qui fournissent un aperçu fragmentaire de la biodiversité à un moment précis de l'histoire de la planète, de nouvelles techniques géochimiques et isotopiques aident les chercheurs à reconstituer les environnements dans lesquels les organismes évoluaient. Température, salinité, quantité d'oxygène sont autant d'indices qui relient environnement et biodiversité.

Aujourd'hui, grâce à ces techniques, on s'aperçoit que le vivant était bien plus diversifié qu'on ne le pensait durant l'Édiacarien (il y a entre 635 millions et 542 millions d'années). On va même plus loin. L'Édiacarien fait directement suite à un épisode glaciaire extrême, nommé « Terre boule de neige », ayant recouvert la planète entière de glace pendant plusieurs millions d'années. Or, au début des années 1970, les paléontologues américains Stephen Jay Gould et Niles Eldredge ont proposé une hypothèse de travail, dite des équilibres ponctués, selon laquelle l'évolution n'est pas progressive, mais se fait par périodes d'évolution rapide entrecoupées de périodes de stabilité, les pressions environnementales favorisant l'évolution rapide par sélection naturelle. Longtemps critiquée, cette hypothèse est devenue incontournable dans la théorie actuelle de l'évolution, appuyée par des champs récents de la biologie comme la génétique et l'épigénétique. Il est ainsi probable que le goulet d'étranglement qu'ont représenté les épisodes de type Terre boule de neige ait joué un rôle primordial dans le façonnement de la vie telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Pour reconstruire la biodiversité et l'environnement juste après l'épisode qui a marqué le début de l'Édiacarien, devant le manque de fossiles dans les niveaux géologiques correspondants, nous nous sommes tournés vers une technique d'extraction de fossiles moléculaires nommés biomarqueurs. Cette technique repose sur le fait que différentes espèces synthétisent des molécules organiques qui leur sont propres et qui peuvent être préservées dans les sédiments pendant plusieurs millions d'années. En 2017 et en 2019, grâce à cette technique, nous avons relié ces épisodes glaciaires à deux évolutions biologiques importantes.

La première montre l'apparition à cette période d'une molécule, le 24-éthyl-stérol. Cette molécule rend la membrane cellulaire plus résistante aux variations de température. Cette innovation biologique aurait donné aux algues vertes un avantage considérable, leur permettant de proliférer et de coloniser la surface de la planète. La deuxième révèle qu'au lendemain de la glaciation, un changement radical s'est opéré dans les écosystèmes : l'évolution concomitante de différents biomarqueurs suggère que la Terre est passée d'un monde majoritairement bactérien à des écosystèmes dominés par des algues unicellulaires qui, d'après l'ampleur du phénomène, ne s'étaient pas contentées d'entrer en compétition avec les bactéries pour s'alimenter, mais s'en étaient elles-mêmes nourries. En d'autres termes, l'émergence de la prédation à l'échelle des microorganismes avait alors, déjà, drastiquement modifié les écosystèmes.

> **Les glaciations de type Terre boule de neige ont eu un rôle majeur dans l'évolution de la vie**

Les glaciations ont longtemps été vues comme des causes d'extinction massive d'espèces. Nous commençons tout juste à comprendre leur rôle de catalyseur de l'évolution. Il reste maintenant à préciser la chronologie des différents événements qu'elles ont causés en étudiant notamment les sédiments du Grand Canyon ou de la vallée de la Mort, qui représentent de véritables archives sédimentaires de ces périodes clés de l'histoire de notre planète. Peut-être, alors, arriverons-nous à relier ces événements à ceux qui, durant l'Édiacarien et le Cambrien, ont conduit à l'explosion des animaux complexes.

PIERRE SANSJOFRE
Laboratoire Géosciences océan, université de Bretagne occidentale, Brest

L. M., van Maldegem *et al.*, *Nature Commun.*, vol. 10(1), article 476, 2019 ; Y. Hoshino *et al.*, *Science Advances*, vol. 3(9), e1700887, 2017

> plus réduites que les chercheurs ne l'attendaient; elles constituaient de véritables oasis d'eau riche en oxygène. Comment ces facteurs ont-ils pu modeler l'extraordinaire diversification apparue à cette époque?

LES FLUCTUATIONS DE L'OXYGÈNE, UN MOTEUR DE L'INNOVATION ?

Les périodes d'anoxie accrue du fond marin coïncident avec certaines extinctions de masse bien connues, comme celle qui a marqué la fin du Permien, il y a 252 millions d'années, au cours de laquelle 90 % des espèces marines ont disparu. Mais plusieurs diversifications majeures ont débuté durant de longues périodes d'anoxie fluctuante des eaux peu profondes, notamment les diversifications de l'Édiacarien-Cambrien, de l'Ordovicien (100 millions d'années plus tard) et de la seconde moitié du Trias, il y a environ 247 millions d'années. Considérant ces événements, mon collègue Doug Erwin, de la Smithsonian Institution, et moi avons émis l'hypothèse que les conditions mouvantes en oxygène avaient pu créer des occasions propices à la fixation d'innovations évolutives chez les animaux à corps mou.

Il est bien plus simple pour les animaux de fabriquer un squelette de calcaire – le matériau qui constitue les squelettes et coquilles de nombreux organismes marins modernes – lorsque la concentration en oxygène dans l'eau de mer est supérieure à dix micromoles par litre. Les animaux à corps mou n'ont peut-être été capables de fabriquer ces squelettes de carbonate de calcium que lorsque la concentration en oxygène a atteint un tel seuil, permettant à des oasis auparavant isolées de s'étendre, de se connecter et de parvenir à une stabilité à l'échelle de la planète.

Il reste beaucoup à découvrir sur la façon dont la vie a réagi aux variations de la disponibilité en oxygène à l'échelle de l'évolution. Cette réaction était probablement compliquée, car les animaux étaient aussi soumis à d'autres facteurs, comme l'augmentation de la prédation. De plus, des rétrocontrôles entre les organismes, les écosystèmes et, plus largement, le système planétaire, dont on sait peu de choses, figuraient probablement aussi dans l'équation.

Nous avons du pain sur la planche. Des variations spectaculaires dans les processus régionaux qui ont modelé la croûte terrestre au cours de l'Édiacarien et du Cambrien ont produit de nombreuses lacunes importantes dans les registres fossile et géologique. Par conséquent, pour reconstituer l'histoire de l'essor des animaux complexes, nous devons assembler les données collectées dans une multitude de sites tout autour du monde. Le fait que beaucoup des sites clés de l'Édiacarien soient mal datés complique encore davantage la tâche. Habituellement, nous datons les roches de cette époque en mesurant le rapport plomb/uranium dans les cristaux de zircon des couches de cendres d'anciennes éruptions volcaniques retrouvées à proximité. Il s'agit de l'une des quelques méthodes qui fournissent un âge absolu, radiométrique, pour une roche donnée. Malheureusement, nombre des successions sédimentaires que nous connaissons le mieux sont dépourvues de telles couches. En conséquence, nous sommes incapables de corréler avec précision les changements évolutifs survenus dans différentes parties du monde, ce qui est essentiel pour créer une chronologie fiable des événements. Un exemple de cette difficulté est la Formation de Lantian, en Chine, qui a livré des animaux fossiles candidats pour être les plus anciens connus, mais dont l'âge remonte à n'importe quelle période entre 635 et 590 millions d'années et est toujours très débattu.

> **Les squelettes n'ont peut-être pu apparaître qu'à partir d'un certain seuil en oxygène**

Néanmoins, il existe des raisons d'être optimiste. De nouvelles couches de cendres sont mises au jour et les méthodes de datation sont affinées. Par exemple, les couches de cendres que de nombreuses équipes utilisent pour déterminer les âges des fossiles édiacariens découverts en Namibie ont récemment été redatées et les plus récentes – celles les plus proches de la frontière Précambrien-Cambrien – se sont révélées plus jeunes de plus de deux millions d'années qu'on ne le pensait. Ce qui a des répercussions sur la correspondance réelle entre ces fossiles et leurs homologues de Terre-Neuve et de Sibérie, entre autres. De plus, des géochimistes développent de nouvelles techniques isotopiques et d'autres méthodes susceptibles d'améliorer notre compréhension de l'oxygénation des océans de ce monde ancien. Enfin, mon équipe et d'autres découvrent de nouveaux fossiles dans des lieux reculés et jusqu'ici largement inexplorés, comme la Sibérie. Gageons que dans un futur pas si lointain, quand nous nous tiendrons sur ces falaises, contemplant la grande forêt en contrebas, notre compréhension de cette tranche de temps si extraordinaire sera bien plus profonde.

BIBLIOGRAPHIE

R. Wood *et al.*, **Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian explosion**, *Nat. Ecol. Evol.*, vol. 3, pp. 528-538, 2019.

M. Zhu *et al.*, **A deep root for the Cambrian explosion : Implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian Platform**, *Geology*, vol. 45(5), pp. 459-462, 2017.

R. Tostevin *et al.*, **Low-oxygen waters limited habitable space for early animals**, *Nature Communications*, vol. 7, article n° 12818, 2016.

UN



NE MEURT JAMAIS.

EN TRIANT VOS JOURNAUX, MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES, PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

CONSIGNESDETRI.FR

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio



POUR EN SAVOIR PLUS

. Lebart, **Inventions (1915-1938)**, RVB Books/CNRS, 2019.

« La Saga des inventions. Du masque à gaz à la machine à laver. Les archives du CNRS », exposition coproduite par le CNRS et les Rencontres d'Arles, en partenariat avec les Archives nationales. Tous les jours de 10 h à 19 h 30 jusqu'au 22 septembre 2019 à l'espace Croisière, à Arles.

L'AUTEURE

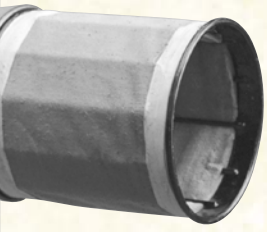


LUCE LEBART
historienne de la photographie et commissaire de l'exposition « La Saga des inventions », à Arles



Les folles inventions de l'ancêtre du CNRS

Électrification des plantes, hangar gonflable, projecteur sur nuage… En France, entre 1915 et 1938, la Direction des inventions intéressant la défense nationale, ancêtre lointain du CNRS, a recensé des milliers de fabuleuses trouvailles. Et les a photographiées. Les images les plus étonnantes sont exposées cet été à Arles.



CORNETS ACOUSTIQUES, 1935
Utilisés pour l'émission et la réception d'ondes sonores, ces cornets géants visaient à écouter des sources lointaines. Le 20 mars 1934, l'inventeur Georges Mabboux demanda un brevet pour cette version perfectionnée, aux parois optimisées pour atténuer les distorsions et réduire le bruit de fond. Celui-ci fut délivré le 1er mai 1939, mais entre-temps, les recherches sur le radar ont permis aux techniques de détection de franchir un cap, rendant ces « grandes oreilles » obsolètes et aux limites du fantasque.

Paris, janvier 1917. Au cœur du premier conflit mondial, le républicain Jules-Louis Breton est nommé à la tête du tout nouveau sous-secrétariat d'État aux Inventions intéressant la défense nationale. Breton, qui déteste la bureaucratie et ses lenteurs, systématise l'emploi de la photographie précisément pour accélérer les processus et transformer une idée, d'où qu'elle vienne, en un objet défensif ou offensif utilisable le plus rapidement possible. Associées aux plans et aux rapports d'inventions, les images facilitent l'évaluation des projets tout en permettant d'en conserver la trace. Substituts des prototypes, elles sont faciles à ranger dans des dossiers et aisément communicables en commission. Au fil des jours et des expériences, les clichés s'accumulent comme autant d'observations peuplant un grand cahier de laboratoire virtuel. Ces milliers d'images nous confrontent aux méandres du progrès technique, aux vacillations parfois touchantes du processus même de création, qu'il s'agisse de survivre en temps de guerre ou de mieux vivre une fois la paix revenue.

Au service des inventions, elles ont joué un rôle administratif et pédagogique d'information, de démonstration, voire de publicité, jusqu'à sa disparition en 1938, quand l'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (ONRSII), dont il faisait partie, a disparu au profit du Centre national de la recherche scientifique, le CNRS. Bien que produites sans intention artistique, ces images ont d'indéniables qualités esthétiques et possèdent même ce que l'on pourrait appeler un style photographique, comparable à celui d'un auteur, alors même que les images ne sont jamais signées.

Il se trouve que, derrière ces clichés, se cachent deux réalisateurs phares des débuts du cinéma, Alfred Machin et Jean Comandon, opérant respectivement de 1917 à 1919 puis à partir de 1920. Leurs imaginaires cinématographiques modèlent l'archive des inventions, alternant gros plans, vues en plongée et mises en scène burlesques. L'archive visuelle frappe par sa fantaisie, ses touches d'humour et sa liberté à déjouer les codes de l'objectivité photographique. Le comique est d'autant plus inattendu que le contexte est militaire et scientifique. Comme au cinéma, les mises en scènes photographiques nous racontent des histoires… ■

EN TEMPS DE GUERRE



TROMPETTE DE TRANCHEE, 1917

Pendant la Première Guerre mondiale, Jean Perrin, futur fondateur du CNRS, alors professeur de chimie-physique à la faculté des sciences de Paris, fut mobilisé comme officier du Génie. Il mit au point un clairon à air comprimé portatif qui amplifiait le son naturel de l'instrument en remplaçant le souffle humain par un mécanisme envoyant de l'air stocké sous pression dans des bouteilles portatives. Surnommé « liaison acoustique », l'instrument, dit d'ordonnance, servait originellement à transmettre des ordres militaires. Ses sons et sa tonalité en si bémol, facilement reconnaissables, servaient à signifier « commencez le feu », « garde à vous », « le rassemblement », « à la soupe », etc. D'une portée de plusieurs kilomètres, ce clairon fut utilisé avec succès lors de la reprise du fort de Douaumont. Perrin, quant à lui, obtint le prix Nobel de physique en 1926 pour avoir prouvé l'existence des atomes.





MASQUES, 1917

« Des hommes se roulaient à terre, convulsés, toussant, vomissant, crachant le sang. » Ces mots du médecin du 66e régiment d'infanterie disent l'horreur provoquée par l'offensive chimique du 22 avril 1915 à Ypres, en Belgique. Cent cinquante tonnes de chlore furent portées par le vent en un lourd nuage jaunâtre flottant à un mètre des tranchées. Près de la moitié des hommes intoxiqués moururent. En conséquence, dès avril 1915, priorité fut donnée aux moyens de protection contre les gaz. Aux mouchoirs et chaussettes imbibés d'urine des premiers jours succédèrent des compresses d'hyposulfite de soude puis des cagoules et enfin, en 1916, des masques avec des cartouches interchangeables, ainsi que des modèles à filtres, comme ceux ci-contre.

RAMPEUR, 1917

Souvent, sur les clichés de la Direction des inventions, l'insolite côtoie le tragique. C'est le cas du *Rampeur de Monsieur Caufer*. Le nom est explicite : cette sorte d'exosquelette permet la reptation. L'appareil consiste en un jeu de roulettes ajustables au niveau du bassin, complété par des plaques métalliques s'installant sur les avant-bras. L'étrange mise en scène en deux temps, figurant le personnage muni de son appareil de reptation d'abord debout, puis couché, souligne le caractère saugrenu de l'invention et contraste avec la réalité tragique de ce rampeur destiné à aider ceux qui, estropiés, devaient se déplacer au sol.



EN TEMPS DE GUERRE

MASQUE A GAZ POUR CHEVAL, 1917-1918

Dès le printemps 1915, chevaux attelés et mulets chargés de mitrailleuses partagèrent le sort des combattants, subissant les attaques aux gaz, qu'il s'agisse des effets suffocants des dérivés du chlore ou des brûlures des gaz vésicants comme le gaz moutarde. Leur protection fut aussitôt envisagée. Une solution d'urgence consistait à installer sur les naseaux des équidés une musette-mangeoire garnie de foin imprégné d'hyposulfite de sodium et de carbonate. Très vite, de nombreuses propositions virent le jour. Le masque Giroux *(ci-contre)* fait partie des divers prototypes évalués dans ce cadre. Le rapport d'invention précise que ce modèle, jugé trop lourd et insuffisamment étanche, n'a pas convaincu. Son dossier a donc été classé « sans suite », à l'instar de nombre d'inventions, néanmoins photographiées et répertoriées comme les autres.





MYRIAPHONES, 1918

Durant sa mobilisation, Jean Perrin a mis au point divers dispositifs d'amplification du son, dont les myriaphones, des capteurs composés de plusieurs cornets acoustiques juxtaposés recueillant l'énergie sonore. Eux-mêmes sont reliés à des tuyaux de même longueur qui, accolés à l'autre extrémité, forment ensemble un cornet allongé qui peut être conjugué avec d'autres myriaphones *(ci-contre, on en voit deux)*. Le son est ainsi amplifié et le nombre de cornets augmente la précision du relevé. Assemblés, ces myriaphones composent le télésitemètre, une autre invention de Perrin. Manœuvré par des opérateurs expérimentés, cet instrument a une portée de 7 à 8 kilomètres et son erreur angulaire ne dépasse pas 2 ou 3 degrés. Jugés concluants, les essais ont mené à la construction d'une vingtaine de télésitemètres, livrés en juin 1918. Un engin similaire apparaît même dans *Le Sceptre d'Ottokar* (1939), à la frontière de la Bordurie, que Tintin tente d'atteindre.



TRANSFERT CIVIL





FUSIL MITRAILLEUR (1917-1918) ET BROSSE À PARQUET (1927)…

Au vu des photographies de l'archive des Inventions, le balai mécanique semble avoir été à la paix ce que le fusil-mitrailleur avait été à la guerre : un objet digne de toutes les attentions et de tous les perfectionnements. Iconographiquement, l'un et l'autre sont représentés de façon assez similaire, et en grand nombre, centrés dans l'image ou bien mis en scène avec un figurant mimant leur emploi. Qu'il s'agisse de l'arme ou de l'outil domestique, les poses sont ressemblantes. Le balai s'accorde avec l'idée de la paix et de la reconstruction. Balayer le passé, nettoyer le terrain, est la condition même du renouveau.



BIBERON POUR BOUTEILLE THERMOS, 1917

Cette bouteille pour avion du pilote Maurice Poumet permet d'aspirer le liquide sans la déboucher. L'invention parvint jusqu'au sous-secrétariat d'État à l'Aéronautique. Sa forme évoque celle des obus que la guerre produisait en masse… et des bouteilles thermos actuelles. Quant au principe du tube, les randonneurs le connaissent bien…



ESSAI D'EXTINCTEUR, 1930

En temps de paix, la priorité n'est plus à la défense, mais à la sécurité. La menace du feu, en particulier, hantait les recherches de l'ONRSII. Dans ce contexte, Jules-Louis Breton créa en 1925, avec le ministère des Travaux publics, la préfecture de la Seine, les sapeurs-pompiers de Paris et la Chambre syndicale des magasins et galeries, un grand concours d'« appareils extincteurs d'incendies ». En 1929, un « laboratoire du feu » s'installa sur le site de Bellevue, à Meudon, encourageant notamment les recherches sur les les lances d'incendie et les extincteurs, comme celui ci-contre, à mousse, testé sur des panneaux électriques.

CEINTURE AVEC BALLONS, 1938
Ce flotteur, attribué à l'aviateur Auguste Chalbert – qui avait eu plusieurs fois l'occasion de « boire le bouillon » lors d'amerrissages imprévus – et soutenu par Albert Toussaint, du laboratoire d'aéronautique de l'ONRSII, est un engin de sécurité pour naufragé. Destiné au sauvetage en mer, il était facile à positionner et permettait de nager tout en garantissant une bonne stabilité grâce à la répartition des bouées. Son encombrement était raisonnable, mais son coût de production dissuada l'État d'investir. L'inventeur mit alors en vente son dispositif aux particuliers.



HANGAR PNEUMATIQUE, 1917
Après la guerre, certaines inventions à visée militaire se sont retrouvées commercialisées dans des formes adaptées à la vie civile et à l'univers domestique. C'est le cas du hangar gonflable de Gabriel Voisin, remarqué pour son volume dérisoire et son faible poids. L'aviateur recherchait une solution mobile et pratique pour abriter en toute sécurité les avions en temps de guerre. Comme toutes les images d'inventions produites pendant la guerre, celles du hangar restèrent secrètes. Il fallut attendre 1919 pour que l'invention devienne publique et qu'un compte rendu de l'Académie des sciences soit rapporté dans la revue *La Nature*. La même année, l'invention du futur pionnier de l'automobile de luxe fit, aux États-Unis, la couverture de la revue *Scientific American*.



CHAISE DE REPOS DÉMONTABLE, 1923
Le fauteuil de repos *Le Désiré* était produit au laboratoire du génie de l'ONRSII après la Première Guerre mondiale. Il avait la particularité d'être « entièrement démontable en éléments de petites dimensions pouvant trouver place facilement dans un sac de voyage, dans une valise ou encore être réunis par une petite courroie pour former un paquet peu volumineux ». Développée pendant la guerre, l'idée d'un matériel mobile, démontable et pliant s'empara vite des loisirs naissants pour devenir complice des moments de bonheur des Français, comme le pique-nique du dimanche.





AU SERVICE DU QUOTIDIEN



TAXI MUNI DE L'ANTI-ECRASEUR, 1924
Dans les années 1920, la sécurité routière est devenue une vraie préoccupation, comme en témoigne le *Taxi muni de l'anti-écraseur* : « L'appareil est constitué par une armature métallique garnie de grillage protecteur et de rouleaux en caoutchouc servant d'amortisseurs », explique l'inventeur, qui résume ainsi son fonctionnement : « La personne tamponnée debout à 20 ou 30 km/h est d'abord heurtée à hauteur des chevilles [...]. Elle perd ainsi son équilibre et s'affaisse. » Qu'elle soit tamponnée debout ou couchée au sol, la victime est ensuite poussée sur le côté ! Ce serait le cas d'un « ivrogne qui n'a pu être aperçu assez tôt », rassure l'inventeur.



BALAI POUR LAVER LES PLANCHERS ET LES CARRELAGES, 1926
« Ramasser l'eau sale autrement qu'avec une éponge ou un torchon » était l'un des enjeux de cette nouvelle brosse nettoyeuse, qui visait aussi à éviter « la pénible prosternation qui mouille les genoux, casse les reins et met le nez à six pouces de la crotte et les mains dedans ». La solution fut apportée par Paul Breton, fils du directeur de l'ONRSII. Son dispositif s'adaptait aux tout jeunes aspirateurs de poussière (eux aussi répertoriés à l'Office), ce qui permettait d'ailleurs de rentabiliser cette acquisition encore fort onéreuse dans l'entre-deux-guerres. L'appareil Breton se composait d'un seau muni d'un manche creux qui, relié à un aspirateur en action, transmettait la dépression à l'intérieur du récipient. Pour Eugène Lapicque, professeur à la Sorbonne, cette brosse aspirante était une alternative moderne à l'archaïsme des pratiques de nettoyage anciennes et une porte vers davantage de liberté et d'égalité sociale.



SPÉCIMENS DE POIREAUX MONSTRES, 1930
À Meudon, sur le site de Bellevue, dans les années 1930, on testait aussi la puissance de l'électricité sur la croissance des plantes. Avec l'aide du préparateur de l'École normale supérieure Lucien Plantefol, Jules-Louis Breton menait ainsi des recherches sur l'électroculture à l'aide d'un transformateur de 2 kilowatts branché sur le courant alternatif du secteur, alimentant ou non différentes parcelles de plantations diverses. Les poireaux semblent avoir été les plus réceptifs : le poids de ceux cultivés sur des parcelles électrifiées atteignait le double de celui des poireaux cultivés de façon classique.

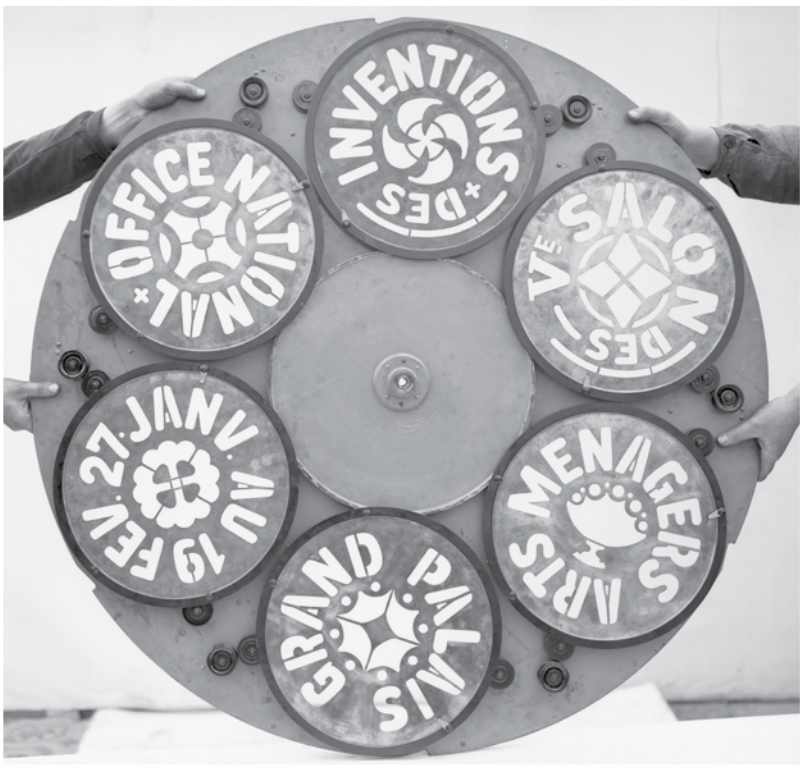
AU SERVICE DU QUOTIDIEN



MACHINE A LAVER MIXTE, 1925
Dans les années 1920, la machine à laver incarnait la possibilité d'un changement radical du quotidien et de la condition des femmes, une transformation aussi fondamentale que celle apportée quelques années auparavant par les premiers engins blindés qui avaient transformé la guerre. Tank et machine à laver ont aussi en commun d'avoir été proposés jadis à la Commission des inventions puis à l'ONRSII par un même homme : le patron des inventions, Jules-Louis Breton. Le plus petit de ses « motolaveurs » a la particularité d'être mixte : il sert pour le lavage du linge et de la vaisselle. D'un usage simple, cette machine ne nécessite ni installation particulière ni canalisation et peut être utilisée « instantanément, aussi bien à la campagne qu'à la ville ».



TAPIS BROSSE EN CAOUTCHOUC, 1924
Au début des années 1920, le tapis en caoutchouc, utilisé comme paillasson, s'était révélé particulièrement combustible et générateur de fumées toxiques. Le comité de chimie de l'Office des inventions, concepteur d'une machine pour tester le caoutchouc en 1924, proposa une alternative en insérant des produits ignifuges dans le matériau, le rendant ainsi moins sensible aux flammes. À titre d'exemple, Jules-Louis Breton installa un tel paillasson devant sa porte. Sa photographie revêt une connotation pour le moins absurde et semble dire : qu'importe si la maison brûle, le paillasson, lui, résistera au feu.



DISQUES POUR PROJECTION SUR NUAGE, 1928
En 1928, le Salon des arts ménagers, événement annuel créé par Jules-Louis Breton, fut l'occasion d'un spectacle inédit et offert à tous : l'Office des inventions expérimenta, devant le public ébahi, un projecteur géant sur nuages entraînant plusieurs disques comprenant des textes et annonçant l'ouverture du salon. Lors de la projection – et sous réserve qu'il y ait des nuages –, on pouvait lire les textes géants dans le ciel de Paris sur un diamètre compris entre 180 et 300 mètres.

RENDEZ-VOUS

2.80 *Logique & calcul*
2.86 *Art & science*
2.88 *Idées de physique*
2.92 *Chroniques de l'évolution*
2.96 *Science & gastronomie*
2.98 *À picorer*

LA PSYCHOLOGIE DE LA COMPLEXITÉ

En s'appuyant sur une définition algorithmique de la complexité, des expériences de psychologie explorent nos capacités à percevoir le hasard et la complexité – et la modification de ces capacités avec l'âge.

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)

Comment distinguer la simplicité de la complexité? Dans le cas d'une suite de chiffres binaires, il paraît évident que la suite de 100 zéros est plus «simple» que la suite 01101001011... résultant du hasard de 100 tirages à pile ou face (0 pour [illegible]). La théorie algorithmique de l'information, qui relie les suites de symboles à l'algorithme de création de ces suites, tente de répondre à cette question. Dans un premier temps, cet éclaircissement n'a porté que sur les longues suites de symboles, mais nous verrons que le développement d'une nouvelle définition de la complexité a permis de prendre en considération des suites courtes. Nous examinerons ensuite comment cette possibilité a ouvert la voie à de nouvelles expériences de psychologie qui nous éclairent sur les caractéristiques de l'intelligence humaine.

La «complexité de Kolmogorov» d'un objet numérique (par exemple un fichier informatique, une suite de symboles pris dans un alphabet, la description d'un état physique, etc.) mesure le désordre de l'objet: c'est la taille du plus petit programme informatique qui permet de reconstituer l'objet numérique. La suite évoquée précédemment de 100 chiffres 0, un ordre parfait, a une faible complexité de Kolmogorov, car elle peut être produite par un programme court du type: «Pour *i* variant de 1 à 100, écrire "0"». En revanche, la suite 01101001011... qui résulte de tirages à pile ou face est incompressible: le plus court programme qui la produit est aussi long que la suite elle-même. Le hasard, selon ce point de vue, correspond à la complexité de Kolmogorov maximale. La complexité, l'ordre et le hasard sont ainsi des notions rattachées à l'informatique théorique dont les fondements ont été posés par Alan Turing. En 1936, ce mathématicien a introduit ce que l'on dénomme aujourd'hui les «machines de Turing» dont nous verrons l'utilité.

En pratique, on ne pouvait utiliser la notion de complexité de Kolmogorov que pour des fichiers ayant plusieurs milliers de symboles. En effet, il est facile d'évaluer la complexité de Kolmogorov de longues séquences en utilisant de bons algorithmes qui compriment l'information tout en la sauvegardant (par exemple, l'instruction «Écrire 1000 fois le chiffre 0» est une compression de l'instruction «Écrire "0000....0000"», où le 0 est écrit 1000 fois). Cette compression permet d'obtenir un petit fichier informatique dont la taille mesure la complexité. Toutefois, quand on change d'algorithme de compression, la complexité de Kolmogorov mesurée d'un objet numérique donné change. Or ce changement, négligeable pour les longs fichiers numériques, ne l'est pas pour les petits fichiers et la complexité de Kolmogorov n'est ainsi pas une mesure satisfaisante.

PROBABILITÉ ALGORITHMIQUE

En 2007, Leonid Levin a proposé un théorème qui généralise la notion de complexité de Kolmogorov et qui permet son utilisation même pour les fichiers courts (constitués par exemple d'une dizaine de symboles ou moins).

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

L'idée de Leonid Levin est que plus un fichier est complexe, plus la probabilité qu'il soit produit par un programme de calcul choisi aléatoirement est faible. Le « théorème de codage » de Leonid Levin stipule : « La complexité de Kolmogorov $K(s)$ d'un fichier numérique s est déterminée par la probabilité $p(s)$ qu'un programme choisi aléatoirement produise s. Complexité et probabilité sont reliées par : $K(s) \approx -\log p(s)$. »

Si l'on admet que, dans l'Univers, toute interaction est assimilable au calcul d'un programme, il s'ensuit, selon le théorème de codage, que l'on observera avec une plus grande fréquence des structures simples (droites, cercles, sphères, cubes…) que des structures complexes (ce rocher ici, ce nuage aujourd'hui dans le ciel, etc.).

Le théorème suggère une généralisation de la complexité de Kolmogorov lui donnant un sens pour des fichiers numériques courts. Pour calculer la probabilité $p(s)$ d'une suite s, on utilise un très grand ensemble de machines élémentaires (par exemple des machines de Turing, *voir l'encadré 1*). On lance chaque machine sur un ruban dont, initialement, toutes les cases portent un 0 et l'on examine (après qu'elle s'est arrêtée) la suite composée de 0 et de 1 qu'elle a écrite sur les cases visitées du ruban : certaines machines donnent la séquence 000, d'autres la séquence 0100111, etc. La distribution des fréquences des séquences produites donne une approximation de la probabilité $p(s)$ pour les séquences les plus courtes. Par application de la formule reliant $p(s)$ et $K(s)$, on en tire une valeur de la complexité.

26 000 MILLIARDS DE MACHINES

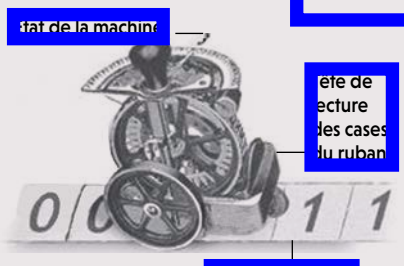
En 2014, en utilisant les 26 559 922 791 424 machines de Turing à cinq états pouvant produire des séquences de 0 et de 1, Fernando Soler-Toscano, de l'université de Séville, Hector Zenil, de l'université d'Oxford, Nicolas Gauvrit, de l'École pratique des hautes études, et moi-même avons mené un immense calcul. Ces 26 000 milliards de machines sont assimilables aux programmes les plus simples et leur fonctionnement fournit l'approximation attendue de la complexité pour les suites courtes de 0 et de 1. Le calcul indique par exemple un classement, avec *ex æquo*, pour les 24 séquences les plus simples (la complexité de *xxx* étant ici notée '*xxx*') :

'0' = '1' < '00' = '01' = '10' = '11' < '000' = '111' < '001' = '011' = '100' = '110' < '010' = '101' < '1111' = '0000' < '0001' = '0111' = '1000' = '1110' < '0010' = '0100' = '1011' = '1101' < …

En ne considérant que les séquences de longueur 7 (il y en a $2^7 = 128$), le classement par complexité croissante mesurée par les 26 000 milliards de machines est donné dans l'encadré ci-contre. Un classement non limité

1 DES MILLIARDS DE MACHINES DE TURING

Une machine de Turing comporte une tête de lecture-écriture se déplaçant sur un ruban découpé en cases, cases où sont écrits des symboles (par exemple des 0 et des 1). En fonction de son état interne, pris dans un ensemble fini d'états possibles, et de ce qu'elle lit sous sa tête, un 0 ou un 1, la machine se déplace vers la droite, vers la gauche ou s'arrête, après avoir réécrit le symbole lu sur le ruban et changé d'état. Partant d'un ruban couvert de 0 *(voir le schéma ci-contre)*, une machine donnée calcule indéfiniment ou produit une séquence de symboles et s'arrête (la production de la machine ne prend en compte que les cases où elle est passée). Elle produit par exemple la séquence 0101010 avant de s'arrêter. Si elle ne s'arrête pas, on ne prend pas en compte son calcul.



Le nombre de machines différentes à n états est $(4n + 2)^{2n}$, ce qui pour $n = 5$ donne 26 559 922 791 424 machines différentes. Fernando Soler-Toscano a fait fonctionner toutes ces machines sur le ruban initial composé de 0 et examiné ce qu'elles produisaient ; cela a pris 18 jours aux supercalculateurs du Centre d'informatique scientifique d'Andalousie. Pour $n = 6$, le même calcul serait environ 10 000 fois plus long, ce qui est inenvisageable aujourd'hui.

Considérons par exemple les 128 séquences de longueur 7 produites par ces machines, et classons-les en fonction du nombre de fois qu'elles ont été obtenues.

Cela donne le tableau ci-dessous. Les séquences d'une même ligne ont été obtenues le même nombre de fois, et les séquences les plus fréquentes sont en tête. Les séquences se groupent en 36 paquets comportant chacun 2 ou 4 séquences. Comme le théorème du codage l'annonçait, on observe que la complexité des séquences s'accroît d'un paquet au suivant. Dans chaque paquet, on note que les séquences ont la même structure.

D'autres classements de séquences ont été réalisés par la même méthode en considérant des machines de Turing utilisant plus de deux symboles ou opérant sur un plan quadrillé au lieu d'un ruban *(voir l'encadré 2)*.

1	0000000	1111111		
2	0000001	0111111	1000000	1111110
3	0101010	1010101		
4	0000010	0100000	1011111	1111101
5	0000100	0010000	1101111	1111011
6	0001000	1110111		
7	0000011	0011111	1100000	1111100
8	0100101	0101101	1010010	1011010
9	0010010	0100100	1011011	1101101
10	0000110	0110000	1001111	1111001
11	0001010	0101000	1010111	1110101
12	0010001	0111011	1000100	1101110
13	0010101	0101011	1010100	1101010
14	0101001	0110101	1001010	1010110
15	0000101	0101111	1010000	1111010
16	0001001	0110111	1001000	1110110
17	0101110	0111010	1000101	1010001
18	0100001	0111101	1000010	1011110
19	0100010	1011101		
20	0010100	1101011		
21	0110110	1001001		
22	0001100	0011000	1100111	1110011
23	0011010	0101100	1010011	1100101
24	0100110	0110010	1001101	1011001
25	0111110	1000001		
26	0000111	0001111	1110000	1111000
27	0010110	0110100	1001011	1101001
28	0001101	0100111	1011000	1110010
29	0010011	0011011	1100100	1101100
30	0011101	0100011	1011100	1100010
31	0011001	0110011	1001100	1100110
32	0110001	0111001	1000110	1001110
33	0011110	0111100	1000011	1100001
34	0001110	0111000	1000111	1110001
35	0011100	1100011		
36	0001011	0010111	1101000	1110100

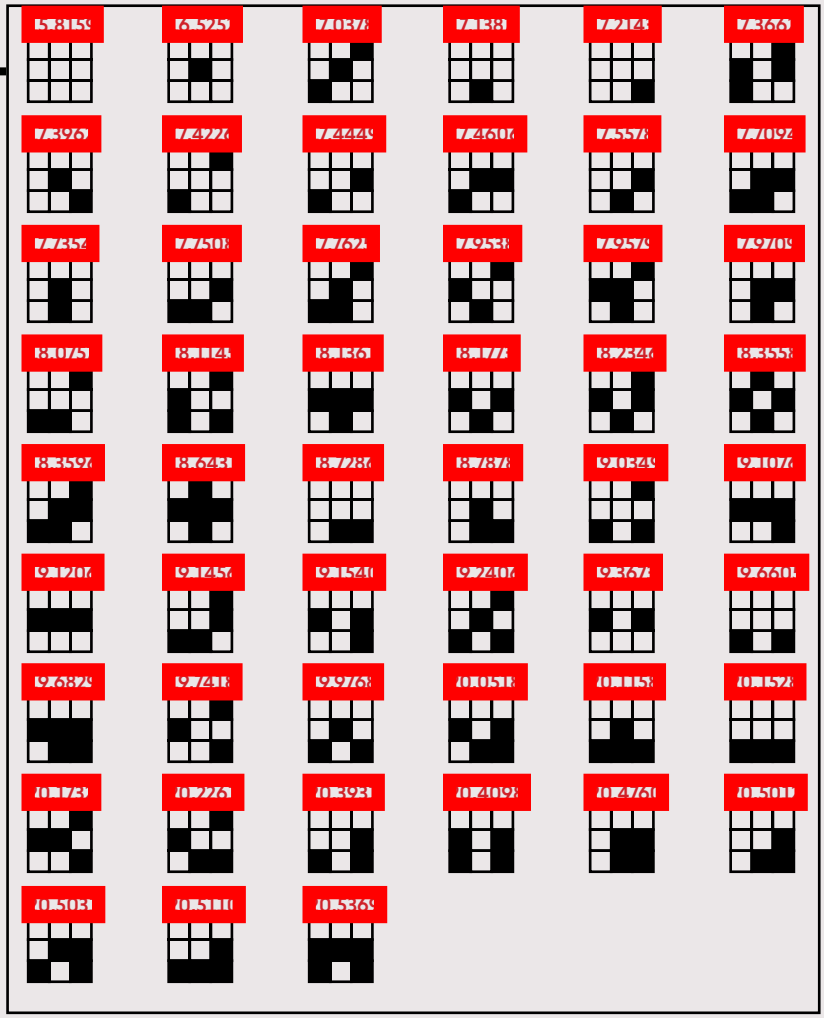
2

COMPLEXITÉ DES DESSINS

Il est plus facile et naturel pour un humain d'évaluer la complexité d'une image que celle d'une séquence finie de symboles alignés. Il se trouve que la notion de machine de Turing écrivant sur un ruban s'adapte sans difficulté à deux dimensions. La machine se déplace (vers le haut, le bas, la gauche ou la droite) sur un plan quadrillé et fait ses choix en fonction de son état interne et de ce qu'elle lit sur la case où elle est posée et qu'elle peut réécrire. La méthode utilisée pour mesurer indépendamment de toute subjectivité la complexité d'une séquence s'adapte ainsi et donne alors une mesure de complexité pour les petits dessins composés de quelques pixels.

Cette mesure est assez proche de celle qu'on obtient quand on produit des statistiques de la complexité des images découpées en tout petits morceaux tirées du monde réel. C'est un argument en faveur de l'idée que le monde réel est assimilable à un immense ensemble de micromachines à calculer qui produisent les structures qu'on y trouve (soit ramenées à des séquences de symboles, soit ramenées à des petits dessins, etc.).

On a reproduit ici le tableau des petits dessins *d* composés de pixels blancs et noirs les plus simples. Ils sont classés en fonction de leur probabilité $p(d)$ d'être produits par des machines de Turing fonctionnant sur un quadrillage, c'est-à-dire en fonction de leur complexité croissante telle que ces machines l'évaluent. Les dessins se déduisant par des symétries ou des rotations de ceux représentés ne sont pas mentionnés. Les nombres indiqués évaluent la complexité des dessins par la formule $K(d) = -\log_2(p(d))$ *(pour plus de précisions, voir la quatrième référence citée en bibliographie).*



la longueur 7 pour les séquences ayant un 1 en tête est donné en : http://complexitycalculator.com/D5.csv.

Comme on s'y attend, les séquences les plus simples se trouvent en tête, et plus on avance dans le classement, plus la complexité des séquences augmente, ainsi que leur longueur. Cela confirme expérimentalement deux choses : ce qui est simple est produit avec une fréquence plus grande que ce qui est complexe, et la méthode des petites machines de Turing donne une fine mesure de complexité où toute subjectivité est absente.

Selon la même méthode, on a déterminé une classification par complexité croissante des schémas en dimension 2 de quelques pixels *(voir l'encadré 2)*.

LA SIMULATION DU HASARD

Ces mesures objectives ont permis de réaliser de nouvelles expériences de psychologie qui font comprendre comment l'esprit humain évalue le complexe et le hasard.

Depuis longtemps, la psychologie expérimentale cherche à mesurer les aptitudes humaines pour les tâches consistant à produire du hasard ou à le reconnaître. Les psychologues ont ainsi mené des expériences où des sujets humains produisaient des suites de 0 et de 1 en imitant le mieux possible ce que donneraient des tirages équitables à pile ou face.

En moyenne, dans 60 % des cas, derrière un 0, les sujets humains placent un 1, et derrière un 1, placent un 0, alors que des suites provenant de vrais tirages aléatoires ne présentent de tels basculements que dans 50 % des cas. Pourquoi les humains sont-ils incapables de simuler correctement le hasard et favorisent-ils les alternances ?

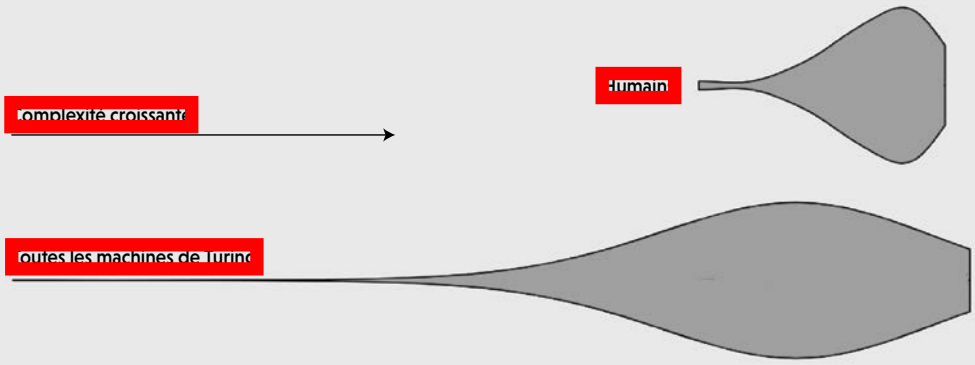
Une hypothèse subtile a été formulée : quand un humain produit des séquences de 0 et de 1 au hasard, il tente de confectionner les plus complexes. Cela lui est mentalement difficile, car il lui faudrait de meilleures capacités de calcul que celles dont il dispose et il ne réussit donc qu'à produire des séquences moyennement complexes : les trop simples sont consciemment évitées, les trop complexes sont inaccessibles ou ne sont pas bien distinguées des séquences moyennement

3

INACCESSIBLE COMPLEXITÉ

Quand les humains créent, en essayant d'imiter le hasard, des suites de longueur 10 composées de lettres prises parmi A, B, C et D, ils évitent de produire des suites très simples (comme AAAAABBBBB), mais ne réussissent qu'imparfaitement à produire des suites complexes telles que la méthode des machines de Turing nous permet de les connaître.

Le schéma du haut montre la répartition des propositions faites par les humains en fonction de leur complexité : quand, pour une complexité donnée (sur l'axe horizontal), le schéma est plus épais, c'est que davantage de suites ayant cette complexité ont été proposées. Le schéma du bas montre la répartition donnée par les machines de Turing quand toutes les suites sont prises en compte. On voit que les humains évitent de produire des séquences de très faible complexité (ce que l'on savait) et qu'ils ne réussissent pas à produire des séquences ayant les complexités les plus élevées *(pour plus de détails, voir la troisième référence citée en bibliographie)*.



complexes. Or les séquences de complexité moyenne ont un biais d'alternance, alors que les séquences simples ou très complexes ont des répétitions de 0 et des répétitions de 1 plus nombreuses, et ont donc un taux d'alternance inférieur à 50 %. Le biais d'alternance proviendrait donc de la difficulté à produire des séquences fortement complexes.

Une seconde expérience, avec cette fois des suites composées de 4 symboles, appuie l'hypothèse. Nicolas Gauvrit et son équipe ont demandé à des sujets d'âge compris entre 22 et 55 ans de produire des séquences de 10 lettres prises dans un alphabet de quatre lettres {A, B, C, D}, en veillant à ce qu'elles ressemblent le plus possible à des séquences tirées au hasard avec la même probabilité pour chaque lettre.

Les résultats font apparaître deux points intéressants *(voir l'encadré 3)*.

– La complexité des séquences proposées par les humains est en moyenne supérieure à la complexité moyenne mesurée par les productions de machines de Turing.

– Très peu de séquences proposées par les humains ont la complexité maximale.

C'est donc bien parce que l'esprit humain réussit mal à engendrer de la complexité forte que ses simulations de pile ou face exhibent un biais d'alternance.

COMPLEXITÉ LOCALE

D'autres expériences précisent ces limitations de l'esprit humain et en identifient d'autres caractéristiques. Cette fois, on demande à des sujets d'examiner des séquences composées d'une vingtaine de symboles 0 ou 1. Les sujets doivent indiquer sur une échelle de 0 à 6 leurs évaluations de ces séquences, de la note 0 pour « certainement aléatoire » à la note 6 pour « certainement pas aléatoire ».

Le sujet humain élabore son jugement non pas en prenant en compte la séquence globale, mais en observant ce qui se passe dans une fenêtre glissant le long de la séquence. On s'interroge alors sur la taille de cette fenêtre quand le sujet examine de longues suites de symboles : examine-t-il trois symboles consécutifs, quatre symboles ou plus encore ? Grâce aux tables de complexité calculées par les machines de Turing, une réponse est proposée. Le protocole est le suivant :

– On demande à des sujets d'évaluer la complexité (entre 0 et 6) d'un certain nombre de séquences assez longues (trop longues pour être évaluées d'un seul coup d'œil).

– Pour chaque largeur L de fenêtre comprise entre 3 et 11, et pour chaque séquence utilisée avec les sujets, on évalue la complexité moyenne quand on déplace une fenêtre de largeur L sur la séquence et cela en se fondant sur le tableau déduit des calculs des machines de Turing pour évaluer la complexité des séquences de L symboles.

– On obtient donc, pour chaque séquence assez longue et pour chaque L, une note comprise entre 0 et 6, évaluant ce que donnerait un dispositif à machine de Turing ne voyant la séquence que par morceaux de largeur L.

– Pour chaque L, on a donc une série de notes (pour les différentes séquences assez

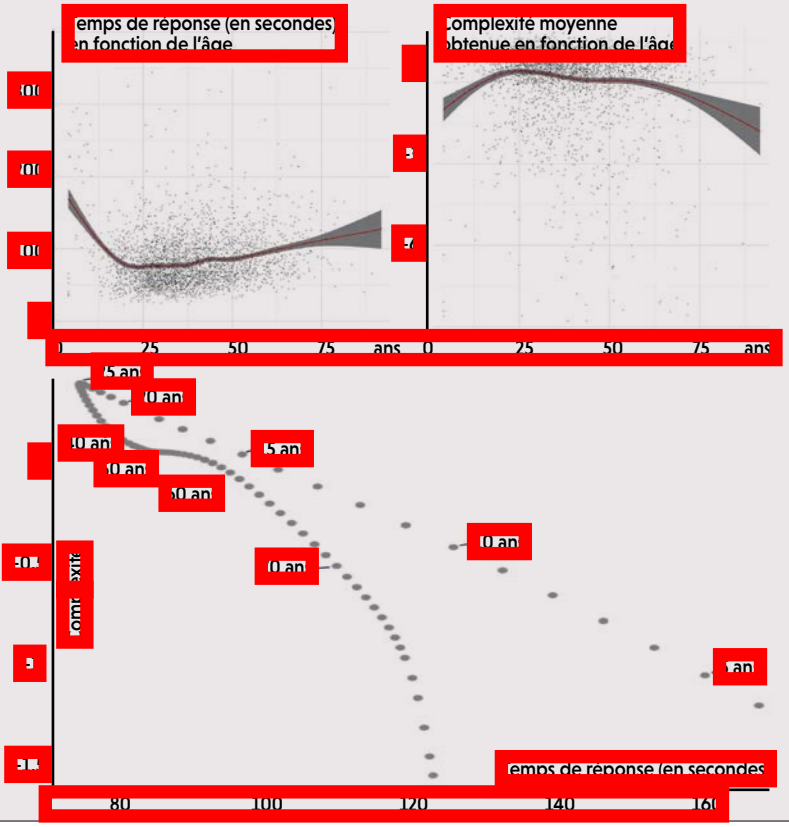
4

L'EVOLUTIO[N] DE NOS CAPACITES

La production de la complexité exige un effort intellectuel important et de bonnes capacités cognitives (attention soutenue, bonne mémoire immédiate, vivacité, etc.). La mesure de l'aptitude d'un sujet à produire cette complexité est donc un moyen d'évaluer le niveau d'éveil et de bonne santé intellectuelle d'un sujet. En opérant des moyennes sur un grand nombre de sujets d'âges variés, on en déduit l'âge de meilleure forme intellectuelle. Des tests impliquant plusieurs milliers de personnes et les tables de complexité déduites des calculs massifs de machines de Turing *(voir le détail du protocole dans l'article)*, on conclut que l'âge optimal est de 25 ans.

Le graphique *a* représente le temps de réponse cumulé aux tests : il est minimal à 25 ans. Le graphique *b* représente la qualité des réponses données : elle est maximale à 25 ans. L'épaisseur des courbes indique la zone de confiance à 95 %. La courbe *c* représente les deux variables simultanément : chacun de ses points représente un âge, avec en abscisse le temps de réponse, et en ordonnée une mesure de la qualité moyenne des réponses produites. Les données ont été lissées.

On voit qu'avant 25 ans, la vitesse de réponse comme la qualité augmentent linéairement : apprentissage et maturité produisent leurs effets. Ces bons résultats sont relativement stables pendant quelques années (accumulation des points en haut à gauche), puis se dégradent, et cela de plus en plus rapidement, surtout après 60 ans. Après 70 ans, la vitesse varie peu, mais l'aptitude à produire de la complexité chute sévèrement *(voir la première référence bibliographique)*.



ongues testées) correspondant à une « vision de largeur *L* ».

– On compare les notations des sujets avec celles données par les machines de Turing pour chaque *L*, et on détermine le *L* qui rend compte le mieux de ce que les sujets proposent.

– On juge alors probable que cette largeur *L* est celle que les humains utilisent quand ils ont à évaluer la complexité d'une séquence assez longue qu'ils ne peuvent pas englober d'un seul regard.

Les largeurs de fenêtre qui donnent des réponses les mieux corrélées avec les évaluations (de 0 à 6) humaines sont 4 et 5. La corrélation devient ensuite de plus en plus mauvaise quand la taille de la fenêtre augmente. On en conclut qu'un humain détermine si une séquence longue est aléatoire en se fiant à sa complexité locale évaluée en examinant les sous-séquences d'environ 4 ou 5 éléments consécutifs. Ce résultat est conforme aux évaluations obtenues par ailleurs de la mémoire à court terme *(voir l'encadré 3)*.

À QUEL ÂGE COMMENCE-T-ON À VIEILLIR ?

Puisque produire et reconnaître de la complexité nous est difficile, la mesure de nos capacités à le faire doit évoluer avec l'âge et pourrait, entre autres choses, servir à identifier des signes annonciateurs d'une maladie neurodégénérative.

Pour voir cette évolution, il fallait disposer de méthodes fiables et donnant des résultats stables et reproductibles. C'est pourquoi on a mis en place un protocole expérimental impliquant un grand nombre de personnes (3429) d'âges variés (entre 4 et 91 ans), et que l'on a collecté et analysé un ensemble de données suite à des tests passés par chacun. L'ensemble du travail est fondé sur les mesures de complexité obtenues par les calculs de milliards de machines de Turing. La cohérence des résultats, leur convergence, et les informations nouvelles qu'ils fournissent montrent l'intérêt des évaluations objectives de complexité en psychologie.

Nicolas Gauvrit, le principal organisateur de cette grande expérimentation, avance que la capacité à simuler le hasard est liée à nos capacités cognitives générales :

« Si l'on demande à quelqu'un de produire une suite aléatoire de chiffres, cette personne cherche à produire une suite complexe. Or, depuis longtemps, les psychologues pensent que la complexité permet de mesurer des fonctions cognitives de haut niveau, telles que l'attention, la mémoire à court terme ou encore l'inhibition. Par exemple, après un 1, nous avons tendance à vouloir mettre un 2 ; il

aut inhiber ce réflexe pour créer de la complexité. Nous savons par ailleurs que ces fonctions cognitives de haut niveau reposent principalement sur le lobe frontal du cerveau. C'est pourquoi les neurologues demandent parfois au patient qui a subi un choc à la tête de produire une suite de chiffres la plus aléatoire possible. Si la région cérébrale est endommagée, le patient aura du mal à créer de la complexité et la suite présentera de nombreuses répétitions. »

Hector Zenil, l'un des organisateurs de la large étude, considère que la capacité à produire des suites complexes est aussi directement corrélée à la créativité, car celle-ci exige de produire de l'inattendu, ce qui est lié à la capacité d'accéder à chaque instant à un ensemble ouvert et large d'éventualités. Pour lui, cette étude doit aussi s'interpréter comme une évaluation de la créativité en fonction de l'âge.

Voyons quelques détails sur le protocole utilisé. Les sujets ont été invités à répondre à cinq exercices liés aux séquences aléatoires. On a évalué leurs réponses en considérant la complexité des séquences courtes qu'ils produisaient.

Exercice a. Les participants doivent créer une série de 12 «pile ou face» pour qu'elle semble aléatoire à quelqu'un d'autre. Ils choisissent sur un écran qui leur propose de manière répétée les deux options. Seul le dernier choix opéré reste visible quand ils effectuent un nouveau choix.

Exercice b. Dix fois de suite, les participants doivent sélectionner 5 cartes dans un jeu en tentant de faire comme si elles provenaient d'un jeu parfaitement mélangé.

Exercice c. Les participants doivent engendrer 10 nombres entiers compris entre 1 et 6, comme pourrait en produire un dé lancé 10 fois. Pour cette épreuve, les choix précédents restent visibles, mais ne peuvent pas être modifiés.

Exercice d. Les participants doivent pointer 10 fois de suite un petit cercle pris dans une série de 9 cercles présentée à l'écran, en choisissant au hasard.

Exercice e. Les participants doivent noircir des cases d'une grille 3×3 initialement blanche, de façon que la grille finale semble aléatoire. Ici, les participants sont autorisés à revenir en arrière sur leur choix jusqu'à en être satisfaits.

À chaque fois, on mesure à la fois la complexité des choix faits et le temps mis pour les faire. Comme le note l'article rapportant cette expérience, celle-ci est un «test de Turing inversé». On ne demande pas à un système informatique d'imiter les réponses que donnerait un humain pour savoir si on peut qualifier le système d'intelligent (c'est l'idée du célèbre test de Turing); on considère, à l'opposé, que c'est la capacité de l'humain à approcher ce que (collectivement) les machines de Turing nous disent de la complexité qui mesure le niveau des aptitudes cognitives des personnes testées.

Malgré la nature variée des tâches demandées, la réussite des sujets évolue de la même façon en fonction de l'âge pour les cinq exercices: le niveau de réussite s'accroît jusqu'à 25 ans, puis décroît assez lentement jusqu'à 60 ans, âge à partir duquel le déclin s'accélère. L'analyse de la vitesse à laquelle les sujets répondent évolue de façon inverse: diminution des temps de réponse jusqu'à 25 ans, puis augmentation *(voir l'encadré 1)*.

CE QUI INFLUE... ET CE QUI N'INFLUE PAS

Les données collectées sur les participants ont permis d'analyser d'autres facteurs que celui de l'âge. Le sexe des participants n'a aucun effet significatif sur les résultats de la simulation du hasard. En revanche, les participants de sexe masculin répondent plus rapidement que ceux de sexe féminin. Cette différence avait déjà été notée dans d'autres études: les hommes semblent plus pressés que les femmes!

L'analyse montre que les réussites aux quatre premiers exercices sont fortement corrélées: réussir assez bien à l'un indique le plus souvent qu'on réussira bien aux autres. Le cinquième exercice est moins nettement corrélé aux autres, ce qui est peut-être dû à la possibilité donnée aux participants à cet exercice de revenir en arrière sur leurs décisions jusqu'à en être globalement satisfaits.

Le rapport entre réussite aux exercices et croyance au paranormal a été examiné. À cette fin, on a demandé aux participants de noter sur une échelle de 0 à 6 leur degré d'approbation de la phrase suivante: «Certaines coïncidences dont j'ai été témoin ne s'expliquent bien qu'en envisageant la perception extrasensorielle ou des forces paranormales.» L'idée était que quelqu'un n'ayant pas l'aptitude à bien évaluer et produire du hasard chercherait à expliquer des situations parfaitement banales du point de vue statistique en invoquant des considérations fondées sur l'intervention de forces paranormales. Aucune corrélation n'a été trouvée pour les quatre premiers exercices, et une légère corrélation négative est apparue pour le cinquième: les participants créent un peu moins bien des grilles complexes quand ils croient au paranormal.

AUTRES APPLICATIONS

Terminons en mentionnant que, grâce à la mise à disposition des tables de complexité calculées par machines de Turing, plusieurs autres études ont pu être menées concernant la perception visuelle *(voir l'encadré 2)*, la formulation des jugements esthétiques et la façon dont s'opère l'apprentissage d'un langage. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Gauvrit *et al.*, **Human behavioral complexity peaks at age 25**, *PLoS Comput. Biol.*, vol. 13(4), e1005408, 2017.

N. Gauvrit *et al.*, **A preference for some types of complexity comment [...]**, *Acta Psychologica*, vol. 174, pp. 48-53, 2017.

N. Gauvrit *et al.*, **Algorithmic complexity for psychology [...]**, *Behav. Res.*, vol. 48(1), pp. 314-329, 2016.

H. Zenil *et al.*, **Two-dimensional Kolmogorov complexity [...]**, *PeerJ Comp. Sci.*, vol. 1, e23, 2015.

N. Gauvrit *et al.*, **Algorithmic complexity for short binary strings applied to psychology [...]**, *Behav. Res.*, vol. 46(3), pp. 732-744, 2014.

F. Soler-Toscano *et al.*, **Calculating Kolmogorov complexity [...]**, *PloS One*, vol. 9(5), e96223, 2014.

J.-P. Delahaye et H. Zenil, **Numerical evaluation of the complexity of short strings [...]**, *Applied Math. and Comput.*, vol. 219, pp. 63-77, 2012.

H. Zenil et J.-P. Delahaye, **On the algorithmic nature of the world**, dans G. Dodig-Crnkovic & M. Burgin (eds.), *Information and Computation*, pp. 477-496, World Scientific, 2010.

AUTEUR

LOIC MANGIN
édacteur en chef adjoint
Pour la Science



UN HAVRE POUR LES ABEILLES

Au Havre, au cœur d'une exposition dédiée au génie des abeilles, des modèles façonnés en papier rendent compte de la diversité insoupçonnée de ces insectes.

En juin 2019, le chercheur Vincent Bretagnolle et ses collègues ont publié une étude montrant que l'agriculture biologique profite aux colonies d'abeilles mellifères, notamment pendant la période de disette à la fin du printemps. Au vu de l'engouement pour le bio et de l'expansion attendue des terres dévolues à ce type de produits, on peut se réjouir pour les abeilles. C'est certainement le cas d'Éric Tourneret, commissaire de l'exposition « Abeilles, une histoire naturelle », présentée au Muséum d'histoire naturelle du Havre. On peut y voir de nombreuses photographies que ce spécialiste des abeilles a rapporté de dix années de reportages dans vingt pays. On découvre également les toutes dernières découvertes scientifiques sur ces insectes, aussi bien sur leur biologie (communication, prises de décision démocratique, performances cognitives, moyens de défense…) que sur les causes de leur déclin, à commencer par le rôle des pesticides.

Pour compléter l'exposition, l'artiste Hugo Boistelle a quant à lui façonné une série de vingt abeilles en papier illustrant la grande diversité des espèces (géantes ou naines, dotées d'un abdomen fin et long ou au contraire court et trapu…). De fait, les spécialistes en ont identifié plus de 20000, dont plus de 1000 en France! Certes, on connaît l'abeille *Apis mellifera*, l'espèce dominante en apiculture: les ruches qui abritent ses colonies nous sont familières, même au cœur des villes. Mais saviez-vous que plus de 1000 espèces en France sont solitaires, c'est-à-dire qu'elles ne fondent pas de colonie sociale et hiérarchisée? C'est notamment le cas (*voir ci-dessus*) de la nomade jaune *Nomada flava* et de l'anthilde à manchettes *Anthidium manicatum*. On peut aussi citer l'abeille orchidée *Euglossa hemichlora*, une solitaire qui vit quant à elle au Panamá.

La nomade jaune, *Nomada flava*, l'anthilde à manchettes *Anthidium manicatum* et l'abeille orchidée *Euglossa hemichlora* plus vraies que nature, mais en papier.

On peut s'étonner que d'autres espèces soient sans dard: pourtant, dans le monde, environ 600 espèces sont dépourvues de cet aiguillon. Un héritage des caractères des abeilles ancestrales, celles qui sont apparues il y a 100 millions d'années, avant



a dérive des continents, ce qui explique qu'on les rencontre partout. Les abeilles à dard, dont *Apis mellifera,* se sont différenciées il y a seulement 20 millions d'années, probablement en Asie, puis ont gagné l'Europe, en passant par l'Afrique, il y a 4 millions d'années.

Comment s'y prend Hugo Boistelle pour confectionner ses abeilles en papier? À partir de feuilles à dessin noires, il dessine puis découpe une silhouette, une sorte de patron en deux dimensions de l'insecte. La troisième naîtra de pliages successifs. Les abeilles sont représentées à l'échelle 2: la *Nomada flava* fait ici près de 1,5 centimètre de longueur. Les effets de texture, de gaufrage sont rendus par diverses techniques, de l'application d'un ongle à la pression d'un coquillage. À la fin, toutes les coupes franches de la silhouette initiale ont disparu. La touche finale consiste à coller les ailes, réalisées avec du papier-calque légèrement coloré en sépia. L'insecte est prêt à rejoindre, épinglé, sa boîte d'entomologiste qui sera exposée au public.

«Je souhaite que l'exposition apporte à ce dernier un regard nouveau sur cet insecte emblématique à travers les dernières découvertes scientifiques sur son génie», déclare Éric Tourneret. Ses nombreux voyages en terres de traditions apicoles (avec les nomades d'Éthiopie, les Pygmées de la République du Congo…) et les ravages constatés en certaines régions par des pratiques agricoles intensives l'ont convaincu d'une chose: «Il vaut mieux travailler avec la nature que contre». Surtout quand notre survie en dépend… ■

«Abeilles, une histoire naturelle»,
au Muséum d'histoire naturelle du Havre,
jusqu'au 10 novembre 2019.
http://www.museum-lehavre.fr

L'auteur a publié:
Pollock, Turner, Van Gogh
Vermeer et la science…
Belin, 2018)

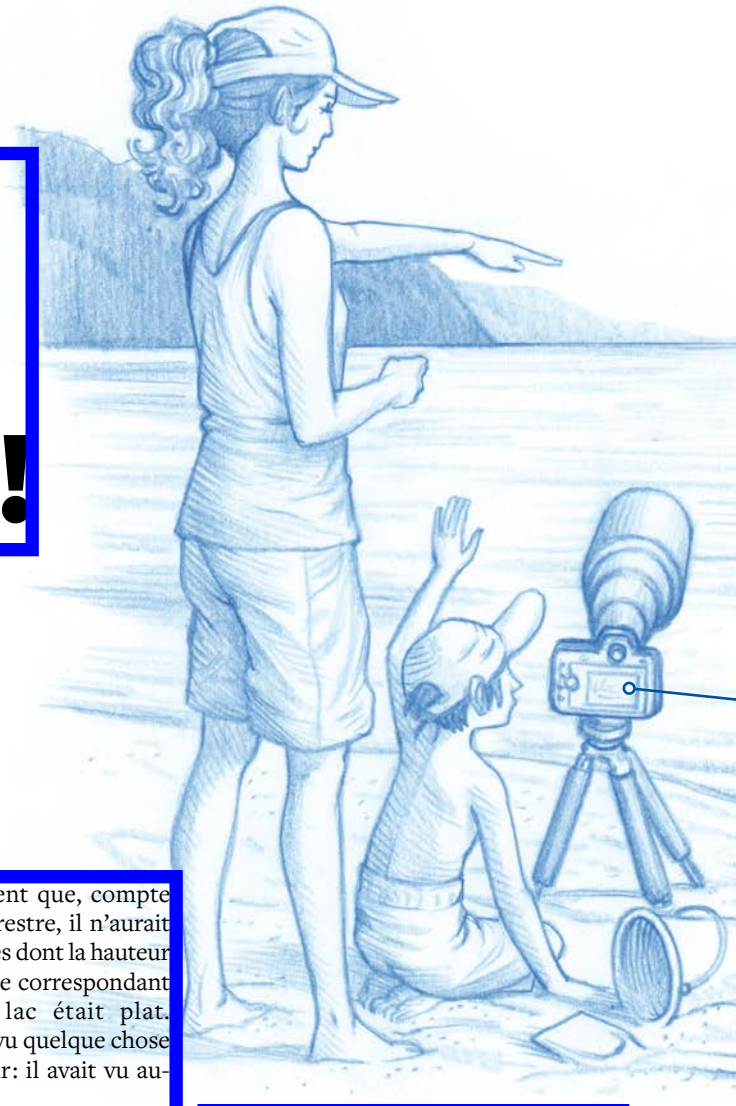
LES AUTEURS



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

VERS L'HORIZON, ET AU-DELÀ !

L'horizon géométrique n'est pas une fatalité: grâce à la réfraction atmosphérique, les rayons lumineux se courbent et permettent de voir plus loin



Tout a commencé par une question apparemment élémentaire nous arrivant par courriel: « Comment se fait-il que la surface des océans est courbe alors que celle des lacs est plate? Ne devrait-elle pas aussi [illegible] ? La réponse nous semblait évidente et nous avons donc répondu en substance: « Les lacs ont la même courbure que les océans, celle de la Terre. Mais comme ils sont bien moins étendus que les océans, leur courbure est difficile à percevoir. »

C'était sans compter sur la réponse très argumentée, relatant des observations précises, des mesures et des calculs numériques, qui nous est revenue quelques heures plus tard.

Notre interlocuteur avait observé, posté sur la rive du lac du Bourget avec un zoom placé à 0,51 mètre de hauteur, un muret d'un port de plaisance situé à l'autre bout du lac, à 16,7 kilomètres de distance. Ce muret était haut de 1,6 mètre. Or les calculs montraient que, compte tenu de la courbure terrestre, il n'aurait dû voir que des structures dont la hauteur dépasse 15 mètres. Notre correspondant en déduisait que le lac était plat. Manifestement, il avait vu quelque chose qu'il n'aurait pas dû voir: il avait vu au-delà de l'horizon!

JUSQU'OÙ PEUT PORTER NOTRE REGARD?

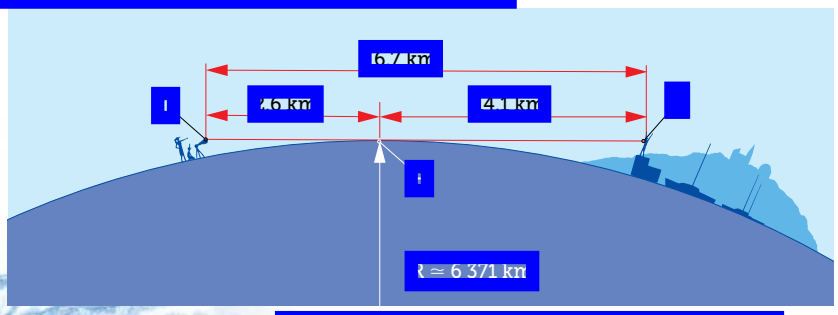
Comment l'expliquer? Évaluons tout d'abord la distance de l'horizon pour un observateur situé à une certaine hauteur h au-dessus de la surface de la Terre. Pour ce faire, on applique le théorème de Pythagore au triangle rectangle dont les sommets sont le centre de la Terre (C), la position de l'observateur (O) et le point de l'horizon (H) qu'il peut apercevoir (*voir l'encadré page ci-contre, schéma du bas*).

Résultat: la distance de l'horizon, OH, est à peu près égale à la racine carrée du double du produit de la hauteur d'observation par le rayon de la Terre, soit 3,6 $\sqrt{h}$ kilomètres, la hauteur h étant exprimée en mètres.

Pour h = 0,51 mètre, on obtient 2,6 kilomètres, une distance bien plus courte que celle de l'extrémité du lac, mais qui ne concerne que la visibilité au niveau de sa surface. Un objet d'une certaine hauteur peut en effet être vu par un observateur au-delà de son horizon à condition que leurs horizons respectifs (de l'observateur et de l'objet) se recouvrent sur la ligne de visée et, à la limite, coïncident (*voir l'encadré page ci-contre, en haut*).

Est-ce le cas du muret du port mentionné dans le courriel? Pour être visible par l'objectif à 16,7 kilomètres, la distance entre le muret et son horizon doit

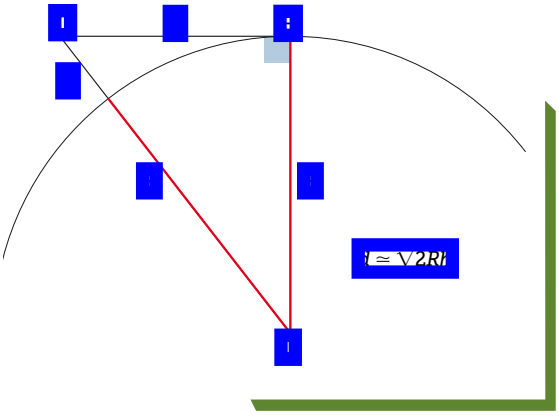
L'HORIZON GEOMETRIQUE



Pour un observateur (O) situé à une altitude *h*, le point de l'horizon (H) se trouve à une distance *d* à peu près égale (si *h* est petit) à la racine carrée de 2*Rh*, où *R* est le rayon de la Terre (voir le schéma *ci-dessous*). L'observateur peut apercevoir un point P situé au-delà de cette distance si ce point P est à une hauteur suffisante. Dans ce cas, la ligne droite reliant l'observateur O au point P passe par l'horizon commun H, comme illustré ci-dessus.
Mais ce cas de figure géométrique ne correspond pas à la situation relatée dans l'article : le muret aperçu était près de dix fois trop bas par rapport à la hauteur requise (15 mètres) compte tenu de la distance OP, qui était de 16,7 kilomètres.



Dans l'image prise par l'appareil photo, apparaît un muret *a priori* trop bas pour être vu de cette distance, compte tenu de la courbure de la Terre.



atteindre 16,7-2,6=14,1 kilomètres, ce qui exigerait de lui une hauteur de 15 mètres, bien plus élevée que sa valeur réelle, autour de 1,6 mètre.

Comment notre interlocuteur a-t-il pu voir le muret ? En fait, cet effet d'observation au-delà de l'horizon était déjà connu et décrit au début du XIXe siècle, mais il concernait des distances bien plus grandes. Le baron Franz von Zach, astronome en séjour à Marseille en 1808, ayant entendu la rumeur qu'il était possible de voir le Canigou, un sommet des Pyrénées, depuis la basilique Notre-Dame-de-la-Garde, en fit lui-même l'observation lors d'un coucher de soleil. Pourtant, avec un sommet à 2 785 mètres d'altitude et un parvis à 164 mètres, la distance qui les sépare aurait dû être inférieure à 234 kilomètres pour que cela soit possible… alors qu'elle dépasse 260 kilomètres.

Et pour reprendre un exemple plus commun, combien de touristes s'étonnent de distinguer la Corse depuis la Côte d'Azur, même à basse altitude ? Depuis Menton, jusqu'à 50 mètres au-dessus du niveau de la mer, on ne devrait pourtant rien voir.

LE RENFORT DE LA RÉFRACTION ATMOSPHÉRIQUE

Ce que notre interlocuteur avait observé n'est rien d'autre que la manifestation d'un mirage dont l'origine est la réfraction atmosphérique. À cause des variations de pression et de température, la densité de l'air dépend de l'altitude. Il en est donc de même de l'indice de réfraction de la lumière et de la vitesse de propagation de cette dernière, qui lui est inversement proportionnelle. Par conséquent, dans l'atmosphère, la lumière ne se propage pas en ligne droite comme dans un milieu homogène.

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

Pour le comprendre, utilisons les notions d'onde et de rayon et la relation qu'ils entretiennent : localement, les fronts d'onde (les lieux des points atteints par l'onde au même moment depuis son émission) sont perpendiculaires aux rayons lumineux. Supposons que, initialement, la lumière se propage horizontalement dans l'atmosphère. Les couches d'air les plus basses étant les plus denses, leur indice est plus élevé ; la lumière s'y propage donc moins vite que dans les couches supérieures. Par conséquent, la partie haute des fronts d'onde prend de l'avance sur la partie basse et les fronts d'onde s'inclinent. Cela signifie que les rayons lumineux dévient vers le bas.

Évaluons quantitativement cet effet. Pour la lumière visible, l'indice de réfraction de l'air au niveau du sol est, typiquement, de 1,0003. Il s'ensuit qu'au niveau du sol, l'onde lumineuse retarde de 3×10^{-4} kilomètre (soit 30 centimètres) par kilomètre parcouru, par rapport à une propagation dans le vide. En imaginant un plan d'onde qui s'étend du sol jusque dans le quasi-vide régnant à, disons, 8 kilomètres d'altitude, on calcule que son inclinaison varie de $3{,}75\times10^{-5}$ radian par kilomètre parcouru.

Cette valeur indique de combien sont déviés vers le bas les rayons lumineux. Cette déviation est 4 fois inférieure à l'angle de courbure dû à la rotondité de la Terre, qui est de $2\pi/(40000$ km), soit $1{,}5\times10^{-4}$ radian par kilomètre ; mais cela signifie que les rayons lumineux épousent en partie la forme de la Terre. Tout se passe comme si le rayon de la Terre était augmenté de 33 %, donc que la distance à l'horizon (proportionnelle à la racine carrée de ce rayon) gagnait plus de 15 %.

Il est remarquable qu'une aussi faible différence d'indice entre l'air au sol et le vide puisse avoir un effet aussi important sur la distance à l'horizon.

Si l'effet contribue sans doute à l'observation inattendue du Canigou, il n'est pas du tout suffisant pour expliquer les observations au bord du lac du Bourget. Celles-ci exigent que l'indice de réfraction (donc la densité de l'air) décroisse plus rapidement avec l'altitude, de telle sorte que la trajectoire du rayon lumineux soit davantage courbée.

Près du sol, on ne peut guère jouer sur la pression seule, due au poids des couches d'air, dont la diminution relative à température constante est d'environ 0,012 % par mètre, ce qui redonne la déviation précédemment calculée ($3{,}75\times10^{-5}$ radian par kilomètre). On peut en revanche jouer sur la température. Comme celle-ci est inversement proportionnelle à la densité, il faut que la température augmente avec l'altitude pour que la densité diminue, ce que l'on nomme en météorologie une « inversion de température ».

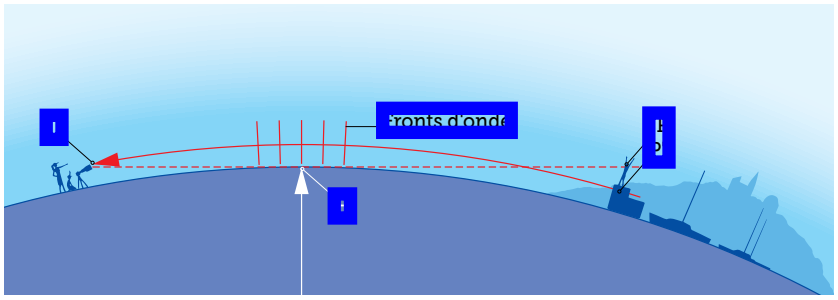
Pour que la trajectoire des rayons épouse la forme de la Terre et porte donc l'horizon à l'infini, il faudrait multiplier d'un facteur 4 notre déviation estimée afin qu'elle compense exactement l'effet de courbure de la Terre. On montre que la variation relative de température devrait alors être le triple au moins de la variation relative de pression. On en déduit que la température doit augmenter d'au moins 0,11 °C par mètre d'altitude.

L'EFFET D'UNE INVERSION DE TEMPÉRATURE

Ce seuil est sans doute exceptionnel, voire impossible à atteindre sur de grandes étendues de plusieurs centaines de kilomètres. Mais il est plausible à des échelles plus locales, comme celle d'un lac où de l'air surchauffé et peu brassé par les vents est au contact d'une eau qui reste fraîche. Dans la situation relatée par notre interlocuteur, l'horizon s'est étendu, mais pas à l'infini, ce qui signifie que la variation relative de température au-dessus du lac du Bourget était inférieure au seuil en question. Si elle avait été supérieure, on aurait pu observer des effets de même nature que les mirages en mer (les Fata Morgana) et notre muret serait apparu en l'air et inversé, comme un « bateau fantôme ». ■

LA REFRACTION REPOUSSE L'HORIZON

En raison des variations de densité au sein de l'atmosphère, un rayon lumineux ne se propage pas dans ce milieu en ligne droite. Les couches d'air proches du sol sont plus denses que les couches supérieures, et la lumière s'y propage donc plus lentement. Cette variation avec l'altitude de la vitesse de propagation, et donc de l'indice de réfraction optique, fait que le rayon lumineux suit une trajectoire courbe, qui allonge la distance à laquelle est visible un point situé à une certaine hauteur. Ainsi, dans la situation illustrée ici, le point P′ est visible de l'observateur O, alors que la pure géométrie n'autoriserait que la vue du point P.



BIBLIOGRAPHIE

M. Nauenberg, **Newton's theory of the atmospheric refraction of light**, *American Journal of Physics*, vol. 85(12), pp. 921-925, 2017.

A. P. French, **How far away is the horizon ?**, *American Journal of Physics*, vol. 50(9), pp. 795-799, 1982.

POUR LA SCIENCE
THEMA

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet

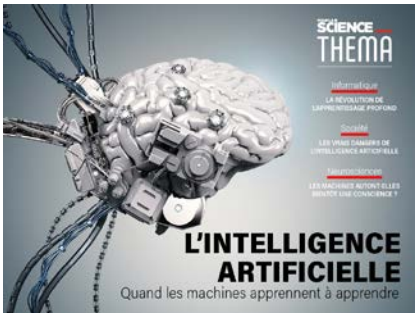
Une lecture adaptée sur écrans



8,99 €

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

Dans la collection *Thema* découvrez aussi













Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client

boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

L'AUTEUR



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

ET L'ÉVOLUTION FRAPPA DEUX FOIS

Qu'un oiseau arrive sur une île et y perde au fil de l'évolution sa capacité de voler, passe encore. Mais qu'il recommence au même endroit, c'est très fort…

En volant, les oiseaux, comme les insectes, colonisent facilement les îles. Mais la difficulté est d'y rester ! Un coup de vent suffit à entraîner l'animal loin de son nouveau territoire. On comprend pourquoi la perte de la faculté [illegible] majeur : rivés sur leur île, les animaux ne donnent plus prise aux tempêtes et courent peu de risques d'être balayés vers l'océan hostile. D'innombrables insectes ont ainsi perdu secondairement la capacité de voler. On en a observé sur les îles du Pacifique, en particulier dans l'archipel de Hawaii. *Nysius wekiuicola*, par exemple, est un petit hémiptère sans ailes – aptère – niché au sommet du volcan hawaiien Mauna Kea. Et la mouche des Kerguelen, qui vit sur les îles Crozet, Heard et Kerguelen, dans le sud de l'océan Indien, n'est autre qu'un diptère aptère…

De nombreux oiseaux aux ailes atrophiées ont aussi été décrits. Le dronte de Maurice, plus connu sous le nom de dodo, était un pigeon insulaire. De même, différents cormorans sont devenus aptères, comme celui de Pallas, endémique des îles du Commandeur, près du détroit de Béring, et aujourd'hui disparu, ou celui de l'archipel des Galápagos, qui a survécu.

Le râle de Cuvier (*Dryolimnas cuvieri*) est l'un de ces oiseaux : après avoir colonisé plusieurs îles de l'océan Indien (Comores,



Les râles de Cuvier sont omnivores. Ils se nourrissent principalement d'insectes, de mollusques et de crabes.

Hervé Le Guyader a récemment publié : *L'Aventure de la biodiversité*, Belin, 2018).

EN CHIFFRES

31

Parmi les 150 espèces connues de rallidés – famille d'oiseaux qui compte notamment les foulques et les poules d'eau –, 31 ont évolué vers la perte du vol.

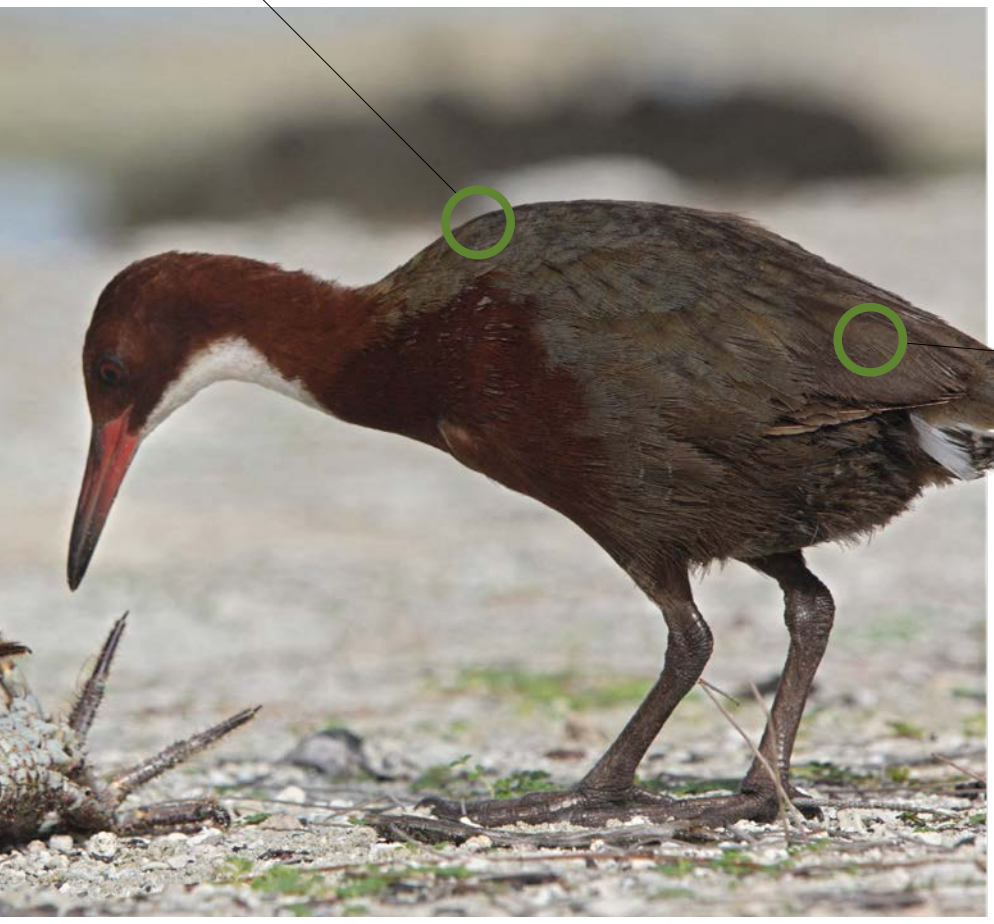
400

C'est le nombre d'espèces et de sous-espèces de vertébrés, d'invertébrés et de plantes endémiques de l'île d'Aldabra selon l'Unesco. En 1983, l'une d'elles, la fauvette d'Aldabra *(Nesillas aldabrana)*, s'est éteinte à cause de la prédation des rats surmulots.

150 000

C'est l'effectif de la population de tortues géantes des Seychelles *(Aldabrachelys gigantea)* sur l'atoll d'Aldabra. Ces tortues peuvent atteindre 1,2 mètre pour 300 kilogrammes – une taille supérieure à celle des tortues géantes des Galápagos *(Chelonoidis niger)*.

La population de râles de Cuvier compte entre 5100 et 7500 individus et n'est pas en danger selon l'Union internationale pour la conservation de la nature.



Cet oiseau de la sous-espèce *D. c. cuvieri*, photographié sur une plage des Seychelles, est capable de voler, contrairement à la sous-espèce endémique d'Aldabra.



Râle de Cuvier
Dryolimnas cuvieri
Taille : environ 30 cm

naturalistes grâce à sa flore et à sa faune, qui comptent bon nombre d'espèces endémiques. En particulier, on y trouve la plus grande colonie de tortues géantes des Seychelles (*Aldabrachelys gigantea*). Pour la tortue verte (*Chelonia mydas*), c'est le site de ponte le plus important de l'océan Indien. Deux espèces et onze sous-espèces d'oiseaux y sont endémiques, dont le râle de Cuvier.

L'île d'Aldabra présente une autre originalité : on y connaît trois importants gisements fossilifères comportant des restes de vertébrés, ce qui est rare sur des atolls, où les conditions ne sont en général pas propices à une fossilisation. Deux sites, à l'extrémité ouest de l'atoll (Bassin Cabri et Bassin Lebine), sont plus anciens que l'âge du calcaire qui les recouvre, à savoir 136 000 ans. Le troisième, Point Hodoul, à l'extrémité est, est plus jeune : il remonte à 100 000 ans. Une équipe anglaise autour des paléontologues Julian Hume, du Muséum d'histoire naturelle de Tring, et David Martill, de l'université de Portsmouth, les a méthodiquement étudiés.

Or différents dépôts sédimentaires, dont des assises de calcaire et de

Seychelles), il y est devenu aptère. Sur l'île d'Aldabra, entre les Seychelles et les Comores, il a même donné une sous-espèce endémique, *Dryolimnas cuvieri aldabranus*. Or celle-ci est une vraie curiosité d'ornithologue, comme le montre son histoire évolutive, récemment reconstruite grâce à différents gisements de fossiles.

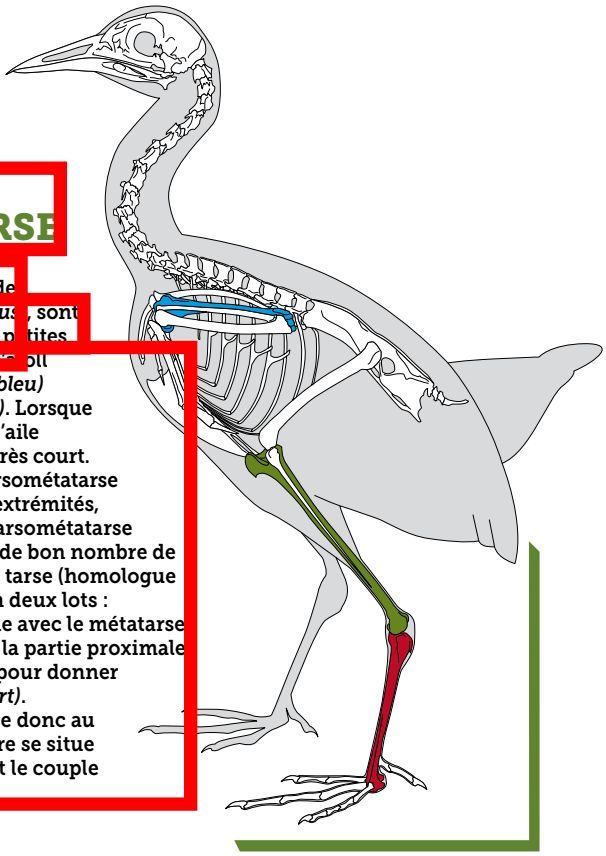
UN ATOLL PLUSIEURS FOIS SUBMERGÉ

Situé au nord-ouest de Madagascar, Aldabra est le deuxième atoll le plus grand du monde, après l'île Christmas, de l'archipel des Kiribati. Classé dès 1982 au patrimoine mondial de l'humanité par l'Unesco, l'atoll est célèbre chez les

phosphorite, prouvent que l'atoll, qui actuellement culmine à 8 mètres au-dessus du niveau de la mer, a été complètement submergé à plusieurs reprises. Deux inondations certaines datent d'environ 340 000 et 120 000 ans, et deux autres se sont vraisemblablement intercalées il y a 240 000 et 200 000 ans.

Évidemment, la submersion complète d'un atoll entraîne l'éradication de l'ensemble des faune et flore terrestres. La plus récente a donc causé l'extinction des nombreuses espèces de vertébrés retrouvées dans le gisement du Bassin Cabri, dont deux oiseaux endémiques (un pétrel et un canard), un crocodile à corne endémique, une tortue géante, un iguane et des scinques… L'étude paléontologique du gisement de Point Hodoul, postérieur, montre qu'après réémergence de l'atoll, la recolonisation a été rapide. Si les oiseaux et le crocodile ont complètement disparu, les autres espèces, non endémiques, sont revenues et comptent parmi les fossiles du site.

LE SECRET DU TARSOMÉTATARSE



Les rallidés, comme ce râle de Cayenne (*Aramides cajaneus*), sont dotés de fortes pattes et de petites [illegible] dont deux fossiles trouvés sur l'atoll d'Aldabra sont des humérus *(en bleu)* et des tarsométatarses *(en rouge)*. Lorsque l'oiseau perd la faculté de voler, l'aile s'atrophie et l'humérus devient très court. L'oiseau devenant coureur, le tarsométatarse se renforce, en particulier à ses extrémités, au niveau des articulations. Le tarsométatarse est une curiosité des oiseaux et de bon nombre de dinosaures. En effet, leurs os du tarse (homologue de notre cheville) se séparent en deux lots : la partie distale *(en bas)* fusionne avec le métatarse pour donner le tarsométatarse ; la partie proximale *(en haut)* fusionne avec le tibia pour donner le tibiotarse, l'os du pilon *(en vert)*. L'articulation de la cheville passe donc au milieu du tarse, alors que la nôtre se situe entre le tarse (avec l'astragale) et le couple tibia-péroné.

LA PARTICULARITÉ DU RÂLE DE CUVIER

Les gisements renferment des restes osseux de râle de Cuvier. Dans le plus ancien, celui du Bassin Cabri, ce sont deux humérus. De taille réduite, ils sont quasiment identiques à ceux du râle de Cuvier d'Aldabra moderne (*D. c. aldabranus*). Dans le gisement plus récent (Point Hodoul), il s'agit d'un tarsométatarse. Chez les oiseaux modernes, en effet, les homologues du tarse (cheville) et du métatarse (pied) des mammifères sont fusionnés en un seul os, le tarsométatarse (*voir l'encadré ci-dessus*). Celui de Point Hodoul paraît plus trapu, plus robuste que ceux des râles de Cuvier d'Aldabra modernes, eux-mêmes plus trapus et robustes que ceux des râles de Cuvier d'autres îles ayant conservé leur capacité de voler (sous-espèce *D. c. cuvieri*). Cela suggère que les râles de Point Hodoul étaient meilleurs coureurs que les oiseaux actuels. Or un oiseau qui perd le vol devient coureur, ce qui entraîne l'accroissement de la puissance de ses pattes. Les râles de Point Hodoul étaient donc très probablement aptères.

La présence du râle de Cuvier dans ces gisements du Pléistocène paraît très étrange. En effet, la petite taille des humérus du Bassin Cabri prouve que l'oiseau avait déjà perdu l'aptitude au vol. Étant strictement terrestre, il a donc dû disparaître au moment de la dernière submersion de l'atoll. Or le râle de Cuvier est revenu sur l'île au moins une fois entre la formation des deux gisements et n'a pu le faire qu'en volant, ce qui signifie que l'oiseau a perdu au moins à deux reprises la possibilité de voler.

Comparons les deux événements évolutifs, séparés de plusieurs dizaines de milliers d'années. Des oiseaux de la même espèce, c'est-à-dire avec des génomes comparables, arrivent à deux moments différents sur un atoll, c'est-à-dire dans des écosystèmes comparables. Mêmes capacités d'évolution, mêmes interférences environnementales. Il en résulte une évolution similaire. Les biologistes appellent cela de l'évolution parallèle. Différents cas sont bien circonstanciés, avec des lieux différents. Par exemple, le râle de Cuvier de la sous-espèce *D. c. abbotti*, aujourd'hui disparu, était lui aussi aptère, mais endémique de l'île de l'Assomption, également dans l'archipel des Seychelles. Par ailleurs, une équipe de l'université de Pennsylvanie a montré en 2012 que les canards-vapeur ou brassemers (genre *Tachyeres*), qui vivent en Patagonie et dans les îles Malouines, ont perdu trois fois indépendamment la faculté de voler. L'étonnant, dans le cas du râle de Cuvier, est que l'on ait eu la possibilité de démontrer la répétition d'un même processus évolutif à partir d'une même espèce, au même endroit. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Hume et D. Martill, **Repeated evolution of flightlessness in Dryolimnas rails (Aves : Rallidae) after extinction and recolonization on Aldabra,** *Zool. J. Linn. Soc.*, article zlz018, 2019.

J. Hume *et al.*, **A terrestrial vertebrate palaeontological review of Aldabra atoll,** Aldabra group, Seychelles, *PLoS One*, vol. 13(3), article e0192675, 2018.

T. Fulton *et al.*, **Multiple losses of flight and recent speciation in steamer ducks,** *Proc. R. Soc. B*, vol. 279(1737), pp. 2339-2346, 2012.

OFFRE D'ABONNEMENT 1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE DÉCOUVERTE	FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier (12 numéros par an	✓	✓	✓
Le hors-série papier (4 numéros par an		✓	✓
L'accès en ligne illimité à pourlascience.fr			✓
L'édition numérique du magazine (12 numéros par an			✓
L'édition numérique du hors-série (4 numéros par an			✓
L'accès aux archives numériques depuis 1996			✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	**59 €** Au lieu de 82,80 € **29 %** d'économie	**79 €** Au lieu de 114,40 € **31 %** d'économie	**99 €** Au lieu de 174,20 € **43 %** d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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

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

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE DÉCOUVERTE
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
4 Hors-série papier
Accès illimité aux contenus en ligne
99€ au lieu de 174,40€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : ..... Prénom : .....

Adresse : .....

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

Téléphone .....

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

..... @ .....

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

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ **Par chèque** à l'ordre de Pour la Science

☐ **Carte bancaire**

N° .....

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

Signature obligatoire :

Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site https://boutique.pourlascience.fr. Photos non contractuelles.

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

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

DÉLICIEUX OXYMORES THERMIQUES

L'AUTEUR



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

Grâce aux particularités du chauffage par des microondes, il est possible de faire un plat à la fois glacé et brûlant.

Le manichéisme séduit par sa simplicité: le bon et le mauvais, le noir et le blanc, le salé et le sucré, le chaud et le froid... Or l'alternative ne se réduit que rarement aux deux termes opposés. Entre le noir et le blanc, il y a [illegible]

Pour la consistance, par exemple, les rhéologistes savent qu'il y a toute une gamme entre le liquide et le solide: il y a ainsi les liquides «newtoniens», dont la viscosité est constante, des fluides rhéofluidifiants, des fluides rhéoépaississants... Notamment, certaines peintures sont rhéofluidifiantes, ce qui signifie qu'elles ne coulent pas facilement quand elles sont immobiles, mais sont plus fluides quand on leur applique une force: utile quand on peint un plafond! En cuisine, c'est le cas des sauces tomate, entre autres.

Ce mois-ci, c'est avec les températures que je propose de jouer, pour faire un millefeuille à la fois glacé et brûlant. L'idée? Elle découle des «omelettes norvégiennes inversées» que nous avions proposées il y a plus de deux décennies, et qui sont fondées sur le fait que les microondes chauffent énergiquement l'eau liquide, alors que l'eau solide (la glace, donc) capte peu l'énergie de ces ondes.

Commençons par nous convaincre expérimentalement de ce fait en fabriquant un récipient en glace, à l'aide de deux saladiers qui s'emboîtent. Versons de l'eau dans le grand saladier, posons le petit saladier dessus (éventuellement avec un poids dedans pour l'enfoncer), et mettons le tout au congélateur. Quand nous sortirons l'ensemble, il suffira de retirer les deux saladiers pour avoir un récipient de glace.

Dans ce dernier, versons de l'eau liquide, et placons le tout au four à microondes: rapidement, l'eau liquide se met à bouillir, alors que la glace n'est pas fondue.



Les couches glacées riches en glace d'eau sont relativement insensibles au chauffage par microondes, contrairement aux couches riches en eau liquide.

Pour faire un plat glacé-brûlant, il faut donc un élément glacé et un élément liquide. Et pour faire un millefeuille de ce type? Il suffira d'alterner des couches glacées et des couches liquides ou, du moins, suffisamment visqueuses pour ne pas couler. Bien sûr, pour donner aux convives la possibilité de bien percevoir l'alternance du glacé et du brûlant, on ne produira pas exactement un millefeuille, mais une alternance de couches ayant environ un centimètre d'épaisseur.

Le glacé? La glace d'eau n'a guère d'intérêt gustatif, mais on n'oubliera pas que les mousses sont des dispersions de bulles d'air dans un liquide, et que ce dernier peut avoir du goût. Pensons par exemple à du blanc d'œuf additionné de sucre, comme pour une meringue, ou, mieux encore, une mousse dont le liquide serait une solution aqueuse de sucre, d'un colorant, d'acide citrique, et de composés odorants, tels le limonène ou le citral, qui sont présents dans les agrumes. Une fois la mousse stabilisée (relativement) par le sucre, on coulera la mousse sur une plaque, dans des moules en forme de disques, de sorte que la congélation produise des disques glacés.

Lors du dressage, on alternera donc des disques glacés et des couches d'un sirop un peu épais, puis l'ensemble sera rapidement chauffé, à pleine puissance, au four à microondes, ce qui produira l'alternance voulue de glacé et de brûlant. Un oxymore thermique et culinaire, en quelque sorte. ■

LA RECETTE

1. Dans 120 grammes d'eau, dissoudre 15 grammes de poudre de blanc d'œuf et fouetter en neige ferme.
2. Ajouter une pincée de sel, une cuillerée d'acide citrique et 250 grammes de sucre en poudre ; fouetter jusqu'à dissolution de tous les cristaux. Éventuellement, ajouter quelques gouttes de limonène ou de citral, ou d'huile essentielle d'agrume.
3. Avec cette mousse, former des disques de dix centimètres de diamètre (soit en utilisant des disques métalliques posés sur un papier sulfurisé, soit en utilisant des moules).
4. Mettre les disques de mousse au congélateur.
5. Préparer un sirop épais avec de l'eau et du sucre ; donner de la couleur avec un colorant alimentaire, et parfumer avec de l'eau de fleur d'oranger (on pourrait aussi utiliser de la confiture).
6. Sortir les disques glacés et les alterner avec des couches de sirop (ou de confiture)
7. Mettre au four à microondes, à pleine puissance, jusqu'à ce que le sirop se mette à bouillir. Servir.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT !



N° 501 (juillet 19
réf. PLS01



N° 500 (juin 19
réf. PLS00



N° 499 (mai. 19
réf. PLS99



N° 498 (avr. 19
réf. PLS98



N° 497 (mar. 19
réf. PLS97



N° 496 (févr. 19
réf. PLS96



N° 495 (jan. 19
réf. PLS95



N° 494 (déc. 18
réf. PLS94



N° 493 (nov. 18
réf. PLS93



N° 492 (oct. 18
réf. PLS92



N° 491 (sept. 18
réf. PLS91



N° 490 (août 18
réf. PLS90

A retourner accompagné de votre règlement à :

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

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

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

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

TOTAL À RÉGLER € 9,90 €

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal Ville :

Téléphone

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

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ **Par chèque** à l'ordre de *Pour la Science*

☐ **Carte bancaire**

N°

Date d'expiration

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire :

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

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

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

RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMEROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

PICORER

Retrouvez tous nos articles sur www.pourlascience.fr

P.36 750 000

À l'époque du contact avec l'Occident, vers la fin du XVIIIe siècle, les Aborigènes australiens constituaient le plus vaste ensemble de chasseurs-cueilleurs jamais observé. On estime que cette population comptait 750 000 individus, répartis en quelque 500 tribus qui se partageaient alors une île-continent vaste comme les États-Unis actuels. Aucune n'avait jamais interagi avec une société étatique.

P.92 CANARD-VAPEUR

Ce nom désigne non pas une recette asiatique mais un genre d'oiseau de Patagonie qui, quand il nage vite, bat l'eau de ses ailes comme une roue à aube. On le nomme aussi brassemer...

P.7

« *82 % des participants de l'étude estiment qu'il y a une différence entre le sel (NaCl) synthétique et celui extrait de la mer.* »

CHRISTOPHE CARTIER DIT MOULIN
directeur de recherche au CNRS

P.10 259

C'est le nombre d'alevins fossiles retrouvés sur une dalle de calcaire de 57 par 37,5 centimètres âgée de plus de 34 millions d'années. Ils allaient quasi tous dans la même direction... Un banc de poissons pris sur le vif !

P.26 ÉTOILE DE PLANCK

Selon la théorie dite de la « gravité quantique à boucles », l'effondrement gravitationnel dans un trou noir ne se poursuit pas jusqu'à former une singularité, mais cesse lorsque les effets quantiques deviennent dominants. L'astre atteint alors une densité phénoménale mais finie, de l'ordre de 5×10^{93} tonnes par mètre cube. Le trou noir est devenu une étoile de Planck.

P.72 MYRIAPHONE

Composé de cornets acoustiques juxtaposés, ce capteur inventé par le physicien Jean Perrin durant la Première Guerre mondiale recueillait l'énergie sonore. Plusieurs myriaphones assemblés formaient un « télésitemètre » d'une portée de 7 à 8 kilomètres. Un engin similaire apparaît dans l'album de Tintin *Le Sceptre d'Ottokar*.

P.54 2 555

La fosse subglaciale de Bentley, dans l'Antarctique, est une grande fosse océanique qui s'étend jusqu'à 2 555 mètres au-dessous du niveau de la mer. C'est le point le plus bas de la surface de la Terre qui ne soit pas recouvert par l'océan : il est par de la glace.

Imprimé en France – Maury Imprimeur SA, Malesherbes – Dépôt légal 5636 – août 2019 – N° d'édition MU7705012-01 – Commission paritaire n° 0922 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0153-4092 – N° d'imprimeur 238035 – Directeur de la publication et gérant : Frédéric Mérot

AcademiaNet

La base de données qui rassemble toutes les femmes scientifiques de renommée internationale



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

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

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

Partenaires

Robert Bosch Stiftung

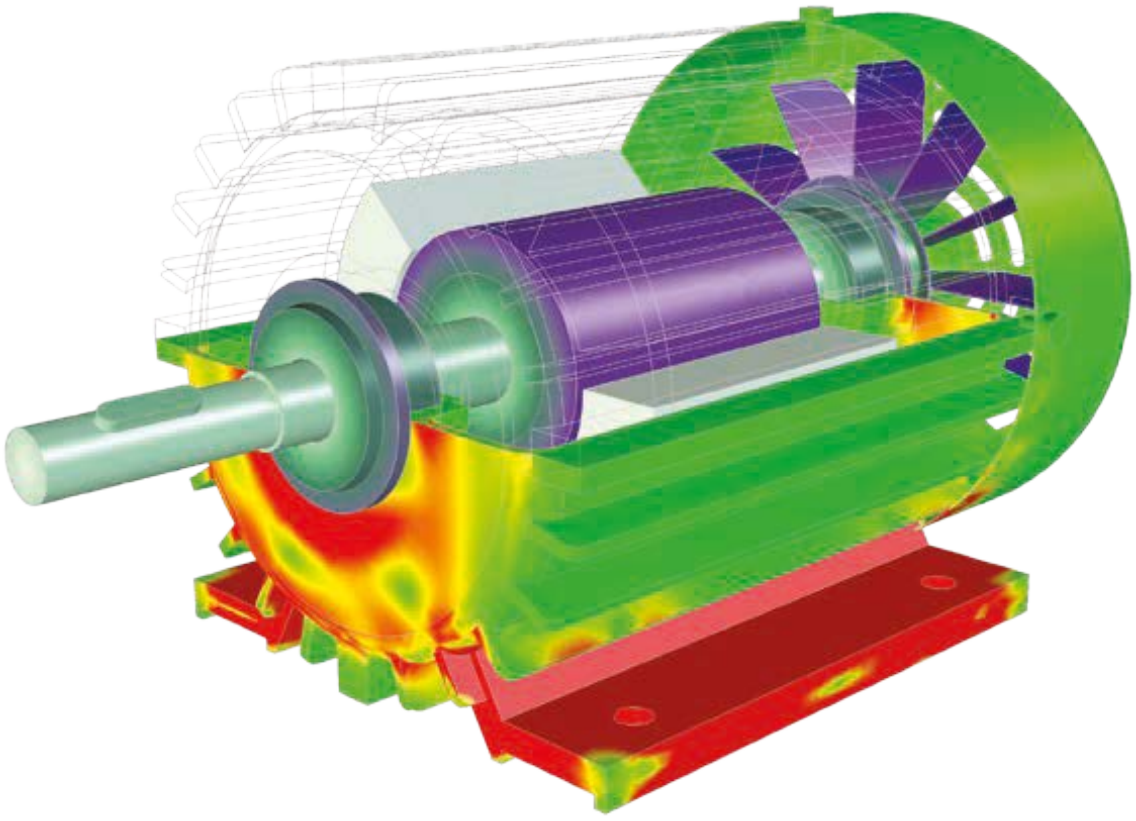
Spektrum der Wissenschaft

nature

Pour la Science

www.academia-net.org

Inventé au 19ième siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19ème siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor

COMSOL