

POUR LA

Edition française de Scientific American

SCIENCE

MICROBIOLOGIE
**CANNIBALISME
CHEZ LES
BACTÉRIES**

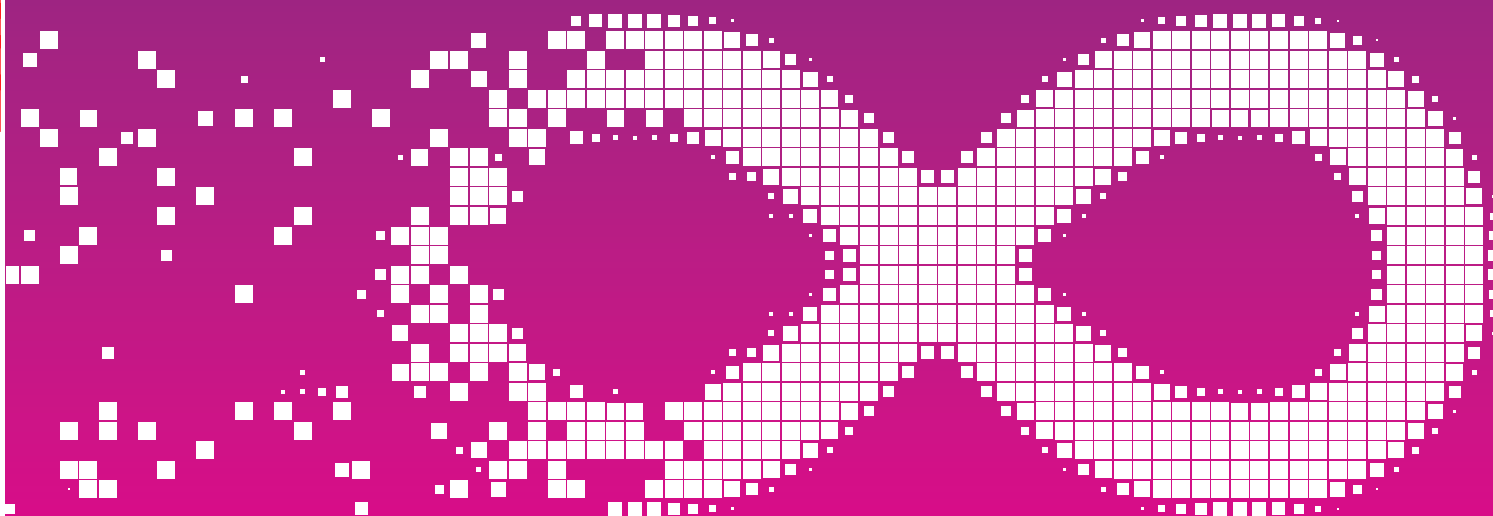
PHYSIQUE
**INTRICATION
QUANTIQUE : DES
TESTS SANS FAILLE**

HISTOIRE DES SCIENCES
**DES NATURALISTES
SUR LES TRACES
DE LA NEIGE ROUGE**

OCTOBRE 2019
N° 504

VERS UNE NOUVELLE THÉORIE DE L'INFINI

**L'hypothèse du continu
bientôt prouvée ?**



ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses





Certifié PEFC

Ce produit est issu
de forêts gérées
durablement et de
sources
contrôlées.

10-31-1282

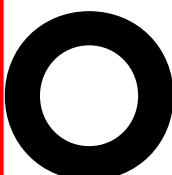
pefc-france.org

É
DITO



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

LES VÉRITÉS MATHÉMATIQUES NE SONT PAS TOUTES IMMUABLES



On ne peut aimer les mathématiques pour des raisons
diverses: pour leur côté ludique, pour leur utilité
dans les sciences et la technologie, pour la rigueur
des raisonnements, pour la beauté des
démonstrations... Beaucoup les aiment pour une
caractéristique fort rassurante dans un monde si

instable: la permanence des théorèmes et autres résultats produits par
la logique. Cependant, il y a une caractéristique des mathématiques, celle
où une théorie peut être remplacée par une autre, plus fidèle à la réalité
et fondée sur des concepts très différents, les mathématiques apportent
en effet des vérités éternelles, comme: «Il existe une infinité de
nombres premiers» ou: «La relation de Pythagore s'applique à tout
triangle rectangle».

Il convient cependant de nuancer. Bien que les mathématiques
soient aujourd'hui assises sur des systèmes d'axiomes bien solides,
les logiciens ont démontré que dans toute théorie axiomatique assez
puissante pour englober l'arithmétique usuelle, on peut formuler
des énoncés indécidables, c'est-à-dire dont la théorie ne peut ni prouver
qu'ils sont vrais, ni prouver qu'ils sont faux.

Ces énoncés indécidables ne sont généralement pas gênants, mais
une des exceptions est «l'hypothèse du continu». Elle stipule qu'entre
l'infini le plus petit, celui des nombres entiers, et l'infini des nombres
réels, il n'existe pas d'intermédiaire. Or certains mathématiciens
refusent d'admettre que l'hypothèse du continu soit indécidable.
Ils cherchent donc à étendre le système axiomatique à la base des
mathématiques de telle façon que cet énoncé, ou sa négation, puissent
être prouvés. Comme Jean-Paul Delahaye l'explique dans ce numéro
(voir pages 26 à 36), les travaux récents de l'Américain Hugh Woodin
sur les grands ensembles infinis laissent penser que l'objectif est à notre
portée. S'il est atteint, l'hypothèse du continu deviendra vraie... tandis
que son indécidabilité deviendra fausse. Peut-être plus important
encore, une nouvelle théorie de la hiérarchie des infinis s'imposera. ■

S

SOMMAIRE

N° 504 /
Octobre 2016

ACTUALITÉS

P. 6

ÉCHOS DES LABOS

Des ondes cérébrales dans des minicerveaux
Climat et sols
La synergie des solutions
La tectonique des plaques a plus de 2,2 milliards d'années
La cochlée indique le sexe
Un cycle en pur carbone
Le crâne du supposé ancêtre de notre ancêtre présumé
Comment les bactéries se réveillent
Des humains à haute altitude
Algue-champignon, une symbiose inédite
La valse des gouttes supermarcheuses
Deux canes d'invisibilité contre les vagues

P. 18

ESTIVESTIUM DE

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Internet a cinquante ans
Gilles Dowek

P. 24

QUESTIONS DE CONFIANCE

Le futur du passé est-il assuré?

Virginie Tournay

GRANDS FORMATS



P. 38

NOTES TECHNOLOGIE

UNE VIDEO STOCKEE DANS L'ADN

James E. Dahlman

Un cheval au galop enregistré dans l'ADN d'une bactérie, c'est possible! Dispositif de stockage numérique, outil de gestion de données lors d'expériences, code-barres... l'ADN endosse des rôles de plus en plus variés.



P. 52

ASTRONOMIE

DES TESTS SANS FAIBLE DE L'INTRICATION QUANTIQUE

Ronald Hanson et Krister Shalm

L'étrange influence à distance de l'œuvre dans l'intrication quantique s'expliquerait-elle par l'existence de variables cachées respectant un principe de localité? Réponse donnée par les expériences récentes: définitivement non!



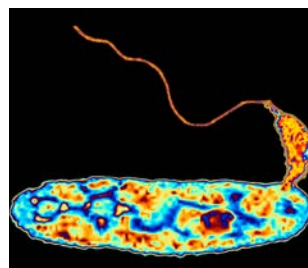
P. 46

PSYCHOLOGIE

LE GRAND MENAGE DE LA PSYCHOLOGIE

François Maquestiaux

Non, vous ne vivrez pas plus longtemps si vous souriez sur les photographies. Non, tenir un crayon entre les dents ne modifie pas votre jugement... Nombre de conclusions d'études menées en psychologie doivent être soumises à un examen plus approfondi. Depuis quelques années, les chercheurs de cette discipline s'y attellent.



P. 62

MICROBIOLOGIE

CES BACTERIES QUI EN DÉVORENT D'AUTRES

Stéphan Jacquet et Jade Ezzedine

Dans les profondeurs des grands lacs de montagne et ailleurs, des bactéries se nourrissent de leurs semblables avec une efficacité redoutable. Nommées Balo, ces bactéries prédatrices offrent une alternative prometteuse aux antibiotiques.



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

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

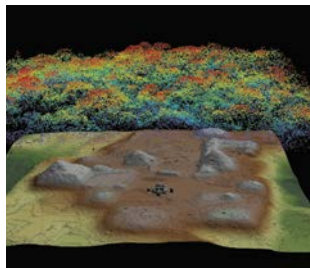
Notre sélection d'articles
Des offres préférentielles
Nos autres magazines en kiosque



inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



En couverture :
© Shutterstock.com/Aha-Soft
Les portraits des contributeurs ont été de Seb Jarnot



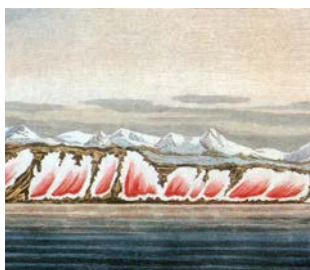
P. 72

ARCHÉOLOGIE

LES PRECOLOMBIENS DÉNOMBRÉS AU LIDAR

William E. Carter,
Ramesh Shrestha
et Juan Carlos Fernández Díaz

Grâce à la technique du lidar aéroporté, les archéologues repèrent et cartographient des sites précolombiens cachés par une épaisse forêt. Ce qui permet de mieux quantifier les populations du passé.



P. 80

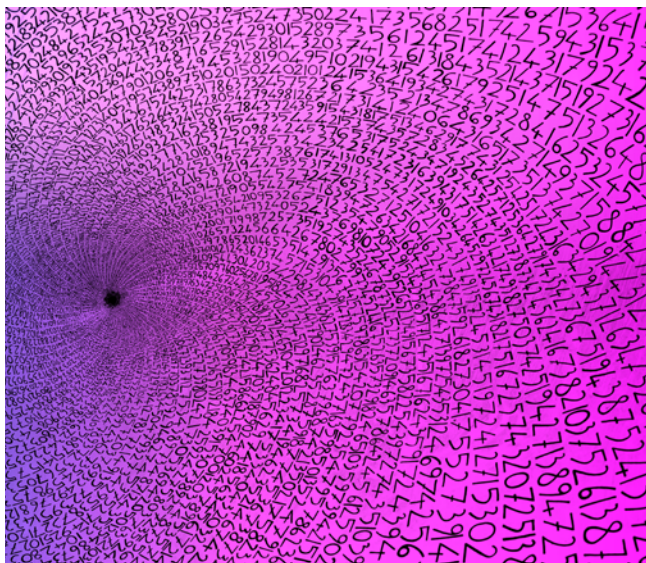
HISTOIRE DES SCIENCES

ROUGE... COMME NEIGE

Frédérique Rémy

Des champs de neige rouge dans les montagnes, des averses pourpres, des traces sanglantes de pas sur un tapis neigeux immaculé... Au XIX^e siècle, les savants multipliaient les hypothèses et les études pour comprendre cet étrange phénomène, et il y a peu.

À LA UNE



P. 26

MATHÉMATIQUES

EN FINIR AVEC L'HYPOTHÈSE DU CONTINU

Ben-Paul Delany

L'existence ou non d'un infini intermédiaire entre celui des nombres entiers et celui des nombres réels est une question que les mathématiciens et les logiciens pensaient impossible à trancher. Mais l'Américain Hugh Woodin est d'un avis contraire. Et ses travaux récents indiquent une voie possible pour résoudre cette énigme centrale posée par l'infini.

RENDEZ-VOUS

P. 86

DÉES DE PHYSIQUE LA CLÉ DES CHAMPS FORTS

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P. 90

ART & SCIENCE LE CORAIL FAIT DANS LA DENTELLE

Loïc Mangin

P. 92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION LA MYXINE, UN VERTÉBRÉ SANS VERTÈBRES

Hervé Le Guvader



P. 96

SCIENCE & GASTRONOMIE DES ÉMULSIONS PLUS PARFUMÉES

Hervé This

P. 98

À PICORER

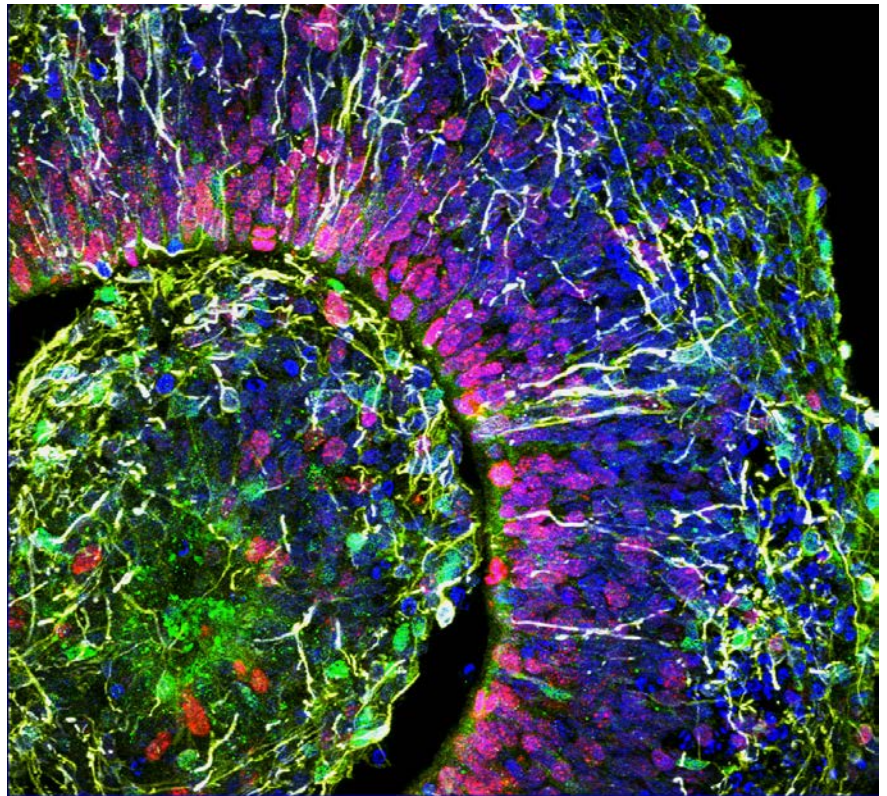
NEUROSCIENCES

A

CTUALITÉS

- 2.6 Echos des labos
- 2.18 Livres du mois
- 2.20 Agenda
- 2.22 Homo sapiens informaticu
- 2.24 Questions de confiance

DES ONDES CÉRÉBRALES DÉTECTÉES DANS DES MINICERVEAUX



Coupe d'un organoïde cérébral. Chaque couleur marque un type différent de cellules cérébrales.

Grâce à une nouvelle méthode de croissance de cellules souches, des chercheurs ont obtenu un réseau de neurones assez complexe pour produire des ondes cérébrales.

Avec ses quelque 86 milliards de neurones, le cerveau est un organe particulièrement difficile à étudier. Une solution est de procéder sur un système simplifié contenant moins de 100 000 neurones. En 2012, Wyeth et ses collègues, de l'Institut de biotechnologie moléculaire, à Vienne, en Autriche, a produit *in vitro* à partir de cellules souches humaines des cerveaux miniatures, aussi nommés organoïdes cérébraux.

Si ces cerveaux de laboratoire sont très utiles aux chercheurs, on n'y avait

jusqu'à présent jamais observé d'activité sous la forme d'ondes électriques. C'est désormais chose faite. Alysson Muotri, de l'université de Californie à San Diego, et son équipe ont amélioré les techniques de production des organoïdes et ont constaté l'apparition spontanée, après une certaine durée de développement, d'ondes cérébrales similaires à celles observées dans le cerveau de bébés prématurés.

Dans le cerveau des prématurés, l'activité électrique présente des motifs chaotiques. Mais ce qui se passe avant, c'est-à-dire la façon dont émerge et se met

en place une activité neuronale complexe, restait hors de portée. Par ailleurs, si des travaux sur des rongeurs ont permis d'observer l'activité dans des cerveaux jeunes, la question de l'extrapolation au cas des cerveaux humains se pose.

Les organoïdes cérébraux offrent une piste intéressante pour étudier de telles questions. De la taille d'un petit pois, ils sont obtenus à partir de cellules souches humaines pluripotentes. Placées dans un milieu qui reproduit les conditions dans lesquelles se développe le cerveau, ces cellules se différencient et forment des neurones qui s'autoorganisent dans une structure tridimensionnelle. On obtient alors une version réduite et simplifiée d'un cortex humain, la zone du cerveau impliquée dans la cognition et l'interprétation de

Climat et sols, la synergie des solutions

En août dernier, le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) a publié un rapport spécial portant sur l'évolution des terres émergées, en lien avec l'activité humaine et le réchauffement climatique. Nathalie de Noblet-Ducoudré, une des auteurs principaux de ce rapport, nous présente quelques-unes de ses conclusions.



Données recueillies par SEAN BAILEY

NATHALIE DE NOBLET-DUCOUDRÉ
Directrice de recherche
du CEA au laboratoire
ISCE, à Gif-sur-Yvette

Pourquoi se focalise-t-on dans ce rapport sur les seules terres émergées ?

La question du réchauffement

climatique touche l'ensemble du globe, mais les terres émergées correspondent à nos lieux de vie, à nos sources principales d'approvisionnement en eau et en nourriture.

L'homme occupe ou exploite plus de 70 % de ces terres (non englacées). Et près de 25 % des terres émergées sont aujourd'hui dégradées, c'est-à-dire qu'elles ont perdu la faculté de se restaurer ou de produire de la nourriture, du bois, etc. Cette évolution négative des sols tient beaucoup plus à l'activité humaine qu'à l'augmentation des températures, mais le rôle du changement climatique s'amplifiera dans les années à venir.

Il était nécessaire de faire le point des connaissances dans ce domaine. Cela a pris la forme d'un projet ambitieux mené en seulement 22 mois avec une approche transverse et pluridisciplinaire, dans laquelle près de 7 000 articles scientifiques ont été analysés. En se concentrant sur quatre axes : la désertification, la dégradation des sols, la sécurité alimentaire et l'atténuation du réchauffement climatique. Nous avons fait un état des lieux sur ces points puis nous avons évalué les solutions proposées pour résoudre chacun de ces problèmes. Enfin, ce qui est vraiment original, nous avons étudié les conséquences sur les autres axes de chaque solution envisagée.

Que montre l'évaluation des solutions ?

Une conclusion forte du rapport

est que chaque solution appliquée pour traiter un axe contribue en général de façon positive aux autres axes. Par ailleurs, une bonne solution doit prendre en compte trois aspects essentiels : la contextualisation, la mise en œuvre et la faisabilité. Une même solution n'est pas valable

partout, la diversification (plutôt que la monoculture) et l'adoption du « local » (utiliser des plantes qui poussent déjà dans la région).

L'agroécologie et l'agroforesterie

modèles d'exploitation des terres agricoles associant des arbres et des cultures ou de l'élevage) offrent des outils et des approches diversifiées qui répondent à ces différents critères et s'inscrivent dans une exploitation durable des sols.

Que dit le rapport en matière de sécurité alimentaire ?

Le chiffre le plus important à cet égard est que 25 % de la production est perdue ou gaspillée. Si l'on pouvait limiter cet effet, c'est autant de terres que l'on utiliserait pour la reforestation, par exemple. Dans les pays développés, le gaspillage prédomine, avec une surconsommation marquée. C'est un problème sur lequel nous devons agir à tous les échelons dans la société.

Dans les pays en développement

ce sont les pertes qui pèsent le plus dans le bilan. Mais des solutions techniques existent. La résolution du problème passe donc par des moyens et une volonté politique de transférer le savoir-faire et les technologies.

Que faut-il retenir d'autre du rapport ?

La première chose à faire est de limiter au maximum les utilisations des sols qui contribuent aux émissions de dioxyde de carbone (déforestation, assèchement des marais, etc.). Par ailleurs, il faut agir maintenant : plus on attend, plus le réchauffement climatique et la dégradation des sols augmentent. Certaines régions pourraient atteindre les points de non-retour et il deviendra très difficile de réhabiliter ces espaces.

Les auteurs du rapport ont ainsi déterminé que le coût qu'entraînera l'inaction dépasse de un à deux ordres de grandeur celui des actions immédiates. Le monde économique et financier doit donc prendre la mesure de ces conclusions : il faut investir maintenant.

Le rapport du Giec sur climat et sols : <https://www.ipcc.ch/report/srcc/>

l'information sensorielle). Par rapport aux travaux antérieurs menant à des minicerveaux sans activité électrique, l'équipe d'Alysson Muotri a perfectionné la technique, ce qui lui a permis de suivre pendant dix mois les centaines d'organoïdes produits.

Les chercheurs ont d'abord montré que les organoïdes présentaient les mêmes types de cellules et dans les mêmes proportions que des cerveaux humains au même stade de développement. Ils ont aussi suivi l'activité électrique des organoïdes en utilisant des réseaux multiélectrodes. En quelques mois, les minicerveaux ont produit une activité jamais observée auparavant sur de tels systèmes : des motifs électriques chaotiques à une seule fréquence, des signaux que l'on observe également dans le cerveau immature de bébés nés prématurément. Ces signaux sont ensuite devenus plus réguliers et plus riches en termes de fréquences. Une transition qui suggère que les minicerveaux continuent de se développer en augmentant le nombre de leurs connexions neuronales.

Les chercheurs ont ensuite mis au point un programme d'apprentissage profond pour étudier le développement des minicerveaux. Ils ont utilisé en guise de référence l'enregistrement des ondes cérébrales de 39 bébés nés six à neuf mois après la conception. En analysant les signaux des organoïdes à différents stades de développement, l'algorithme était en mesure de prédire le niveau de maturité des minicerveaux. Cela confirme que les cerveaux humains et les minicerveaux ont un développement comparable. Ces derniers seraient donc des modèles très intéressants pour étudier le développement du cerveau, mais aussi des pathologies telles que la maladie d'Alzheimer, les épilepsies ou l'autisme, ou pour tester des médicaments.

Malgré ce progrès certain, les organoïdes restent des modèles rudimentaires et très éloignés de la complexité du cerveau humain. Ces travaux sur les minicerveaux soulèvent par ailleurs des questions éthiques : à partir de quand un minicerveau présentant une activité cérébrale peut-il être considéré comme conscient ? On est encore loin d'en savoir assez sur le cerveau pour répondre à cette épineuse interrogation. ■

SEAN BAILEY

J. A. Trujillo et al., *Cell Stem Cell*, vol. 25, pp. 1-12, 2019.

GEOSCIENCES

LA TECTONIQUE DES PLAQUES A PLUS DE 3,3 MILLIARDS D'ANNÉES

Des roches volcaniques attestent que le recyclage des plaques tectoniques était déjà actif il y a 3,3 milliards d'années, plus tôt qu'on ne le pensait.

Elle remodèle sans arrêt le visage de la Terre: la tectonique des plaques déplace depuis des milliards d'années les continents les uns par rapport aux autres, modifiant la géographie, donc le climat et le monde vivant. Mais dater sa mise en place se

les sciences de la Terre (ISTerre), à Grenoble, et ses collègues apportent de nouveaux indices montrant que ce processus était déjà à l'œuvre au Paléoarchéen (il y a entre 3,6 et 3,2 milliards d'années), 600 millions d'années plus tôt qu'on ne l'estimait précédemment.

Les chercheurs ont étudié des komatiites trouvées à Barberton, en Afrique du Sud, et formées il y a 3,3 milliards d'années. Ces roches volcaniques résultent du refroidissement de magma issu de la fusion de roches du manteau et remontant vers la surface sous la forme de panaches très chauds. Alexander Sobolev et ses collègues se sont intéressés à la chimie des inclusions vitreuses contenues dans ces komatiites pour connaître les conditions de leur formation. Alors que le magma s'est lentement refroidi en cristallisant sous la forme de minéraux, ces derniers ont parfois piégé des gouttelettes de magma qui sont passées très vite à l'état solide, formant ainsi les inclusions vitreuses.

Lors de leur analyse, les géologues ont trouvé que les roches mantelliques à l'origine de ces komatiites présentaient un excédent d'eau par rapport à ce qui était attendu pour le manteau à cette époque dans les modèles classiques de l'évolution de la planète. La présence d'eau en excès en profondeur serait révélatrice d'une tectonique active: une croûte océanique hydratée aurait plongé dans le manteau (on parle de subduction) où elle se serait déshydratée, principalement au niveau du manteau supérieur, mais aussi plus profondément, dans la zone de transition entre le manteau supérieur et inférieur (entre 400 et 600 kilomètres de profondeur), où le magma commence à se former.

Pour s'assurer que l'eau en excès provient de la plongée d'une plaque tectonique, les chercheurs ont étudié la composition des inclusions en isotopes légers (H) et lourds (D) de l'hydrogène. Dans les inclusions des komatiites, le rapport D/H est plus faible que celui du manteau



Produit d'une fusion à température élevée de roches du manteau terrestre, les komatiites (ici l'une d'elles en gros plan) renseignent sur la composition ancienne de celui-ci.

1 700 °C

C'EST LA TEMPÉRATURE MINIMALE DES PANACHES NÉCESSAIRE POUR FORMER DES KOMATIITES. AVEC LE REFROIDISSEMENT DE LA TERRE, LES ÉRUPTIONS MAGMATIQUES NE PRODUISENT PLUS DE KOMATIITES DEPUIS 2,4 MILLIARDS D'ANNÉES.

paléoarchéen, et correspond à celui d'une croûte plongeante arrivée dans la zone de transition. Enfin, les géologues y ont trouvé des concentrations élevées de chlore, caractéristique de roches altérées par l'eau de mer.

A partir de tous ces indices, les chercheurs ont reconstitué le scénario à l'origine des komatiites de Barberton. Il y a 3,3 milliards d'années, un panache de roches très chaudes, en provenance du manteau profond, est remonté jusqu'à la zone de transition, où les roches ont partiellement fondu. Dans cette zone, la composition du manteau était modifiée par l'apport d'eau et de chlore d'une plaque tectonique plongeante. Ces éléments ont été entraînés par le magma du panache. Arrivé près de la surface, le magma a cristallisé, et des inclusions vitreuses porteuses de la signature géochimique de la plaque plongeante ont été emprisonnées dans les minéraux.

La tectonique des plaques aurait donc débuté il y a au moins 3,3 milliards d'années. Mais au vu du temps nécessaire au plongement d'une plaque tectonique jusqu'au manteau profond, elle avait certainement démarré bien avant la formation des komatiites de Barberton. ■

NICOLAS BUTOR

A. V. Sobolev et al., *Nature*, vol. 571, pp. 555-559, 2019.

LA MASSE DU NEUTRINO SE PRÉCISE

Sur les trois types de neutrinos, au moins deux ont une masse non nulle, mais très petite. Les données cosmologiques ne donnent qu'une limite supérieure sur la somme des trois masses, tandis que la physique des particules ne renseigne que sur les différences entre ces masses. Arthur Loureiro, de l'University College, à Londres, et ses collègues ont examiné comment ces contraintes jouent sur la distribution statistique des galaxies. Ils en ont déduit que la masse du neutrino le plus léger est inférieure à 0,086 électronvolt. Six millions de fois moins que la masse de l'électron !

UN PREMIER VACCIN ANTICHLAMYDIA ?

La chlamydie est une maladie sexuellement transmissible qui touche 31 millions de personnes chaque année. Chez la femme, l'infection peut entraîner des douleurs pelviennes chroniques, voire une stérilité. Sonya Abraham, de l'Imperial College, à Londres, et ses collègues ont testé, contre placebo, deux formulations d'un nouveau vaccin auprès d'une trentaine de femmes. Ces vaccins se révèlent bien tolérés et déclenchent une réponse immunitaire efficace contre la bactérie responsable de la maladie.

DES MENHIRS AUVERGNATS

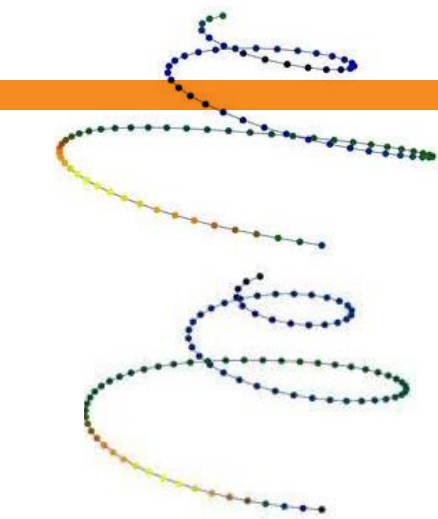
À Veyre-Monton, dans le Puy-de-Dôme, Ivy Thomson et son équipe de l'Inrap ont mis au jour un alignement, unique pour la région, d'une trentaine de menhirs sur 150 mètres. Abattus et retrouvés dans des fossés, ces monolithes auraient été intentionnellement éliminés du paysage, peut-être à cause des changements de croyances. L'un des menhirs se distingue par sa nature calcaire et sa forme grossièrement anthropomorphe dotée de deux petits seins.

LA COCHLÉE INDIQUE LE SEXE

Identifier le sexe d'un humain à partir de son seul squelette n'a rien d'évident. La question se pose en médecine légale et surtout en anthropologie. Les os bien conservés. Les chercheurs utilisent différents os, mais même le bassin, le plus fiable, est sujet à caution: chez les jeunes enfants, la morphologie du bassin des filles ne diffère guère de celle des garçons. Une solution se nicherait au sein du rocher, petit os de l'oreille interne et l'un des plus solides du squelette.

Souvent bien préservé chez les fossiles, cet os héberge la cochlée, l'organe spiralé de l'audition qui convertit les ondes sonores en signaux électriques à destination du cerveau. Cet organe est le seul qui présente dès la naissance sa morphologie et sa taille définitives, qu'il imprime en creux dans le rocher. José Braga, de l'université Toulouse 3, et ses collègues viennent de montrer que la forme de la cochlée, plus précisément la torsion de sa spirale, diffère notablement selon le sexe. Ce résultat leur a permis de mettre au point une méthode fiable de détermination du sexe des squelettes, ne faisant pas appel à l'ADN.

Les chercheurs ont obtenu ce résultat grâce à des méthodes d'analyse de formes 3D complexes. Ces outils ont fourni une représentation fine de la forme spiralée de la cochlée de près



Les torsions de la forme moyenne de la spirale cochléaire masculine (en haut) et féminine (en bas) diffèrent.

de l'une centaine d'individus dont les données ont été collectées par tomographie à rayons X. Une analyse statistique non supervisée (c'est-à-dire en mélangeant hommes et femmes), où l'effet de la taille a été éliminé, a montré une claire séparation des individus en fonction du sexe. La détermination à l'aveugle du sexe de chaque individu à partir de la cochlée a montré une performance moyenne de 93%. Reste à améliorer la méthode et à la tester sur des squelettes plus anciens, ce à quoi l'équipe s'attelle, et à déterminer à quel moment de l'évolution ce dimorphisme est apparu. ■

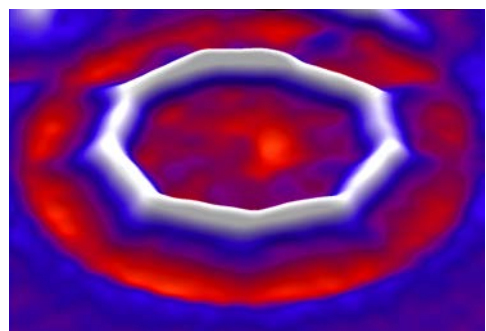
NOËLLE GUILLOU

J. Braga et al., *Scientific Reports*, vol. 9, article 10889, 2019

UN CYCLE EN PUR CARBONE

Diamant, graphène, nanotubes et fullérènes ont en commun de ne contenir que des atomes de carbone. Dans le premier, chaque atome est lié à quatre voisins; dans les suivants, chaque atome est lié à trois autres atomes de carbone. Mais est-il possible de fabriquer des cycles de carbone où chacun est lié à seulement deux voisins? Parmi l'autres, le Prix Nobel de chimie Roald Hoffmann avait imaginé cette configuration dès 1966, mais toute tentative de la réaliser avait échoué. Katharina Kaiser, du laboratoire de recherche IBM à Zurich, et ses collègues ont réussi ce tour de force en produisant un cycle stable, formé de 8 atomes de carbone.

Pour ce faire, ils sont partis d'une molécule cyclique ($C_{24}O_6$) d'atomes de carbone contenant des groupes CO. En manipulant au



Une molécule cyclique formée uniquement d'atomes de carbone a été synthétisée pour la première fois.

microscope à force atomique la molécule à très basse température (5 kelvins), les chercheurs ont éliminé les CO excédentaires. Le résultat est un cycle où alternent des liaisons C-C triples et simples. Ce qui devrait conférer des propriétés semi-conductrices à ces molécules. ■

S.B.

K. Kaiser et al., *Science*, août 2014, en ligne le 15 août 2014

LE CRÂNE DU SUPPOSÉ ANCÊTRE DE NOTRE ANCÊTRE PRÉSUMÉ

Le site de Woranso-Mille, en Éthiopie, était prometteur pour les paléanthropologues. Il est devenu majeur: une équipe menée par Yohannes Haile-Selassie, du Muséum d'histoire naturelle de Cleveland, dans l'Ohio, y a

trouvé un crâne d'australopithèque daté de 3,8 millions d'années (*ci-contre*). D'après les détails de son maxillaire et de sa dentition, les chercheurs attribuent ce fossile, noté MRD, à *Australopithecus anamensis*, une espèce connue jusque-là par des fragments d'os longs, une mandibule et des dents vieux de 3,9 à 4,2 millions d'années.

Si cette identification est correcte, alors nous découvrons la face et la calotte crânienne d'*A. anamensis*, un australopithèque passant jusque-là pour l'ancêtre d'*A. afarensis*, l'espèce de la célèbre Lucy. L'étude morphologique montre que MRD présente nombre de traits primitifs, notamment une calotte crânienne évoquant celle de Toumaï, alias *Sahelanthropus tchadensis* (7 millions d'années). Estimée à 365-370 centimètres cubes, la capacité crânienne de MRD est très proche de celle de Toumaï, tandis que celle d'*A. afarensis* est un peu plus grande (380 à 430 centimètres cubes); celle de la plus ancienne forme humaine, *Homo habilis* (2,1 millions d'années) est encore plus grande (660 centimètres cubes). Les caractéristiques de la face – notamment la forme de la zone postorbitaire et la position en

haut du masséter, un puissant muscle de l'appareil masticateur – sont partagées à divers degrés par les hominines (la lignée Toumaï-ardipithèques-australopithèques-*Homo*), y compris par les plus anciens, Toumaï et *Ardipithecus ramidus* (4,4 millions d'années). Bref, MRD, c'est-à-dire *A. anamensis*, représente une forme intermédiaire entre les hominines anciens et primitifs et *A. afarensis*.

Or les chercheurs soulignent que la datation d'un des fossiles (celui noté BEL-VP-1/1) d'*A. afarensis* (3,9 millions d'années) prouve qu'« *A. afarensis* et *A. anamensis* ont été contemporains pendant 100 000 ans au moins. » Étrange, si *A. anamensis* est supposé être l'ancêtre d'*A. afarensis*... Mais pour Yohannes Haile-Selassie et ses collègues, la thèse que l'espèce de Lucy serait issue d'*A. anamensis* reste plausible: un petit groupe d'*A. anamensis* se serait isolé génétiquement et aurait évolué en *A. afarensis* tout en cohabitant avec le reste de la population générale d'*A. anamensis*. Sans surprise, d'autres chercheurs trouvent cela tiré par les cheveux. Une seule chose est sûre: pendant ces 4 à 5 millions d'années séparant Toumaï de l'australopithèque gracile (peut-être *A. afarensis* ou *A. gahri* / *A. sediba*?) qui a évolué en *Homo*, l'Afrique a foisonné d'hominines proches et différents. ■

FRANÇOIS SAVATIER

Y. Haile-Selassie et al., *Nature*, en ligne le 28 août 2019



MICROBIOLOGIE

COMMENT LES BACTÉRIES SE RÉVEILLEN

Dans certaines situations, des bactéries entrent en dormance dans l'organisme hôte. On vient d'élucider les mécanismes de leur réveil, qui relance parfois l'infection.

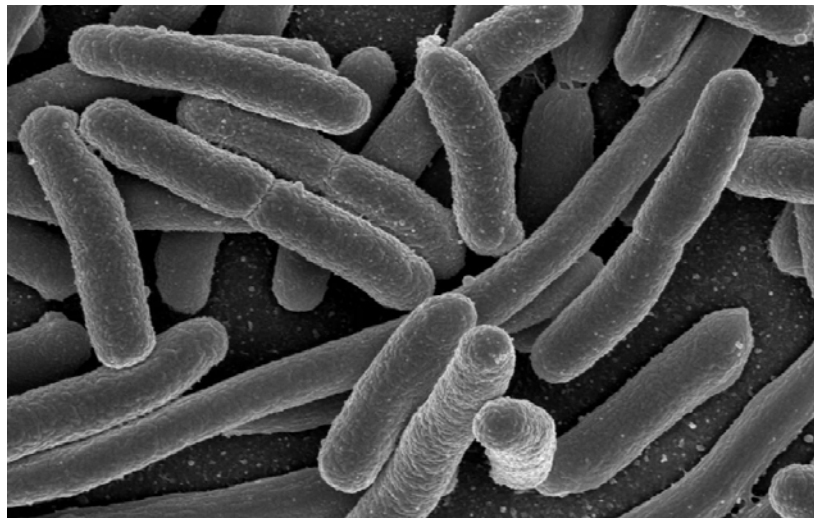
Il faut se méfier de la bactérie qui dort. Dans la plupart des populations bactériennes, il y a une fraction d'individus «persistants» ou «dormants». Ces bactéries sont génétiquement identiques aux autres, mais leur métabolisme est fortement ralenti. Or certains traitements sont in-

persistent dans l'organisme et sont capables de se réveiller, se diviser et démarrer une nouvelle infection. Si l'on comprend bien le mécanisme qui déclenche la mise en dormance, ce n'est pas le cas du réveil. Dorien Wilmaerts et ses collègues, du centre de microbiologie de Louvain, en Belgique, ont découvert les mécanismes qui réveillent celui-ci.

Ces chercheurs ont étudié chez la bactérie *Escherichia coli* l'une des molécules qui déclenche la mise en dormance: la toxine HokB. Ce peptide forme des paires liées. Puis ces «dimères» s'organisent en constituant un pore dans la membrane de la bactérie, qui laisse s'échapper l'ATP, la molécule fournissant l'énergie de la cellule. La toxine HokB empêche aussi la production de cette molécule du métabolisme. Sans énergie, la bactérie entre en dormance. Certains antibiotiques qui ciblent la production d'ATP, comme l'oligomycine, ne sont alors plus efficaces, et la bactérie les tolère donc momentanément.

La bactérie ne peut se réveiller qu'en arrêtant la fuite d'ATP. En détruisant ses pores? Dorien Wilmaerts et ses collègues ont en effet identifié chez *E. coli* une protéase (une enzyme qui dégrade les peptides), DegQ, qui s'attaque spécifiquement à la toxine de dormance HokB. Ainsi, dans des bactéries qui surexpriment DegQ, les concentrations en HokB sont beaucoup plus faibles. Elles perdent très peu d'ATP et n'entrent pas en dormance. Cependant, l'enzyme DegQ est incapable de dégrader les peptides quand ils sont liés par deux et ne peut donc pas directement s'attaquer aux pores. Ce qui signifie qu'un autre acteur est à l'œuvre pour déclencher le réveil.

Or les chercheurs ont constaté que, chez des bactéries modifiées où une enzyme, DsbC, ne fonctionne plus, on ne retrouve pas HokB à l'état de molécules seules, mais uniquement en dimères. De plus, la présence de la protéase DegQ ne diminue pas la concentration en HokB



Dans une population de bactéries, comme ici *Escherichia coli*, une petite partie des individus sont en dormance. Certains antibiotiques sont alors inopérants contre eux.

0,01 %

CEST LE TAUX MOYENNE DE BACTÉRIES DORMANTES DANS UNE POPULATION D'E. COLI. CE NOMBRE VARIE EN FONCTION DES SOUCHES ET DES CONDITIONS DE CULTURE. IL PEUT ALLER DE PLUS DE 1 % À MOINS DE 0,001 %. OR MÊME UNE FRACTION AUSSI FAIBLE PEUT SUFFIRE À RELANCER L'INFECTION À LA FIN DE LA CURE D'ANTIBIOTIQUES.

comme elle le fait chez les bactéries non modifiées. La destruction des pores se fait donc comme suit: les dimères de HokB, qui forment des pores fonctionnels, sont coupés par l'enzyme DsbC en toxines simples, qui sont ensuite dégradées par la protéase DegQ. L'ATP ne peut plus sortir, il n'y a donc plus de perte d'énergie, la bactérie sort de sa léthargie.

Reste une question: comment la bactérie dormante récupère-t-elle l'énergie perdue? Les chercheurs ont étudié le rôle du complexe I, une enzyme impliquée dans la production d'énergie (que l'on retrouve d'ailleurs dans les mitochondries, qui fournissent l'énergie à nos cellules). Les bactéries pour lesquelles ce complexe I ne fonctionne plus peuvent entrer en dormance mais ont du mal à en sortir. Les chercheurs en ont conclu qu'en plus de la destruction des pores, une production d'énergie soutenue est nécessaire au réveil de la bactérie.

Ces travaux ne portent que sur HokB, alors que de nombreuses toxines sont impliquées dans la dormance des bactéries. Mais ils fournissent un modèle qui sera exploré pour d'autres toxines, notamment afin de lutter contre le retour d'infections lié à ce phénomène de persistance. ■

V. B.

D. Wilmaerts et al., *Molecular Cell*, vol. 75, pp. 1-12, 2019.

ÉCUREUIL ÉCOUTE L'OISEAU QUI CHANTE

Quand un danger approche, les oiseaux s'arrêtent de chanter, puis reprennent peu après. Mary Lilly, d'Oberlin College, aux États-Unis, et ses collègues ont observé que des écureuils gris (*Sciurus carolinensis*) utilisaient aussi ce signal pour estimer la menace. Dans un parc, les chercheurs ont diffusé les cris de buse à queue roussée (*Buteo jamaicensis*), prédateur de petits oiseaux et d'écureuils. Les rongeurs relâchaient leur vigilance plus vite si des chants d'oiseaux étaient diffusés juste après.

UN MINIMOTEUR FAIT D'UN SEUL ION

Des physiciens de l'université de Mayence, en Allemagne, et du Trinity College, en Irlande, ont réalisé une sorte de moteur thermique fondé sur un unique ion. David von Lindenfels et ses collègues ont opéré sur un ion de calcium, piégé par des forces électromagnétiques dépendant du spin de l'ion. En manipulant ce spin par les lasers, on fournit de l'énergie, qui se transforme alors en mouvement l'oscillation de l'ion dans le piège. L'ion stocke ainsi l'énergie un peu comme un volant d'inertie.

LE PHOTOVOLTAÏQUE EST CONCURRENTIEL

En Chine, l'électricité d'origine photovoltaïque est devenue moins chère que celle (d'origines diverses) fournie par le réseau, selon Jinyue Yan, du KTH, l'institut royal de technologie de Stockholm, en Suède, et ses collègues. Ces chercheurs ont évalué les coûts et profits liés à la construction et au fonctionnement de systèmes photovoltaïques qui fourniraient de l'électricité au réseau. La comparaison avec les prix pratiqués dans 322 grandes villes chinoises montre que le photovoltaïque serait moins cher. Dans 22 % d'entre elles, il serait même moins cher que l'électricité provenant des centrales à charbon.

DES HUMAINS À HAUTE ALTITUDE

Situées en Éthiopie, les montagnes de Balé s'élèvent jusqu'à environ 4 000 mètres d'altitude et forment une région assez typiques des zones de haute altitude. L'air y est pauvre en oxygène, les températures y sont basses ou varient brutalement.

Pour ces raisons, on a longtemps supposé que les humains n'avaient colonisé cet endroit que très tardivement au cours de leur évolution, et seulement pour de très courtes périodes. À tort semble-t-il. Götz Ossendorf, de l'université de Cologne, et son équipe internationale ont découvert dans ces montagnes, près de l'abri de Fincha Habera, des outils en pierre et des fragments d'ossements d'animaux. L'analyse des sédiments de la zone contenant les biomarqueurs et la datation des échantillons au carbone 14 a permis aux chercheurs de conclure que des humains étaient présents à cet endroit pendant de longues périodes il y a 45 000 à 30 000 ans.

Pourquoi des hommes ont-ils colonisé cet endroit inhospitalier? Peut-être, expliquent les chercheurs, parce qu'à cette époque, l'abri se situait près de glaciers qui fondaient de façon régulière, produisant une source d'eau exploitable et accessible pour les habitants de la zone.



Vue extérieure de l'abri de Fincha Habera, à 3 450 mètres d'altitude, où des humains ont occupé il y a 45 000 ans.

À cela s'ajoutait la présence de rats-taupes géants, des rongeurs endémiques de la région, qui constituaient des proies faciles à chasser.

Cette nouvelle étude renseigne non seulement sur l'histoire de la colonisation de divers habitats par les hommes, mais aussi sur le potentiel d'adaptation de ces derniers. En effet, en s'installant dans des milieux aux conditions extrêmes tels que cette région de haute altitude, les humains ont fait montre d'une grande capacité d'adaptation physique, génétique et culturelle; un potentiel qui répond aux variations des conditions environnementales d'alors. ■

WILLIAM ROWE-PIRRA

G. Ossendorf et al., Science, vol. 365, pp. 583-587, 2019.

ETHOLOGIE

DES MARES BÂTIES PAR UNE GRENOUILLE

Des chasseurs rapportaient que la grenouille goliath (*Conraua goliath*), de la taille d'un lapin, construit des mares où elle pond ses œufs.

En savoir plus, Marvin Schäfer, du Muséum d'histoire naturelle de Berlin, et des collègues allemands et camerounais ont arpenté les berges de la rivière Mpoula, au Cameroun, à la recherche de mares construites par ces batraciens. Au total, ils ont découvert 19 petites mares «artificielles» plus ou moins élaborées, allant de la simple dépression naturelle connectée à la rivière, débarrassée activement de saitière (les feuilles, boues et branchages qui tombent au fond), à des mares bien circulaires, «nettoyées» et entourées de digues de pierres.

Les chercheurs n'ont pas vu cet animal à l'œuvre, mais leur étude ouvre sur



La grenouille goliath est la plus grande de toutes les grenouilles. Elle crée des mares destinées à ses petits.

une perspective intéressante: la plupart des grenouilles géantes sont, comme la grenouille goliath, des bâtisseuses. Dès lors, on peut supposer que le gigantisme aurait été sélectionné comme un caractère améliorant les capacités de construction de ces grenouilles. ■

RORALINE MADEC

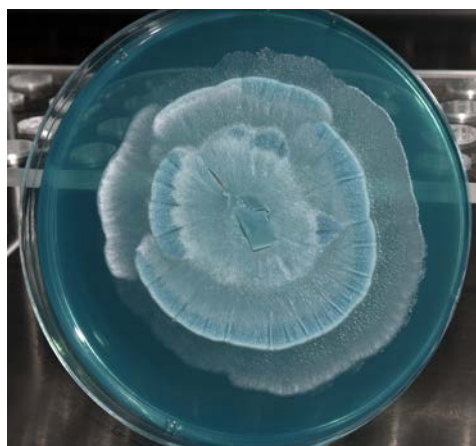
M. Schäfer et al., Journal of Natural History, vol. 53(21-22), pp. 1263-1276, 2019.

BIOLOGIE

ALGUE-CHAMPIGNON, UNE SYMBIOSE INÉDITE

Les végétaux verts et les champignons sont de vieux acolytes. Des représentants des deux groupes sont engagés dans de multiples associations. Parmi elles, certaines qui concernent 90% des végétaux terrestres, sont des associations entre des champignons et les racines des plantes. Mais Zhi-Yan Du, de l'université d'État du Michigan, aux États-Unis, et ses collègues ont révélé un degré d'intimité jamais observé jusqu'ici entre les deux partenaires: un champignon, *Mortierella longata*, internalise dans ses cellules une algue unicellulaire, *Nannochloropsis oceanica*.

Ces deux organismes, capables de vivre séparément, sont bien connus car on peut les utiliser pour produire des huiles ou des biocarburants. Placés ensemble dans un milieu de culture, ils établissent vite une grande proximité. En utilisant du carbone radioactif, les chercheurs ont observé que la matière organique produite par l'algue grâce à la photosynthèse se retrouve ensuite chez le champignon. Les deux partenaires échangent aussi de l'azote, au bénéfice net de l'algue. Les chercheurs ont même montré que, dans un milieu pauvre en nutriments, les deux organismes produisent plus de matière quand ils sont cultivés ensemble que séparément.



Les champignons *Mortierella* (ci-dessus) vivent seuls, mais certains vivent en symbiose avec une microalgue.

Mais cette interaction présente une caractéristique inédite et insoupçonnée. Au bout d'un mois de coculture, des algues vivantes sont retrouvées à l'intérieur des cellules fongiques. C'est la première fois que l'on observe une endosymbiose (c'est-à-dire une symbiose entre deux cellules dont une est contenue dans l'autre) entre un hôte champignon et une algue verte. Le fait qu'ils soient présents dans les mêmes milieux (estuaires, zones de balancement des marées...) laisse à penser qu'une telle association se produit aussi dans la nature. ■

N.B.

Z.-Y. Du et al., eLife, vol. 8, article 47815, 2019

BIOCHIMIE

MIEUX DÉTECTER LES CTC

Lorsque des cellules se détachent de tumeurs solides et passent dans le sang, elles deviennent des «cellules tumorales circulantes» (CTC). Elles sont intéressantes à des fins de diagnostic ou de suivi. Mais comme elles sont très peu nombreuses, les méthodes actuelles pour ce faire sont coûteuses. D'où l'intérêt du nouveau procédé de détection de ces cellules mis au point par Hanhan Guo et ses collègues, de l'université Fujian, en Chine.

Il consiste à isoler d'abord les CTC du sang en déposant le prélèvement sur une plaque gravée de micropuits couverts d'anticorps spécifiques d'un type de cellules tumorales. Lorsqu'une CTC pénètre dans un puits, elle se fixe aux anticorps. Afin de détecter ces cellules, les chercheurs ajoutent des nanoparticules de fluorure de sodium et d'euporium elles aussi



La détection de cellules cancéreuses circulant dans le sang aiderait au diagnostic précoce des cancers.

recouvertes des mêmes anticorps. Ces nanoparticules se fixent donc aux CTC. Enfin, un révélateur forme avec l'euporium des composés organométalliques fluorescents qui émettent de la lumière rouge lorsqu'une source ultraviolette les éclaire. Testée sur des patientes atteintes d'un cancer du sein, cette méthode a une efficacité de détection de l'ordre de 94%. ■

MARTIN TIANO

Hanhan Guo et al., Angew. Chem. Int. Ed., vol. 58, pp. 12195-12199, 2019

EN BREVI

UN MINÉRAL VENU D'AILLEURS

Dans une météorite, découverte à Wedderburn, en Australie, en 1951, Chi Ma, de l'institut de technologie de Californie, et Alan Rubin, de l'université de Californie à Los Angeles, viennent d'identifier un minéral jamais observé dans la nature (mais déjà produit artificiellement). Celui-ci, l'edscottite, est un carbure de fer de formule Fe_3C_2 . D'après certains chercheurs, ce minéral se serait formé au cœur d'une planète détruite lors d'une collision géante et dont la météorite serait un débris.

IMMUNITÉ NATURELLE CONTRE LE SIDA

On connaissait déjà le « patient de Berlin », Timothy Brown, qui présente une immunité naturelle contre le sida grâce à une mutation du gène CCR5. José Alcami, de l'université de Barcelone, et ses collègues ont montré qu'une autre mutation, très rare et provoquant une dystrophie musculaire, a un effet similaire. Une centaine de personnes d'une même famille en Espagne portent cette mutation qui touche le gène *Transportine-3*. En raison de cette mutation, le VIH, le virus du sida, ne peut pas pénétrer dans les cellules immunitaires.

L'IMPACT QUI A BRISE LE CŒUR DE JUPITER

Jupiter s'est formée à partir d'un cœur rocheux qui a peu à peu piégé du gaz et donné la planète géante que l'on connaît. Toutefois, les données gravimétriques de la sonde *Juno*, en orbite autour de Jupiter depuis 2016, suggèrent que son cœur n'est pas petit et compact, mais grand et dilué. D'après Andrea Isella, de l'université Rice, à Houston, et ses collègues, la seule façon d'expliquer cela est de supposer que Jupiter a subi un impact géant avec une protoplanète de dix masses terrestres peu après sa formation.

ASTROPHYSIQUE

ALMA RÉVÈLE DES GALAXIES « NOIRES »

Pas moins de 20 galaxies jamais vues viennent d'être repérées grâce au radiotélescope *Alma*, installé au Chili. Formées

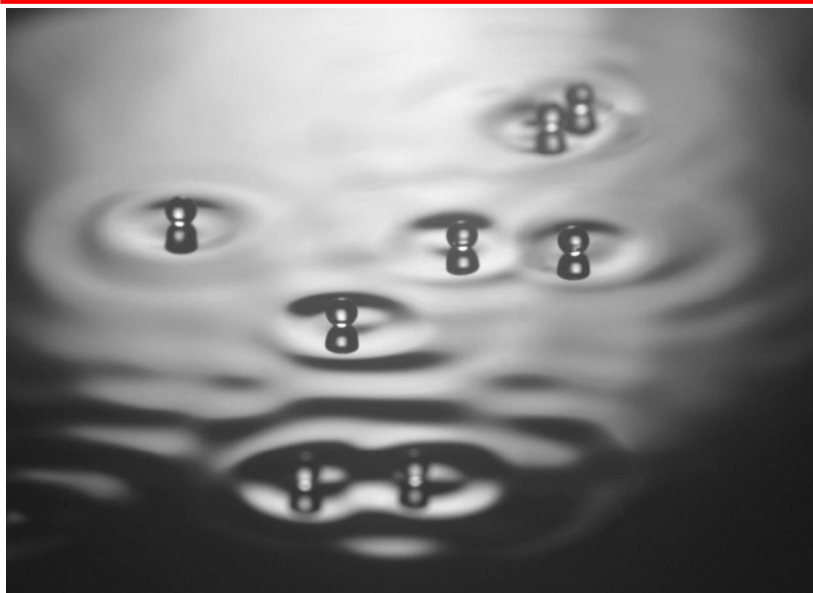
Bang, elles seraient le chaînon manquant entre les galaxies jeunes de l'Univers lointain et les grandes galaxies elliptiques proches de nous. C'est le résultat d'une étude menée par David Elbaz, astrophysicien au CEA, et ses collègues. Mais ces galaxies soulèvent de nombreuses questions. Elles sont bien plus nombreuses que ne l'envisagent les modèles. Comment l'Univers a-t-il produit autant de galaxies massives en un milliard d'années environ? Une autre question est que si ces galaxies étaient «noires», c'est qu'elles étaient nimbées de poussière absorbant la lumière visible et infrarouge. Or l'abondance de cette poussière est surprenante. Un grand ménage s'impose dans l'histoire de l'Univers! ■

S.B.

J. Wang et al., *Nature*, vol. 572, pp. 211-214, 2019

PHYSIQUE

LA VALSE DES GOUTTES SUPERMARCHEUSES



En plus de se déplacer à la surface du bain d'huile, les gouttes supermarcheuses peuvent interagir entre elles, les unes et les autres, et former des structures complexes.

Les marcheuses continuent d'étonner les physiciens. Ces gouttes d'huile de silicone rebondissent à la surface d'un bain du même liquide que l'on fait vibrer verticalement et se déplacent, grâce aux ondes qu'elles-mêmes produisent. En soumettant le bain à deux fréquences simultanées, l'une de 80 hertz et l'autre de 40 hertz, Rahil Valani, de l'université Monash, à Melbourne, en Australie, et ses collègues ont découvert une nouvelle famille de gouttes marcheuses, les «supermarcheuses», qui interagissent

Les supermarcheuses sont plus grosses que les marcheuses (jusqu'à 2,8 millimètres de diamètre contre 1 millimètre) et vont plus vite (5 centimètres par seconde contre 1,5 centimètre par seconde). Elles présentent aussi des comportements collectifs étonnants. Quand l'amplitude de l'excitation à 40 hertz est faible, les gouttes s'agrègent et forment des structures similaires à des réseaux cristallins, ce qui a déjà été observé chez les marcheuses. Mais si on augmente l'amplitude de cette excitation, ces réseaux se dissocient, à la manière d'un corps qui subirait une transition de phase en passant de l'état solide à liquide, puis gazeux, avec l'augmentation de la température. L'étude de l'interaction goutte-onde des marcheuses offrait déjà une analogie intéressante avec des comportements relevant de la physique quantique et avec certaines interprétations de celle-ci, comme la théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie. Ces nouveaux travaux montrent que ces systèmes offrent en outre des analogies avec différents états de la matière.

Étonnant aussi, les chercheurs ont fait danser ces gouttes en remplaçant les vibrations à 40 hertz par des vibrations à 39,5 hertz. Les supermarcheuses réalisent alors des chorégraphies saccadées: elles se déplacent rapidement, puis arrêtent leur mouvement et rebondissent sur place, avant de se remettre en marche. ■

S.B.

R. N. Valani et al., *Physical Review Letters*, vol. 123, article 024503, 2019

EVOLUTION

LA VACHE, UNE HISTOIRE COMPLEXE

La vache *Bos taurus* accompagne les humains depuis plusieurs millénaires. Elle est issue de la domestication de l'aurochs *Bos primigenius* (aujourd'hui éteint). En Anatolie, il y a 10 500 ans. Mais ce qui s'est passé ensuite restait flou. Grâce à l'analyse génétique de 67 bovins fossiles du Proche-Orient, Marta Pereira Verdugo, de l'université de Dublin, et ses collègues, ont mis en évidence que de nombreux échanges génétiques ont marqué l'évolution de la vache.

Une partie de la population initialement domestiquée a migré vers l'Europe, où elle s'est hybridée avec l'aurochs local il y a 7 000 ans, tandis qu'une autre a migré vers l'Afrique du Nord et s'est croisée avec l'aurochs africain. Par ailleurs, il y a 4 000 ans, à l'occasion d'une importante sécheresse, des populations du Proche-Orient auraient croisé des vaches avec le zébu *Bos indicus*, bovin domestiqué plus tôt en Inde et mieux adapté aux conditions arides. ■

S.B.

M. P. Verdugo et al., *Science*, vol. 365, pp. 173-176, 2019

PHYSIQUE

DEUX CAPES D'INVISIBILITÉ CONTRE LES VAGUES

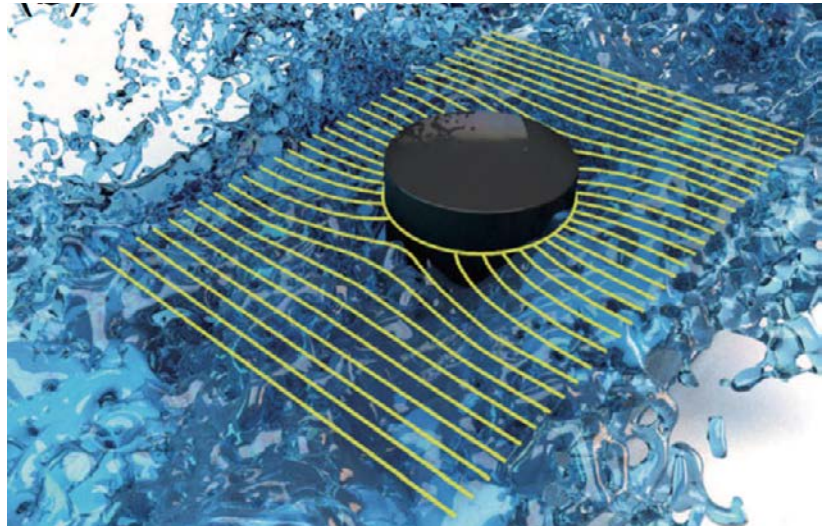
Les métamatériaux inspirent des solutions pour protéger des installations en mer et des ports, ou pour réduire le sillage d'un navire.

Depuis presque une quinzaine d'années, les physiciens savent manipuler des ondes électromagnétiques de telle façon qu'elles contournent un objet sans être perturbées... comme si l'objet n'était pas là, ce qui le rend invisible

avec des résultats spectaculaires. Leur principe repose sur des métamatériaux: des matériaux artificiels dont le volume est structuré à une échelle inférieure à celle de la longueur d'onde des ondes électromagnétiques utilisées, ce qui leur confère des propriétés exotiques (comme un indice de réfraction négatif). Rapidement, l'idée des métamatériaux a été appliquée aux autres types d'ondes. Il est ainsi possible de faire des capes d'invisibilité thermique, acoustique, voire hydrodynamique. Deux équipes, l'une chinoise et l'autre coréenne, viennent de concevoir des systèmes qui protègent des vagues, c'est-à-dire qui cachent des objets à l'impact des vagues.

L'idée de protéger une zone contre des vagues grâce aux métamatériaux n'est pas nouvelle. Déjà en 2008, Stefan Enoch et Sébastien Guenneau, de l'institut Fresnel, à Marseille, et leurs collègues avaient imaginé un dispositif astucieux permettant de contrôler la trajectoire des vagues dans l'hypothèse d'un fluide non visqueux. Il s'agissait d'un espace circulaire entouré de sept rangs concentriques hérissés de poteaux. La géométrie exacte du système était choisie pour que les vagues interfèrent de façon que leur amplitude soit nulle dans la partie centrale et qu'elles ne soient pas perturbées à l'extérieur du dispositif.

De tels systèmes seraient efficaces pour protéger les structures en mer comme les éoliennes ou les plateformes pétrolières, ainsi que les ports sur les côtes. Ils pourraient aussi servir à concevoir des navires plus économes en énergie. C'est sur cette dernière idée qu'ont travaillé Suh-yuk Park, de l'université de Séoul, et ses collègues. Ces chercheurs ont utilisé des méta-matériaux pour éliminer le sillage qui se forme derrière une structure fixe ou un navire. Ce sillage crée une force qui risque de fragiliser la structure et s'oppose au mouvement du bateau. Et oblige à consommer plus de carburant pour



ur cette vue d'artiste, l'objet
cylindrique crée un sillage dans
l'écoulement du liquide où il baigne
*(les courbes jaunes indiquent les
lignes isobares)*. Des forces
hydrodynamiques s'exercent alors
sur l'objet. Avec des structures
inspirées des métamatériaux, il est
possible de contrôler l'écoulement
du liquide pour éliminer le sillage
et ainsi protéger l'objet.

avancer). Avec une sorte de cape d'invisibilité hydrodynamique, ce serait comme si la structure ou le navire étaient transparents au flot.

En partant de la situation d'un écoulement d'un fluide visqueux rencontrant un obstacle cylindrique, les chercheurs coréens ont conçu un dispositif entourant le cylindre de plusieurs couches concentriques pour former une surface microstructurée, à l'image de celui de l'équipe de Stefan Enoch. Grâce à des simulations numériques et des expériences, ils ont montré que le sillage disparaissait complètement.

Siyuan Zou, de l'université Zhejiang, en Chine, et ses collègues ont exploré une piste différente. Ils se sont inspirés des métamatériaux à gradient d'indice utilisés dans des guides d'ondes électromagnétiques. Transposé au cas des vagues, le dispositif revient à moduler la profondeur d'eau dans un chenal avec de longues barres parallèles placées sur le fond. En ajustant le profil de celles-ci, les chercheurs modulent la vitesse des vagues en surface et en réduisent l'amplitude. Disposé dans un chenal d'accès à un port, un tel système protégerait les navires. Reste à tester en grandeur réelle ces deux idées de capes d'invisibilité hydrodynamique. ■

S. B.

Yiyuan Zou et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123,
article 074501, 2019; I. Park et al. *ibid.* article 074501

LE PETIT DOIGT DE DENISOVA M'A DIT

Les Denisoviens, qui ont occupé l'extrême est de l'Eurasie pendant le Paléolithique supérieur, restent très énigmatiques. On les tient pour une sorte de « Néandertaliens orientaux ». Eva-Maria Geigl, de l'institut Jacques Monod, à Paris, et ses collègues ont étudié en détail la forme de l'os de la dernière phalange du petit doigt de la main droite d'un Denisovien. Or cette forme suggère que la main dénisovienne ressemblait beaucoup plus à la nôtre (celle d'*Homo sapiens*) qu'à celle d'*H. neanderthalensis*.

LA MOUSSON MODULE LA PLUIE MÉDITERRANÉENNE

En analysant 447 mètres d'épaisseur de sédiments du lac Ohrid, en Macédoine du Nord, une équipe menée par Bernd Wagner, de l'université de Cologne, a établi que pendant 1,3 million d'années, la mousson amplifiée les étés durant les interglaciaires (périodes chaudes) était corrélée avec une augmentation de la pluviométrie dans les Balkans. Les chercheurs ont aussi proposé un mécanisme expliquant comment l'ampleur de la mousson joue pour charger en pluies les dépressions pénétrant en Méditerranée.

UNE TRÈS ANCIENNE TRACE DE MOBILITÉ ANIMALE

Quand des animaux à symétrie droite-gauche, les bilatériens (dont nos ancêtres), ont-ils acquis la mobilité et conquis le Monde ? Avec des collègues, Zhe Chen, de l'Académie des sciences chinoise, vient de décrire *Ililingia spiciformis*, une sorte de ver bilatérien constitué de nombreux segments trilobés. Il a été découvert avec la trace de ses derniers mouvements dans les sédiments vieux de 551 à 559 millions d'années, donc précambriens. C'est l'une des plus anciennes traces de mobilité animale connues.

QUAND LA GIRELLE CHANGE DE SEXE

Chez les poissons, changer de sexe n'est pas rare. En effet, plus de 500 espèces sont concernées par cet « hermaphrodisme ». Les girelles à tête bleue (*Thalassoma bifasciatum*) vivent en petits groupes composés d'un mâle dominant qui surveille un harem de femelles. Lorsque le mâle meurt, la femelle la plus âgée change de sexe et prend sa place. Et la transformation atteint des records : en deux heures, la femelle change de couleur et de comportement pour devenir, dix jours plus tard, un mâle reproducteur !

Erica Todd, de l'université d'Otago, en Nouvelle-Zélande, et ses collègues se sont intéressés aux mécanismes de ce changement. Ils ont par exemple observé des changements hormonaux chez les femelles. La régression des ovaires à partir du deuxième jour coïncide avec une chute importante de la concentration d'oestrogènes dans le sang. Puis, au quatrième jour, une augmentation de la 11-kétotestostérone (forme active de la testostérone chez les poissons) concorde avec le développement des testicules.

Chez les femelles, une enzyme, l'aromatase, convertit la 11-kétotestostérone en oestrogène. Or les chercheurs se sont rendu compte que dès le deuxième jour de leur



Dans ce groupe de girelles à tête bleue, le mâle (en haut à gauche) surveille ses femelles. S'il meurt, l'une d'elles changera de sexe pour le remplacer.

transformation, les girelles ne produisent plus cette enzyme : la disparition du mâle entraîne chez elles un pic de cortisol, l'hormone du stress, qui inhibe la production d'aromatase.

Chez les mammifères, on a longtemps cru que l'identité sexuelle était figée à l'âge adulte. Or des études récentes chez la souris ont montré que ses cellules sexuelles gardaient aussi leur bipotentialité et que l'identité sexuelle devait être activement maintenue. Comment ? La réponse est peut-être dans les nombreux gènes impliqués dans la transition sexuelle des girelles et aussi présents chez les mammifères... ■

E.M.

E. V. Todd et al., *Science Advances*, vol. 5, article eaaw7006, 2019

GENÉTIQUE

KOMODO: DES GÈNES DE CHASSEUR

Malgré ses 120 kilogrammes en moyenne et ses 2 à 3 mètres de longueur, le dragon de Komodo, *Varanus komodoensis*, est un prédateur redoutable. Les chercheurs du Gladstone à San Francisco, et ses collègues ont séquencé le génome de ce reptile et ont identifié plusieurs dizaines de gènes qui lui confèrent ses remarquables facultés de prédateur.

Les chercheurs ont trouvé 129 gènes associés à des récepteurs de l'organe voméronasal (distinct du système olfactif), grâce auquel le dragon piste ses proies. Cette grande diversité explique que le dragon soit capable de repérer un cadavre ou une proie blessée à plusieurs kilomètres de distance. Des gènes impliqués dans l'activité physique (production d'énergie par la cellule, résistance à la fatigue...) ont été sélectionnés chez le dragon. Ils sont à l'origine

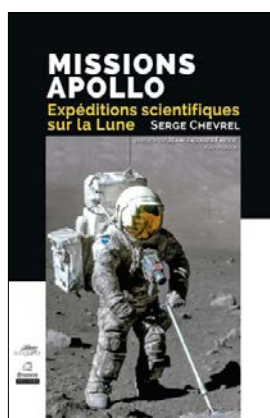


Le dragon de Komodo traque, poursuit et neutralise ses proies avec une redoutable efficacité.

de sa facilité à poursuivre des proies rapides, comme les cerfs, avec des pointes de 20 kilomètres par heure. Des gènes sont aussi en jeu dans la résistance du dragon à l'anticoagulant contenu dans sa salive, qui renforce l'effet de ses morsures. ■

S.B.

A. L. Lind et al., *Nature Ecology and Evolution*, vol. 3, pp. 1241-1252, 2019



INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

BABEL 2.0

Thierry Poibeau
Odile Jacob, 2019
224 pages, 22,90 euros

Cet ouvrage pourrait être sous-titré *D'où vient et où va la traduction automatique ?*, car il explore le contexte et l'histoire de cette technologie, si essentielle de nos jours, y sont décrits. Il est clair, facile à lire et riche d'informations sur tous les aspects de la traduction automatique, depuis sa genèse jusqu'au marché actuel en passant par son évaluation et les principales approches. Les lecteurs découvriront les débuts hésitants de ce domaine, entre espoirs parfois démesurés et détracteurs zélés, et seront plongés dans une exploration des méthodes statistiques (modèles BM, modèles à base de segments et modèles neuronaux) à la base des avancées majeures des trente dernières années et qui constituent le cœur des systèmes de traduction automatique actuels. Mon seul regret dans ce panorama est la moindre importance accordée aux modèles à base de segments, dont l'équation fondamentale simplifie et rationalise celle des modèles BM, et sert de socle aux modèles neuronaux.

Dans le dernier chapitre du livre, l'auteur présente des applications comme la recherche d'information multilingue, le sous-titrage automatique, le dialogue multilingue et les objets connectés, ainsi que les enjeux commerciaux et militaires du domaine.

Au-delà de cette bonne description de la traduction automatique, l'ouvrage contient aussi d'intéressantes réflexions sur les liens entre statistiques et sémantique ainsi que sur la relation entre traduction automatique et traduction humaine.

ERIC GAUSSIER
UNIVERSITÉ GRENOBLE-ALPES

ÉCOLOGIE-ANTHROPOLOGIE

HABITER LA FORÊT TROPICALE AU XXI^e SIÈCLE

Geneviève Michon, Stéphanie Carrière et Bernard Moizo (dir.)
Éditions IRD, 2019
182 pages, 35 euros

Voilà un trésor scientifique sur la vie des quelque 700 millions d'habitants de la forêt tropicale. Puisqu'il s'agit avant tout d'eux et de leurs vies, les auteurs donnent à part belle aux sciences humaines. On ose même dire qu'il s'agit d'un beau livre, même si cet adjectif caractérise habituellement un autre type d'ouvrage, moins scientifique. En effet, sa richesse iconographique est remarquable. Les photographies de scènes de vie ou de paysages d'Amazonie, d'Afrique, d'Indonésie, du Laos, etc. font voyager dans le monde entier.

Réalisé sous la direction de trois chercheurs de l'Institut de recherche pour le développement, cet ouvrage rassemble une trentaine d'articles, structurés en six parties. Il présente les caractéristiques des populations vivant dans les forêts tropicales et leurs interactions, qu'il s'agisse des populations historiques ou de nouveaux venus attirés par l'appât du gain ou à la recherche de conditions économiques meilleures. Ces vies forestières se trouvent insérées depuis plusieurs décennies dans une économie globalisée, capitaliste et subissent les politiques internationales et nationales. On y déconstruit des mythes, on y lit les vérités qui contrecarrent des idées simplistes véhiculées par les médias, ONG ou organisations étatiques. L'ouvrage est aussi un hommage à ces agriculteurs forestiers qui ne sont pas responsables de la déforestation à grande échelle.

Il est aisé d'appréhender les 380 pages de ce bel ouvrage, les articles pouvant être lus indépendamment. Des encadrés illustrent des pratiques spécifiques dans telles ou telles forêts tropicales, par exemple la pêche chez les Amérindiens Wayana de Guyane ou les agroforêts cacaoyères du sud du Cameroun. Une belle immersion scientifique tropicale!

REGINE TOUFFAIT
ONE, PARIS

EXPLORATION SPATIALE

MISSIONS APOLLO

Serge Chevrel

Alina-Sofedis, 2019
168 pages, 28 euros

L'auteur, planétologue

à l'Observatoire Midi-Pyrénées

Le livre apparaît comme un cahier de laboratoire où tous les événements sont décrits minutieusement et commentés. Les numéros des nombreuses photographies prises sur la Lune sont donnés, ce qui permet de les retrouver facilement sur le web. Le livre plaide aussi pour le retour de l'homme sur la Lune, aidé de robots pour améliorer le rendement des activités pendant les sorties. Ce livre est une mine pour mesurer ce que furent le programme scientifique des missions Apollo et leurs immenses retombées.

JEAN COUSTEIX
SARL SUPAÉRO, TOULOUSE

ARCHÉOLOGIE-HISTOIRE

COMMENT L'EMPIRE ROMAIN S'EST EFFONDRE

Kyle Harper

La Découverte, 2019
144 pages, 25 euros

Professeur d'études classiques

à l'université de l'Oklahoma,

Kyle Harper nous offre un ouvrage novateur, qui a fait parler de lui dans la presse. Il fait partie des chercheurs partisans d'une cause exogène au déclin romain: celui-ci s'expliquerait, selon lui, par un changement climatique et par des épidémies. La température et la pluviométrie, assure-t-il, ont connu un optimum de 200 avant notre ère jusqu'à environ 150 de notre ère; ensuite, une période de transition a duré de 150 à 450; enfin, un petit âge glaciaire s'est étendu de 450 à 700 environ. Kyle Harper a en outre comptabilisé trois grandes vagues de «pestes», au temps de Marc Aurèle (165-180), de Gallien (vers 249-262) et enfin sous Justinien (541-542).

Nous pensons pour notre part qu'il ne faut pas surestimer ces facteurs climatiques et bactériologiques, même s'ils jouent un rôle crucial. L'amplificateurs de crise; pour Rome, ils furent graves, mais pas des causes suffisantes de disparition. Trois raisons écartent cette hypothèse selon nous: l'abord, l'unité politique de l'empire a clairement été détruite par des conquérants barbares, Goths au premier chef; il est clair ensuite que le froid et la peste ont touché les envahisseurs comme les envahis; enfin, la chronologie climatique concorde mal avec celle des événements politiques: l'Occident romain a disparu au début du V^e siècle, après la traversée du Rhin par les Vandales (406) et la prise de Rome par les Goths (410); l'Orient, lui, loin de s'effondrer, devient doucement byzantin à partir du milieu du IV^e siècle.

Ces mises au point n'empêchent pas que le livre soit très utile et très intéressant. Il apporte de l'eau au moulin des historiens, actuellement minoritaires, qui croient que le Bas Empire n'a pas été un âge de bonheur universel, et qu'il a souffert de crises graves. L'auteur de ces lignes s'était déjà rangé dans le camp de ces pessimistes.

YANN LE BOHEC
PROFESSEUR ÉMÉRITÉ
L'UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE

ET AUSS



LE PARRAIN, AU CŒUR D'UN CLAN D'ÉLÉPHANTS

Caitlin O'Connell

Actes Sud, 2019
220 pages, 23 euros

Caitlin O'Connell, de l'université de Stanford, est bien connue pour ses recherches sur les éléphants. Elle se sert ici du comportement de Greg, un mâle dominant vivant dans le désert namibien d'Etosha, comme fil directeur afin de nous décrire les relations entre mâles. Un angle original, puisque les clans d'éléphants, menés par la plus vieille femelle survivante, sont matriarcaux. Voilà un livre passionnant pour apprendre comment vivent les mâles d'une espèce matriarcale. Sa thèse principale? Les éléphants mâles seraient très comparables aux membres de la mafia new-yorkaise...

LA LOUTRE D'EUROPE

René Rosoux et Charles Lemarchand

Édito, 2019
52 pages, 25 euros

Connaissez-vous *Lutra lutra*? La loutre a failli disparaître en France au cours du XX^e siècle sous l'influence de la néfaste théorie des «nuisibles» et des «utiles». Sauvée *in extremis* par la première législation de protection de la nature (1972), présente à l'ouest d'une diagonale Cotentin-Hérault, la loutre est en train de reconquérir notre pays si riche en rivières, son habitat préféré. Il est donc temps d'étudier son comportement, d'apprendre à distinguer ses traces de celles du castor, de reconnaître ses trotes pleines de restes de poisson, etc. Pour ce faire, voici un livre de référence et très bien illustré.

ASTROPHOTO

Patrick Lécureuil

De Bock, 2019
240 pages, 29,90 euros

Voici l'état de l'art en matière d'astrophotographie. Ce livre détaille les pièges à éviter et les astuces à mettre en œuvre dans des prises de vue par appareil photo numérique, par caméra vidéo, par caméra CCD. Il discute des défauts d'un cliché et des corrections possibles, ainsi que du traitement des images numériques. Pour les passionnés, voilà le quoi progresser, car, comme l'écrit l'astrophysicien Roland Lehoucq dans la préface, «photographier le ciel est une tâche bien plus difficile que le photographeur son petit-neveu»!

COLMAR

JUSQU'AU 23 DÉCEMBRE 2019

Muséum de Colmar

www.museumcolmar.org

Biodiversité, crise et châtiments



Plus de 90% des espèces ayant existé sur Terre sont aujourd'hui éteintes, peut-on apprendre dans cette petite exposition.

Elle évoque notamment à cinq grandes crises qui ont ponctué l'histoire de la vie aux échelles de temps géologiques. L'humanité est-elle en train de provoquer une sixième extinction massive d'espèces? Il semble que oui. Les panneaux explicatifs présentent des chiffres soutenant

cette thèse, et détaillent aussi les raisons de la situation (disparition et dégradation des habitats, prélèvements excessifs, espèces invasives, changement climatique, etc.). Une dizaine de spécimens de mammifères, plus d'une vingtaine d'oiseaux, une centaine d'insectes, des mollusques, quelques batraciens, poissons et coraux, des planches d'herbier viennent rappeler la beauté si diverse du vivant et illustrer une partie des espèces menacées.

COURBEVOIE

VENDREDI 11 OCTOBRE 2019, 20 H 30

Centre événementiel de Courbevoie

<https://laborigins.com>

Demain? Un défi pour Homo sapiens!



Dans le cadre du festival international de cinéma Atmosphères, dédié au développement durable, LabOrigins et Marie-Odile Monchicourt proposent une soirée en images et en musique où s'exprimeront notamment l'écologue François Léger, le biologiste Gauthier Chapelle, le rédacteur en chef de Cerveau & Psycho Sébastien Bohler...

TULLE ET BRIVE (CORREZE)

JUSQU'AU 6 OCTOBRE À TULLE,

DU 10 NOVEMBRE AU 1^{ER} DÉCEMBRE À BRIVE

Salle Latreille (Tulle), chap. de la Providence (Brive)

Alexander von Humboldt



Pour célébrer la naissance il y a 250 ans de ce naturaliste de terrain qui fut un précurseur de la biogéographie et de l'écologie scientifique, des documents sur Humboldt sont présentés au milieu d'œuvres (dessins, peintures, photos...) d'une trentaine d'artistes d'aujourd'hui sur des thèmes qui passionnaient le savant allemand.

ET AUSSI

Mardi 8 octobre, 18 h
Université Savoie-Mont-Blanc, Chambéry
www.univ-smb.fr/amphis

ULTIMA PATAGONIA

Le géomorphologue Stéphane Jaillat décrit à ses auditeurs les exceptionnels gouffres et grottes découverts ces vingt dernières années en Patagonie.

Jusqu'au 9 octobre
Institut culturel italien, Paris

<https://bit.ly/2NHpvGO>
Tél. 01 85 14 62 50

LE LION MÉCANIQUE DE LÉONARD DE VINCI

Le codex Madrid I s'est révélé contenir les notes du projet de lion automate, que le pape Léon X avait commandé à Léonard. Un exemplaire en bois de cet automate long de trois mètres a ainsi été réalisé, et il est présenté ici.

Du 10 au 13 octobre
Apt et environs (Vaucluse)
decampementscientifique.fr
ou velotheatre.com
Tél. 04 90 04 85 25

LE CAMPMENT SCIENTIFIQUE

Chercheurs et artistes s'associent pour proposer au public conférences, spectacles, petites expéditions scientifiques et autres animations... De la science dans un esprit ludique.

Mercredi 16 octobre, 12 h 15
Le Lieu unique, Nantes
www.lelieuunique.com

LE HASARD EXISTE-T-IL ?

Un atelier d'une heure et demie où les participants aborderont, d'abord de façon passive puis de façon active, le hasard sous diverses formes. Également le mercredi 13 novembre.

Mercredi 16 octobre, 20 h 30
Espace Mendès-France, Poitiers
<https://emf.fr>

ÉCRIRE AVEC UN STYLO OU UN ORDINATEUR

Une conférence de Thierry Olive, chercheur au Cerca, à Tours, pour répondre à la question : est-ce que ça change quelque chose ?

LANDERNEAU

JUSQU'AU 3 NOVEMBRE 2019
Aux Capucins
www.fonds-culturel-leclerc.fr

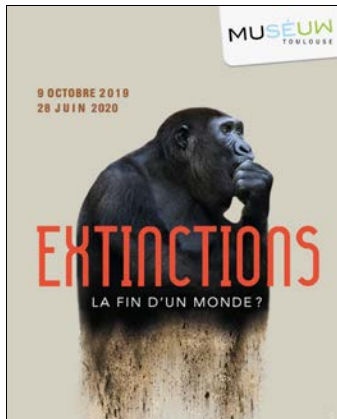
Cabinets de curiosités

Ancêtres en quelque sorte du cabinet de curiosités, les cabinets de curiosités sont apparus en Europe à la Renaissance. Ces collections privées de pièces diverses – objets, minéraux, animaux ou plantes –, rassemblés par des individus appartenant à l'élite sociale de leur temps, représentaient des vitrines du savoir, entre art et science. Tombés en désuétude à l'époque des Lumières, les cabinets de curiosités suscitent un regain d'intérêt depuis quelques années. L'exposition, qui ouvre sur une mise en perspective historique, présente à ses visiteurs 17 versions plus ou moins réinventées des cabinets de curiosités. Ces collections, qui rassemblent au total quelque 1500 pièces, proviennent d'institutions telles que le Muséum de Paris ou le Musée d'anatomie de Montpellier, d'artistes ou de personnalités singulières. Un cabinet de cabinets de curiosités, donc.



TOULOUSE

DU 9 OCTOBRE 2019 AU 28 JUIN 2020
Muséum de Toulouse
www.museum.toulouse.fr



Extinctions: la fin d'un monde?

Les menaces actuelles sur la biodiversité inspirent décidément de nombreuses expositions. Conçue par le Muséum d'histoire naturelle de Londres, celle-ci propose un parcours montrant plus de 60 pièces provenant du musée londonien, qui s'ajoutent à d'autres issues du fonds local toulousain. Spécimens, vidéos et témoignages de scientifiques éclairent le visiteur sur l'apparition des espèces, leur évolution et leur disparition. Et suscitent une questionnement sur la préservation de la biodiversité ou le futur des humains.

SORTIES DE TERRAIN

samedi 5 octobre, 14 h
Environs de Colmar
www.museumcolmar.org
Tél. 03 89 23 84 15

MOUSSES ET LICHENS

Une après-midi avec Bernard Stoeher, accompagnateur de montagne, botaniste et mycologue, qui vous initiera à ces groupes végétaux souvent méconnus.

Les 9 et 10 octobre, 10 h
Forêt de Fontainebleau
www.anvl.fr
Tél. 01 64 22 61 17

CHAMPIGNONS

Deux sorties à la journée pour s'initier aux champignons et les ramasser en vue de l'exposition annuelle de l'ANVL à Avon, du 12 au 14 octobre.

samedi 12 octobre
Villeneuve-sur-Auvers (91)
montauger.essonne.fr
Tél. 01 60 91 97 34

RÉSERVE GÉOLOGIQUE DE L'ESSONNE

Une journée d'animations variées pour fêter les 30 ans de la Réserve géologique de l'Essonne, avec l'inauguration d'un nouvel itinéraire, le « Chemin des sables », et du géosite de la Butte du Puits.

PARIS

JUSQU'AU 9 MARS 2020
Musée de l'Homme
www.museedelhomme.fr

Piercing

Accrocher à son corps des anneaux métalliques ou d'autres ornements après avoir troué la peau est une pratique qui trouve des traces sur tous les continents. En Europe, par exemple, le port de boucles d'oreilles suspendues à des lobes percés est une tradition répandue et ancienne. Le musée de l'Homme propose un regard anthropologique sur ces coutumes corporelles. Des coutumes qui, en Occident, se sont développées sous de nouvelles formes à partir des années 1970, et pour lesquelles le terme de *piercing* s'est imposé. Dans cette exposition qui complète celle intitulée *Dans ma peau* et présentée



jusqu'en juin dernier dans le même établissement, des objets préhistoriques (un *piercing* de Cro-Magnon...), des représentations artistiques, des photographies et des bijoux modernes ou de certaines ethnies (Dayaks, Kayapos...) viennent illustrer ces modifications du corps et leurs motivations: appartenance à un groupe, rites de passage, simple ornement, marques de prestige ou de soumission, etc.

samedi 26 octobre
Toulouse
www.natureo.org
Tél. 09 67 03 84 07

lichens en ville

Une journée de balade vers les bords de la Garonne pour voir les lichens des murs, roches et rochers, puis vers la coulée verte pour les lichens poussant sur les écorces des arbres.

Dimanche 27 octobre, 10 h
Grans (Bouches-du-Rhône)
Tél. 04 42 20 03 83
www.cen-paca.org

OLIVES DANS UNE RÉSERVE PROVENÇALE

La réserve nationale régionale de la Poitevine-Regarde-Venir, située dans la Crau, accueille de nombreuses espèces protégées et une oliveraie sauvage. Il est proposé une cueillette, le partage de l'huile issue de la récolte et une visite guidée.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

INTERNET A CINQUANTE ANS

Ce réseau informatique mondial figure parmi les inventions qui ont profondément changé nos vies. Un succès dû à sa robustesse et à son universalité



Cette machine a été utilisée pour envoyer le premier message sur internet en 1969.

Le réseau internet a tellement transformé l'idée que nous nous faisons de la communication et de l'accès à la connaissance que nous avons du mal à imaginer à quoi ressemblait le monde avant son invention. Pourtant,

le 29 octobre 1969, à 22h30, que Leonard Kleinrock et Charley Kline envoyèrent, depuis l'université de Californie à Los Angeles, le premier message à Bill Duvall, au Stanford Research Institute, sur le réseau arpanet, qui préfigurait l'internet que nous connaissons. Ce message était formé des cinq caractères «login», mais la petite histoire raconte que seuls les deux premiers parvinrent à leur destinataire.

Le succès d'internet – deux ordinateurs connectés en 1969, mille en 1984, un million en 1992, un milliard en 2012, etc. – s'explique *a posteriori* par deux principes d'organisation, restés étonnamment stables au cours de son histoire.

Le premier est celui de la reconfiguration automatique du réseau lors d'un

changement de sa topologie. Dans les premiers réseaux informatiques, quand on envoyait un message d'un ordinateur A à un ordinateur C, ce message suivait invariablement la même route, passant par exemple par un ordinateur intermédiaire B. Dans les années 1960, en pleine guerre froide, les informaticiens, notamment Paul Baran, ont pris conscience de

Fracture numérique: 8% des Français et plus de 98% des Érythréens n'ont pas accès à internet

la vulnérabilité d'une telle organisation: si l'ordinateur B était détruit par une bombe, il devenait impossible d'envoyer un message de A à C. L'originalité d'internet est que si l'ordinateur B est détruit, le réseau se reconfigure tout seul afin d'acheminer les données de A à C par une

autre route. Pour cela, chaque ordinateur du réseau observe, en permanence, les ordinateurs auxquels il est connecté. Et de ces informations locales émergent une carte globale du réseau et des routes qui permettent d'aller de n'importe quel point à n'importe quel autre.

Cette robustesse face aux pannes n'a pas été utile, les conflits redoutés n'ayant finalement pas eu lieu. Mais cette reconfiguration automatique du réseau lui a aussi donné une robustesse face aux pannes et à sa propre croissance. Le réseau se reconfigure tout seul quand l'un de ses ordinateurs tombe en panne ou est déconnecté, ou quand un nouvel ordinateur s'y ajoute.

Le second principe est celui que tous les ordinateurs connectés communiquent en utilisant le même protocole. Alors que les humains s'expriment dans des milliers de langues et que les informaticiens eux-mêmes utilisent des milliers de langages de programmation, le protocole internet (IP) s'est imposé comme l'unique protocole pour échanger des informations sur un réseau informatique de grande taille. Ce protocole a une histoire, diverses versions s'étant succédé, mais il ignore les variations géographiques – une prouesse d'autant plus remarquable qu'il existe, par exemple, encore aujourd'hui dans le monde plus d'une dizaine de types de prises électriques. Si bien que, pour beaucoup, avant d'être le nom d'un réseau d'ordinateurs, internet est le nom d'un protocole de communication.

Si internet nous semble désormais accessible partout – dans nos maisons, nos universités, nos trains, sur nos téléphones, etc. –, n'oublions pas que cette impression cache une redoutable «fracture numérique»: encore 8% des Français et plus de 98% des Érythréens n'ont pas d'accès à internet. Cinquante ans après le premier message échangé, l'accès universel à internet, qui conditionne souvent celui à l'éducation, à la santé, à l'administration, aux banques ou aux assurances, n'est toujours pas une réalité.

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

Time World

Congrès international
SUR LE TEMPS



21. 22. 23

NOVEMBRE 2019

Cité des sciences et de l'industrie

Paris - France

Réservez vos billets sur www.timeworld2019.com

Une coproduction



En partenariat avec





LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

LE FUTUR DU PASSÉ EST-IL ASSURÉ?

La muséographie moderne, qui privilégie l'expérience individuelle et sensible, et internet, qui affiche des visions concurrentes, transforment la connaissance de l'histoire.



Dimanche 25 août 2019. Pour le 75^e anniversaire du Paris délivré de ses oppresseurs, le musée de la Libération a été entièrement réaménagé dans les pavillons Ledoux, lieu patrimonial qui rend l'histoire le plus « vivante » possible, la visite est truffée de cartes interactives et de technologies de réalité augmentée. Ces outils numériques peuvent-ils renforcer notre connaissance des faits historiques et notre mémoire collective? En fait, savoir et mémoire mobilisent des ressorts différents de la confiance.

Tout d'abord, les scénographies numériques facilitent une appropriation « expérientielle » de l'histoire, c'est-à-dire l'acquisition d'une connaissance sensible des faits à partir du vécu de ses personnages. Ainsi, la reconstitution virtuelle amène le visiteur, plongé dans la peau d'un résistant grâce à un casque de réalité augmentée, à revivre l'ambiance et les événements de ce lieu confiné.

Donner une représentation visuelle du passé à partir de la numérisation des archives alimente de nombreux projets muséographiques. Ainsi, l'exposition « Les Cités millénaires », à l'Institut du monde arabe, en 2018, doit son succès aux mises en scène immersives de patrimoines détruits par la guerre comme à Palmyre, Alep ou Mossoul.

**Le numérique
bouleverse les supports
traditionnels de notre
mémoire collective**

C'est avant tout une histoire par le pas qui est proposée. Qu'il s'agisse de remonter aux origines de la vie avec le Muséum national d'histoire naturelle ou de transmettre le ressenti de peintures à l'atelier des Lumières, les techniques immersives ont le vent en poupe.

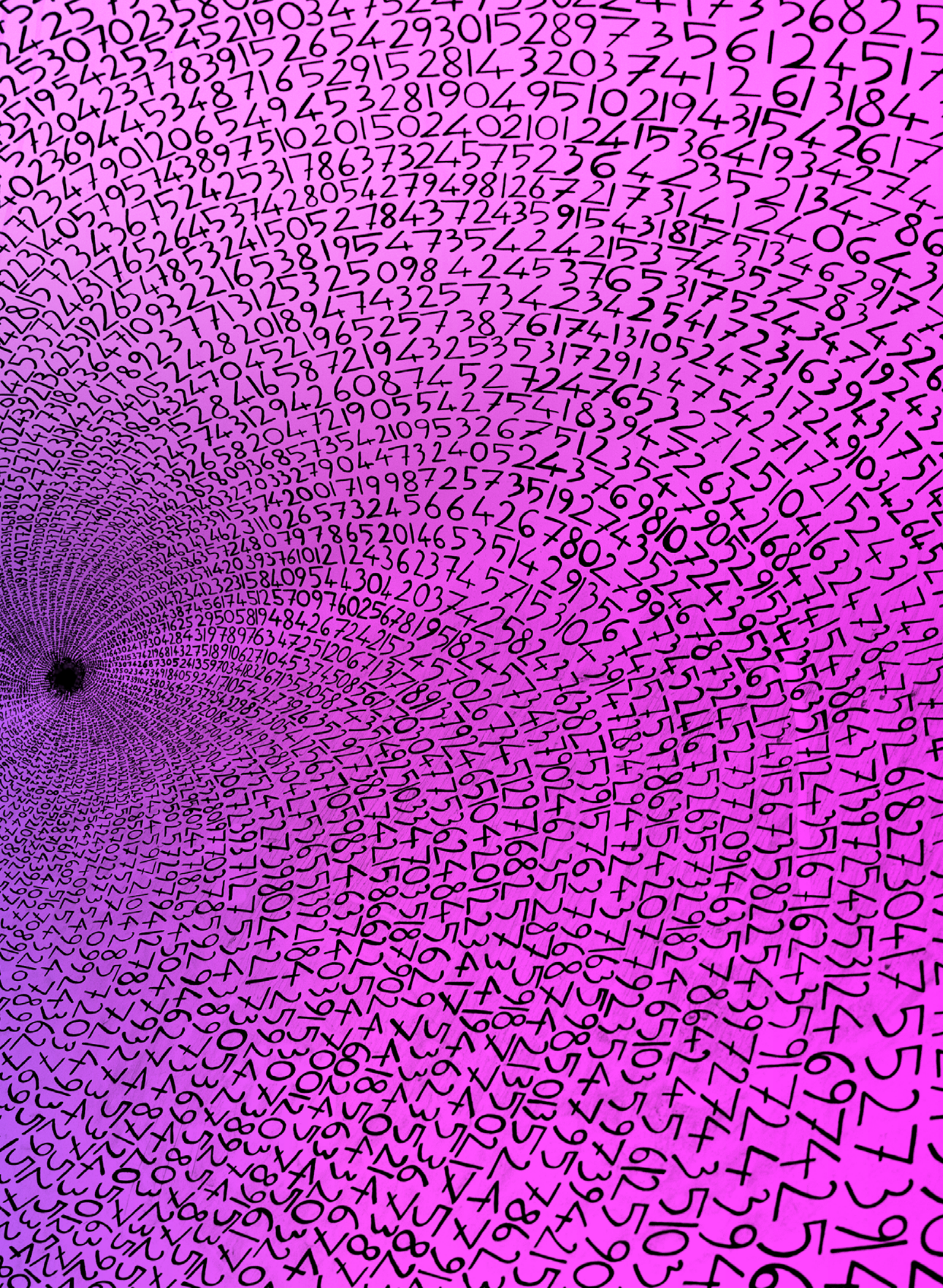
Cependant, parallèlement à ces possibilités de reconstitution du passé, le numérique bouleverse les supports traditionnels de notre mémoire collective, structurés par les bibliothèques, les archives et les musées. Avant internet, la confiance dans notre récit historique partagé découlait de la synchronisation mémorielle que nous procuraient les livres, les sources primaires et les collections d'objets historiques dans les lieux dédiés.

Par exemple, ce croisement des contenus nous assure aujourd'hui de l'existence passée des ravages causés par les maladies infectieuses et du tournant opéré par la vaccination: les archives médicales donnent accès à l'épidémiologie animale et humaine de la rage aux XIX^e et XX^e siècles, de nombreux récits décrivent les symptômes de cette grave pathologie et le musée Pasteur conserve les instruments scientifiques à l'origine des découvertes de l'illustre savant.

Mais avec internet et la structure distribuée du web mondial, on assiste à une (ré)écriture collaborative des faits, plusieurs récits mémoriels étant mis en concurrence, avec une amplification des thèses complotistes, pseudoscientifiques et révisionnistes. Et le tri algorithmique effectué par les moteurs de recherche accentue ces biais en présentant aux internautes des contenus en phase avec leur historique de navigation.

Ainsi, la révolution muséographique favorise l'expérience individuelle et sensible du récit historique, tandis que la toile multiplie les discours concurrents sur le passé et ses interprétations. Il y a là deux écueils à surmonter, sans quoi le numérique fragilisera le futur du passé en mettant à mal la hiérarchie des faits. Le relativisme doit être contrebalancé par la conscience partagée du progrès et du tragique de l'histoire. Et face au risque de privatisation de la mémoire collective, rappelons les propos d'Ariane Mnouchkine, directrice du théâtre du Soleil: l'histoire de l'humanité et les cultures appartiennent à tout le monde.

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



MESSAGES

La théorie usuelle des ensembles, à la base des mathématiques, repose sur un système d'axiomes noté ZFC. Elle constitue une théorie des infinis, dont il existe toute une hiérarchie.

Selon « l'hypothèse du continu », il n'existe pas d'infini intermédiaire entre celui des nombres entiers et celui des nombres réels.

Dans la théorie ZFC, cette hypothèse est indémontrable.

On cherche à compléter la théorie ZFC par des axiomes raisonnables qui permettraient de lever l'indécidabilité de l'hypothèse du continu.

L'Américain Hugh Woodin a récemment indiqué une voie prometteuse vers cet objectif.

NUMERO



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)

En finir avec l'hypothèse du continu

L'existence ou non d'un infini intermédiaire entre celui des nombres entiers et celui des nombres réels est une question que les mathématiciens et les logiciens pensaient impossible à trancher. Mais l'Américain Hugh Woodin est d'un avis contraire. Et ses travaux récents indiquent une voie possible pour résoudre cette énigme centrale posée par l'infini.

Le concept d'infini a de tout temps été une source d'importantes difficultés. Philosophes et théologiens ont eu à son propos d'interminables et assez stériles discussions, et les mathématiciens eux-mêmes n'ont commencé à manier l'infini de façon précise et satisfaisante qu'à partir du XIX^e siècle. Notamment, on avait conscience de rencontrer en mathématiques différents types d'infini, mais on ne savait pas

On faisait face à ce qui semblait être des absurdités. Par exemple, en multipliant par 2 chaque nombre entier, on établit une correspondance « biunivoque » entre les entiers et les nombres pairs: $1 \leftrightarrow 2$, $2 \leftrightarrow 4$, $3 \leftrightarrow 6$, $4 \leftrightarrow 8$, $5 \leftrightarrow 10$, etc. De cette façon, à tout entier n correspond un unique entier pair $p=2n$; inversement, à tout entier pair p correspond un unique entier (pair ou impair) $n=p/2$. Cette correspondance biunivoque

suggère qu'il y a autant d'entiers pairs que d'entiers pairs et impairs réunis, lesquels paraissent pourtant deux fois plus nombreux que les seuls entiers pairs!

Dans les années 1870, le mathématicien allemand Georg Cantor a proposé d'utiliser cette propriété de correspondance biunivoque, ou bijection, pour comparer entre eux des ensembles constitués d'une infinité d'éléments. Cela ne conduit directement à aucune contradiction; d'ailleurs, on peut définir un ensemble infini comme étant un ensemble qui est en bijection avec une partie (au sens strict) de lui-même – définition dont on vérifie facilement le bien-fondé sur notre exemple des entiers et des entiers pairs.

Partant de là, Cantor a pu construire une théorie des ensembles qui constitue une théorie mathématique de l'infini et qui est aujourd'hui le socle sur lequel se développent toutes les mathématiques. L'axiomatisation de la théorie des ensembles a fait surgir quelques difficultés, mais celles-ci ont pour l'essentiel fini par être résolues: on dispose, depuis le

lébut du xx^e siècle, d'un système d'axiomes qui n'a fait apparaître jusqu'ici aucune contradiction dans les travaux des mathématiciens.

Cette théorie axiomatique des ensembles est juste un peu faible en ce sens qu'elle laisse définitivement sans réponse certaines questions élémentaires comme celle dite de «l'hypothèse du continu», que l'on explicitera plus loin. Améliorer la théorie pour qu'elle réponde mieux à ces questions, tel est l'objectif de ceux qui mènent aujourd'hui des recherches dans le domaine de la théorie des ensembles.

REPONDRE A DES QUESTIONS QUI ÉTAIENT A PRIORI SANS RÉPONSE

Or des résultats très intéressants ont été obtenus dans cette direction au cours de la dernière décennie, et l'un des principaux protagonistes de cette histoire est Hugh Woodin. Ce mathématicien travaillant aujourd'hui à l'université Harvard, aux États-Unis, a la profonde conviction que l'énigme de l'hypothèse du continu dispose d'une solution. c'est-à-dire que

L'INFINI DÉNOMBRABLE ET LE CONTINU

Pour comparer les tailles d'ensembles E_1 et E_2 constitués d'une infinité d'éléments, on cherche à savoir s'il existe une bijection (ou correspondance biunivoque) entre les éléments de E_1 et ceux de E_2 . Si c'est le cas, on dit que E_1 et E_2 sont équipotents, ou qu'ils ont le même cardinal.

Un ensemble infini qui est équipotent à l'ensemble $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ des entiers naturels est dit «dénombrable». On constate aisément que, par exemple, l'ensemble des nombres pairs (a), l'ensemble des multiples de 5 (b), l'ensemble $\mathbb{Z}$ des entiers relatifs (c) sont dénombrables. On peut aussi montrer facilement que l'ensemble $\mathbb{Q}$ des nombres rationnels (ceux qui, comme $1/2$ ou $7/3$, peuvent s'écrire sous la forme p/q , où p et q sont des entiers) est dénombrable. Il en est de même de l'ensemble des couples (p, q) d'entiers, des triplets (u, v, w) de nombres rationnels, etc.

En revanche, l'ensemble des nombres réels compris entre 0 et 1 (par exemple) n'est

pas dénombrable. En voici une démonstration. Supposons que cet ensemble $[0, 1]$ soit dénombrable. On pourrait alors énumérer ses éléments un à un, ce qui donnerait une liste infinie (mais dénombrable) de nombres du type :

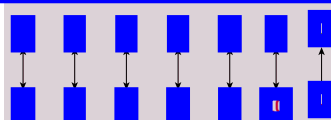
$d_{1,1} d_{1,2} d_{1,3} d_{1,4} d_{1,5} d_{1,6} \dots$
 $d_{2,1} d_{2,2} d_{2,3} d_{2,4} d_{2,5} d_{2,6} \dots$
 $d_{3,1} d_{3,2} d_{3,3} d_{3,4} d_{3,5} d_{3,6} \dots$
 $d_{4,1} d_{4,2} d_{4,3} d_{4,4} d_{4,5} d_{4,6} \dots$
...

où les $d_{i,j}$, $d_{i,2}$, $d_{i,3}$, etc. sont les chiffres du développement décimal du i -ième nombre de la liste (on exclut ici les développements décimaux qui se terminent par une infinité de 9). Formons alors un nombre $x = 0, d_{1,2} d_{2,3} d_{3,4} d_{4,5} \dots$ tel que $d_{1,1} \neq d_{1,2}$, $d_{2,1} \neq d_{2,2}$, $d_{3,1} \neq d_{3,2}$, etc. (en évitant

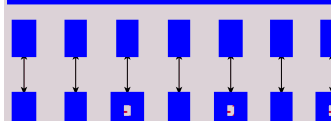
de choisir 9 pour les $d_{i,j}$). On constate que x ne figure pas dans la liste ci-dessus (car quel que soit n , sa n -ième décimale diffère de la n -ième décimale du n -ième nombre de la liste), alors que x est bien un nombre réel compris entre 0 et 1. Cette contradiction montre que l'hypothèse de départ, à savoir que l'ensemble $[0, 1]$ est dénombrable et donc que ses éléments sont énumérables par une liste, est fautive.

Ainsi, les nombres réels compris entre 0 et 1 ne sont pas dénombrables. Leur infinité est d'un ordre supérieur à celle de $\mathbb{N}$ et l'on parle de l'infini continu, les nombres réels pouvant être représentés par les points d'une ligne continue. Cette représentation géométrique des nombres permet d'ailleurs de voir facilement que l'intervalle $[0, 1]$ est équipotent à, par exemple, l'intervalle $[0, 5]$: deux intervalles de longueurs différentes ont la même infinité de points (d)... On peut aussi démontrer des choses plus étonnantes, par exemple que la surface d'un carré, ou le volume d'un cube, contient la même infinité de points qu'un segment de droite.

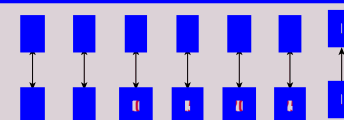
L'ensemble des nombres pairs est dénombrable



L'ensemble des entiers relatifs est dénombrable



L'ensemble des multiples de 5 est dénombrable



L'ensemble des points d'un segment de longueur 1 est équipotent à l'ensemble des points d'un segment de longueur 5



L'HYPOTHESE DU CONTINU ET LES GRANDS CARDINAUX

L'hypothèse du continu ou HC, a été considérée la première fois par Georg Cantor. Elle affirme

qu'entre l'infini des nombres entiers (l'infini dénombrable) et l'infini des nombres réels (le continu), il n'existe pas l'autre infini.

Aucune intuition claire ne s'impose à propos de la vérité ou de la fausseté de HC. Ce n'est pas le cas pour les axiomes dits « de grands cardinaux », qui affirment l'existence d'ensembles infinis très grands, comme celle d'un ensemble qui, en taille, dépasserait chacun des infinis de la liste $\mathbb{N}$, $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, $\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N}))$.

On connaît une série d'axiomes de grands cardinaux. On les considère vrais a priori, car les refuser reviendrait à limiter l'infini, ce qui semble absurde.

Les axiomes permettent de prouver des résultats qu'on ne peut pas obtenir sans eux, et conduisent

nisme a demontrer les résultats portant sur les nombres entiers. Le mathématicien Alexandre Grothendieck a utilisé de tels axiomes dans ses travaux sur la théorie des catégories, et la démonstration du grand théorème de Fermat (selon lequel il n'existe pas d'entiers positifs x, y, z tels que $x^n + y^n = z^n$ dès que l'entier n est supérieur à 3), au moins dans un premier temps, semblait ne pas pouvoir s'en dispenser.

On a espéré que certains axiomes de grands cardinaux auraient pour conséquence HC ou non-HC, ce qui aurait résolu l'énigme de l'hypothèse du continu. On a malheureusement établi que cela ne pouvait pas être le cas. On est donc reparti à la recherche de nouveaux axiomes naturels qui fixeraient la vérité ou la fausseté de HC.



Georg Cantor (1845-1918)

soit cette hypothèse est vraie, soit elle est fausse: elle ne devrait pas être «indécidable». Cela l'a conduit à proposer et à faire avancer deux programmes de recherche opposés.

Le premier devait établir que l'hypothèse du continu est fausse. Il y a quinze ans, Hugh Woodin croyait possible son aboutissement. Mais il a changé d'avis et lancé un second programme de recherche qui porte sur ce qu'on appelle le «L ultime» et qui, selon lui, conduira à une solution satisfaisante et définitive des principales énigmes posées par l'infini – notamment à la preuve que l'hypothèse du continu est vraie.

C'est cette voie vers le L ultime que je vais tenter d'expliquer dans ses grandes lignes. Revenons un peu en arrière pour comprendre les termes du problème.

Découverte par Cantor et publiée en 1891, la vérité la plus simple concernant l'infini mathématique est qu'il en existe plusieurs sortes. De façon plus générale, le théorème de Cantor

indique qu'à chaque fois que l'on considère un ensemble infini E , l'ensemble de ses parties (ou sous-ensembles), noté $\mathcal{P}(E)$, est d'une taille infinie strictement supérieure à celle de E . Cela signifie que $\mathcal{P}(E)$ ne peut pas être mis en correspondance biunivoque, ou bijection, avec E .

Ainsi, l'ensemble des entiers naturels $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots, n, \dots\}$ est strictement plus petit que l'ensemble $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ de ses parties, qui comprend par exemple $\mathbb{N}$ lui-même, l'ensemble des nombres pairs, l'ensemble des nombres premiers, l'ensemble des puissances de 2, etc. Il y a dans $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ trop d'éléments pour qu'on puisse les mettre en bijection avec ceux de $\mathbb{N}$.

Et en répétant l'opération, c'est-à-dire en considérant la suite $\mathbb{N}$, $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, $\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N}))$, $\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N})))$, etc., on dispose, grâce au théorème de Cantor, d'une infinité d'ensembles infinis différents et de plus en plus grands.

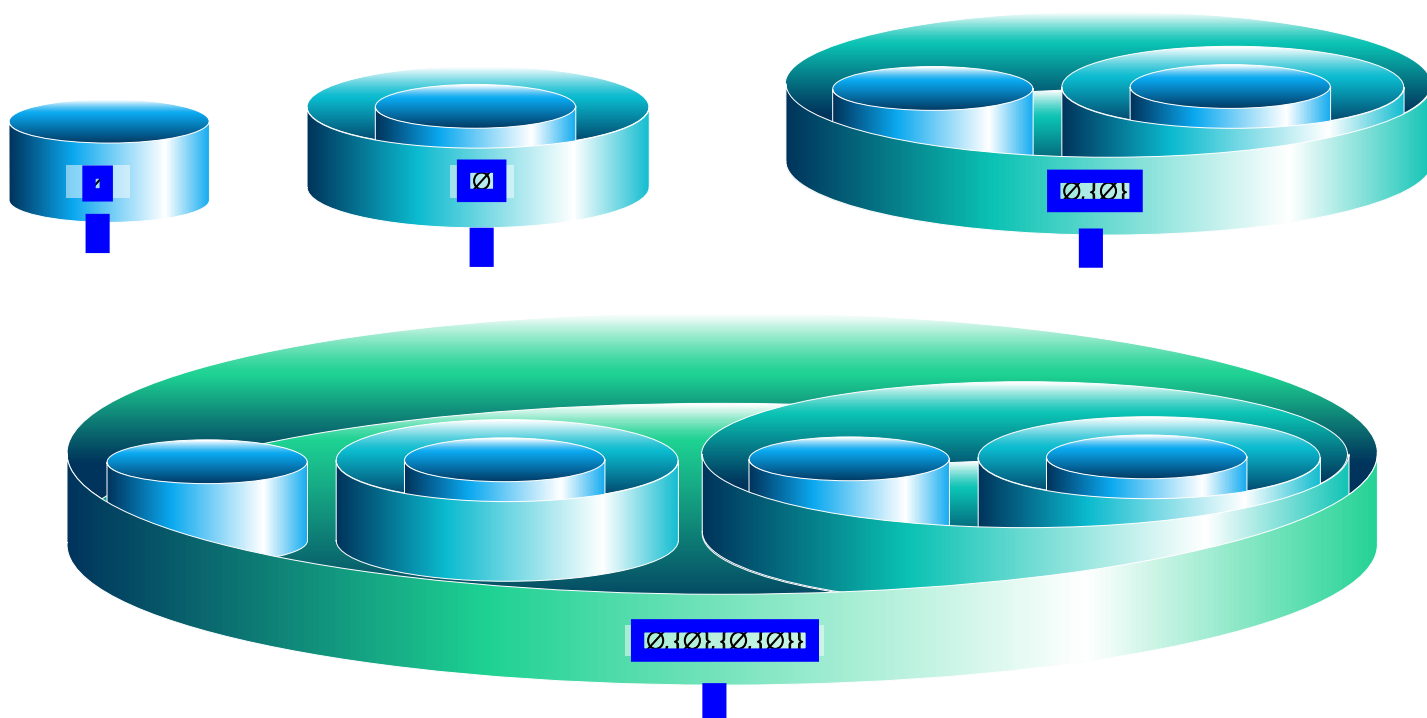
L'HYPOTHESE DU CONTINU: PAS D'INFINI INTERMEDIAIRE ENTRE CELUI DE $\mathbb{N}$ ET CELUI DE $\mathbb{R}$

L'infini des entiers naturels, $\mathbb{N}$, est le plus simple et le plus petit qui existe. On l'appelle l'infini dénombrable, et tout ensemble infini qui peut être mis en bijection avec $\mathbb{N}$ est dit «dénombrable» (voir l'encadré page précédente). Un infini d'ordre supérieur est celui de $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, comme on l'a vu. On peut en donner une représentation moins abstraite: cet infini est le même que celui de l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels, car on démontre assez facilement qu'il existe une bijection entre $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ et $\mathbb{R}$.

Sachant que $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ ou $\mathbb{R}$ est un ensemble strictement plus «grand» que $\mathbb{N}$, se pose la question suivante: existe-t-il des infinis intermédiaires entre celui de $\mathbb{N}$ et celui de $\mathbb{R}$? Les mathématiciens n'en ont jamais rencontré, et ils ont donc été amenés à supposer que de tels infinis intermédiaires n'existent pas: telle est l'hypothèse du continu, posée à l'origine par Cantor. Ici, le mot «continu» évoque l'infinité des nombres réels, ces nombres pouvant être représentés par les points d'une ligne continue.

Autrement dit, l'hypothèse du continu affirme que tout sous-ensemble infini de $\mathbb{R}$ est soit en bijection avec $\mathbb{N}$ (si c'est un «petit» infini), soit en bijection avec $\mathbb{R}$ lui-même (si c'est un «grand» sous-ensemble infini de $\mathbb{R}$).

L'hypothèse du continu constitue la plus simple des questions non résolues concernant les infinis. On la juge importante et, d'ailleurs, le mathématicien allemand David Hilbert l'avait placée en tête de sa célèbre liste des 23 grands problèmes présentée en 1900 au Congrès international des mathématiciens, à Paris. Plus d'un siècle après sa formulation, nul n'a su résoudre définitivement la question: on n'a jamais rencontré de partie infinie de $\mathbb{R}$ qu'on ne sache pas mettre en bijection avec $\mathbb{N}$.



ou avec $\mathbb{R}$, mais on n'a pas démontré qu'une telle partie n'existerait pas.

Les logiciens ont cependant obtenu d'intéressants résultats qui, dans un premier temps, ont aggravé le mystère. Ils portent sur la théorie des ensembles telle qu'elle a été formalisée au début du xx^e siècle et qui repose sur un système d'axiomes élaboré par plusieurs chercheurs, en particulier les Allemands Ernst Zermelo et Abraham Fraenkel. Ce système d'axiomes est noté ZFC d'après les initiales de ces derniers, le C représentant l'axiome du choix, un axiome au statut particulier (il stipule qu'étant donnée une collection d'ensembles non vides, il existe toujours un ensemble ayant exactement un élément commun avec chacun de ces ensembles).

Or en 1938, le logicien autrichien Kurt Gödel a prouvé que si la théorie des ensembles construite sur ZFC est non contradictoire (c'est-à-dire qu'elle ne conduit pas à une affirmation et son contraire), alors elle ne peut pas démontrer que l'hypothèse du continu est fausse. En d'autres termes, si l'on note HC l'hypothèse du continu (« Il n'existe pas d'infini intermédiaire entre celui de $\mathbb{N}$ et celui de $\mathbb{R}$ ») et non-HC sa négation (« Il existe un infini intermédiaire entre celui de $\mathbb{N}$ et celui de $\mathbb{R}$ »), la théorie ZFC ne peut pas démontrer non-HC.

La surprise est surtout venue en 1963 de la preuve apportée par le mathématicien américain Paul Cohen que si la théorie ZFC n'est pas contradictoire, alors elle ne peut pas démontrer l'hypothèse du continu. Ce résultat et celui de 1938 montrent donc que HC est logiquement indépendante des axiomes ZFC.

En d'autres termes, l'hypothèse du continu est un énoncé « indécidable » de la théorie ZFC.

Une interprétation possible de cette indépendance vis-à-vis des axiomes ZFC est que les mathématiciens ont le choix de faire ce qui leur plaît : ajouter l'hypothèse du continu, HC, comme axiome à leur théorie, ou ajouter sa négation, non-HC. Mais cette interprétation est incompatible avec l'idée qu'il existe une réalité ensembliste unique, et Gödel la refusait donc (voir l'encadré page 34). Pour lui, l'indécidabilité de l'hypothèse du continu dans la théorie ZFC signifiait que les axiomes ZFC ne donnent pas une description complète de cette réalité ensembliste à laquelle, comme beaucoup de mathématiciens, il croyait. D'où un programme : trouver de nouveaux axiomes et les ajouter à ZFC jusqu'à ce qu'ils permettent de savoir si l'hypothèse du continu est vraie ou non.

AJOUTER DE NOUVEAUX AXIOMES POUR LEVER L'INDÉCIDABILITÉ

Certains axiomes envisagés pour compléter ZFC, y compris par Gödel lui-même, ne sont pas satisfaisants, car les axiomes doivent avoir un fondement intuitif. C'est d'ailleurs pourquoi ajouter HC ou non-HC comme axiome n'est pas considéré comme une solution : notre intuition ne nous souffle rien de vraiment clair concernant HC. Trouver de bons axiomes est tout le problème.

Pour comprendre les idées nouvelles introduites par Hugh Woodin, il nous faut maintenant expliquer brièvement de quoi est fait l'univers ensembliste découvert par Cantor.

Une représentation imagée des premiers « entiers de von Neumann », c'est-à-dire les nombres entiers tels qu'on les définit en termes d'ensembles

ORDINAUX ET L'ULTIME

Les ordinaux sont une généralisation des nombres entiers, très

constituent les nombres réels. Ils constituent une façon de prendre au sérieux les infinis et de les ordonner. Après la série ordonnée des nombres entiers, on considère qu'il existe un nouveau nombre, noté ω . On ne s'arrête pas là et on considère que, de la même façon qu'après 0 il y a 1, après ω il y a $\omega + 1$, puis $\omega + 2$, etc. Au-delà de cette deuxième série infinie, il y a $\omega \cdot 2$, puis $\omega \cdot 3$, etc. L'image ci-dessous est une tentative de représentation des ordinaux.

Définissables à partir de l'ensemble vide (voir le texte de l'article), ces ordinaux constituent une structure qu'on essaie de comprendre depuis que Cantor les a

redécouverts. On les utilise en particulier pour définir des ensembles V_α de plus en plus grands, dont on montre qu'ils forment l'univers ensembliste dans sa totalité, noté V .

En jouant avec la

définition des V_α , on construit les sous-univers du monde ensembliste (on parle de « modèles internes ») qui, bien que plus petits que V , en ont les propriétés fondamentales. C'est avec l'un de ces sous-univers, noté L , que Gödel a montré que la théorie usuelle des ensembles est compatible avec l'hypothèse du continu, HC. Mais Paul Cohen a montré qu'elle était aussi compatible avec non-HC. L'idée utilisée pour définir L a été reprise sous le nom de « L ultime » et semble mener vers une solution concernant HC qui, finalement, serait vraie.

La colonne vertébrale de cet univers est donnée par la suite des « ordinaux », qui sont des nombres permettant de compter dans un ordre progressif les éléments d'un ensemble, qu'il soit fini ou infini. Le début de cette suite est composé des nombres entiers naturels, définis sous une forme ensembliste et nommés dans ce contexte « entiers de von Neumann ». Ils se construisent en partant de l'ensemble vide (celui qui ne contient rien), noté $\emptyset$, en posant : $0 = \emptyset$, $1 = \{\emptyset\}$, $2 = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$, ..., $n+1 = n \cup \{n\}$, ..., où $\cup$ est le symbole désignant la réunion de deux ensembles (voir la figure page précédente). Dans cette représentation, l'entier n est donc constitué des entiers allant de 0 jusqu'à $n-1$.

L'UNIVERS ENSEMBLISTE : UNE CHAÎNE INFINIE ET CUMULATIVE

Les ordinaux ne s'arrêtent pas aux entiers. Le premier ordinal infini – on dit aussi transfini – est obtenu en prenant d'un coup tous les entiers, et est noté ω (oméga).

$$\omega = \{0, 1, 2, \dots\}.$$

On peut alors poursuivre : $\omega + 1 = \omega \cup \{\omega\}$, $\omega + 2 = (\omega + 1) \cup \{\omega + 1\}$, etc. On arrive ainsi à $\omega + \omega$, noté $\omega \cdot 2$, puis, plus loin, à $\omega \cdot 3$, et ainsi de suite. Plus loin encore, on obtient ω^2 , ω^3 , ..., ω^ω ... (voir l'encadré ci-contre).

Notons qu'il y a deux sortes d'ordinaux : ceux qui ont un prédécesseur, par exemple $\omega + 1$ ou $\omega^3 + 32$, et ceux qui n'en ont pas, par exemple $\emptyset$, $\omega \cdot 2$ ou ω^4 . Ces derniers sont appelés « ordinaux limites ».

Avec les ordinaux et l'opération $\mathcal{P}$ qui, à un ensemble E , associe l'ensemble $\mathcal{P}(E)$ de ses parties, on obtient une hiérarchie d'ensembles emboîtés qui sera le centre de notre discussion. On pose :

$$V_0 = \emptyset;$$

$$V_{\alpha+1} = \mathcal{P}(V_\alpha) \text{ si } \alpha+1 \text{ est un ordinal ayant un prédécesseur};$$

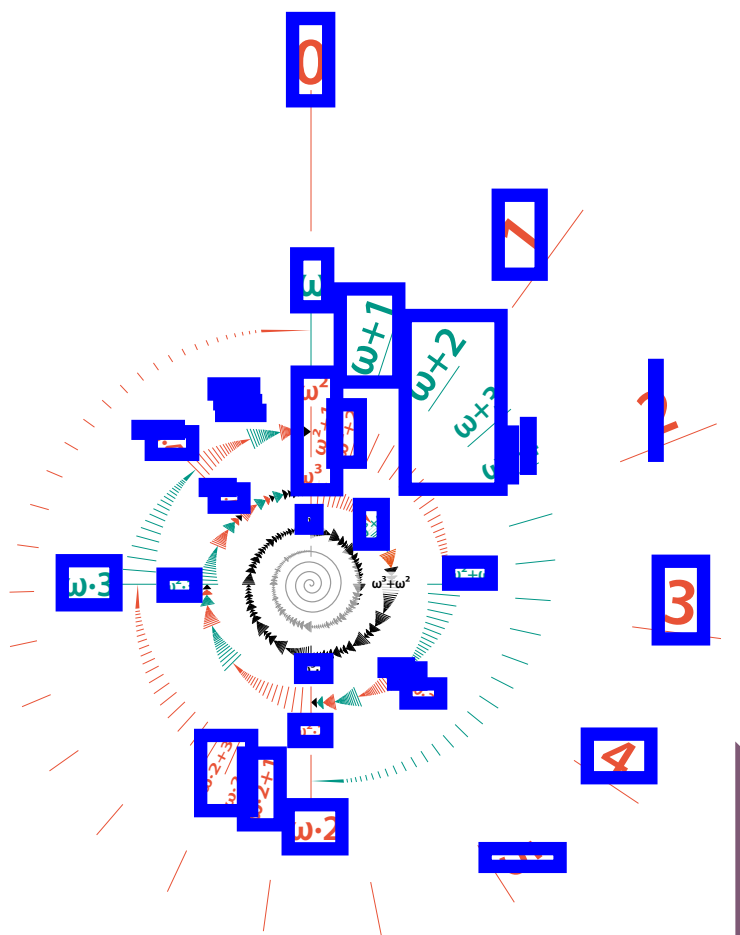
$$V_\alpha = \bigcup_{\beta < \alpha} V_\beta \text{ si } \alpha \text{ est un ordinal limite};$$

On note alors V l'univers ensembliste obtenu en prenant tous les V_α . Puisque tout ensemble est dans l'un des V_α , tout provient de l'ensemble vide $\emptyset$: le monde ensembliste n'est constitué que du vide et de ce que sa présence implique.

Revenons maintenant à la preuve par Gödel, en 1938, que non-HC ne résulte pas des axiomes de ZFC. Les V_α sont donc des ensembles d'ensembles de plus en plus grands. Ils constituent la totalité du monde ensembliste. En effet, la théorie ZFC permet de démontrer que tout ensemble est dans l'un des V_α . Par exemple, l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers naturels est dans V_ω , tandis que l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels n'apparaît que plus loin, et l'ensemble $\mathcal{P}(\mathbb{R})$ des parties de $\mathbb{R}$ encore un peu plus loin, etc.

On note alors V l'univers ensembliste obtenu en prenant tous les V_α . Puisque tout ensemble est dans l'un des V_α , tout provient de l'ensemble vide $\emptyset$: le monde ensembliste n'est constitué que du vide et de ce que sa présence implique.

Revenons maintenant à la preuve par Gödel, en 1938, que non-HC ne résulte pas des axiomes de ZFC.



axiomes ZFC. Gödel a utilisé pour ce faire un procédé dont l'idée est facile à comprendre... même si tous les détails ne le sont pas! Son point de départ était l'hypothèse que la théorie ZFC n'est pas contradictoire. En vertu de son théorème de complétude démontré en 1929 (voir l'encadré ci-contre), il existe alors une structure vérifiant tous les axiomes ZFC. Gödel en a déduit une autre structure vérifiant tous les axiomes ZFC et vérifiant aussi l'hypothèse du continu. Ce qui montre que le système ZFC+HC est non contradictoire – et donc que l'on ne peut pas déduire non-HC du système ZFC (en effet, si de ZFC on pouvait déduire non-HC, on pourrait aussi déduire non-HC du système ZFC+HC, lequel donnerait alors à la fois HC et non-HC, ce qui serait contradictoire).

Comment Gödel a-t-il obtenu la structure en question? L'idée de la méthode est analogue à celle souvent utilisée en algèbre où, partant d'une structure qui vérifie par exemple les axiomes de groupe, comme l'ensemble des nombres réels muni de l'opération d'addition, on considère tous les éléments dont l'existence se déduit de celle d'un élément particulier; ainsi, si l'on choisit le nombre 1, on en déduit la sous-structure constituée de 1, -1, 1+1, 1+1+1, etc., qui est le «sous-groupe engendré par 1». Dans cet exemple, ce procédé donne $\mathbb{Z}$, l'ensemble des entiers relatifs.

PASSER PAR UN UNIVERS ENSEMBLISTE PLUS RESTREINT

Autrement dit, l'idée est de partir d'une structure vérifiant certains axiomes et d'en déduire une structure plus petite qui les vérifie aussi et qui, éventuellement, a d'autres propriétés intéressantes.

La méthode de Gödel part donc de l'univers V décrit plus haut et vérifiant les axiomes ZFC. Pour définir une sous-structure, qui sera notée L , il s'est inspiré de la définition des V_α en la modifiant légèrement:

$V_0 = \emptyset$;
 $V_{\alpha+1} = \mathcal{P}(V_\alpha)$ si $\alpha+1$ est un ordinal ayant pour prédécesseur un ordinal.

La réunion de tous les V_α tels que $\alpha < \beta$, est notée V_β .

ici, $\mathcal{P}_{\text{def}}(E)$ désigne l'ensemble des parties constructibles de l'ensemble E , c'est-à-dire définissables par une formule – une expression écrite dans le langage formel de la théorie des ensembles et dont les paramètres sont dans E . Si l'on prend, mettons, l'ensemble $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$, un exemple simple de partie constructible de $\mathbb{N}$ est l'ensemble X constitué des éléments x de $\mathbb{N}$ tels qu'il existe un y de $\mathbb{N}$ vérifiant $x+y=5$ (tout cela peut se traduire par une formule). On a dans ce cas $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$.

La différence entre $\mathcal{P}_{\text{def}}(E)$ et $\mathcal{P}(E)$ provient de ce que, en général, certaines parties

STRUCTURES ET « CONSISTANCE RELATIVE »

Un résultat de base pour travailler sur les systèmes axiomatiques est le théorème de complétude, que Kurt Gödel a prouvé en 1929 dans sa thèse de doctorat, avant de démontrer ses fameux théorèmes d'incomplétude.

Le théorème de complétude affirme qu'une théorie définie par des axiomes logiques est non contradictoire si et seulement s'il existe au moins une structure qui satisfait tous ses axiomes.

Par exemple, l'axiome « pour tout x , il existe un y tel que $x < y$ » est non contradictoire, car, en considérant la structure $\mathbb{N}$ (les entiers naturels) avec pour relation $<$ la relation d'ordre habituelle sur les entiers, on voit que l'axiome est satisfait.

Dans le cas d'un système d'axiomes plus compliqué, il n'est bien sûr pas aussi facile de proposer une structure satisfaisant le système d'axiomes. Pour la théorie des ensembles, on se rabat sur la méthode

dite « de consistance relative » : on suppose qu'un système S d'axiomes est non contradictoire ; on en déduit, par le théorème de complétude, qu'il existe une structure M satisfaisant tous les axiomes de S ; on modifie M en M' pour que M' vérifie un axiome de plus, noté X ; l'existence de cette structure M' montre que le système $S + X$ est non contradictoire. Cette construction démontre donc l'implication :

S est non contradictoire $\Rightarrow S + X$ est non contradictoire.

C'est la méthode utilisée par Kurt Gödel et Paul Cohen pour démontrer que :

ZFC est non contradictoire $\Rightarrow$ ZFC + HC est non contradictoire (Gödel, 1938)

et que :

ZFC est non contradictoire $\Rightarrow$ ZFC + non-HC est non contradictoire (Cohen, 1963).



Kurt Gödel (1906-1978)

d'un ensemble E n'ont pas une définition permettant de les caractériser. Par exemple, il n'existe qu'une infinité dénombrable de parties définissables de $\mathbb{N}$ (car il n'y a qu'une infinité dénombrable de formules), alors qu'il existe une infinité non dénombrable de parties de $\mathbb{N}$.

La réunion de tous les L_α , notée L , est l'« univers des ensembles constructibles ». C'est un univers ensembliste inclus dans V , dans lequel tous les axiomes ZFC sont vrais. Le point important démontré par Gödel est que, dans L , l'hypothèse du continu est vraie. La méthode de Gödel montre donc que, partant d'une structure qui vérifie ZFC, on sait en trouver une sous-structure qui vérifie ZFC+HC ; par conséquent, elle prouve que si ZFC est non contradictoire, alors ZFC + HC est non contradictoire.

Ce résultat de Gödel suggère que l'on pourrait ajouter au système ZFC l'axiome affirmant que tout ensemble est constructible, ce qui s'écrit $V=L$, et alors l'hypothèse du continu serait vraie. L'axiome $V=L$ pourrait donc, à première vue, être l'axiome recherché pour compléter ZFC et lever l'indécidabilité de HC. Mais il faudrait pour cela avoir des arguments forts incitant à l'admettre. L'argument que tout ensemble doit être définissable à partir de ceux qui viennent avant lui est une justification intuitive; Gödel l'a peut-être envisagé lui-même. Malheureusement, nous allons voir que l'idée de prendre $V=L$ comme nouvel axiome n'est finalement pas défendable.

Aux yeux d'un mathématicien convaincu que les ensembles existent et qu'il existe donc une vérité unique les concernant, on ne peut pas envisager d'ajouter comme axiome n'importe quelle formule indécidable de ZFC (une « formule », dans le contexte de la logique, est un énoncé). Un nouvel axiome doit affirmer une propriété dont nous percevons le sens et qui s'impose à partir de l'idée que nous nous faisons des ensembles. Le fait qu'un axiome possible n'introduise pas de contradiction ne suffit pas pour qu'on l'adopte.

L'exemple le plus simple pour le comprendre est ce qui se passe avec le second théorème d'incomplétude de Gödel, publié en 1931. Ce théorème indique que la non-contradiction d'un système S assez puissant pour englober l'arithmétique usuelle (par exemple le système ZFC), si elle est vraie, ne peut pas se démontrer dans le système S lui-même. Cela signifie que l'on peut ajouter à S l'affirmation « S est contradictoire » sans que cela introduise de contradiction. Il serait pourtant absurde de le faire, puisqu'en adoptant et en utilisant le système S , on suppose *a priori* qu'il est non contradictoire!

TENIR COMPTE DES AXIOMES DE GRANDS CARDINAUX

Les critères permettant de juger si une formule (un énoncé) peut être ajoutée ou non comme axiome font l'objet de discussions délicates. Une idée cependant fait l'unanimité: si une formule affirme l'existence de grands ensembles infinis et qu'elle n'introduit pas de contradiction, alors il faut l'accepter. S'il existe vraiment un univers des ensembles, alors celui-ci est aussi grand que cela est possible et il faut donc accepter tout ce qui affirme qu'il est grand.

On connaît depuis longtemps des affirmations exprimant l'existence de très grands ensembles infinis, que l'on dénomme « axiomes de grands cardinaux ». Le premier de ces énoncés est l'axiome de l'infini, selon lequel il existe un ensemble infini (axiome dont un énoncé possible est: « Il existe un ensemble pouvant être mis en bijection avec une de ses parties propres [c'est-à-dire non identiques à lui-même] »). La définition précise de ces axiomes dépasse le cadre de cet article, mais il faut savoir qu'ils sont nombreux et font intervenir divers types de grands ensembles (cardinaux « inaccessibles », cardinaux « mesurables », cardinaux « supercompacts », etc.). Ils jouent dans l'étude de l'infini un rôle dont nous verrons plusieurs aspects (voir l'encadré page 36).

Or un miracle se produit à propos des grands cardinaux. Bien que les propriétés qui les définissent soient sans rapport direct les unes avec les autres, et qu'*a priori* il aurait pu se produire que deux grands cardinaux distincts ne soient pas comparables (c'est-à-dire qu'aucun des deux ne soit plus grand que l'autre), cela ne se produit jamais: les grands cardinaux se rangent en une ligne ordonnée qui va du plus petit vers le plus grand.

Hugh Woodin et de nombreux mathématiciens voient dans ce fait un argument pour croire que les ensembles existent réellement et que ce ne sont pas des fictions: si derrière ces formules qui définissent les grands cardinaux ne se trouvait aucune réalité, leur

REALISME SIMPLE OU RÉALISME PLURALISTE?

En philosophie des mathématiques, les réalistes soutiennent que le monde mathématique existe et que le travail du mathématicien consiste à découvrir les vérités de ce monde. Puisque les théories les plus puissantes et les plus utilisées sont fondées sur des notions ensemblistes et que, tout, d'une certaine façon, s'y ramène, il est assez naturel aujourd'hui d'affirmer que le réalisme mathématique est fondé sur la théorie des ensembles, c'est-à-dire en défendant l'idée que les ensembles, et en particulier les ensembles infinis, existent bel et bien.

Face au problème de l'hypothèse du continu (HC)

et de son indécidabilité relativement aux axiomes usuels de la théorie des ensembles, une version du réalisme ensembliste soutient que l'univers des mathématiques existe sous une multitude de formes. Dans certaines, l'hypothèse du continu est vraie, dans d'autres, elle est fausse. Ce « multivers ensembliste » dispenserait de rechercher une valeur de vérité (« vrai » ou « faux ») à l'hypothèse du continu. Hugh Woodin oppose à cette version trop facile de réalisme des arguments techniques montrant que, dans le prétendu multivers, aucune notion de vérité satisfaisante ne trouve place. Pour lui, comme pour Gödel, il n'existe qu'un seul univers ensembliste, dont on doit trouver les bons axiomes, ce à quoi il travaille avec acharnement, en soutenant que la voie ouverte par le « L ultime » a de bonnes chances de régler le problème une fois pour toutes.

alignement selon un ordre bien déterminé serait incompréhensible.

On a espéré trouver un axiome de grand cardinal qui ait un effet sur l'hypothèse du continu, mais on a montré plus tard que c'est impossible. La solution du problème posé par l'hypothèse du continu ne peut donc pas provenir directement des grands cardinaux.

Qui plus est, la prise en compte des grands cardinaux condamne sans appel l'axiome $V=L$, évoqué plus haut, comme solution possible à l'énigme de l'hypothèse du continu. En 1961, le mathématicien et informaticien américain Dana Scott a en effet prouvé que si l'on adopte comme axiome $V=L$, alors les cardinaux «mesurables» ne peuvent pas exister.

Ce résultat signifie donc que l'on ne peut pas à la fois adopter tous les axiomes de grands cardinaux, comme on croit nécessaire le faire, et adopter l'axiome $V=L$. Hugh Woodin n'hésite pas à dire que le résultat de Dana Scott signifie que $V=L$ est une affirmation fausse.

UNE VARIANTE DE L COMPATIBLE AVEC LES GRANDS CARDINAUX?

Pour trouver une issue, les mathématiciens et les logiciens ont alors considéré des variantes de L . Elles sont fondées sur des définitions utilisant le même principe que pour L : fixer une notion constructive pour passer d'un L_α à un $L_{\alpha+1}$, mais la choisir moins restrictive, de façon que les ensembles L_α soient plus grands que ceux définis par Gödel.

Cette idée a permis de résoudre le problème des cardinaux «mesurables», le logicien américain Robert Solovay ayant conçu en 1976 une version de L qui n'est pas en contradiction avec l'existence d'un tel cardinal. Ce nouveau L est malheureusement en contradiction avec d'autres axiomes de grands cardinaux plus élevés dans la hiérarchie. De ce fait, la variante de $V=L$ de Robert Solovay n'est pas plus recevable que celle de Gödel.

Ce processus d'élargissement de L a été répété plusieurs fois, mais à chaque étape, la nouvelle version de $V=L$ s'est révélée incompatible avec certains axiomes de grands cardinaux. La situation semblait donc bloquée.

En 2010, cependant, une avancée spectaculaire s'est produite. Hugh Woodin a démontré cette année-là que si l'on trouvait une variante de $V=L$ compatible avec l'existence d'un cardinal «supercompact», alors elle serait nécessairement compatible avec tous les axiomes de grands cardinaux.

On recherche donc aujourd'hui ce L miraculeux, dénommé « L ultime». On dispose de pistes sérieuses pour y parvenir, et surtout, on sait, grâce à un autre résultat de Hugh Woodin, que l'axiome $V=L$ ultime aurait pour conséquence que l'hypothèse du continu est vraie.

LE FORCING, UNE TECHNIQUE QUE L'AXIOME $V=L$ ULTIME NEUTRALISERAIT

Le forcing est la méthode conçue par Paul Cohen pour démontrer que

non-HC (la négation de l'hypothèse du continu) est compatible avec la théorie ZFC. Elle est extrêmement puissante, au point même que c'est gênant : elle permet de montrer non seulement que non-HC est compatible avec la théorie ZFC, mais aussi que HC l'est. Elle démontre donc à elle seule que HC est un énoncé indécidable de la théorie ZFC.

En plus, le forcing

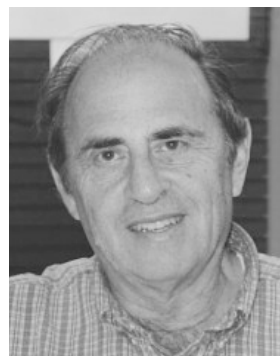
s'applique à d'autres questions mathématiques importantes et montre que celles-ci (problème de Whitehead en théorie des groupes, conjecture de Kaplansky en analyse, problème de Suslin en combinatoire, conjecture de Borel en théorie de la mesure...) sont indécidables dans la théorie ZFC.

Les indécidabilités

confirment qu'il faut ajouter des axiomes au système ZFC, et les ajouter si possible de façon à rendre inopérant le forcing.

Un axiome X rend inopérant le forcing si l'on ne peut plus démontrer qu'à la fois HC (ou l'un des autres problèmes cités) et sa négation sont compatibles avec le système ZFC + X , autrement dit si l'ajout de X aux axiomes ZFC fixe une valeur de vérité à HC (ou à l'un des problèmes cités).

Hugh Woodin a pu établir que l'axiome $V=L$ ultime qu'il envisage serait compatible avec les axiomes de grands cardinaux, mais aussi qu'il rendrait inopérant le forcing. Ce serait donc un axiome en tout point satisfaisant pour supprimer le flou que ZFC laisse persister. La nouvelle théorie des ensembles démontrerait ainsi que l'hypothèse du continu est vraie, et serait d'après lui la plus raisonnable des théories des ensembles.



Paul Cohen (1924-2007)

Un argument supplémentaire soutient ce $V=L$ ultime: Hugh Woodin a montré en 2015 que cet axiome rendrait inopérant le forcing. Expliquons de quoi il s'agit. Pour démontrer que non-HC est compatible avec la théorie ZFC, la méthode de Paul Cohen s'appuie sur une technique nommée «forcing». Elle consiste, partant d'une structure vérifiant les axiomes ZFC, à en construire une autre qui vérifie ZFC+non-HC. Cette méthode est cependant très puissante et permet bien d'autres choses. Notamment, le forcing permet de construire, comme la méthode de Gödel, une structure qui vérifie ZFC et HC. En clair, le forcing est une méthode qui, à elle seule, montre l'indécidabilité de l'hypothèse du continu dans le système ZFC. Mieux, elle s'applique aussi à d'autres énoncés de mathématiques en algèbre, en analyse, etc., dont elle

montre l'indécidabilité dans la théorie ZFC (voir l'encadré ci-dessous).

Pour Hugh Woodin, la situation créée par ces indécidables est très insatisfaisante: qu'est donc cette science – les mathématiques fondées sur les axiomes ZFC – incapable de dire, pour nombre de ses énoncés, s'ils sont vrais ou faux? Cette situation suggère un nouveau critère pour juger si l'ajout au système ZFC d'un axiome X est bienvenu ou non: l'ajout sera bienvenu s'il rend inopérant le forcing de Paul Cohen, autrement dit si, en ajoutant X à ZFC, le forcing ne permet plus de choisir comme on veut entre l'hypothèse du continu et sa négation, ou, plus généralement, entre A et non-A pour les énoncés mathématiques A que le forcing montre indécidables dans la théorie ZFC.

Or l'axiome $V=L$ ultime rendrait inopérant le forcing, comme Hugh Woodin l'a montré. Avec le L ultime, une série de questions indécidables dans la théorie ZFC prendraient donc une valeur de vérité déterminée. Ainsi, le $V=L$ ultime attendu, qui serait compatible avec l'existence d'un cardinal supercompact, ne serait pas seulement un axiome compatible avec tous les axiomes de grands cardinaux (c'est une exigence *a priori*). Il limiterait aussi

l'impuissance des mathématiques fondées sur ZFC à déterminer, pour toute une classe intéressante d'énoncés, si ceux-ci sont vrais ou faux. C'est là un puissant faisceau de raisons pour adopter l'axiome $V=L$ ultime.

A LA RECHERCHE DU L ULTIME

La situation n'est pas réglée pour autant. En effet, il reste à trouver la bonne définition du L ultime, telle que l'axiome $V=L$ ultime soit compatible avec l'existence des grands cardinaux supercompacts. Plusieurs pistes sont aujourd'hui en cours d'exploration et l'on peut espérer que les mathématiciens disposeront bientôt d'un argument sérieux qui leur permettra enfin d'affirmer que l'hypothèse du continu est vraie, et qui lèvera aussi l'indécidabilité d'autres questions mathématiques.

Ces développements survenus depuis une dizaine d'années sont remarquables; ils confirment que la compréhension de l'infini est un travail mathématique qui progresse régulièrement et sensiblement. On constate que la découverte des vérités mathématiques ne consiste pas seulement à élaborer des démonstrations à partir d'axiomes évidents, faciles à formuler et jamais

Le CNRS a 80 ans! masterclass

— vendredi 25, samedi 26, dimanche 27 octobre de 14h à 19h

cité

sciences et industrie

Nouveau(x) monde(s), le Forum du CNRS

Pour célébrer ses 80 ans le CNRS propose une édition spéciale de son Forum. Des scientifiques, des artistes et des auteurs sont invités à répondre à la question: comment la recherche peut réparer, réinventer ou ré-enchanter notre monde?

des masterclass à ne pas manquer

avec:

En solo: Alain Aspect, Gérard Berry, Monica Brinzei, Alain Connes, Thomas Ebbesen, Albert Fert, Jean-Gabriel Ganascia, Julie Grollier, Serge Haroche, Edith Heard, Jean-François Lutz, Alain Prochiantz, Jean-Loup Puget, Jacques Stern

En duo: Barbara Cassin et Sophie Calle, Alexandre Gefen et Minh Tran Huy, Jacques Maddaluno et Pierre Buraglio, Frédéric Keck et Hervé di Rosa, Roberto Casati et Larry Kagan

Cité des sciences et de l'industrie
30, avenue Corentin-Cariou - 75019 Paris
② Porte de la Villette ③ Cité des sciences et de l'industrie
informations sur cite-sciences.fr

HUGH WOODIN ET LES GRANDS CARDINAUX

Pour Hugh Woodin (ci-contre), la hiérarchie des grands cardinaux (de grands ensembles infinis dont l'existence est posée par des axiomes complémentaires aux

intrinsèque et absolue que celle des nombres entiers eux-mêmes. C'est selon lui une découverte majeure. Il est convaincu que les axiomes des grands cardinaux ne conduiront jamais à une contradiction, ce qui a pour conséquence que les énoncés qu'ils permettent de prouver sur les nombres entiers sont vrais, et que ces axiomes ont donc des conséquences concrètes, physiques. Il affirmait ainsi (dans « The transfinite universe », chapitre du livre collectif Kurt Gödel and the Foundations of Mathematics, paru en 2011) : « Dans les dix mille ans à venir, on ne trouvera aucune contradiction au sein de ces théories affirmant l'existence de grands cardinaux. Il s'agit d'une prédiction spécifique et non ambiguë sur l'univers physique. Elle ne se réduit à aucune vérité connue antérieurement. Cette prédiction découle du développement de la théorie des ensembles au cours des cinquante dernières années [...]. Elle se fonde sur ma conviction que la conception de l'univers transfini est pleinement sensée. Je fais cette prédiction indépendamment de toute spéculation sur les dispositifs informatiques susceptibles d'être développés au cours des dix mille prochaines années et qui pourraient avoir les effets sur l'efficacité de la recherche en mathématiques. »



remis en cause, mais qu'elle est aussi le résultat d'une discussion et d'un affinement de notre conception de l'infini.

Cette discussion se nourrit à la fois de théorèmes et de points de vue qui renforcent notre intuition. Certaines options s'offrant aux mathématiciens sont ainsi éliminées non pas parce qu'on démontre qu'elles sont logiquement absurdes, mais parce qu'elles ne sont pas intellectuellement satisfaisantes – comme adopter brutalement l'axiome $V=L$. L'infini mathématique se montre intelligible et, comme pour d'autres sciences, nos connaissances dans ce domaine s'enrichissent d'année en année.

DES TRAVAUX ABSTRAITS AUX CONSÉQUENCES CONCRÈTES

Par ailleurs, considérant ces avancées de la théorie des ensembles depuis un demi-siècle, Hugh Woodin défend l'idée que la théorie des grands cardinaux et les travaux sur l'axiomatisation complémentaire de ZFC ne sont pas un travail purement abstrait, hors du monde. La compréhension nouvelle qu'ils donnent de l'infini a, selon lui, des « conséquences physiques ». Expliquons son point de vue.

Les axiomes de grands cardinaux se classent les uns par rapport aux autres et quand un axiome X est plus fort que l'axiome Y , alors X permet de prouver l'énoncé affirmant « le système $ZFC+Y$ est non contradictoire ». Or un tel énoncé s'exprime dans la théorie par une suite de symboles, et savoir s'il se

démontre n'est qu'une question combinatoire, que l'on sait toujours traduire en question portant sur les nombres entiers. Même si c'est étonnant, les axiomes de grands cardinaux ont donc des conséquences sur ce qu'on sait démontrer concernant les nombres entiers : l'infini joue sur le fini et plus on a d'infinis, plus on en sait sur le fini.

Ces effets sur les énoncés arithmétiques sont, d'une certaine façon, des effets physiquement testables. Penser qu'un axiome de grand cardinal X est acceptable – et Hugh Woodin clame que c'est le cas de beaucoup d'entre eux – signifie qu'en faisant fonctionner la théorie $ZFC+X$, on est certain qu'on ne tombera jamais sur une contradiction.

Or faire fonctionner une théorie, c'est dérouler les conséquences de ses axiomes, tâche que l'on peut confier à une machine. Croire en l'existence d'un grand cardinal, c'est donc croire que des machines utilisant le système ZFC complété par l'axiome correspondant à ce grand cardinal ne produiront jamais de résultats contradictoires tels que $0=1$. C'est donc un énoncé qui porte sur le monde physique. Il provient uniquement de notre compréhension de l'infini. En d'autres termes, les progrès de la théorie des ensembles enrichissent ce que nous pouvons affirmer de l'infini et donc du monde physique. Ainsi, ces avancées des mathématiciens et des logiciens tissent un fil qui relie l'infini le plus grand à la réalité matérielle, allant des objets les plus abstraits aux objets les plus concrets. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Woodin, **In search of ultimate-L**, *Bulletin of Symbolic Logic*, vol. 23(1), pp. 1-109, 2017.

J. Cavitt, **Set-theoretic geology, the ultimate inner model, and new axioms**, thèse soutenue à l'université Harvard, 2017.

J. Rittberg, **How Woodin changed his mind : New thoughts on the Continuum Hypothesis**, *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 69(2), pp. 125-151, 2015.

Conférence filmée de Hugh Woodin, 2015 :
<https://www.youtube.com/watch?v=nVF4N1ix5WI>

M. Heller et H. Woodin, **Infinity : New Research Frontiers**, Cambridge University Press, 2011.

H. Woodin, **Strong axioms of infinity and the search for V**, *Proceedings of the International Congress of Mathematicians 2010*, World Scientific, pp. 504-528, 2011.

DES SUJETS D'ACTUALITÉ, DES LECTURES CAPTIVANTES



Michio KAKU

Physicien et futurologue, cofondateur de la théorie des cordes.

1^{re} éd. 2019 • 448 p. • 9782807322332 • **24 €**

Les dernières avancées et perspectives sur le cerveau humain.



Jamie BARTLETT

Journaliste et expert britannique en médias sociaux et technologie.

1^{re} éd. 2019 • 224 p. • 9782807322301 • **19,50 €**

Un essai passionnant sur les enjeux de la révolution numérique



Christian de PERTHUIS

Créateur de la Chaire d'économie du climat à l'université Paris Dauphine.

1^{re} éd. 2019 • 256 p. • 9782807322097 • **19,50 €**

Une course contre la montre pour le climat



William NORDHAUS

Prix Nobel d'économie 2018 pour ses travaux sur l'économie du climat.

1^{re} éd. 2019 • 352 p. • 9782807325296 • **24,90 €**

Risques, incertitudes et solutions économiques face à un monde en réchauffement.



MAJESTÉ



JAMES E. DAHLGREN
maître de conférences dans le département
Wallace H. Coulter d'ingénierie biomédicale,
à l'institut de technologie de Géorgie et
à l'université Emory, à Atlanta, aux États-Unis

ESSENTIEL

Les propriétés uniques de l'ADN le rendent idéal pour le stockage d'informations de toutes sortes, comme des livres ou des films

Dans l'ingénierie biomédicale, on l'utilise par ailleurs comme un code-barres permettant de réaliser une multitude d'expériences simultanément, ce qui permet de générer des données à des vitesses sans précédent.

Cette technique offre la possibilité de tester plus rapidement et à moindre coût des pistes thérapeutiques, comme les traitements contre le cancer ou l'efficacité de vecteurs de médicaments

Une vidéo stockée dans l'ADN

Un cheval au galop enregistré dans l'ADN d'une bactérie, c'est possible ! Dispositif de stockage numérique, outil de gestion de données lors d'expériences, code-barres... l'ADN endosse des rôles de plus en plus variés

Des milliards d'années avant que les humains inventent le premier disque dur, l'information la plus précieuse – le patrimoine génétique – avait déjà son moyen de stockage : l'ADN. Au fil de l'évolution, toute forme connue de vie sur Terre s'est retrouvée dotée de cette molécule. Aujourd'hui, grâce aux récentes percées techniques qui nous permettent de lire et d'écrire l'ADN, des scientifiques voient dans cette vieille molécule un moyen de stocker d'autres types d'informations : celles produites à une vitesse exponentielle à l'ère du *big data*.

L'idée de recourir à l'ADN pour stocker des informations autres que les gènes n'est pas neuve. Après tout, les 0 et les 1 du code informatique se heurtent aux limites de la physique. Un événement récent l'illustre : Myspace, un réseau social qui fut un jour l'un des plus populaires, a perdu les données d'une décennie au cours d'une migration de serveur. Assurer la protection des données à long terme, comme celles d'un site web qui redémarre après une longue période d'arrêt, est difficile quand les techniques employées sont vulnérables. En outre, les quantités d'énergie requises sont considérables.

Or l'ADN a le potentiel de contourner ces problèmes. Sa structure en double hélice est parfaitement adaptée au stockage d'information.

Pour plusieurs raisons. D'abord, l'ADN est doté d'une très grande stabilité dans le temps : l'intégrité et la précision des informations sont donc garanties à long terme. Conservé dans un environnement froid et sec, l'ADN résiste plusieurs dizaines de milliers d'années, comme l'ont montré, en 2010, Svante Pääbo, à l'institut Max-Planck pour l'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, et ses collègues en analysant le génome d'un spécimen de Néandertal à partir d'un os. Mais l'aspect le plus fascinant de la double hélice réside dans son exceptionnelle capacité de densification. Chaque cellule du corps humain contient un noyau de diamètre 10 micromètres. Pourtant, si l'on déroulait l'ADN qu'il renferme, il atteindrait 2 mètres. Mises bout à bout, les molécules d'ADN de toutes les cellules d'un individu mesureraient quelque 100 000 milliards de mètres. En 2014, les scientifiques ont calculé que l'archivage de 455 exaoctets (455×10^{18} octets) de données tiendrait, en théorie, dans un gramme d'ADN. Cette densité de stockage est 1 million de fois plus importante que celle des disques durs.

Malgré ces avantages, des obstacles scientifiques, économiques et éthiques doivent être levés avant que l'ADN ne remplace les traditionnels disques durs. Néanmoins, il commence déjà à faire ses preuves en tant que technologie de l'information. Ainsi, en 2016,

L'entreprise de postproduction hollywoodienne Technicolor est parvenue à archiver 1 million de copies du vieux film *Le Voyage dans la Lune*, de Georges Méliès, sur des brins d'ADN de synthèse, au lieu des fragiles microfilms habituels. Plus récemment, des chercheurs ont utilisé l'ADN comme outil pour concevoir des thérapies géniques, accélérer le développement de médicaments anticancer et même produire le premier «enregistrement en direct» de l'expression des gènes d'une cellule. Dans ce domaine en constante évolution, l'ADN est au cœur de recherches non seulement pour ses capacités de stockage, mais aussi pour ses possibilités de production de données à des vitesses sans précédent.

DES CODES-BARRES ADN

Au cours des dernières années, de plus en plus de scientifiques ont utilisé l'ADN comme «enregistreur moléculaire» pour suivre les résultats de leurs expériences. Le procédé implique souvent l'emploi de «codes-barres ADN»: afin de suivre les résultats d'une expérience, les scientifiques ont recours à une séquence d'ADN connue qui endossera le rôle d'étiquette moléculaire. Ils associent par exemple un résultat expérimental à la séquence ACTATC de nucléotides (les constituants de l'ADN), un autre à la séquence TCTGAT, et ainsi de suite.

Le principe du code-barres ADN est né au début des années 1990, lorsque Richard Lerner et Sydney Brenner, alors tous deux en poste à l'institut de recherche Scripps, en Californie, ont eu l'idée de l'utiliser comme un moyen de suivre des réactions chimiques. Leur concept était extrêmement innovant, mais en avance sur leur temps: les techniques permettant de séquencer facilement l'ADN à des coûts réduits n'existaient pas encore. Le potentiel de cette méthode a donc été exploité plus tard, quand le séquençage de nouvelle génération est apparu.

En 2005, une étape majeure a été franchie: les chercheurs ont réussi à analyser 25 millions de nucléotides en seulement 4 heures. Les progrès se sont poursuivis rapidement: on sait désormais lire des millions de séquences d'ADN en même temps, ce qui signifie qu'il est techniquement possible de réaliser des milliers d'expériences simultanément. L'analyse des expériences à codes-barres ADN relève donc à présent de la gestion de données. Au lieu de réaliser leurs tests un à un, les chercheurs peuvent émettre 20 000 hypothèses, puis les tester toutes en même temps afin de déterminer lesquelles sont correctes.

Les biologistes ont été les premiers à recourir aux méthodes de codes-barres ADN. Puis, à mesure que le procédé est devenu plus accessible, des chercheurs issus d'autres domaines, dont l'ingénierie chimique et la science des matériaux, ont commencé à user de ces

Avec les codes-barres ADN, on peut tester 20 000 hypothèses en même temps

techniques pour suivre leurs expériences à des échelles inédites. Par exemple, dans mon laboratoire de l'institut de technologie de Géorgie, aux États-Unis, des ingénieurs utilisent des codes-barres ADN pour améliorer la conception et le fonctionnement de nanoparticules. Ces nanoparticules sont destinées, *in fine*, à agir comme vecteurs, c'est-à-dire comme moyens de transport d'un médicament jusqu'à des cellules malades. Les nanotechnologies, qui reposent principalement sur l'ingénierie physique et chimique, semblent *a priori* sans rapport avec l'ADN. Mais si on considère l'ADN comme un outil de suivi et d'archivage de n'importe quelle donnée, son intérêt devient évident.

TESTER 500 NANOPARTICULES EN MÊME TEMPS

Pour les chercheurs en nanomédecine, il est plus aisé de concevoir des expériences destinées à trouver de nouvelles thérapies que de les réaliser et d'analyser les résultats. En effet, de nombreux paramètres comme la taille, la forme, la charge et la composition chimique des nanoparticules influent sur l'efficacité avec laquelle ces dernières transporteront un médicament jusqu'à des cellules malades. En outre, ces facteurs interagissent les uns avec les autres, ce qui complique la tâche des chercheurs. Une solution évidente serait de tester chaque nanoparticule individuellement. Mais, selon des données issues d'entreprises pharmaceutiques qui ont développé de telles nanoparticules, ce type de tests coûte plusieurs centaines de millions de dollars.

C'est là que les capacités de stockage de l'ADN présentent un réel intérêt. Pour augmenter le nombre de nanoparticules testées, on peut concevoir des milliers de nanoparticules aux structures chimiques variées (de grandes sphères chargées positivement ou de petits triangles à charge neutre, par exemple) et assigner un code-barres ADN à chacune d'elles. La nanoparticule 1, de structure chimique 1, porte le code-barres 1. La nanoparticule 2, de

structure chimique 2, le code-barres 2, etc. On peut ensuite administrer des centaines de ces nanoparticules à des cellules malades. Afin d'identifier les nanoparticules les mieux adaptées pour livrer un médicament, il suffit de séquencer l'ADN de ces cellules pour y quantifier les codes-barres présents. L'échelle de ces expériences est complètement nouvelle en nanomédecine. Dans mon domaine, à l'issue d'une expérience traditionnelle – le test d'une seule condition expérimentale –, on recueille en général une à cinq données. Mais d'ici à la fin de l'année, à l'aide de tels codes-barres ADN, mon laboratoire espère tester l'efficacité de 500 nanoparticules comme vecteurs dans 40 types de cellules différentes. Cela revient à pratiquer 20 000 expériences en même temps.

Pour ce faire, nous avons aussi besoin d'un outil capable de gérer ces données et de nous aider à les analyser. Nous avons donc d'abord testé la fiabilité de notre jeu de données : à quel

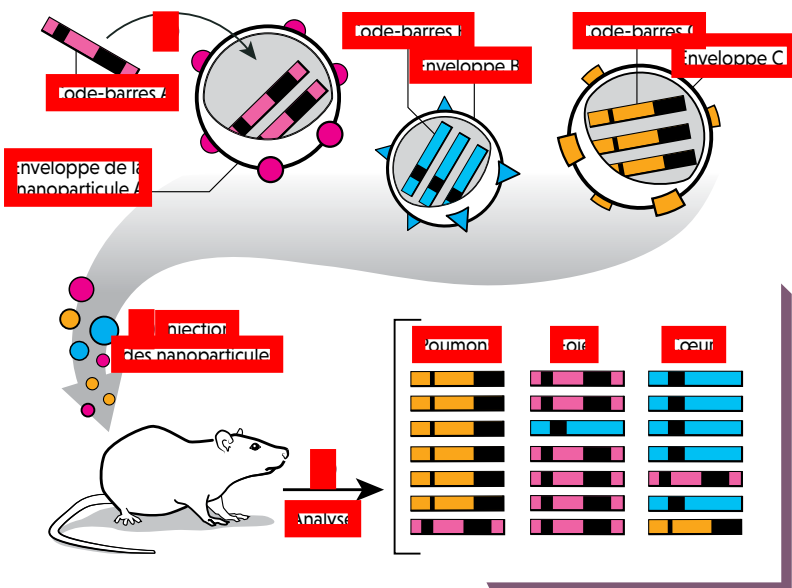
point les résultats issus d'une expérience reproduite plusieurs fois nous permettaient-ils de prédire l'issue d'une autre expérience ? Puis nous avons fait appel aux statistiques pour savoir si certaines caractéristiques des nanoparticules, comme leur taille, influencent sur l'introduction du médicament dans les tissus cibles. Nous avons ainsi découvert que la chimie des nanoparticules, et non leur taille, affectait leur efficacité. Avec cette technique, nous espérons découvrir de nouvelles thérapies géniques plus rapidement, en utilisant moins de ressources. L'un de nos objectifs est d'identifier une nanoparticule capable de cibler spécifiquement les tumeurs. Cela réduirait les effets secondaires des traitements habituels, telles les nausées et la perte de cheveux.

Nous avons déjà eu quelques succès. En 2018, en utilisant cette approche, nous avons rapidement identifié des nanoparticules capables de livrer des médicaments aux cellules qui tapissent les vaisseaux sanguins (les cellules endothéliales), ainsi qu'à de nombreux types de cellules immunitaires. Or, avec les traitements existants, nombre de protéines des cellules immunitaires sont souvent hors de portée des agents thérapeutiques – de petites molécules ou des anticorps. Grâce à nos découvertes, les atteindre et modifier leur activité devient possible. Ces travaux ont intéressé de nombreux chercheurs en thérapie génique. Nous avons donc décidé de fonder GuideRx, une entreprise de codes-barres ADN destinée au développement de nouvelles thérapies géniques.

TRACER LES NANOPARTICULES AVEC DES CODES-BARRES ADN

Les thérapies géniques consistent à injecter du matériel génétique dans les cellules d'un organisme grâce à un vecteur – un moyen de transport capable de véhiculer le matériel génétique jusqu'au noyau des cellules.

Les vecteurs les plus courants sont des virus, ou, dans certains cas, parfois des nanoparticules. Auparavant, tester l'efficacité de nanoparticules comme vecteurs était long et laborieux. Mais grâce aux codes-barres ADN, ces recherches sont beaucoup plus rapides : il est possible de réaliser des expériences avec des centaines de particules différentes en même temps. Pendant la phase de test (ci-dessous), on place un code-barres ADN différent à l'intérieur de l'enveloppe de chaque type de nanoparticule (1). Puis on injecte simultanément de nombreuses nanoparticules à un animal de laboratoire (2). Ensuite, on séquence l'ADN des cellules de l'animal pour déterminer quel code-barres elles contiennent : on sait ainsi quelle nanoparticule a atteint quel tissu (3). Grâce à cette méthode, les chercheurs identifient le modèle de nanoparticule qui convient le mieux selon l'objectif thérapeutique. Et le ciblage plus spécifique minimise les effets secondaires.



ETUDIER LES RESISTANCES DES CELLULES CANCÉREUSES

La technique des codes-barres ADN est devenue tellement commune que même au sein d'un seul domaine, elle est employée de diverses façons. C'est le cas, par exemple, en biologie du cancer, où l'on examine comment les mutations génétiques conduisent à des cancers et de quelle façon contrer les mécanismes en jeu. La résistance aux médicaments que les cellules cancéreuses développent chez les patients au fil du traitement est un défi majeur dans ce domaine.

En 2016, dans le laboratoire de Todd Golub, à l'université Harvard, des scientifiques ont eu recours aux codes-barres ADN pour étudier ces résistances. À l'aide d'un virus, ils ont inséré de façon permanente un code-barres ADN directement dans le génome de cellules cancéreuses. Une cellule cancéreuse de type A a reçu une séquence code-barres A, une cellule cancéreuse de type B, un code-barres B, etc. Les scientifiques ont ensuite mélangé les différentes cellules et les ont traitées avec un médicament contre le cancer. Une cellule sensible au traitement mourait ou ne se divisait plus. En revanche, si une cellule développait une

[illegible]

résistance, elle se divisait rapidement. Par conséquent, au fil du temps, la quantité de codes-barres A, par exemple, augmentait si la cellule de type A devenait résistante au médicament ou diminuait si elle était neutralisée. En séquençant tous les codes-barres des cellules survivantes au cours du temps, le laboratoire a quantifié les réponses de chaque type cellulaire au médicament.

Quelques mois plus tard, ce fut le tour de l'équipe de Monte Winslow, de l'université de Stanford, de mener des recherches à l'aide de codes-barres ADN, cette fois pour trouver des inhibiteurs de métastases dans le cancer du pancréas. Les biologistes ont d'abord produit des lignées de cellules cancéreuses à partir de

cardiovasculaires. Dans les exemples cités plus haut, remplacez le mot « cancer » par une autre maladie et le mot « résistance » par n'importe quelle réponse à un médicament et vous percevrez l'étendue de leur potentiel.

ENCODER UN FILM DANS L'ADN D'UNE BACTÉRIE

Ce n'est pas tout. Les approches utilisant les codes-barres ADN reposent sur la lecture de séquences connues d'ADN. Mais cela suppose de préalablement « écrire » ces séquences. Or, jusqu'à récemment, la synthèse de séquences d'ADN restait compliquée dès qu'elles étaient un peu trop longues. Il était donc inenvisageable de convertir d'autres formes d'informations – images, films, états biologiques... – en séquences de nucléotides que l'on pourrait stocker et lire plus tard. Mais de nouvelles techniques d'écriture offrent désormais cette possibilité. Elles reposent sur les outils d'édition du génome dérivés du système CRISPR.

Ce système est un moyen de défense des bactéries contre les attaques de virus. Lorsqu'un virus infecte une bactérie, il se fixe à sa surface et introduit son ADN (ou ARN) à l'intérieur. Mais la bactérie garde alors une trace de l'attaque en insérant des extraits de cet ADN (ou ARN) étranger dans une région de son propre génome – une sorte de bibliothèque nommée CRISPR. En cas de nouvelle attaque du même virus, la bactérie le reconnaît alors grâce à sa bibliothèque CRISPR et détruit son matériel génétique avant qu'il n'ait le temps de se répliquer.

En 2017, dans le laboratoire du généticien George Church à l'université Harvard, Seth Shipman, aujourd'hui à l'université de Californie à San Francisco, a exploité ce mécanisme de défense pour enregistrer une image de main dans le génome d'une population de bactéries *Escherichia coli* (voir l'encadré page ci-contre). Dans de précédents travaux, l'équipe avait montré qu'il suffisait d'induire l'expression de deux protéines de ces bactéries – Cas1 et Cas2 –, associées au fonctionnement du système de défense CRISPR, pour forcer les cellules à insérer de courtes séquences d'ADN de synthèse dans leur bibliothèque CRISPR. Seth Shipman et ses collègues ont donc recommencé, cette fois avec des fragments d'ADN qui encodent les pixels de l'image.

En séquençant l'ADN d'*E. coli*, ils ont retrouvé l'image initiale avec une précision de plus de 90%. Ils ont ensuite reproduit l'expérience, mais avec une difficulté supplémentaire : ils ont ajouté les séquences d'ADN à des temps différents et mis au point une méthode pour enregistrer la position de ces séquences les unes par rapport aux autres. En retrouvant l'ordre d'ajout des séquences au sein du

Ils ont encodé une série d'images dans l'ADN et l'ont restituée

tumeurs primaires et de métastases provenant de modèles murins de la maladie. Parmi elles, ils n'ont gardé que celle qui, injectée chez des souris, formait le plus facilement des métastases. Puis, à l'aide d'un virus, ils ont introduit une étiquette d'ADN dans 96 lignées cellulaires issues de la lignée sélectionnée, avant de disposer chacune d'elles dans un puits distinct. Ils ont ensuite ajouté un inhibiteur potentiel dans chaque puits. Ainsi, chaque molécule était associée à un code-barres différent. Les scientifiques ont alors immédiatement injecté les cellules dans les vaisseaux sanguins de souris et suivi, grâce aux codes-barres, quelles cellules se sont développées dans les poumons. En identifiant les codes-barres présents ou absents des poumons, ils ont ainsi mis en évidence plusieurs molécules qui favorisaient ou empêchaient les métastases. Cette méthode leur a permis de tester plus de 700 inhibiteurs d'enzymes sur 20 fois moins de souris.

Dans ces approches, l'ADN est à la fois un enregistreur moléculaire – une étiquette qui permet de suivre des expériences menées simultanément et les repérer les unes par rapport aux autres – et un générateur de données, puisqu'il offre la possibilité de réaliser de nombreuses expériences en même temps. Les implications sont stupéfiantes : les mêmes techniques peuvent être appliquées contre les maladies auto-immunes, neurologiques ou

génomique de la bactérie, ils sont parvenus à enco-
der une série d'images dans l'ADN et à la resti-
tuer. Les chercheurs ont ainsi enregistré un
extrait de la première séquence d'animation
créée en 1878 par le photographe britannique
Eadward Muybridge, qui met en scène un che-
val au galop.

ENREGISTRER EN TEMPS REEL L'EXPRESSION DES GÈNES

Plus récemment encore, en 2018, des cher-
cheurs du laboratoire de Randall Platt, à
l'École polytechnique fédérale de Zurich, en
Suisse, ont mené ces approches encore plus
loin en ciblant non plus l'ADN, mais l'ARN
messager. Cette molécule est un cousin molé-
culaire clé de l'ADN, intermédiaire indispen-
sable entre les gènes portés par l'ADN et la
synthèse des protéines qu'ils codent. Au lieu
de stocker des images dans des séquences
d'ADN de synthèse, les chercheurs ont utilisé
le système CRISPR d'une bactérie pour enre-
gistrer en temps réel les ARN messagers qu'elle
produisait, et donc l'expression de ses gènes.
L'ensemble de tous les ARN messagers pré-
sents dans une cellule à un instant donné per-
met de savoir quelles protéines sont produites,
et ainsi de mieux comprendre le fonctionne-
ment de la cellule étudiée.

Afin d'enregistrer dans le génome d'une cel-
lule les séquences des ARN messagers qu'elle a
produits à divers moments, l'équipe de Randall
Platt a tout d'abord testé différentes protéines
Cas (associées au système CRISPR) issues de
nombreuses souches bactériennes distinctes.
Elle a ainsi découvert que les protéines Cas1 et
Cas2 de la bactérie *Fusicatenibacter saccharivo-
rans* étaient capables de convertir l'ARN mes-
sager en ADN et de l'encoder dans sa
bibliothèque CRISPR. Les chercheurs ont uti-
lisé ce procédé afin d'enregistrer le comporte-
ment d'une cellule à la suite de différents
événements: un stress oxydatif, des conditions
acides et l'exposition à un herbicide.

Ces résultats sont particulièrement intéres-
sants: ils fournissent la preuve qu'il est possible
d'enregistrer dans le génome d'une cellule, à un
instant donné, les gènes qu'elle exprime, en vue
d'une analyse ultérieure. Le laboratoire de
Randall Platt continue d'améliorer cette tech-
nique. L'enregistrement en temps réel de l'ex-
pression des gènes pourrait s'étendre à d'autres
domaines et permettre, par exemple, de suivre
des événements qui rendent cancéreuse une cel-
lule ou encore d'observer comment une cellule
répond à une infection au cours du temps.

Alors que l'ADN est utilisé pour produire,
suivre et stocker de l'information dans des
domaines de plus en plus nombreux, on peut
se demander s'il a la capacité de rivaliser avec
les dispositifs électroniques usuels de stockage
et de prendre en charge l'ensemble des

Conservé au sec et au frais, l'ADN résiste des dizaines de milliers d'années

données générées par les humains. Pour l'in-
stant, la réponse est non: disques durs et cartes
mémoires sont bien plus adaptés pour conser-
ver des informations que le plus avancé des
systèmes génétiques.

En même temps, comme toute technologie,
les appareils électroniques conventionnels ont
leurs limites. Ils prennent de la place et néces-
sitent des conditions environnementales par-
ticulières. Et même les dispositifs les plus
robustes tiennent rarement plus de quelques
décennies. À cause de ces obstacles, il devien-
dra de plus en plus difficile de conserver toutes
les données que nous produisons.

Au contraire, l'ADN résiste des dizaines de
milliers d'années s'il est conservé dans des
environnements frais et secs. Il est aujourd'hui
couramment stocké à -20°C , voire à -80°C
dans les laboratoires, mais pourrait aussi être
conservé sous des chaleurs extrêmes que les
appareils électroniques ne supportent pas.
En 2015 en effet, Robert Grass et Wendelin
Stark, tous deux à l'École polytechnique fédé-
rale de Zurich, ont montré que des molécules
d'ADN encapsulées dans des billes de verre
résistaient à une température de 70°C pendant
une semaine sans qu'aucune erreur n'apparais-
se. Et si les disques durs permettent de
stocker 19 gigaoctets par centimètre carré, des
estimations récentes suggèrent que l'ensemble
des informations générées dans le monde tien-
draient, en théorie, dans moins de 1 kilo-
gramme d'ADN.

UNE RECHERCHE A ENCADRER

Il reste du chemin à parcourir avant que le
stockage sur ADN devienne courant. Le pre-
mier obstacle réside dans l'extraction des infor-
mations: si elle est presque instantanée à partir
d'un disque dur, récupérer des données enco-
dées dans l'ADN requiert du séquençage, ce qui
peut prendre de quelques minutes à une jour-
née entière. Et même si les séquenceurs ont
connu des avancées considérables ces der-
nières années, ils restent imposants et chers
par rapport aux disques durs.

BIBLIOGRAPHIE

C. D. Sago et al., High-throughput in vivo screening of functional mRNA delivery identifies nanoparticles for endothelial cell gene editing, PNAS, vol. 115(42), pp. F9944-F9952. 2018.

F. Schmidt et al., Transcriptional recording by CRISPR spacer acquisition from RNA, Nature, vol. 562, pp. 380-385. 2018.

S. L. Shipman et al., CRISPR-Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria, Nature, vol. 547, pp. 345-349. 2017.

S. M. Church et al., Next-generation digital information storage in DNA, Science, vol. 337, p. 1628. 2012.

Ces limites ne sont pas les seules considérations à prendre en compte. La banalisation du séquençage aura des répercussions sur le quotidien: tracer des personnes deviendra plus facile et de nouvelles vulnérabilités quant à la sécurité des données feront leur apparition. Les exemples d'atteinte à la vie privée sont déjà légion. Aux États-Unis, le séquençage de l'ADN est utilisé par les départements de police avec peu de vigilance. Lorsqu'elle enregistre l'ADN de personnes en état d'arrestation, même pour des crimes mineurs, la police enrichit de vastes banques de données génétiques. Cette procédure est considérée par certains comme l'équivalent moderne des empreintes digitales. Pourtant, il y a une différence majeure: les empreintes digitales n'identifient qu'un seul individu. En revanche, si une personne fournit son ADN, elle fournit une information qui peut permettre d'identifier n'importe quel membre de sa famille. En Chine, sous le couvert d'un programme de santé, des agents ont rassemblé des informations génétiques concernant près de 36 millions de personnes sans que l'on ne connaisse l'usage que le gouvernement en fera. Or cette population compte notamment de nombreux Ouïgours, les membres d'un groupe ethnique musulman victime de discriminations...

Jusqu'à aujourd'hui, les principales préoccupations sur le stockage d'informations génétiques concernaient le patrimoine individuel et la protection de l'identité. Mais dans le futur, si les informations comme des données de santé, les contrats légaux et d'autres histoires individuelles sont stockées dans de l'ADN, cela soulèvera de nombreuses questions en termes de sécurité physique des données et de cybersécurité. Des quantités si importantes d'informations rentreront dans un espace si petit: comment distribuer les données pour éviter qu'elles soient concentrées en un seul endroit? Et même si l'extraction devient plus simple, comment accèdera-t-on puis stockera-t-on à nouveau les données sans les exposer à des piratages malveillants ou à des pertes accidentelles?

L'ampleur du travail scientifique et éthique à accomplir me décourage parfois. Je pense alors aux frères Wright. Leur premier vol a duré 12 secondes, durant lesquelles ils ont parcouru 37 mètres. Soixante-six ans plus tard, les humains ont posé le pied sur la Lune. Ces exploits me laissent espérer que nous saurons exploiter le potentiel de l'ADN au cours des prochaines décennies et mettre tout en œuvre pour que ce potentiel soit mis au service du bien commun. ■

RENCONTRE

Samedi 5 octobre – 15h

PoulpeFiction – Chronique d'une intelligence hors du commun

Dans le cadre de l'exposition *Océan, une plongée insolite* à la Grande Galerie de l'Évolution

Avec : **Laure Bonnaud-Ponticelli**, Biologiste, enseignante-chercheuse, spécialiste des céphalopodes, Muséum et **Aline Richard Zivohlava**, Journaliste scientifique pour le site The Conversation France, auteure de *Dans la peau des bêtes* paru aux éditions Plon (2019).

Dès 8 ans - sur inscription : iardindesplantesdeparis.fr

Rotonde de la Ménagerie

Ménagerie, zoo du Jardin des Plantes - Paris 5

Lundi 7 octobre – 19h

L'agroécologie en pratique : trajectoires et expériences d'agriculteurs.trices

Moderatrice : **Margaux Alarcon**, doctorante, Muséum

Avec : **Marie Françoise Bizard-Pasquet**, agricultrice gérante et membre de l'Académie d'Agriculture, **Kevin Morel**, ingénieur agronome, AgroParisTech Paris, **Véronique Lucas**, sociologue et agroécologue, INRA Montpellier

Lundi 14 octobre – 19h

De l'océan à l'assiette

Moderateur : **Christophe Lavelle**, biophysicien, commissaire de l'exposition *Je mange donc je suis* du Musée de l'Homme

Avec : **Guy Duhamel**, ichtyologue, Muséum, **Laurent Nicolle**, armateur, Groupe Le Garrec, **Elisabeth Vallet**, directrice Éthique Océan, **Julien Dumas**, chef du Lucas Carton, Paris

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution

36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

LES { Partagez les savoirs } RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur iardindesplantesdeparis.fr

POUR LA SCIENCE



L'ESSENTIEL

► Ces dernières années, un grand nombre d'études de psychologie ont échoué à répliquer les résultats de recherches précédentes.

► Une crise en a découlé, mais ces échecs sont aussi le signe que la psychologie s'est résolument engagée dans la voie de l'autocorrection.

► Loin d'en être affaiblie, elle en sort donc renforcée. D'autant plus que les effets classiques, corroborés par tout un faisceau d'études, tiennent bon.

L'AUTEUR



FRANÇOIS MAQUESTIAUX
professeur de psychologie cognitive à l'université de Franche-Comté, à Besançon, et membre de l'institut universitaire de France

Le grand ménage de la psychologie

Non, vous ne vivrez pas plus longtemps si vous souriez sur les photographies. Non, tenir un crayon entre les dents ne modifie pas votre jugement... Nombre de conclusions d'études menées en psychologie doivent être soumises à un examen plus approfondi. Depuis quelques années, les chercheurs de cette discipline s'y attellent.

« **L**a plupart des résultats scientifiques publiés sont faux » : tel est le titre provocateur d'un article publié en 2005 par John Ioannidis, professeur de médecine à l'université Stanford, aux États-Unis. De fait, plusieurs cas de fraude seront découverts par la suite : quelques années après le cri d'alarme de John Ioannidis, le psychologue néerlandais Diederik Stapel sera par exemple radié de l'université de Tilburg, à l'âge de 45 ans, pour avoir inventé ou trafiqué les résultats de 55 de ses 137 publications scientifiques. Mais le problème dépasse largement ces richesses manifestes. Il porte sur la nature et l'organisation même de la recherche dans plusieurs disciplines, qui entraînent la publication de nombreux « faux positifs » – des travaux qui semblent démontrer un phénomène, mais de façon illusoire (voir l'encadré page 48).

Si la question concerne toutes les disciplines expérimentales, les projecteurs se sont braqués sur la psychologie en 2015, avec la parution dans la revue *Science* d'une étude de

grande ampleur, associant 270 chercheurs et visant à reproduire 100 expériences. Les résultats étaient alarmants : seulement 36 % des répliques menées ont confirmé les résultats originaux. Dès 1935, le philosophe viennois Karl Popper soulignait que la reproductibilité d'une découverte est le gage de sa qualité scientifique ; cette étude a donc déclenché un tsunami : la psychologie serait-elle une pseudo-science ? Les deux tiers de ses résultats seraient-ils à jeter à la poubelle ?

UNE CURE DE REPLICATION EST LANCÉE

En réalité, ce qui pouvait passer pour une catastrophe est une excellente nouvelle, puisque la psychologie est l'une des rares disciplines à s'être engagée dans la voie de l'autocorrection. Depuis un peu moins d'une dizaine d'années, une véritable cure de réplique a été lancée, afin de vérifier les effets allégués par un certain nombre de travaux. Il s'agit de reproduire les études originales à l'identique (même matériel, mêmes tâches, même environnement) ou avec de légères adaptations.



De nombreux laboratoires se sont lancés dans l'aventure, soit seuls, soit en s'associant pour multiplier les reproductions d'une même expérience. Auparavant réticentes à publier ces études de réplication, des revues de premier plan, comme *Psychological Science*, ont créé des rubriques spéciales qui leur sont destinées. Ainsi, entre 2013 et 2017, la proportion des publications scientifiques qui portent sur le thème de la réplication a augmenté de 50% dans les revues de psychologie, comme l'ont montré David Huber et ses collègues de l'université du Massachusetts, en passant en revue les bases de données qui répertorient ces publications.

Où en sommes-nous, moins d'une décennie après? Il y a eu inévitablement une forme d'hécatombe. Dana Carney, de l'université Columbia, et ses collègues sont au nombre des victimes. En 2010, ces chercheurs avaient trouvé qu'une posture victorieuse – le *power posing*, qui consiste à se tenir debout bras en V levés vers le ciel – rend effectivement plus conquérant: cette posture augmenterait le taux de testostérone (l'hormone associée au pouvoir), diminuerait le taux de cortisol (l'hormone associée au stress) et accroîtrait le sentiment de puissance et la tolérance au risque. Mais cinq ans plus tard, Eva Ranehill, de l'université de Zurich, et ses collègues ont reproduit l'étude auprès d'un échantillon nettement plus grand de participants (200 au lieu de 42 dans l'étude originale). Cette fois pour conclure à une absence de résultat.

64 %

DES TENTATIVES DE REPLICATION

effectuées sur une sélection de 100 études publiées dans trois revues de psychologie n'ont pas retrouvé les résultats originaux. Ce vaste travail de réplication a été réalisé par Open Science Collaboration, un collectif regroupant un grand nombre de chercheurs, et publié en 2015 B. A. Nosek et al., «Estimating the reproducibility of psychological science», *Science*, vol. 349, n°6235, 2015.

De nombreux travaux amusants ou étonnants de ce type ont fait l'objet de tentatives de réplication, qui ont souvent porté sur les découvertes les plus en vue, celles que l'on pourrait qualifier de «trop belles pour être vraies». Au final, c'est un inventaire à la Prévert qui s'en va rejoindre les cimetières de la science.

Des chercheurs avaient ainsi «prouvé» les faits suivants: on évalue la pente d'une colline comme plus inclinée de 13 degrés quand on pense à un lourd secret (parce qu'on se sent écrasé), on juge une image plus amusante quand on tient un crayon entre les dents (parce qu'on est forcé à sourire et que cela nous influence en retour), on améliore ses performances au Trivial poursuit en pensant à un professeur plutôt qu'à un hooligan (parce qu'on active un stéréotype associé à l'intelligence), les gens qui sourient sincèrement sur les photographies vivent plus longtemps (ce serait le signe d'une tendance à éprouver des émotions positives et à bien résister au stress, d'où des conséquences positives sur la santé)... Or les expériences de réplication menées au cours des huit dernières années ont invalidé toutes ces «découvertes».

UNE PLUS GRANDE PUISSANCE STATISTIQUE

Fait important: ces expériences avaient plus de puissance statistique que les études originales. Elles ont effectué leurs tests sur beaucoup plus de participants et ont parfois regroupé plusieurs équipes, qui ont uni leurs ressources et

VICTIMES ET SURVIVANTS

Les expériences de réplication récentes ont invalidé de multiples résultats en psychologie... mais en ont confirmé bien d'autres ! Voici quelques exemples



LE SOURIRE PREDIT LA LONGEVITE

l'étude originelle: En 2010, les psychologues américains Ernest Abel et Michael Kurger analysent les photographies d'anciens joueurs de baseball, examinent leur date de décès et concluent que ceux qui souriaient ont vécu plus longtemps.

la réplication: En 2018, Michael Dufner, de l'université de Leipzig, reproduit l'étude en élargissant considérablement le nombre de photographies analysées. Il ne trouve aucun lien entre la longévité et le sourire.



UN CRAYON CHANGE LE JUGEMENT

l'étude originelle: En 1988, l'équipe du psychologue allemand Fritz Strack montre qu'on juge une image plus amusante lorsqu'on tient un crayon dans la bouche, car cela nous force à sourire.

la réplication: En 2016, 17 laboratoires et 55 chercheurs s'associent pour reproduire l'expérience. Aucun ne trouve d'effet du crayon dans la bouche.



LES MOTS FONT DE L'OMBRE AUX IMAGES

l'étude originelle: en 1990, Jonathan Schooler et Tonya Engstler-Schooler montrent que lorsqu'on a aperçu le visage d'un cambrioleur, on peine davantage à le reconnaître parmi une série de portraits si on a d'abord essayé de le décrire par des mots. La description verbale perturberait le souvenir visuel du visage.

la réplication: en 2014, 90 chercheurs issus de 33 laboratoires différents reproduisent l'expérience et confirment la réalité de cet effet d'ombrage.

DES ERREURS EN SCIENCE, POURQUOI ?

Médecine, psychologie, génétique, neurosciences, économie... Dans bien des domaines, les erreurs scientifiques abondent. Pourquoi avons-nous tant de mal à les éviter ?

La revue *PLoS Medicine* et abondamment commenté par la communauté scientifique, John Ioannidis, de l'université de Stanford, avance trois raisons.

La première est inhérente à la science : il n'y a pas de vérité absolue et toute conclusion est énoncée moyennant un certain risque de se tromper, qu'on cherche à rendre le plus petit possible. Par convention, ce risque d'erreurs acceptable oscille entre 1 et 5 % (il est généralement fixé à 5 % en psychologie). Si une étude concluait que l'adoption d'une posture à la Usain Bolt accroît le taux de testostérone, il y aurait donc 5 % de chances qu'elle se trompe et que ce qu'elle a observé soit le fruit du hasard. C'est le principe du faux positif.

La deuxième raison est un biais de publication : les revues favorisant à outrance les recherches qui ont montré l'existence d'un effet donné. L'absence d'effet est pourtant également une information précieuse ! Ce biais peut induire des comportements discutables de la part des scientifiques, comme prendre certaines libertés dans la façon de conduire, d'analyser et de rapporter les résultats d'une recherche ; ou négliger de nombreuses données, à jamais perdues pour la science.

Enfin, la troisième raison a trait au contexte actuel de la recherche scientifique. Tous les scientifiques connaissent l'expression *publish or perish*, littéralement « publier ou périr » : pour décrocher un poste ou des financements, il faut publier le plus possible et le faire dans des revues de préférence influentes. Ce qui incite certains à enjoliver les résultats, voire à en inventer...

Leurs efforts afin de répliquer une étude donnée. Cette méthode « multilaboratoire » est en progression depuis 2015. Pour l'étude du stylo dans la bouche, par exemple, ce sont pas moins de 17 laboratoires et 54 chercheurs, coordonnés par Eric-Jan Wagenmakers, de l'université d'Amsterdam, qui se sont associés ! Dix-sept laboratoires, 17 répliques directes, mais pas une ne trouve un effet du sourire forcé sur le jugement. La conclusion est autrement convaincante que celle d'une équipe isolée.

Mais ces répliques ne font pas qu'envoyer des résultats au tapis : elles se révèlent parfois riches d'enseignement – comme d'ailleurs bien d'autres expériences qui échouent à démontrer le phénomène étudié. C'est ce que nous avons constaté lors de travaux autour de la célèbre illusion visuelle d'Ebbinghaus, selon laquelle un même cercle apparaît plus gros lorsqu'il est entouré de petits cercles plutôt que de grands. En 2012, Jessica Witt, de l'université Purdue, et ses collègues avaient reproduit l'illusion sur un tapis de minigolf et montré que lorsqu'on leur faisait paraître le trou plus large, les joueurs réussissaient mieux à y envoyer la balle.

Mais par la suite, plusieurs indices m'ont amené à questionner sa validité. D'une part,

l'autres expériences cherchant à exploiter l'illusion visuelle d'Ebbinghaus – dont une à laquelle j'ai participé – n'y parvenaient pas. D'autre part, en examinant plus en détail l'étude originale, je me suis aperçu que les auteurs avaient exclu les données de 4 des 36 participants et ignoré certaines configurations de l'expérience qui contredisaient leurs conclusions. Cette pratique parfois nommée *p-hacking* est très discutable : elle revient à triturer les données jusqu'à les faire parler dans le sens désiré !

Avec mes collègues Marie Mazerolle et Guillaume Chauvel, nous avons alors reproduit l'expérience sans rien trafiquer (voir l'encadré page 50). Les résultats ont montré que les participants percevaient bien l'un des trous comme plus gros, mais que cela n'avait aucune influence sur leurs performances. L'effet de l'illusion d'Ebbinghaus sur le succès au golf semble donc chimérique.

Toutefois, cette réplique avortée nous a permis de trancher une controverse sur le fonctionnement du système visuel, résultant d'un certain nombre d'expériences aux résultats opposés : les voies cérébrales qui permettent la formation d'une image consciente sont-elles dissociées de celles qui assurent le contrôle visuel d'une action ? Nos résultats indiquent que c'est bien le cas, car les participants ne visaient pas mieux le trou même s'ils le percevaient comme plus gros. Pour planifier un acte moteur (le tir au golf), le cerveau se fonde donc sur une représentation visuelle inconsciente du but à atteindre (le trou), qui n'est pas influencée par l'illusion d'Ebbinghaus et qui est donc distincte de l'image consciente.

LA RESISTANCE A LA TENTATION DANS L'ENFANCE NE PRÉDIT PAS LA RÉUSSITE

Si les expériences de réplique nous en apprennent beaucoup, c'est aussi parce que les chercheurs en profitent souvent pour introduire des mesures complémentaires, absentes de l'étude originale. Ce fut le cas de Tyler Watts, de l'université de New York, et de ses collaborateurs, qui ont tenté de répliquer le célèbre test du marshmallow. Ce test a été imaginé par le psychologue d'origine autrichienne Walter Mischel dans les années 1970. Le chercheur a laissé des enfants de 4 à 5 ans seuls avec un marshmallow, en leur disant qu'il reviendrait plus tard et leur en donnerait un deuxième s'ils n'avaient pas mangé le premier. Mischel a suivi ces enfants pendant plusieurs décennies et trouvé que ceux qui avaient résisté à la tentation réussissaient mieux dans les domaines variés : école, travail, relations sociales... Ils étaient en outre moins vulnérables aux addictions.

Avec le temps, cette expérience est devenue un véritable symbole de l'importance de la maîtrise de soi. Dès lors, il y eut un coup de tonnerre quand Tyler Watts et ses collègues publièrent leur étude en 2018 : celle-ci, menée auprès d'un très large échantillon de participants (918 au total) suivis pendant plus d'une décennie, nuancait très fortement les résultats de Mischel. Si le test du marshmallow prédit bien en partie la réussite future, c'est de façon bien plus faible que ne l'a trouvée l'étude originale. Autrement dit, rien n'est fixé à l'âge de 5 ans et de nombreux autres facteurs peuvent moduler les trajectoires individuelles.

Cela ne signifie pas que la maîtrise de soi ne joue aucun rôle. Bien d'autres travaux confirment que cette capacité favorise la réussite. Mais d'une part, elle peut évoluer sensiblement, les facteurs environnementaux ayant une grande influence. Et d'autre part, la mesure procurée par le test du marshmallow serait trop grossière. La maîtrise de soi est une construction psychologique complexe, qui dépend de toute une série de paramètres : le contrôle de ses impulsions, mais aussi la mémoire de travail (pour garder à l'esprit l'objectif à atteindre), la planification, l'attention... En mesurant la capacité à différer une récompense de façon globale, le test du marshmallow n'évaluerait qu'imparfaitement la maîtrise de soi et ne rendrait pas compte de la façon dont ses composantes peuvent interagir, se compenser, s'enrichir.

Les chercheurs ont d'ailleurs mesuré plusieurs d'entre elles chez les enfants, ce qui leur a permis de mieux comprendre leur influence. Ils ont ainsi montré que les différences précoces dans la capacité à maîtriser son attention et son impulsivité n'expliquent qu'une petite partie des variations dans la réussite future. Il est donc capital d'éduquer aussi les autres aptitudes cognitives. Des programmes d'enseignement de la maîtrise de soi sont déjà en phase de test. Nul doute que ces résultats seront précieux pour les affiner.

LES EFFETS CLASSIQUES DE LA RÉSISTANCE

Fort heureusement, les expériences de réplication n'échouent pas toujours. Bon nombre d'entre elles confirment les résultats originaux. C'est ce qui s'est produit dans le cas de «l'ombrage verbal», un phénomène découvert en 1990 par Jonathan Schooler et Tonya Engstler-Schooler, aux États-Unis. Ces chercheurs ont montré qu'après avoir visionné une vidéo simulant un braquage, on peine davantage à reconnaître le visage du cambrioleur quand on a l'abord essayé de le décrire. Cela créerait en effet des représentations verbales du souvenir (une «ombre verbale»), qui viendraient ensuite interférer avec le souvenir initial, encodé dans un

format perceptif. Alors que Jonathan Schooler lui-même peinait à croire à cet effet, une expérience publiée en 2014, à laquelle 33 laboratoires et 90 chercheurs ont pris part, a levé ses doutes : le phénomène d'ombrage verbal est bien réel.

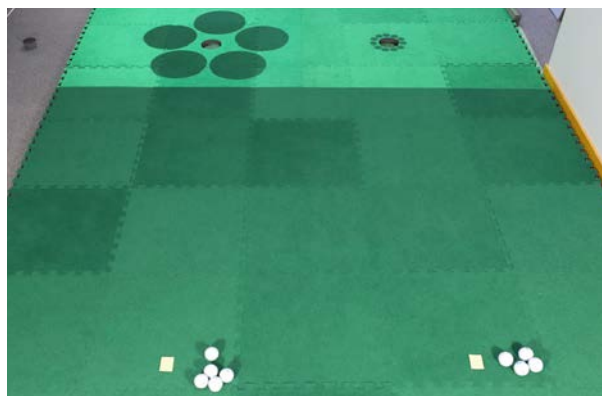
Les effets classiques de la psychologie cognitive, en particulier, tiennent bon. Dans une étude publiée en 2013, Matthew Crump, du Brooklyn College, à New York, et ses collègues ont répliqué un certain nombre d'entre eux, en faisant passer des tests à de nombreux participants grâce à la plateforme web Amazon's Mechanical Turk (AMT). Ils ont ainsi confirmé la réalité des effets d'inhibition, qui stipulent que bloquer nos automatismes et nos habitudes a un coût cognitif. On mesure ce dernier de diverses façons, par exemple grâce au test de Stroop. Ce test consiste à indiquer la couleur de l'encre dans laquelle un nom de couleur est écrit et on constate que le temps de réponse s'allonge nettement lorsque les deux ne correspondent pas (par exemple, le mot «bleu» écrit à l'encre verte), car le cerveau doit alors bloquer la lecture automatique du mot.

Les effets de flexibilité cognitive, selon lesquels alterner entre deux tâches différentes a

DES ECHECS INSTRUCTIFS

Parfois, l'échec d'une expérience de réplication est riche d'enseignement. Ce fut le cas lorsque nous avons tenté de reproduire une étude portant sur l'illusion

Minigolf. Cette étude avait tenté d'exploiter l'illusion en projetant les cercles sur un tapis de minigolf et semblait montrer que les participants parvenaient mieux à viser le trou quand l'appareil apparaissait plus gros. Mais lorsque nous avons élaboré une expérience analogue (voir l'image dessous), nous n'avons pas retrouvé ce résultat. Cela nous a renseignés sur l'organisation du système visuel : puisqu'un trou qui apparaît plus gros n'est pas plus facile à viser, c'est que le cerveau se fonde sur une représentation visuelle distincte, inconsciente, pour planifier l'action motrice.



Certains chercheurs préconisent de créer un indice pour quantifier la fiabilité d'un résultat

également un coût, ont également été reproduits avec succès. Les expériences de réplication ont confirmé que l'on effectue plus rapidement une tâche lorsque la précédente est identique. Dans une série de chiffres qui défilent, on déterminera ainsi plus vite ceux qui sont impairs si l'on ne fait que cela, par rapport au cas où l'on doit alterner avec une autre tâche, comme «indiquer si un chiffre est supérieur à 5.»

Même quand une expérience de réplication échoue, les «grandes conclusions» restent souvent valides, car elles reposent sur tout un faisceau d'études. Prenons le cas d'un autre effet classique de la psychologie, l'«amorçage». Il est bien établi que des mots ou des personnes peuvent influencer inconsciemment nos jugements et nos décisions, notamment en activant des stéréotypes: une fille obtiendra ainsi de moins bons résultats en mathématiques si on lui rappelle qu'elle est une fille. L'étude sur le Trivial poursuit, que nous avons mentionnée précédemment, s'inscrivait dans ce contexte: l'idée était que l'image mentale d'un professeur «amorcé» d'intelligence et la recherche de connaissances dans notre esprit. Le fait que la réplication ait échoué n'invalide pas les très nombreuses études publiées dans le domaine de l'amorçage, qui reste un phénomène psychologique robuste. De même, le semi-échec de la réplication du test du marshmallow n'annule pas l'ensemble des recherches sur la maîtrise de soi.

Les fondements de la psychologie scientifique sont donc solides. La crise de la réplication a permis, non pas de décrédibiliser cette discipline, mais au contraire d'en redorer le blason en attestant de sa maturité et de sa capacité à se questionner. Elle nous rappelle aussi le caractère provisoire des connaissances scientifiques.

En 1938, le célèbre épistémologue Gaston Bachelard écrivait à leur propos: «Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit.» Gardons donc à l'esprit que les connaissances sont des constructions, elles-mêmes amenées à être, un jour ou l'autre, déconstruites pour être mieux reconstruites par la suite.

DES IDEES QUI RESTENT INFLUENTES BIEN APRÈS LEUR RÉFUTATION

Le problème est que les résultats les plus étonnants se propagent comme une traînée de poudre, aussi bien chez les scientifiques (l'étude du stylo dans la bouche a été citée par près de 2000 articles scientifiques, d'après *Google Scholar*) que dans le grand public. Et même lorsqu'ils sont réfutés, ils continuent à circuler, voire à être dévoyés. Dans une conférence TED sur le langage corporel datant de 2012, Amy Cuddy, qui avait participé à l'étude «montrant» l'influence du *power posing*, la fameuse posture conquérante avec les bras en V, conseille d'adopter cette posture juste avant un entretien d'embauche et mentionne l'étude du stylo dans la bouche. Cette conférence est encore visible sur Internet et cumule un audimat impressionnant: elle a été visionnée plus de 50 millions de fois.

Une très grande prudence reste donc de mise avant d'utiliser les découvertes de la science à des fins commerciales ou politiques. Harold Pashler, de l'université de Californie à San Diego, préconise de créer un indice spécifique et de le mentionner dès que l'on cite un résultat scientifique. L'indice 1, le plus fiable, serait réservé à des études répliquées une ou plusieurs fois. L'indice 2 serait accordé à des résultats non répliqués, mais dotés d'une bonne puissance statistique (impliquant de multiples mesures et de nombreux participants), tandis que les études d'une puissance plus faible auraient un indice 3 et devraient être considérées comme préliminaires. Seuls les résultats d'indice 1 seraient alors mûrs pour une éventuelle exploitation commerciale ou politique.

C'est ainsi que pourraient être limités les malentendus et les interprétations abusives, tout en conservant le droit à l'erreur. Émettre des hypothèses erronées n'est pas une honte, bien au contraire: c'est inhérent à la recherche. De même, il est normal qu'un certain nombre d'expériences préliminaires ne soient pas confirmées par la suite. L'important est de savoir abandonner une piste qui a débouché sur une impasse. Pour l'astronome américain Phil Plait, «une partie du processus [de la science], c'est admettre qu'on a parfois tort. Et ça peut être vraiment très, très dur. [...] Mais la contrepartie est la meilleure qui soit: savoir et comprendre». ■

BIBLIOGRAPHIE

D. E. Huber et al., *Less "story" and more "reliability" in cognitive neuroscience*, *Cortex*, vol. 113, pp. 347-349. 2018.

H. Pashler et C. R. Harris, *Is the replicability crisis overblown? Three arguments examined*, *Perspectives on Psychological Science*, vol. 7, pp. 531-536. 2012.

J. P. A. Ioannidis, *Why most published research findings are false*, *PLoS Medicine*, vol. 2, pp. 696-701. 2005.

G. Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique*, Librairie philosophique J. Vrin. 1938.

L'intrication quantique défie l'intuition physique classique. Elle établit un lien instantané entre deux particules (en rouge et en bleu) même si elles sont très éloignées l'une de l'autre.

L'ESSENTIEL

En 1964, le physicien John Bell a montré comment tester la nature de l'intrication quantique, phénomène par lequel deux particules conservent un lien « fantomatique » même quand elles sont très éloignées l'une de l'autre.

Pour Einstein, l'intrication était la preuve que la physique quantique était incomplète : des « variables cachées locales » expliqueraient le phénomène.

Plusieurs équipes ont mis en œuvre le test de Bell. Les résultats semblaient

écarter l'hypothèse des variables cachées et confirmaient les prédictions de la physique quantique. Mais ces expériences comportaient des failles ou « échappatoires », qui ne permettaient pas d'éliminer complètement l'hypothèse de variables cachées agissant en coulisses.

Finalement, en 2015, plusieurs groupes ont réalisé les premiers tests de Bell sans échappatoire, qui excluent définitivement toute explication par des variables cachées locales.

LES AUTEURS



RONALD HANSON
Physicien
à l'université
de technologie
de Delft,
aux Pays-Bas



KRISTOPHER SHALM
Physicien au NIST
Institut américain
des normes et
de la technologie
à l'université
du Colorado
à Boulder

les mesures effectuées sur l'une influent instantanément sur l'autre. En physique classique, une telle influence est impossible, car aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Mais dans le cadre de la théorie quantique, cela semble être le cas. Grâce aux inégalités mathématiques qu'il a trouvées, Bell a ouvert la possibilité de sonder la nature de ce lien.

Pour comprendre ce que Bell a fait, nous devons revenir aux racines de la physique quantique. Les règles de cette théorie décrivent le comportement de la lumière et de la matière aux plus petites échelles. Les atomes, les électrons, les photons et les autres particules subatomiques ont un comportement différent des objets macroscopiques du quotidien. L'une des principales différences est que ces particules existent dans des états marqués du sceau de l'incertitude. Prenez par exemple le :

spin (moment cinétique intrinsèque) d'un électron, une propriété purement quantique. Si un électron dont le spin est orienté horizontalement traverse un champ magnétique orienté verticalement, le spin basculera vers le haut avec une probabilité de 50%, et vers le bas avec une probabilité de 50%, le résultat étant vraiment aléatoire par nature.

Comparez cela à une pièce que l'on tire à pile ou face. Nous sommes tentés de penser que le lancer de pièce est aussi aléatoire, mais si nous connaissons précisément la masse de la pièce, la force employée pour la lancer, les détails des courants d'air qui l'atteignent, etc., nous pourrions prédire comment la pièce va retomber. Le caractère aléatoire provient dans ce cas d'un manque d'information sur le système.

UN ALEA FONDAMENTAL

Pour le spin de l'électron, c'est une toute autre affaire. Même si nous connaissons parfaitement toutes les propriétés de l'électron et de son spin avant qu'il ne traverse le champ magnétique, l'incertitude quantique nous empêche de prévoir de quel côté le spin basculera. Avec un spin initial horizontal, l'électron est dans une superposition à poids égaux des états de spin «haut» et «bas». Si une mesure est réalisée sur l'électron selon l'axe vertical, cette superposition cesse d'exister: elle se réduit à l'un de ses termes et l'on obtient un résultat unique; on mesure un spin orienté soit vers le haut, soit vers le bas.

Quand les physiciens ont développé la théorie quantique au début du xx^e siècle, certains de ses fondateurs, comme Albert Einstein et Erwin Schrödinger, étaient gênés par le flou des états quantiques. Selon eux, la nature ne peut pas être vraiment floue, et une théorie allant au-delà de la physique quantique devrait prédire exactement le comportement des particules. Il serait alors possible de prévoir le résultat d'une mesure du spin de l'électron de la même façon qu'il est possible de savoir comment une pièce va retomber si vous détenez assez d'information.

Plus surprenant encore, une superposition d'états peut s'étendre sur deux particules ou plus, un phénomène que Schrödinger a nommé intrication (*Verschränkung* en allemand). D'après la théorie quantique, les propriétés des particules peuvent être intriquées de telle façon que leur valeur d'ensemble soit bien connue, mais que les valeurs individuelles restent complètement incertaines – un peu comme si l'on avait deux dés spéciaux qui, quand on les lance, donneraient chacun un résultat aléatoire, mais dont la somme serait toujours égale à 7.

Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen (le fameux trio EPR) ont analysé les conséquences de l'intrication. Imaginez que les spins de deux électrons soient intriqués de telle sorte que quand on les mesure selon un même axe,

on obtiendra toujours des valeurs opposées. Par exemple, si l'on mesure le spin d'un des électrons et qu'on trouve qu'il pointe vers le haut, l'autre pointera vers le bas. Cette corrélation tient toujours, même si les électrons sont très éloignés l'un de l'autre. Alors que l'état du premier électron ne devient déterminé qu'au moment de la mesure, il n'a aucun moyen de communiquer ce résultat à son partenaire. Comment la seconde particule «sait-elle» que le spin de la première pointe vers le haut? Einstein a qualifié cette synchronisation de «fantomatique action à distance».

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen ont publié un article désormais célèbre sur ce problème. Ils se sont appuyés sur deux hypothèses raisonnables. Premièrement, si l'on peut prédire avec certitude le résultat d'une mesure sur un système, celui-ci doit avoir une certaine propriété qui correspond à ce résultat. Einstein a nommé de telles propriétés des «éléments de réalité». Par exemple, si nous savons que le spin d'un électron pointe vers le haut, nous pouvons prédire avec certitude que s'il se propage dans un champ magnétique approprié, il sera toujours dévié vers le haut. Dans cette situation, le spin de l'électron serait un élément de réalité.

Deuxièmement, un événement survenant à un endroit ne peut pas affecter instantanément un événement lointain; les influences se propagent, au mieux, à la vitesse de la lumière. C'est le principe dit «de localité».

Vue d'ensemble du campus de l'université de Delft, aux Pays-Bas, où Ronald Hanson et ses collègues ont réalisé leur expérience du test de Bell sans faille. Les stations (à gauche et en haut à droite) hébergent les cristaux au sein desquels des électrons peuvent être intriqués à distance par l'intermédiaire de photons qu'ils émettent. Les stations sont distantes de 1280 mètres, mais sont reliées à une station intermédiaire qui assure la bonne réception et l'intrication des photons émis par les deux cristaux.



A partir de ces deux principes, imaginons deux électrons intriqués tenus à distance par deux personnes, Alice et Bernard. Supposons qu'Alice mesure le spin de son électron selon la direction z . À cause de la parfaite anticorrélation du système intriqué, elle sait aussi quel sera le résultat si Bernard mesure le spin de son électron le long de la direction z . Dès lors, selon l'EPR, la composante en z du spin de l'électron de Bernard serait un élément de réalité. De la même façon, si Alice décide de mesurer plutôt le spin selon la direction x , elle connaîtra avec certitude le résultat de la mesure du spin de l'électron de Bernard selon l'axe des x . Dans ce cas, la composante en x du spin de l'électron de Bernard est un élément de réalité.

Mais Alice et Bernard étant très éloignés l'un de l'autre, la décision d'Alice de mesurer selon l'axe des x ou des z ne peut pas influencer sur ce qui se passe chez Bernard (principe de localité). Par conséquent, pour rendre compte des anticorrélations, la valeur du spin de l'électron de Bernard doit être parfaitement prévisible le long de l'axe des z comme de celui des x . Or cette conclusion est en contradiction avec la théorie quantique, dont les lois imposent que si le spin a une valeur bien définie dans une direction, il est nécessairement flou dans les autres.

Cette incohérence a conduit Einstein et ses collègues à conclure que la théorie quantique est incomplète. Ils ont suggéré qu'il serait possible de résoudre cette contradiction en complétant la théorie par des variables supplémentaires

naccessibles pour Alice et Bernard (on parle de variables cachées). En d'autres termes, il existerait une théorie plus fondamentale que la physique quantique dans laquelle les électrons ont les propriétés supplémentaires par rapport à celles connues. Celles-ci décriraient comment les électrons se comportent lorsqu'on les mesure conjointement. Si nous y avions accès à ces variables cachées, nous pourrions prédire ce qui arriverait aux électrons. Le flou apparent des particules quantiques résulterait ainsi de notre ignorance. Pour désigner cet éventuel successeur de la physique quantique, les physiciens parlent de «théorie locale à variables cachées». Le qualificatif «local» se réfère ici au fait que les signaux cachés ne peuvent pas se propager plus vite que la lumière.

Pour les défenseurs de la physique quantique, tel le Danois Niels Bohr, celle-ci était complète et l'intrication ne créait pas de contradiction, considérant que la physique quantique est non locale par nature.

BELL RELANCE LE DEBAT

Einstein ne mettait pas en doute les prédictions de la physique quantique elle-même; il pensait qu'il existait une vérité plus profonde qui gouverne la réalité. Après l'article EPR de 1935, l'intérêt pour ces questions fondamentales posées par la physique quantique est retombé. La possibilité des variables cachées a été considérée comme une question philosophique sans importance pratique, car on pensait que les



ÉLIMINER TOUTES LES ÉCHAPPATOIRES

La physique quantique décrit un univers qui entre en conflit avec notre intuition de la réalité. Certains scientifiques

proposent des théories alternatives incluant des variables dites « cachées », qui agissent en coulisses, et devraient éliminer certaines des implications les plus déroutantes de la théorie quantique. Jusque récemment, aucune expérience n'a pu exclure de façon indiscutable ces variables cachées locales, mais le tableau a changé en 2015.

Les objections d'Einstein à la physique quantique reposaient sur deux principes fondamentaux : le réalisme et la localité.

Le réalisme est la notion selon laquelle les objets ont des propriétés déterminées : une pomme, par exemple, est rouge, ou jaune. La localité est l'idée selon laquelle les objets n'interagissent qu'avec leur environnement direct ; les influences ne peuvent se propager plus vite que la lumière.

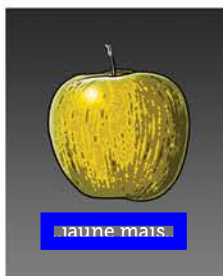


Mais la théorie quantique brosse la réalité un tableau beaucoup plus étrange que cela.



Selon la physique quantique, une particule peut être dans deux états à la fois (dans une superposition d'états).

Par exemple, une pomme quantique.

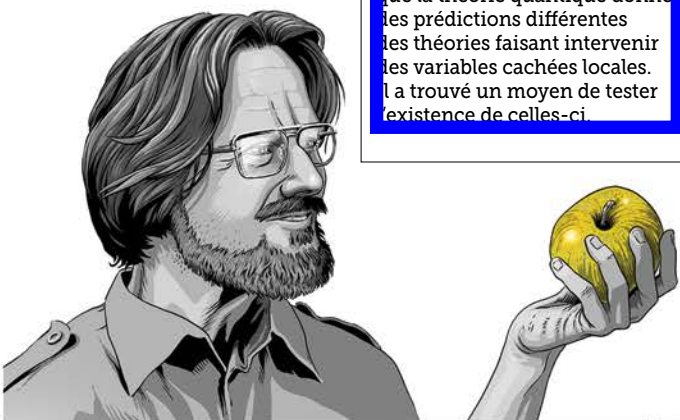


Les particules peuvent même être intriquées. Comme si c'était un système fait d'une pomme rouge et d'une pomme jaune, mais sans que chaque pomme ait une couleur définie avant d'être vue.

Si l'on observe une pomme quantique d'une paire intriquée et qu'on la trouve rouge, l'autre devient instantanément jaune, quelle que soit leur distance mutuelle.

Einstein n'admettait pas ce phénomène, qu'il qualifiait de « fantomatique action à distance ». Pour éviter d'invoquer des influences se propageant plus vite que la lumière, il supposait l'existence de variables cachées locales, inconnues des observateurs et censées contrôler cette intrication.



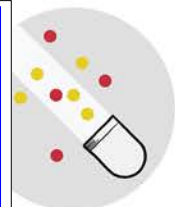


En 1964, John Bell a découvert que la théorie quantique donne des prédictions différentes des théories faisant intervenir des variables cachées locales. Il a trouvé un moyen de tester l'existence de celles-ci.

Le test de Bell : Deux observateurs feraient des mesures séparées de deux particules censées être intriquées. Bell a calculé la corrélation maximale qu'il pourrait y avoir entre les mesures des deux observateurs si des variables locales, limitées par la vitesse de la lumière, étaient impliquées.



Les chercheurs ont rapidement commencé à mettre en œuvre le test. Mais il restait deux failles qui laissaient un peu de marge pour d'éventuelles variables cachées.



1. Faille de localité
Les stations de mesure sont assez proches pour que les deux particules s'échangent des signaux à des vitesses inférieures à la lumière pendant le test.

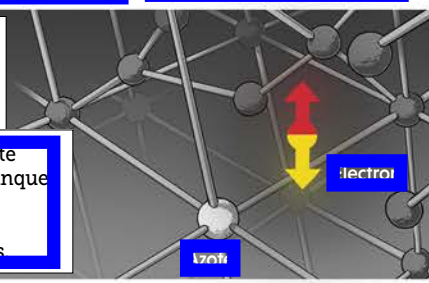
2. Faille de détection
Les détecteurs ne peuvent mesurer qu'une partie des particules intriquées.

En 2015, plusieurs groupes de scientifiques ont conçu des versions du test de Bell qui éliminent les deux échappatoires. L'une d'elles, à l'université de technologie de Delft, a pour point de départ deux minuscules diamants.



Dans le réseau cristallin presque parfait du diamant, il existe occasionnellement un défaut : un atome d'azote.

Dans certains endroits, à côté d'un tel atome d'azote, il manque un atome de carbone, un « défaut » qui se comporte comme un piège à électrons.



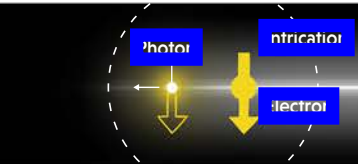
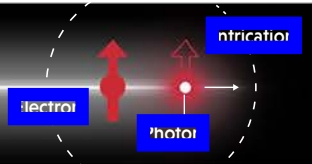
Les électrons sont lotés d'un spin.
↑ ou ↓
Ou en superposition, à la fois haut et bas.

En utilisant deux électrons, dans deux diamants séparés de 280 mètres, les scientifiques sont sûrs qu'il n'y a pas assez de temps pour un échange de signal, même à la vitesse de la lumière, dans l'intervalle de temps qui sépare le choix de l'orientation des détecteurs et la mesure des spins des électrons.

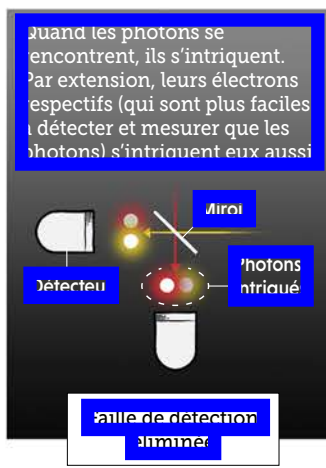
Faille de localité éliminée



Avec des lasers, les physiciens excitent les électrons, qui émettent alors des photons intriqués avec leur état de spin.



Les photons traversent le campus jusqu'à ce qu'ils se rencontrent dans un détecteur.



Faille de détection éliminée

Pour la première fois, un test de Bell sans faille.



À Delft, les physiciens ont effectué 245 mesures portant sur une paire d'électrons intriqués. Ils ont mesuré leurs spins dans chaque cas et ont trouvé que 80 % étaient corrélés, soit beaucoup plus qu'on n'obtiendrait avec des variables cachées locales. D'autres expériences ont donné des résultats similaires.

Les résultats prouvent de façon définitive que des variables cachées locales ne peuvent pas expliquer les conséquences de l'intrication.

Une conclusion s'impose : le monde est vraiment étrange.



prédictions des théories avec ou sans variables cachées seraient identiques. Mais tout cela a changé en 1964, quand Bell a montré que dans certaines circonstances, les prédictions des théories à variables cachées diffèrent de celles de la physique quantique. Il serait possible de tester avec une expérience si des variables cachées existent et expliquent l'intrication quantique.

Bell a reconsidéré l'expérience de pensée EPR, mais avec une petite variante qui change tout : il laissait Alice et Bernard mesurer le spin de leurs électrons respectifs dans n'importe quelle direction. Dans l'expérience de pensée initiale, Alice et Bernard mesurent les spins selon le même axe et trouvent donc des résultats anticorrélés à 100% : ainsi, pour l'axe vertical, si Alice mesure « haut », alors Bernard mesure toujours « bas », et inversement. En revanche, si Alice et Bernard mesurent le long d'axes différents, les corrélations entre les résultats sont plus complexes, et c'est là qu'apparaissent les différences entre la théorie quantique et les théories à variables cachées.

Bell a montré que pour certains ensembles de directions, les corrélations entre les mesures d'Alice et de Bernard seraient plus fortes en physique quantique que dans toute théorie locale à

variables cachées. Mathématiquement, ces différences s'expriment par ce qu'on a nommé les « inégalités de Bell ». Elles sont dues au fait que les variables cachées ne peuvent pas s'influencer plus vite que la vitesse de la lumière, et sont donc moins efficaces pour coordonner leurs efforts : les corrélations sont limitées. En physique quantique, les spins de deux électrons intriqués existent conjointement dans un unique état qui peut s'étendre sur de longues distances. Grâce à l'intrication, la théorie quantique prédit des corrélations jusqu'à 40% plus fortes que celles des théories à variables cachées.

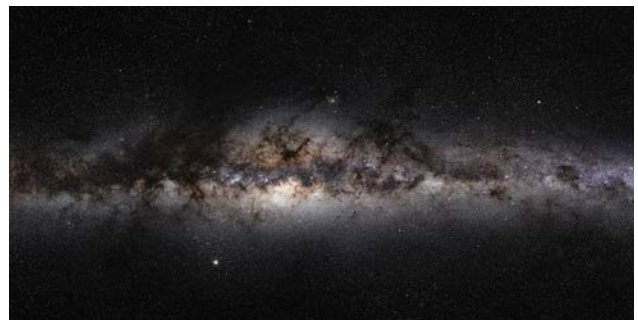
Le théorème de Bell fournit ainsi des inégalités qui posent une limite supérieure aux corrélations qu'il est possible d'avoir dans n'importe quelle théorie locale à variables cachées. Si les données expérimentales dépassent cette limite (en d'autres termes, si elles « violent » les inégalités de Bell), cela signifie que les théories à variables cachées ne décrivent pas la nature.

Peu après la publication de Bell, le physicien John Clauser, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont trouvé des inégalités similaires, mais plus faciles à tester dans les expériences. Les chercheurs ont effectué les premières mesures à la fin des années 1960.

LIBRE ARBITRE ET SUPER-DÉTERMINISME

En 2015, plusieurs équipes, dont celle des auteurs, ont réalisé les premiers tests de Bell prenant en compte à la fois la faille de localité et celle de détection. Elles ont conclu que la physique quantique est complète et fondamentalement non locale. Mais la nature peut-elle encore comploter pour truquer ces résultats ? Il existe en effet une autre échappatoire : la faille de libre arbitre de l'expérimentateur sur le réglage des dispositifs de mesure. Il est envisageable que des variables cachées ou un autre phénomène du passé aient une action causale sur la configuration des détecteurs. Si les choix des physiciens pour l'orientation des polariseurs sont limités

d'une façon ou d'une autre, les résultats seraient biaisés. Dans les expériences de 2015, les chercheurs écartaient cette hypothèse en supposant que, si variables cachées il y a, elles n'émergent qu'avec la paire de photons intriqués et ne peuvent donc pas influencer causalement sur les systèmes de détection. Cependant, le formalisme sous-jacent aux inégalités de Bell ne précise pas où et quand les variables cachées intervenant dans l'expérience seraient créées. Pour écartier cette hypothèse l'un « complot de la nature » sur la configuration des détecteurs, l'idée est de définir la direction de polarisation mesurée par les instruments à partir d'événements survenus dans un passé lointain, comme la lumière émise par les étoiles distantes. En 2017, Anton Zeilinger et son équipe, à l'université de Vienne, ont utilisé une source de photons intriqués envoyés vers deux détecteurs distants de plus de un kilomètre. La configuration des deux polariseurs est contrôlée par deux télescopes pointant chacun sur une étoile distante de plus de 500 années-lumière. Les photons cantés en



Lors d'une expérience sur le test de Bell, une équipe de physiciens a utilisé la lumière de plusieurs étoiles de la Voie lactée pour choisir la configuration des détecteurs de leur expérience.

provenant d'une telle étoile et émis il y a plusieurs centaines d'années ont une longueur d'onde propre. Cette dernière est utilisée pour sélectionner une des deux configurations possibles pour chaque instrument, selon qu'elle est supérieure à 700 nanomètres « rouge », ou inférieure « bleue ». Les mesures conduisent à une violation des inégalités de Bell, tout en contrôlant en partie la faille de libre arbitre. En effet, si un mécanisme impliquant des variables cachées a exploité cette échappatoire, il doit avoir agi il y a plus de 500 ans ! En utilisant des sources

lumineuses de plus en plus lointaines – étoiles, quasars ou même le fond diffus cosmologique – il sera possible de repousser l'autant les limites sur cette échappatoire. Cependant, la faille ne pourra jamais être complètement éliminée... En poussant à l'extrême ce raisonnement, cela conduit à l'idée de superdéterminisme, qui suppose l'absence totale de libre arbitre dans un monde où tout est prédéterminé depuis le début de l'Univers. Cependant, la plupart des physiciens rejettent cette idée, qui n'est pas réfutable.

Et, depuis, les expériences n'ont cessé de se rapprocher du dispositif idéal proposé par Bell. Les expériences ont trouvé des corrélations qui violent l'inégalité de Bell, ce qui éliminait les théories locales à variables cachées. Mais jusqu'en 2015, toutes ces expériences reposaient sur une ou plusieurs hypothèses *ad hoc* à cause d'imperfections des dispositifs. Ces hypothèses comportaient des failles que les théories locales à variables cachées pouvaient en principe exploiter pour réussir le test.

Grâce à l'intrication quantique, il est possible de créer des générateurs de nombres vraiment aléatoires

Dans presque toutes les expériences de ce type au xx^e siècle, les scientifiques ont produit des photons intriqués à partir d'une source, et les ont envoyés dans des stations de mesure (représentant Alice et Bernard). Ces dernières enregistraient la polarisation d'un photon de la paire, c'est-à-dire la direction dans laquelle oscille le champ électrique du photon. Les chercheurs calculaient alors les corrélations moyennes entre les résultats des deux stations et examinaient si les inégalités de Bell étaient respectées ou violées.

Dans les premières expériences, les mesures étaient effectuées selon des directions fixes. Dans ce cas, une interaction avait le temps de s'établir entre les dispositifs et créer d'éventuelles corrélations. Autrement dit, des signaux cachés indiqueraient à Bernard, sans voyager plus vite que la lumière, quelle direction Alice avait utilisée pour mesurer son photon. Cette «échappatoire (ou faille) de localité» signifie qu'une théorie locale à variables cachées obtiendrait les mêmes corrélations que la théorie quantique. En 1982, Alain Aspect, de l'Institut d'optique, à Orsay, et ses collègues ont effectué un test amélioré dans lequel les photons étaient envoyés à deux extrémités d'une pièce. Pendant que ces photons intriqués étaient en vol, l'angle de polarisation du dispositif de mesure changeait périodiquement. À la fin des années 1990, Anton

Zeilinger, aujourd'hui à l'université de Vienne, et son équipe ont perfectionné cette stratégie en utilisant des directions de mesure de polarisation vraiment aléatoires (et non simplement périodiques) et déterminées juste avant que les mesures n'aient lieu. Si les signaux cachés existent, ils devraient se propager plus vite que la lumière pour influencer sur ces mesures. La faille de localité était hermétiquement comblée.

Mais ces expériences présentaient un inconvénient de taille: il est difficile de travailler avec des photons, particules qui peuvent se perdre en vol ou tout simplement ne pas être vues par les détecteurs. La plupart du temps, une mesure ne donnait pas de résultat, car les photons se perdaient en chemin. Les expérimentateurs étaient obligés d'éliminer les mesures ratées et de supposer que les mesures réussies étaient représentatives de l'ensemble des paires intriquées (l'«hypothèse d'échantillonnage sans biais»). Sans cette supposition, il est impossible de garantir que l'ajout des photons perdus ne donne pas un résultat compatible avec les théories à variables cachées.

Les scientifiques ont éliminé cette échappatoire de détection au début de ce siècle, en abandonnant les photons au profit d'autres systèmes intriqués et mesurés avec une bonne efficacité: des ions piégés, des atomes et des circuits supraconducteurs. Le problème est que, dans ces cas, les contraintes techniques imposaient que les particules soient assez proches, ce qui laissait ouverte la faille de localité. Un test de Bell pour lequel toutes les échappatoires seraient supprimées est devenu l'un des grands défis de la science quantique.

Grâce aux progrès réalisés dans le contrôle et la mesure des systèmes quantiques, il est devenu possible en 2015 d'effectuer un test de Bell avec un dispositif idéal, ce qu'on appelle un test de Bell sans échappatoire (ou sans faille). En fait, en peu de temps, quatre groupes différents de physiciens ont trouvé des résultats violant les inégalités de Bell tout en éliminant les deux échappatoires. Ces expériences ont ainsi fourni des preuves indiscutables qui réfutent les théories locales à variables cachées.

ÉLIMINER LES FAILLES

L'un d'entre nous (Ronald Hanson) a effectué avec ses collègues la première expérience éliminant toutes les échappatoires à l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas (voir la photo page 55 et l'encadré pages 56 et 57). Nous avons intriqué les spins de deux électrons présents chacun dans un défaut cristallin d'un diamant, c'est-à-dire dans un site où il manque un atome de carbone. Les deux électrons intriqués étaient dans des laboratoires situés de part et d'autre du campus, et pour être sûrs qu'aucune communication n'était possible entre les deux, nous avons utilisé un générateur de nombres

léatoires rapide pour sélectionner la direction de la mesure. Cette mesure était finalisée et enregistrée localement sur un disque dur avant que la moindre information concernant la mesure de l'autre côté n'ait eu le temps d'arriver, même à la vitesse de la lumière. Un signal caché indiquant à l'un des dispositifs de mesure la direction utilisée par l'autre n'aurait pas eu le temps de faire le trajet entre les deux laboratoires: on contrôlait ainsi entièrement la faille de localité.

TELEPORTATION D'INTRICATION

Ce chronométrage strict nous a imposé de séparer les deux électrons de plus de un kilomètre, une distance supérieure de deux ordres de grandeur aux précédents records mondiaux pour des particules de matière intriquées. Comment intriquer des électrons sur une telle distance? Nous avons utilisé une technique nommée « téléportation d'intrication », où l'on commence par intriquer chaque électron avec un photon. Nous envoyons alors les photons à la rencontre l'un de l'autre, à mi-chemin des deux laboratoires. Ils se retrouvent sur un miroir semi-réfléchissant où nous avons placé des détecteurs de chaque côté. Si nous détectons les photons sur des côtés opposés du miroir, alors les spins des électrons intriqués avec chaque photon deviennent eux-mêmes intriqués. En d'autres termes, l'intrication entre les électrons et les photons est transférée aux deux électrons.

Ce processus de transfert échoue souvent, car les photons se perdent entre les diamants et le miroir, comme dans les expériences précédentes. Mais nous ne lançons un test de Bell que si les deux photons sont détectés; ainsi, nous évitons la perte de photons en amont. De cette façon, nous éliminons la faille de détection, parce que nous n'excluons aucun résultat des tests de Bell sur des électrons intriqués. La perte de photons liée à la grande distance de séparation ne limite donc pas la qualité de l'intrication, mais, en revanche, elle réduit de façon drastique le nombre d'événements à notre disposition pour le test de Bell – quelques-uns par heure.

Après plusieurs semaines de mesures en juin 2015, nous avons trouvé que l'inégalité de Bell était violée à hauteur de 20%, en accord avec les prédictions de la théorie quantique. La probabilité d'obtenir par hasard un tel résultat dans le cadre d'un modèle à variables cachées locales (et en admettant que les dispositifs nient conspiré en utilisant toutes les données disponibles) était de 3,9%. Lors d'une deuxième série de mesures en décembre 2015, nous avons trouvé un taux similaire de violation des inégalités de Bell.

La même année, trois autres groupes ont effectué des tests de Bell sans échappatoire. En septembre, l'équipe du NIST (l'Institut américain des normes et de la technologie), dirigée par l'un d'entre nous (Krister Shalm), et celle

L'INTRICATION QUANTIQUE SUFFIT-ELLE POUR FAIRE DES SYSTÈMES SÉCURISÉS?

L'intrication quantique est exploitée dans de nombreuses

applications, notamment pour sécuriser des communications. Il est par exemple possible d'utiliser les photons intriqués pour établir, à distance, une clé de chiffrement qui sera utilisée pour sécuriser un message. Alice et Bernard mesurent la polarisation d'une série de photons intriqués (la polarisation « horizontale » codant pour le bit « 0 » et « verticale » pour le bit « 1 »). En plus de fournir la clé, ce système indique aussi si la transmission de la clé a été interceptée par un ennemi. En effet, une mesure sur un photon influe sur son état. Dès lors, si quelqu'un « écoute » la transmission de la clé, Alice et Bernard

peuvent le savoir et il leur suffit de renvoyer une nouvelle clé jusqu'à être certain que celle-ci n'a pas été compromise. Si la théorie est robuste, c'est souvent la réalisation expérimentale qui introduit des failles. Par exemple, la transmission des photons dans une fibre optique de plus de 10 kilomètres de longueur conduit à une perte de signal: un attaquant pourrait alors exploiter la faille de détection. En 2016, Sébastien Tanzilli, du CNRS et de l'université Côte-d'Azur, Nicolas Gisin, de l'université de Genève, et leurs collègues ont étudié le cas où l'attaquant a un contrôle relatif (mais non total) sur l'efficacité de détection du système. En interceptant une partie des photons, il peut acquérir une partie de la clé. Malgré cela, les chercheurs ont montré que des inégalités de Bell plus générales restent violées. Tant que son contrôle reste limité, l'adversaire peut ainsi être démasqué. Les systèmes de cryptographie quantique offrent une grande robustesse contre des attaques et sont efficaces pour sécuriser un réseau de communication, mais ils ne sont pas pour autant invulnérables. Mal conçus, ces systèmes s'exposent à des failles fatales que les attaquants cherchent inlassablement...

l'Anton Zeilinger ont utilisé des photons intriqués. Peu après, Harald Weinfurter, de l'université Ludwig-Maximilian, à Munich, et ses collègues ont utilisé des atomes de rubidium distants de 400 mètres dans un protocole similaire à celui du groupe de Ronald Hanson.

Les équipes du NIST et de Vienne ont intriqué les états de polarisation de deux photons au moyen de lasers intenses dirigés sur un matériau cristallin particulier. Très rarement (environ une fois pour un milliard de photons pénétrant dans le cristal), un photon émis par un laser interagissait d'une façon particulière en donnant naissance à une paire de photons dont les états de polarisation étaient intriqués. Avec des lasers assez puissants, les chercheurs ont produit des dizaines de milliers de paires de photons intriqués par seconde. On envoyait alors ces photons

vers des stations séparées (de 184 mètres dans l'expérience du NIST, de 60 mètres dans l'expérience de Vienne) où l'on mesurait les états de polarisation. La direction de mesure était décidée pendant le temps de vol des photons, ce qui éliminait la faille de localité.

Pour la faille de détection, il fallait récupérer plus des deux tiers des photons intriqués pour que l'on soit sûr d'avoir un échantillon représentatif. Au NIST, nous avons développé des détecteurs de photons uniques ultraperformants et constitués de matériaux supraconducteurs froids. Ces capteurs sont capables d'observer plus de 90% des photons qui les atteignent. La faille de détection était ainsi supprimée.

En répétant plus de 100 000 fois par seconde ces mesures, nous avons très vite accumulé des résultats statistiques significatifs sur les corrélations entre les états de polarisation des photons; les corrélations observées dans les deux expériences étaient beaucoup plus fortes que celles prédites par les théories à variables cachées. De fait, la probabilité que les résultats du NIST soient le fruit du hasard est de l'ordre de un milliardième, et les chances sont encore plus faibles avec l'expérience viennoise. Aujourd'hui, le groupe du NIST utilise une version améliorée du dispositif pour violer les inégalités de Bell à un degré similaire en moins d'une minute, et des perfectionnements attendus accéléreront encore le processus de deux ordres de grandeur.

DES GÉNÉRATEURS D'ALÉA

Ces expériences nous obligent à conclure que tous les modèles à variables cachées, tels ceux que soutenait Einstein, sont incompatibles avec la nature. Les corrélations que nous avons observées entre particules défient notre intuition, et nous démontrent que la fantomatique action à distance a bien lieu.

Nos résultats mettent aussi en avant la remarquable puissance de l'intrication pour l'éventuelles applications. À court terme, une situation où des tests de Bell sans faille seraient utiles est la génération de nombres aléatoires. De nombreuses techniques de cryptographie reposent sur la capacité à produire des nombres aléatoires. Or, en pratique, ces derniers sont difficiles à produire. Les générateurs de nombres aléatoires sont loin d'être infaillibles et s'il est possible d'anticiper les nombres qu'ils produisent, de nombreux systèmes financiers et de communication seraient en danger. Une bonne source de nombres aléatoires est donc d'une importance cruciale.

Pour générer des nombres aléatoires, on recourt le plus souvent à des algorithmes ou à des processus physiques. Avec les algorithmes, si l'on connaît les paramètres utilisés comme valeurs initiales, il est souvent possible de prédire le résultat. Avec les processus physiques,

une compréhension détaillée de la physique sous-jacente du système est nécessaire. Il suffit qu'un détail vous échappe, et un pirate exploitera cette faille. L'histoire de la cryptographie regorge d'exemples de générateurs de nombres aléatoires des deux types qui ont été cassés.

La physique quantique est une aubaine pour ces applications. Il est possible d'«extraire» le hasard inhérent aux processus quantiques afin de produire des nombres véritablement aléatoires. On peut convertir les corrélations mesurées dans un test de Bell sans échappatoire en une chaîne de nombres aléatoires. En 2018, l'équipe du NIST a utilisé son dispositif pour produire 1024 bits véritablement aléatoires à partir de 10 minutes de données expérimentales. La violation des inégalités de Bell garantit que la chaîne de bits est aléatoire.

Il est possible de quantifier la robustesse du système: il y a une chance sur un billion que la chaîne de bits du NIST ne soit pas parfaitement aléatoire. En comparaison, il faudrait plusieurs centaines de milliers d'années à un générateur classique de nombres aléatoires pour acquérir assez de données assurant une telle qualité d'aléa. Les chercheurs travaillent maintenant à développer un outil public: le générateur servirait de source de référence de nombres aléatoires datés et transmis sur internet à intervalles fixes pour être utilisés dans les applications de sécurité.

Plus généralement, les techniques développées dans les expériences de Bell sans faille rendraient possibles le déploiement de nouveaux types de réseaux de communication. De tels réseaux, qui constituent ce que l'on appelle souvent l'«internet quantique», effectueraient des tâches dépassant les capacités des réseaux classiques. Un internet quantique garantirait des communications sécurisées, la synchronisation des horloges, et bien d'autres tâches sensibles.

De tels projets reposent sur l'intrication quantique et la qualité des dispositifs, comme dans nos expériences. En 2017, l'équipe de Delft a fait la démonstration d'une méthode pour améliorer la qualité des spins intriqués, et en 2018, elle a amélioré ses taux d'intrication de trois ordres de grandeur. En s'appuyant sur ces progrès, les chercheurs travaillent au développement d'une première version rudimentaire d'un internet quantique qui devrait être déployé en 2020 dans quelques villes des Pays-Bas.

Il y a quatre-vingts ans, quand la théorie quantique faisait ses débuts, les sceptiques se chagrinaient de sa contradiction apparente avec les siècles d'intuition physique. Désormais, quatre expériences ont asséné le coup final à cette intuition; mais, en même temps, ces résultats ont ouvert une porte pour exploiter la nature d'une façon que ni Einstein ni Bell n'avaient anticipée. La révolution silencieuse que John Bell a mise en branle bat maintenant son plein. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Maldacena, **L'intrication quantique est-elle un trouble ver ?**, *Pour la Science*, n° 475, mai 2017.

B. Hensen *et al.*, **Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers**, *Nature*, vol. 526, pp. 682-686, 2015.

M. Giustina *et al.*, **Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250401, 2015.

J. K. Shalm *et al.*, **Strong loophole-free test of local realism**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250402, 2015.

L'ESSENTIEL

Les Balo sont de petites bactéries qui se nourrissent exclusivement d'autres bactéries.

Contrairement à d'autres bactéries prédatrices, elles chassent en solitaire.

Depuis quelques années, on s'aperçoit que les Balo sont

présents partout où on les cherche et que ce sont sûrement de puissants régulateurs écologiques.

Leurs applications potentielles sont multiples, notamment dans la lutte contre l'antibiorésistance.

LES AUTEURS



STÉPHAN JACQUET
Directeur de recherche à l'Inra, au Centre alpin de recherche sur les réseaux trophiques et écosystèmes limniques, Thonon-les-Bains



ADELE EZZEDINE
doctorant au sein du même laboratoire

Ces bactéries qui en dévorent d'autres

Dans les profondeurs des grands lacs de montagne et ailleurs, des bactéries se nourrissent de leurs semblables avec une efficacité redoutable. Nommées Balo, ces bactéries prédatrices offrent une alternative prometteuse aux antibiotiques.

Au beau milieu du Léman, le plus grand lac naturel profond d'Europe occidentale, l'attaque a été foudroyante. Peu de chance d'en réchapper ! La victime est une bactérie aquatique, *Limnohabitans planktonicus*, dont la taille ne dépasse pas deux micromètres. Sa prédatrice... est aussi une bactérie, plus petite. Du genre *Peredibacter*, elle se délecte de ses semblables. La proie, qui se nourrissait de matière organique dissoute libérée par le phytoplancton alentour, n'a rien senti venir. Force est de constater que la loi de la jungle s'applique aussi au monde microbien.

Les bactéries aquatiques jouent un rôle fonctionnel clé au sein des écosystèmes, ce qui n'empêche pas qu'elles soient les proies de prédateurs ou de parasites très efficaces. Outre les bactériophages ou phages – des virus mangeurs de bactéries –, qui se sont révélés, au cours des trois dernières décennies, un facteur majeur de régulation de l'abondance des bactéries dans les milieux aquatiques et de leur diversité, d'autres prédateurs, comme les

organismes unicellulaires flagellés, les ciliés ou certains métazoaires appartenant au zooplancton (ou plancton animal), sont bien connus des biologistes. Les bactéries qui se nourrissent de leurs consœurs le sont moins, mais depuis peu, on s'accorde à y voir un groupe qui compte aussi dans le contrôle des populations bactériennes. Certaines sont regroupées dans un groupe fonctionnel, les *Bdellovibrion* et organismes apparentés ou Balo (pour *Bdellovibrion and like organisms*).

Depuis quelques années, grâce aux nouvelles techniques de séquençage et de manipulation génétique, de bio-informatique et de microscopie, on commence à mieux connaître ces bactéries et leur impact écologique. Au point d'en faire de sérieux candidats dans la lutte antibactérienne en aquaculture, mais aussi en agriculture et en médecine.

UNE DÉCOUVERTE FORTUITE

En sciences, le hasard est parfois un facteur important d'innovation. La poussée d'Archimède, la radioactivité, la pénicilline, l'ADN et nombre d'autres avancées sont ainsi les fruits

de découvertes fortuites. C'est aussi le cas des Balo. Un jour de 1962, l'année de la mort de Marilyn Monroe et de l'arrestation de Nelson Mandela, le microbiologiste allemand Heinz Stolz menait une expérience à l'Institut de bactériologie de Berlin pour isoler des bactériophages spécifiques des bactéries *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*, responsables de la tache grise du haricot. Durant ce travail, Stolz, à court des filtres qu'il utilisait pour obtenir des échantillons non contaminés par des bactéries, décida de les remplacer par des filtres en verre fritté, bien qu'ils soient moins sélectifs et susceptibles de laisser passer des cellules de taille supérieure à celle de la maille de ses filtres habituels (0.2 micromètre).

Pour détecter des bactériophages, une méthode consiste à observer sur boîte de culture ce que l'on appelle des «plages de lyse», c'est-à-dire des trous qui se forment rapidement au sein des colonies bactériennes en réponse au succès de l'infection virale des

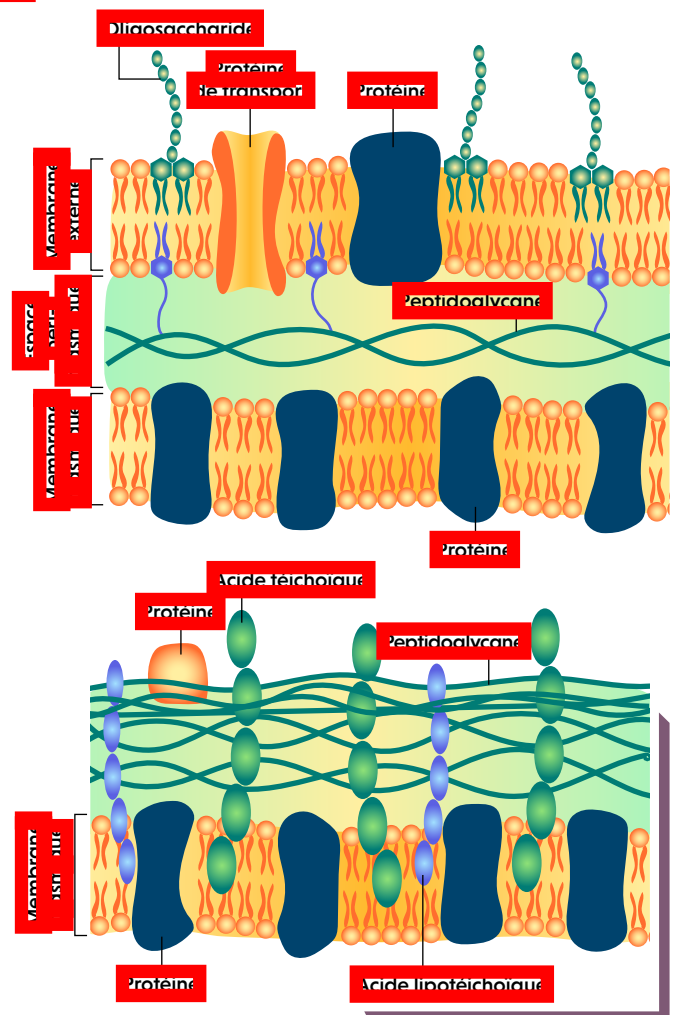
bactéries. Stolz a donc laissé incuber ses boîtes de bactéries avec ses échantillons en espérant observer le lendemain des plages de lyse. Cependant, ce ne fut pas le cas, aucun trou n'était visible. Naturellement, Stolz aurait dû se débarrasser de ces boîtes, mais il les conserva deux jours supplémentaires. Or, contre toute attente, des plages de lyse tardives apparurent ! Intrigué, Stolz examina ces trous au microscope. Et ce qu'il vit fut une incroyable surprise : des bactéries se déplaçant à vive allure, s'attachant parfois à certaines cellules... jusqu'à les détruire. Des bactéries prédatrices de bactéries !

En 1963, après avoir isolé et étudié ces microorganismes, Stolz et son collaborateur Mortimer Starr, de l'université de Californie à Davis, les ont nommées *Bdellovibrio*, du grec *Bdella* signifiant «sangsue» (l'attachement du Balo à sa proie et la succion du contenu cellulaire rappelant le mode d'action des sangsues) et *vibrio*, qui renvoie à la forme en virgule de

DES BACTÉRIES À GRAM NÉGATIF

Les Balo sont des bactéries à Gram négatif et se nourrissent... de bactéries à Gram négatif. Pourquoi ? La réponse n'est pas claire. La distinction entre bactéries à Gram positif et négatif ne constitue ni un critère fonctionnel ni un critère de classification, mais provient de la coloration de Gram. Du nom de son inventeur, le bactériologiste danois Hans Christian Gram (1853-1938), ce protocole de coloration des membranes bactériennes fait apparaître les bactéries à Gram négatif en rose et celles à Gram positif en violet. Aujourd'hui, on sait que ces couleurs correspondent à deux structures distinctes de l'enveloppe bactérienne et que certains antibiotiques, par exemple, fonctionnent mieux sur telle ou telle structure. Celle des bactéries à Gram négatif (ci-contre en haut) est à double membrane organisée en trois parties. En périphérie, la membrane externe est composée de phospholipides et de protéines intrinsèques, notamment de transport. Les bactéries à Gram positif (ci-contre en bas) en sont dépourvues. Puis, un espace dit périplasmique comportant la paroi – une couche de peptidoglycane relativement mince, contrairement à celle des bactéries à Gram positif – sert notamment de stockage d'enzymes et de nutriments. Enfin, la membrane plasmique, commune aux deux types de bactéries, est très semblable à la membrane externe, mais contient de nombreux autres complexes protéiques d'une importance vitale pour le métabolisme.

Pour expliquer pourquoi les Balo se nourrissent préférentiellement de bactéries à Gram négatif, une hypothèse est que les Balo reconnaissent des composants de la membrane externe, voire du périplasmique. Il a en effet été suggéré qu'au contact d'une proie potentielle, des biopolymères du prédateur reconnaîtraient certains sucres ramifiés (des oligosaccharides) à la surface de la paroi bactérienne, présents uniquement chez les bactéries à Gram négatif. Toutefois, on a aussi proposé que, dans certaines conditions de laboratoire, en présence uniquement de bactéries à Gram positif, certains Balo se nourrissent de ces dernières. Le prédateur changerait alors de mode de prédation. Au lieu de consommer la proie en la pénétrant, il la consommerait de l'extérieur, grâce à la production rapide de nouvelles enzymes adaptées à la paroi de ces proies. Néanmoins, ce scénario n'a pas encore été observé.



ces microorganismes. Depuis le premier *Bdellovibrio* de Stolp, plusieurs équipes ont découvert divers autres Balo, les dotant en général d'un nom synonyme de «dévoreur». Jusque dans les années 2000, cependant, ce domaine de recherche est resté assez confidentiel: entre 1972 et 1980, seules une vingtaine de publications sur les Balo ont vu le jour, puis le

semblent être partout où on les cherche: océans, rivières, eaux côtières, estuaires, lacs, bassins d'aquaculture, stations d'épuration, eau d'irrigation, sols variés, rizières, rhizosphère et même fèces animales. De fait, si, en nombre, ils sont loin de dominer leur milieu de vie, ils n'en restent pas moins suffisamment nombreux pour être aisément détectables par les techniques routinières de biologie moléculaire.

Au premier abord, on pourrait voir dans les Balo des parasitoïdes – des organismes qui se développent dans ou sur un autre organisme et finissent par le tuer. Mais les spécialistes de ce groupe les définissent plutôt comme des prédateurs, car comme ces derniers, un Balo induit rapidement la mort de sa proie (généralement dans les quinze minutes suivant l'attaque), bien avant le développement de sa progéniture. Mais, à l'inverse des grands prédateurs, la majorité des Balo ne consomment pas leur victime à la vue de tous. Si certains restent à l'extérieur de leur proie (prédation épibiotique), la plupart l'utilisent comme un refuge temporaire, un habitat osmotiquement stable et regorgeant de nutriments (prédation endobiotique). Ce faisant, les Balo se protègent des variations des conditions environnementales et des attaques des bactériophages. Une fois qu'ils se sont multipliés dans l'hôte, leur progéniture détruit sa paroi et se retrouve dans le milieu environnant, prête à entamer son cycle *via* la prédation d'un nouvel hôte (voir l'encadré pages 66 et 67).

UNE CHASSE EN SOLITAIRE

Dans l'arbre du vivant, les Balo ne constituent pas un groupe monophylétique: ils n'ont pas d'ancêtre commun à eux seuls (voir l'encadré page 68). Ce qui fait qu'un Balo est un Balo n'est donc pas tant lié à sa signature génétique qu'à son mode de fonctionnement. De fait, la morphologie et les stratégies de prédation uniques des Balo en font un groupe à part des autres bactéries prédatrices. D'abord, ce sont les prédateurs «obligatoires»: ils sont incapables de vivre dans des milieux dépourvus de proie. Cela dit, en laboratoire, diverses équipes ont observé qu'en l'absence de proie, mais placés dans un milieu très riche en nutriments, certains types de Balo étaient capables de se nourrir du milieu nutritif.

Ensuite, la stratégie de prédation et de croissance des Balo – individuelle et en mode endobiotique ou épibiotique – est une marque bien caractéristique. Le cycle endobiotique consiste en une appropriation complète de la proie. En effet, le Balo infecte son hôte et, dans son élan, empêche toute autre infection de celui-ci par d'autres Balo *via* l'émission d'un signal d'occupation (une molécule dédiée). En laboratoire, un cas de multi-infection a quand même été observé avec un nombre de Balo

Les Balo, comme les phages, ont un grand potentiel antimicrobien

Le sujet a été délaissé. Mais à partir des années 2000, dix à vingt articles scientifiques sur les Balo ont paru chaque année, surtout sur *Bdellovibrio bacteriovorus*. L'année 2017 a comptabilisé à elle seule plus d'une trentaine de publications liées à leur étude. De fait, alors que l'on recherchait des alternatives à l'utilisation des antibiotiques, devenus inopérants face aux bactéries multirésistantes, on s'est aperçu que les Balo, comme les phages, avaient un grand potentiel antimicrobien.

PETITES MAIS REDOUTABLES

Les Balo sont des bactéries dites «à Gram négatif», c'est-à-dire caractérisées par une enveloppe particulière à double membrane (voir l'encadré page ci-contre). Équipés d'un flagelle lorsqu'ils ne sont pas attachés à leur proie, ils sont par ailleurs très mobiles. En effet, un tel prédateur est capable de se déplacer à 160 micromètres par seconde, ce qui n'est pas négligeable pour des organismes de 0,5 à 2,5 micromètres de longueur et de 0,2 à 1 micromètre de largeur, soit sensiblement plus petits que les bactéries *Escherichia coli*, longues d'environ 3 micromètres. Mais petit ne signifie pas inoffensif! Bien au contraire, ces prédateurs redoutables s'attaquent à de nombreux hôtes quels que soient leur physiologie, leur taille ou leur pedigree, contrairement aux bactériophages, qui ont souvent un hôte bien spécifique. Ainsi, une grande proie ne les impressionne point et, d'ailleurs, certains Balo infectent plus rapidement les grandes cellules que les petites.

Découverts initialement dans le sol, puis dans divers milieux aquatiques, les Balo

largement supérieur à celui des proies, mais cela reste anecdotique. Le cycle épibiotique, de son côté, est plus «partageur»: plusieurs Balo peuvent s'attacher à la paroi d'une proie et consommer simultanément son contenu. Les autres prédateurs, comme *Myxobacteria* ou *Cytophaga*, se différencient par une prédation facultative – ils ne s'attaquent aux autres bactéries que lorsque les ressources en nutriments sont au plus bas – et par une stratégie de chasse en meute (voir l'encadré page 69). Par ailleurs, les études de l'ADN des Balo les séparent clairement des autres prédateurs bactériens.

UN LARGE CHOIX DE PROIES

En matière de proie, la majorité des études ont confirmé que les Balo préfèrent se nourrir de bactéries à Gram négatif. Et si on leur donne le choix, ils consomment d'abord celles qu'ils rencontrent habituellement dans leur milieu de vie. Leurs proies sont de toutes sortes, pathogènes ou commensales des plantes, des animaux ou des humains. Toutefois, il y a quelques années, une équipe de l'université Sapienza, à Rome, sous la direction de Serena Schippa, a observé un nouveau phénomène: le Balo *Bdellovibrio bacteriovorus* arrive à cibler et à consommer des bactéries à Gram positif. En effet, en présence de proies à Gram positif comme *Staphylococcus aureus*, *Bdellovibrio bacteriovorus*, prédateur naturellement endobiotique, finit par s'adapter à son nouveau repas. En une vingtaine d'heures, il change de stratégie et opte pour une prédation épibiotique. Le temps nécessaire pour consommer *S. aureus* est comparable à une phase de latence durant laquelle le prédateur synthétise un nouvel arsenal d'enzymes hydrolytiques capables d'agir sur la paroi des bactéries à Gram positif. Plus surprenant encore, *Bdellovibrio bacteriovorus* est aussi capable de s'en prendre à des cellules mortes dont le contenu cellulaire est intact.

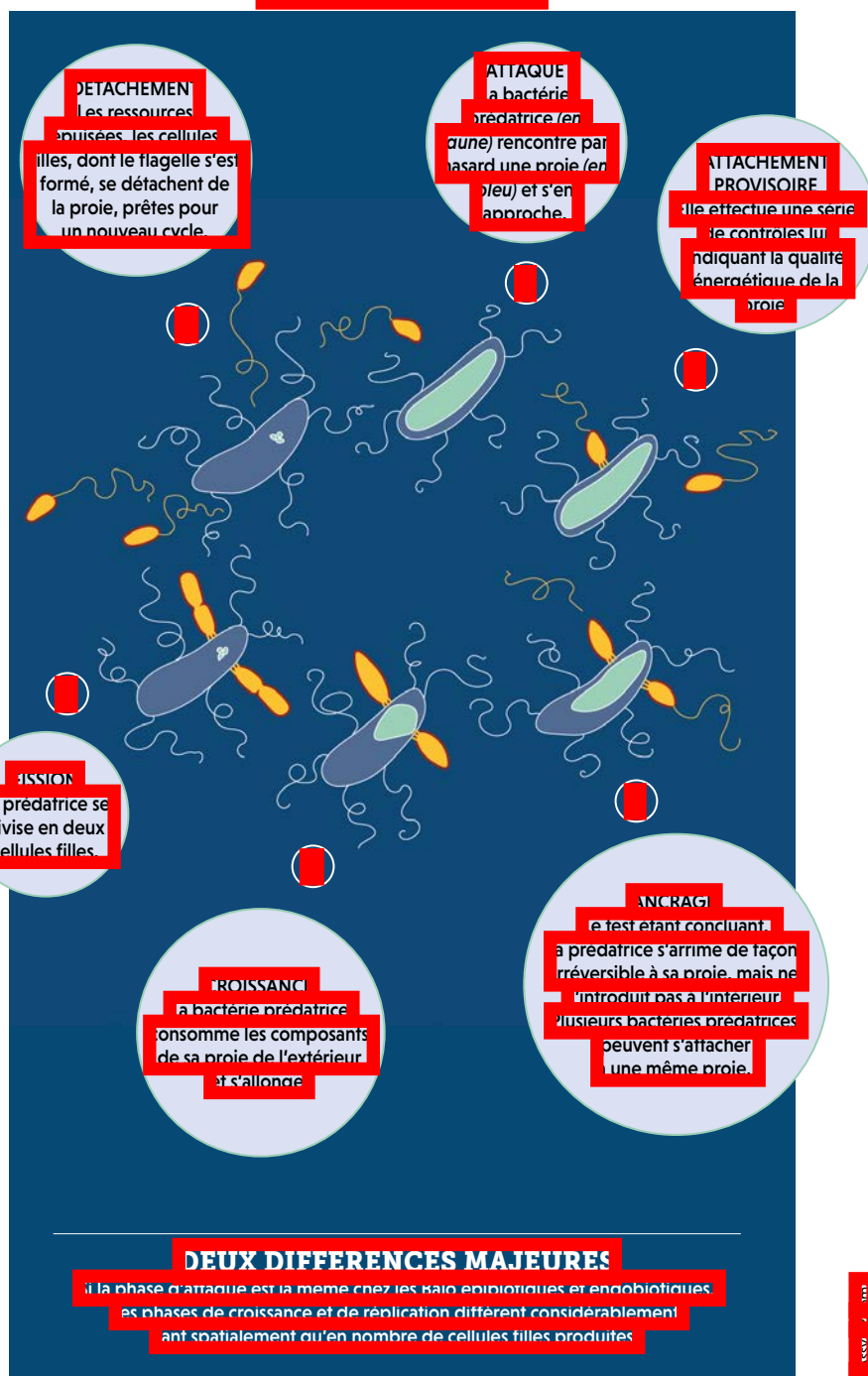
Le spectre de prédation des Balo varie selon les représentants. Certains sont semi-généralistes, avec un large choix de proies consommables, tandis que d'autres sont plutôt spécialistes d'un type de proie. Il arrive aussi que des Balo soient versatiles, c'est-à-dire à la fois semi-généralistes et spécialistes, optant pour un comportement ou l'autre selon l'environnement. Une stratégie gagnante? Pas sûr. Certes, elle offre un avantage indéniable: la bactérie qui la pratique est moins limitée par la compétition et est donc apte à dominer la population de Balo. Cependant, l'efficacité de prédation est plus faible et un Balo spécialiste d'une proie la consomme naturellement plus vite qu'un versatile... Les populations de Balo varient donc en fonction des proies présentes dans le milieu.

Toutes ces caractéristiques confèrent aux Balo une grande facilité d'adaptation aux milieux

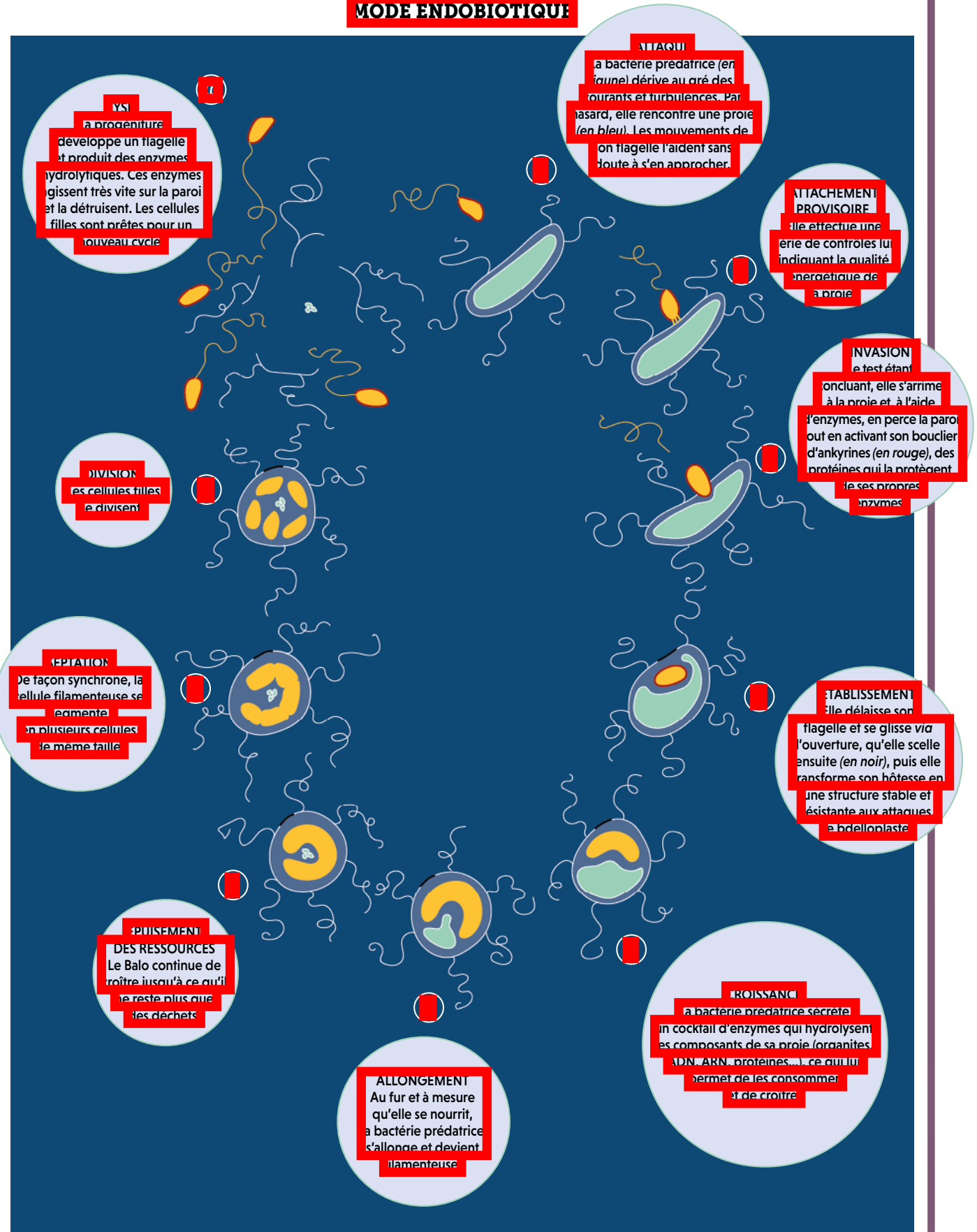
LE CYCLE DE VIE DES BALO

Les Balo ont développé deux cycles de vie différents. Certaines bactéries, comme *Peredibacter starrii* et *Bdellovibrio bacteriovorus*, ont un cycle de reproduction endobiotique, c'est-à-dire qui se déroule à l'intérieur de l'hôte (voir page ci-contre le cycle de *Bdellovibrio bacteriovorus*), tandis que d'autres, comme *Bdellovibrio exovorus*, ont un cycle de reproduction épibiotique: le prédateur reste en dehors de sa proie (ci-dessous le cycle de *B. exovorus*). Les deux cycles durent entre trois heures et demie et quatre heures.

MODE EPIBIOTIQUE



MODE ENDOBIOTIQUE



[illegible]

ISSN 1365-3113
DOI 10.1017/S1365311315001711
Printed in the United Kingdom
© 2015 Cambridge University Press
This is a Creative Commons article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution licence (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted re-use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Devenus des candidats intéressants pour de nombreuses applications dans le contrôle de populations bactériennes, qu'il s'agisse de combattre des bactéries pathogènes des humains, des animaux ou des cultures.

UNE PISTE CONTRE LES BACTÉRIES RÉSISTANTES

De fait, chez l'humain, les bactéries à Gram négatif sont responsables de plus de 30% des infections contractées à l'hôpital (infections nosocomiales). Elles sont aussi associées à une morbidité et une mortalité souvent très élevées dans les unités de soins intensifs, car la plupart des patients concernés sont atteints de souches résistantes aux antibiotiques. En 2015, en Europe, le Centre européen de prévention et de contrôle des maladies a encore recensé près de 700 000 infections dues à des bactéries résistantes aux antibiotiques, lesquelles ont entraîné 33 000 décès. Et chez l'animal, si l'utilisation des antibiotiques a diminué dans certains pays européens depuis 2005 (dont la France), de grandes disparités subsistent entre les pays, d'après l'étude européenne JIACRA II. La situation est donc tout aussi préoccupante, d'autant que les résistances à certains antibiotiques comme les quinolones – traitements contre la salmonellose et la campylobactériose chez l'humain – sont associées à leur utilisation chez l'animal. Le recours à des solutions alternatives est donc une nécessité.

A ce jour, plusieurs expériences avec les Balo se sont déjà révélées prometteuses contre des maladies humaines et animales. La mucoviscidose, notamment, est une maladie génétique létale au cours de laquelle une colonisation bactérienne chronique des voies respiratoires inférieures déclenche et maintient un cercle

vicieux d'inflammation et de destruction des tissus qui entraîne le déclin progressif de la fonction respiratoire. Or *Bdellovibrio bacteriovorus* a été détecté dans le microbiote des poumons de sujets sains, signe que ce Balo y survit et n'y est *a priori* pas toxique. En 2014, l'équipe de Serena Schippa a donc examiné si ce prédateur était capable de se nourrir des deux principales bactéries responsables de la colonisation

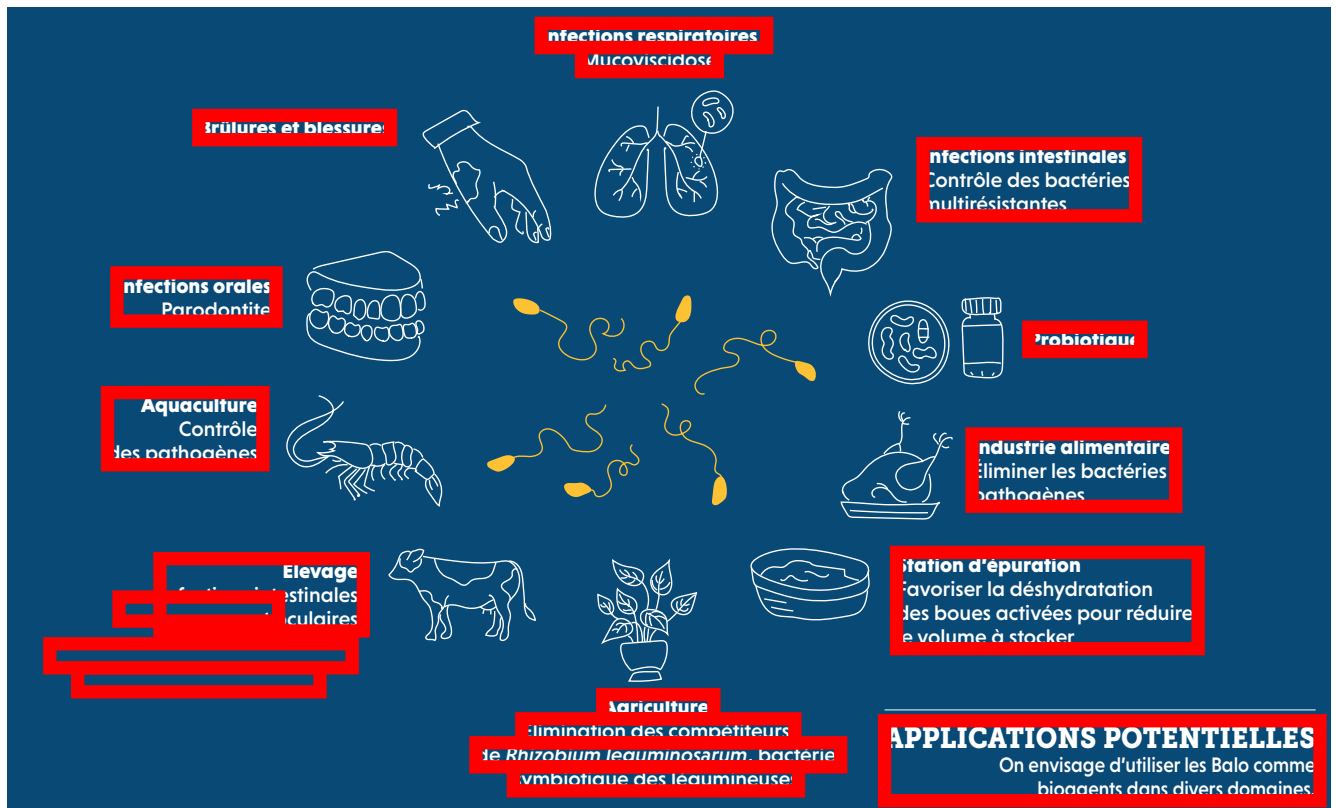
B. bacteriovorus a été détecté dans le microbiote des poumons de sujets sains

des voies respiratoires dans la mucoviscidose, *Pseudomonas aeruginosa* (à Gram négatif) et *Staphylococcus aureus* (à Gram positif). Après avoir prélevé ces bactéries chez des patients atteints de la maladie, l'équipe les a mises en culture, puis a testé le Balo sur chacune. Après 24 heures, même si *B. bacteriovorus* avait marqué une légère préférence pour la bactérie à Gram négatif, elle avait réduit les biofilms de chaque bactérie de plus de 70%. L'inoculation

LES AUTRES BACTERIES PREDATRICES

Outre les Balo, on connaît une dizaine de bactéries prédatrices appartenant à diverses branches de l'arbre phylogénétique de *Proteobacteria* (*Chloroflexi*). Le point commun à tous ces prédateurs est qu'ils se nourrissent de bactéries. *Myxobacteria*, par exemple, est une bactérie du sol qui, en temps normal, forme des nodules fixateurs d'azote sur les racines et les tiges de légumineuses. Mais lorsque les conditions nutritives deviennent limitantes, il lui arrive de présenter un comportement de prédation. C'est aussi le cas de *Cupriavidus necator*, une autre bactérie du sol qui devient prédatrice quand sa croissance est limitée faute de concentrations élevées en cuivre. Contrairement à ces dernières, *Lysobacter* est un genre bactérien dont la prédation s'effectue en groupe, une stratégie dénommée « meute de loups ». Mais contrairement aux Balo, quand le contact est établi entre le prédateur et la proie, aucune structure d'attachement à la proie n'est observée ou définie. Chez *Myxobacteria*, la prédation s'opère aussi de manière groupée, par un déplacement de l'essaim jusqu'à la rencontre fortuite d'une proie. La prédation se déroule en deux temps : d'abord, les cellules mères attaquent, piègent et affaiblissent la proie, puis les nouvelles recrues, produites principalement par division cellulaire, la contraignent dans un espace réduit et la dévorent. Quand les nutriments sont rares, cependant, les bactéries *Myxobacteria* s'agrègent en une structure latente de plusieurs dizaines de micromètres qui favorise leur survie (*ci-contre*).





de *Bdellovibrio bacteriovorus* au début du stade de colonisation des poumons pourrait donc contribuer à contrôler cette colonisation chronique.

DES BALO CONTRE LA PARODONTITE ?

Les Balo constituent aussi une piste pour lutter contre la parodontite, une maladie infectieuse polymicrobienne qui provoque l'inflammation des tissus de soutien de la dent (la parodonte). L'infection est due à de nombreuses bactéries pathogènes à Gram négatif, comme *Porphyromonas gingivalis* et *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*, qui sont enchâssées dans un biofilm complexe, la plaque dentaire. Les traitements de la parodontite consistant à éradiquer le biofilm par des thérapies classiques comme l'utilisation d'antibiotiques se révèlent de plus en plus compliqués et souvent inefficaces, voire déconseillés. Mais en 2011, l'équipe de Wim Teughels, à l'université catholique de Louvain, en Belgique, a montré que diverses souches de Balo étaient capables d'attaquer, en culture, six sortes de bactéries pathogènes de la plaque dentaire et de réduire ainsi considérablement leur population, qu'elles soient cultivées seules ou ensemble, mélangées à des bactéries à Gram positif de la plaque ne faisant pas partie du menu des Balo. Toutefois, des études complémentaires sont nécessaires dans des conditions se rapprochant plus de l'environnement

B. bacteriovorus a pour les crevettes un effet protecteur contre les infections à *Vibrio*

buccal, notamment parce que les bactéries pathogènes de la plaque dentaire sont anaérobies, tandis que les Balo ont besoin d'oxygène pour vivre. En 2019, Romeo Patini, de l'université catholique du Sacré-Cœur, à Rome, et ses collègues ont en effet montré qu'en conditions anaérobies, les Balo ne se développent pas suffisamment pour attaquer efficacement certaines de ces bactéries pathogènes.

Des expériences menées *in vivo* chez la larve du poisson-zèbre suggèrent par ailleurs que le Balo *Bdellovibrio bacteriovorus* pourrait aider à combattre une souche de la bactérie *Shigella flexneri* résistante à deux antibiotiques, la streptomycine et la carbénicilline. Les bactéries *Shigella*, à Gram négatif, font partie des agents pathogènes causant la dysenterie. Selon

L'Organisation mondiale de la santé, elles sont responsables de plus d'un million de décès chaque année dans le monde, principalement dans les pays en développement. En 2016, Alexandra Willis, de l'Imperial College London, et ses collègues ont montré qu'en injectant *B. bacteriovorus* dans le rhombencéphale (la partie postérieure du cerveau) de larves de poissons-zèbres infectées par *Shigella flexneri*, les Balo augmentaient de 35% leur taux de survie, agissant conjointement avec le système immunitaire des larves avant que celui-ci n'élimine *B. bacteriovorus* à son tour. Le système immunitaire du poisson-zèbre présentant de grandes similarités avec celui de l'humain, cette stratégie fonctionnerait-elle aussi chez ce dernier?

PROTEGER LES ELEVAGES DE CREVETTES

Outre les humains, l'aquaculture et l'élevage sont tout aussi concernés par l'essor des bactéries antibiorésistantes. Chez les crevettes à pattes blanches (*Penaeus vannamei*) notamment, élevées en eau douce dans divers pays d'Amérique et d'Asie, plusieurs bactéries du genre *Vibrio*, comme *V. parahaemolyticus* et *V. cholerae* (le bacille du choléra), provoquent des épidémies généralisées et sont responsables d'une perte atteignant parfois 90% de l'élevage, l'infection n'étant pas toujours contrôlable par des antibiotiques. Or en Chine, notamment, l'aquaculture produit annuellement 300 000 tonnes de ces crevettes à destination alimentaire.

Dans ce cas encore, les Balo offrent une piste intéressante. En 2015, Haipeng Cao, de la Shanghai Ocean University, et ses collègues, sont parvenus à éradiquer dix souches pathogènes différentes de *Vibrio* en culture en les incubant avec le Balo *Bdellovibrio bacteriovorus*. De plus, le prédateur a indéniablement pour les crevettes un effet protecteur contre les infections à *Vibrio*: en reproduisant l'expérience *in vivo*, les chercheurs ont observé que le taux de survie des crevettes augmentait de plus de 60%.

Il semble par ailleurs que les bactéries prédatrices ne soient pas nocives pour les cultures cellulaires humaines ou animales, aucune maladie n'ayant été associée ou attribuée à une infection par des Balo. Contrairement à ce que l'on observe avec d'autres bactéries ou des bactériophages employés en thérapie phagique, ils ne déclenchent qu'une faible réaction inflammatoire et, à ce jour, aucune résistance permanente n'a été décelée chez leurs proies.

Les Balo sont encore peu étudiés malgré le grand potentiel qu'ils recèlent et le nouvel engouement qu'ils suscitent. On est encore loin des 6990 articles que le portail Pubmed a référencés sur les bactéries *Staphylococcus* pour la seule année 2018! Néanmoins, il ne fait plus aucun doute que ces bactéries prédatrices gagneront en

DES VESICULES SOUS-ESTIMEES

Dès les années 1960, on s'est aperçu que les bactéries et les cellules eucaryotes (c'est-à-dire comportant un noyau) sécrètent des vésicules membranaires. Depuis, on sait que c'est aussi le cas des archées. Ces vésicules jouent un rôle dans le système de défense du vivant. Il s'agit d'une des mécanismes très anciens de l'évolution. Et beaucoup plus répandu qu'on ne le pensait, comme l'ont observé Steven Biller, de l'institut de technologie du Massachusetts, et ses collègues en 2014 en montrant que les cyanobactéries *Prochlorococcus* produisent d'étonnantes quantités de ces vésicules dans leur milieu naturel.

Il s'agit de petits compartiments clos formés à partir de membranes cellulaires sécrétées dans le milieu extérieur ou intervenant dans le trafic intracellulaire. De formes, tailles, compositions et fonctions variées (défense contre certaines infections, protection antivirale, libération de facteurs de virulence, matériel de transport génétique, moyen de communication entre organismes, leurre, nourriture pour organismes unicellulaires, inhibiteur de croissance...), ces vésicules sont produites par une diversité de mécanismes. Dans leur environnement, elles sont capables d'interagir avec des cellules et même des virus aquatiques, avec lesquels il arrive qu'elles soient confondues. En effet, de taille comparable (entre 10 et 230 nanomètres), elles sont parfois présentes en nombre très élevé (supérieur à 10^6 vésicules par millilitre). Les virus aquatiques sont donc probablement un peu moins nombreux qu'on ne le pensait, et leur impact sur l'écosystème plus faible. Les bactéries prédatrices de bactéries v ont dès lors toute leur place.

importance dans un futur proche, tant leurs applications potentielles sont nombreuses (voir la figure page ci-contre). Il reste cependant encore beaucoup à comprendre le rôle des Balo dans les milieux naturels, qui n'ont encore jamais été étudiés de façon globale.

BIBLIOGRAPHIE

J. A. Ezzedine et S. Jacquet, **Bactéries prédatrices : zoom sur les Bdellovibrio et organismes apparentés (BALOs)**, N3AF, vol. 2, 2019.

S. Paix et al., **Diversity, dynamics and distribution of Bdellovibrio and like organisms in peri-alpine lakes**, *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 85, article 02494-18, 2019.

S. Jacquet et C. Depecker, **Les virus, piliers de la vie marine**, *Pour la Science Hors-Série n° 104*, pp. 36-43, 2019.

E. Jurkevitch et Y. Davidov, **Phylogenetic diversity and evolution of predatory prokaryotes**, dans E. Jurkevitch (éd.), *Predatory Prokaryotes - Biology, Ecology and Evolution*, Springer, 2006.

E. Azam et al., **The ecological role of water-column microbes in the sea**, *Marine Ecology Progress Series*, vol. 10, pp. 257-263, 1983.

PLEIN DE BALO DANS LES LACS PÉRIALPINS

Aujourd'hui, les nouvelles techniques de séquençage à haut débit et de la bio-informatique offrent la possibilité de décrypter la diversité de ces bactéries et leurs interactions avec l'environnement. Fin 2017, nous avons ainsi lancé un projet dans ce sens, visant à étudier la diversité, la structure, l'abondance et les rôles des Balo dans divers écosystèmes aquatiques. Nos premiers résultats sont déjà très prometteurs. Nous avons découvert que certains prédateurs bactériens étaient parfois très abondants dans les grands lacs périalpins. La famille des Peredibacteraceae – en particulier la bactérie *Peredibacter starrii*, majoritaire – représentait parfois jusqu'à 7% de l'abondance totale des bactéries, tandis que les deux autres familles analysées, les Bdellovibrionaceae et les Bacteriovoraceae, restaient très peu représentées. Ces trois familles occupaient d'ailleurs des zones différentes de la colonne d'eau : les Peredibacteraceae dominant près de la surface, tandis que les Bdellovibrionaceae et les Bacteriovoraceae étaient plus abondantes en profondeur. Stratégies de vie différentes? Niches écologiques distinctes? L'avenir nous le dira. Une chose est sûre, la prochaine fois que vous vous baignerez dans le lac Léman, vous ne le regarderez pas de la même façon.

PRÉSENTATION

Les effectifs de la population précolombienne n'ont jamais été évalués de façon fiable.

Aujourd'hui, les relevés effectués par lidar aéroporté permettent de repérer les vestiges archéologiques cachés par la végétation et de les cartographier.

Les premières campagnes menées en Mésoamérique montrent que les territoires fondés étaient bien plus peuplés et exploités qu'on ne le pensait.

Ce n'est qu'un début, car ces campagnes n'ont couvert qu'une partie infime de ce qui reste à explorer.

LES AUTEURS



WILLIAM E. CARTER
consultant en géodésie
et ancien professeur de génie
civil à l'université de Houston,
au Texas



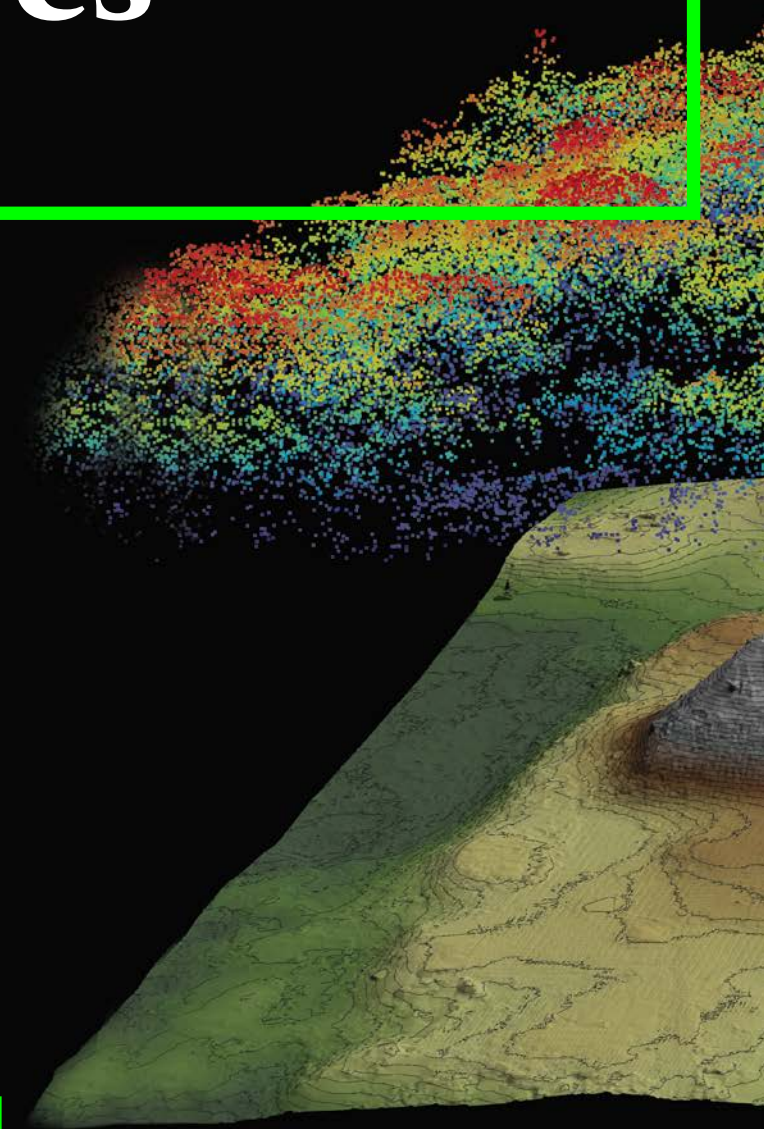
JAMES L. SHRESTHA
directeur du Centre américain
de cartographie par laser
aéroporté (NCALM)
à l'université de Houston

Les Précolombiens dénombrés au lidar

Grâce à la technique du lidar aéroporté, les archéologues repèrent et cartographient des sites précolombiens cachés par une épaisse forêt. Ce qui permet de mieux quantifier les populations du passé.

Les prêtres, soldats ou marchands européens qui, à la fin du xvi^e siècle, découvraient le Nouveau Monde ont souvent exprimé leur surprise devant le nombre des agglomérations amérindiennes. Ont-ils tenté de les recenser? Nous l'ignorons. En tout cas, aucune estimation ne nous est parvenue, ce qui est bien dommage pour les archéologues et les anthropologues qui étudient l'Amérique précolombienne. Toutefois, depuis l'apparition d'une nouvelle technique – la cartographie par lidar aéroporté –, le recensement à grande échelle des cités, des villages, champs et autres infrastructures précolombiennes devient envisageable.

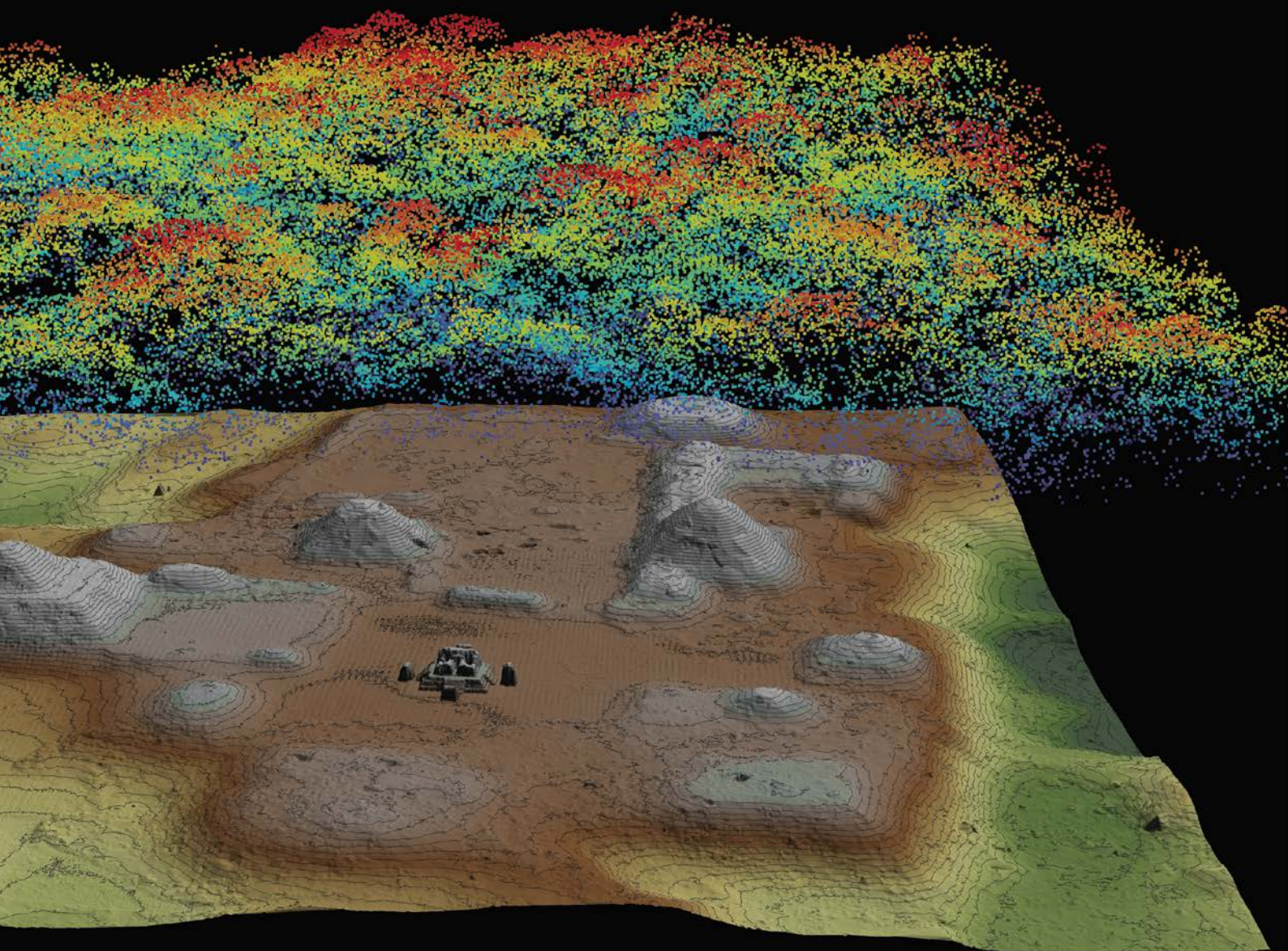
Cette tâche est d'autant plus concevable que, pour aménager leurs cités et leurs environnements, les civilisations précolombiennes pratiquaient à grande échelle le terrassement. De fait, aujourd'hui, de nombreux Américains vivent non loin de vestiges de cités, de cimetières et de décharges précolombiens, mais les prennent souvent pour de simples





JUAN CARLOS FERNANDEZ DIAZ
Chercheur sénior au centre NCALM
de l'université de Houston

Le lidar est une forme de télédétection bien adaptée à la cartographie de sites archéologiques couverts par une végétation dense, comme le montre ce relevé d'une partie du site d'El Ceibal, dans le Petén, au Guatemala. Les fausses couleurs traduisent l'altitude de chaque point relevé (partie supérieure de la figure), de la plus basse (bleu) à la plus haute (rouge). La carte résultante (en bas) montre des structures anciennes d'une frappante variété



accidents de terrain... Cette confusion est moins probable s'agissant des grands tertres qui, de l'Amazonie au Canada, ont été édifiés par des cultures amérindiennes, par exemple pour porter des bâtiments de culte (parfois en pierre comme chez les Mayas) ou à usage funéraire. On connaît bien nombre d'entre eux, isolés ou groupés, tels le tumulus du Grand Serpent dans l'Ohio, Poverty Point en Louisiane, Spiro Mounds dans l'Oklahoma, Manitou Mounds au Canada et le complexe de tertres de la vallée de la rivière Upano au Guatemala, mais les vestiges de nombreux autres tertres sont peu décelables. En 1930, dans son ouvrage *The Mound-Builders*, l'archéologue américain Henry Clyde Shetrone estimait que plus de 100 000 tumulus artificiels sont dispersés à travers 20 États des États-Unis.

DES ESTIMATIONS QUI VARIENT BEAUCOUP

Une telle ampleur suggère une population précolombienne considérable. Examinons le cas de Cahokia, une grande et ancienne cité du peuple des Mississippiens située près de Saint Louis, dans le Missouri, aux États-Unis. À son apogée, entre 1050 et 1150 (donc bien avant l'arrivée des Européens), cette agglomération constituait sans doute un centre d'activité et de commerce comparable aux grandes cités européennes du Moyen Âge. Les archéologues y ont découvert plus de 120 tumulus de tailles diverses. L'un d'entre eux, le tumulus du Moine (Monk's Mound), un empilement de quatre terrasses, constitue la plus grande pyramide connue aux États-Unis. Haut de 30 mètres pour 300 mètres de long et 200 mètres de large, ce vaste terrassement met en jeu plus de 600 000 mètres cubes de terre... Tout cela suggère que la population de Cahokia devait être considérable, mais les estimations varient, allant de 6 000 à plus de 100 000 habitants à son apogée.

Un autre cas illustre la plausibilité d'une très forte population précolombienne : les efforts colossaux accomplis par les Mayas vivant dans les terres marécageuses de certaines régions du Yucatán afin de pouvoir y cultiver du maïs, des courges et des avocats. La façon dont ces habitants ont aménagé des paysages marécageux entiers en dit long sur leurs compétences en ingénierie hydraulique et sur le haut niveau d'organisation de la société maya. Et l'échelle à laquelle ils ont réalisé ces aménagements suffisait à nourrir des dizaines de milliers de personnes vivant dans un rayon de plusieurs centaines de kilomètres. Cette constatation implique l'existence de réseaux d'échange complexes et des moyens de transport correspondants.

Pour autant, sans indices certains sur les effectifs des Mississippiens ou sur l'importance

de la population maya, comment savoir ? Les archéologues tentent de répondre à cette question par deux approches, qui souffrent toutes deux du manque de données disponibles.

La première consiste à remonter le temps : après avoir établi l'état le plus ancien de la population pouvant être reconstitué à partir des recensements incomplets et des témoignages informels disponibles, on tente de calculer les effectifs qui se sont succédé dans le passé en faisant des hypothèses raisonnables sur les taux de naissance et de mortalité à chaque génération.

La population du centre du Mexique serait passée de 25 millions d'habitants à seulement 700 000 à l'ère coloniale

La seconde approche se fonde sur les données archéologiques disponibles : elle consiste à répertorier les hameaux, les villages, les villes, les cités et tous les aménagements présents dans un territoire, puis à leur attribuer des nombres plausibles d'habitants.

Ces deux approches n'ont pas permis aux archéologues de s'entendre sur une estimation des populations précolombiennes. Tout d'abord, les reconstitutions démographiques fondées sur une remontée du temps sur la base de l'état démographique plusieurs siècles après l'arrivée des Européens n'ont rien de fiable : des différences de quelques points de pourcentage seulement dans l'estimation des taux de mortalité conduisent à des différences de plusieurs dizaines de millions d'habitants dans les résultats.

Ensuite, les bactéries et les virus européens ont infligé de terribles épidémies aux populations du Nouveau Monde, ce qui complique les comptages démographiques. Ainsi, selon les archives historiques, la population du Mexique central serait passée de 25 millions d'habitants à seulement 700 000 au cours du premier siècle de l'ère coloniale... L'importance de cet effondrement est toutefois mise en cause par certains archéologues pour qui l'idée que 25 millions de Mayas auraient habité le Mexique central vers 1500

est très exagérée. Ces *low counters* (tenants d'une estimation basse), comme on les nomme dans notre jargon, s'opposent aux *high counters* (tenants d'une estimation haute) qui parlent, eux, de quelque 40 millions d'habitants dans la même région.

Pour réfuter l'idée que des dizaines de millions d'indigènes peuplaient le Nouveau Monde à l'arrivée des Européens, les *low counters* demandent: «Où sont les vestiges des cités nécessaires pour loger tant de gens?» À cette question, les *high counters* proposent deux réponses: d'une part, l'étendue et la densité des anciens villages connus seraient sous-estimées; d'autre part, il resterait des sites anciens à découvrir.

Si de telles «cités perdues» existent, on est tenté de dire qu'à l'ère spatiale, il devrait être facile de les repérer et cartographier. Après tout, la Nasa et les militaires lancent régulièrement des satellites équipés de caméras à haute résolution capables de prendre des photos dans une large plage de longueurs d'onde, ainsi que des instruments de type radar (des imageurs et des télémètres en ondes radio) ou lidar (acronyme anglais de *light detection and ranging*, désignant un télédécteur et télémètre par laser). Ces instruments envoient des impulsions électromagnétiques courtes (ondes radio et faisceaux laser) et mesurent leur temps d'aller-retour; ce temps détermine la distance qui sépare l'instrument de l'élément de surface au sol qui a réfléchi l'impulsion, ce qui permet de dresser des cartes du relief de la surface sondée.

APPRENDRE A RECONNAITRE DES SIGNATURES LIDAR

Le défi à relever afin de parvenir à une bonne estimation d'une population ancienne est cependant bien plus qu'une simple tâche de cartographie. Il faut en effet reconnaître les signatures des activités passées dans un paysage qui s'est modifié au fil de plusieurs siècles. Cela requiert une résolution suffisante, ce qui n'est pas le cas avec les systèmes satellitaires, à cause de leur grande vitesse de défilement par rapport au sol et de leur haute altitude. Fondée sur la prise de relevés photographiques par avion, la topographie par photogrammétrie est une autre approche possible, mais elle suppose un certain éclairage solaire et ne peut fournir d'information sur un terrain situé sous un dense couvert forestier.

Il existe heureusement une technique qui évite ces écueils: les lidars aéroportés (voir l'encadré ci-contre). Ces dispositifs embarquables sur des aéronefs légers prélèvent un grand nombre de données, assez en tout cas pour qu'il soit possible de retrancher des images obtenues les échos renvoyés par la végétation. Le traitement des échos renvoyés

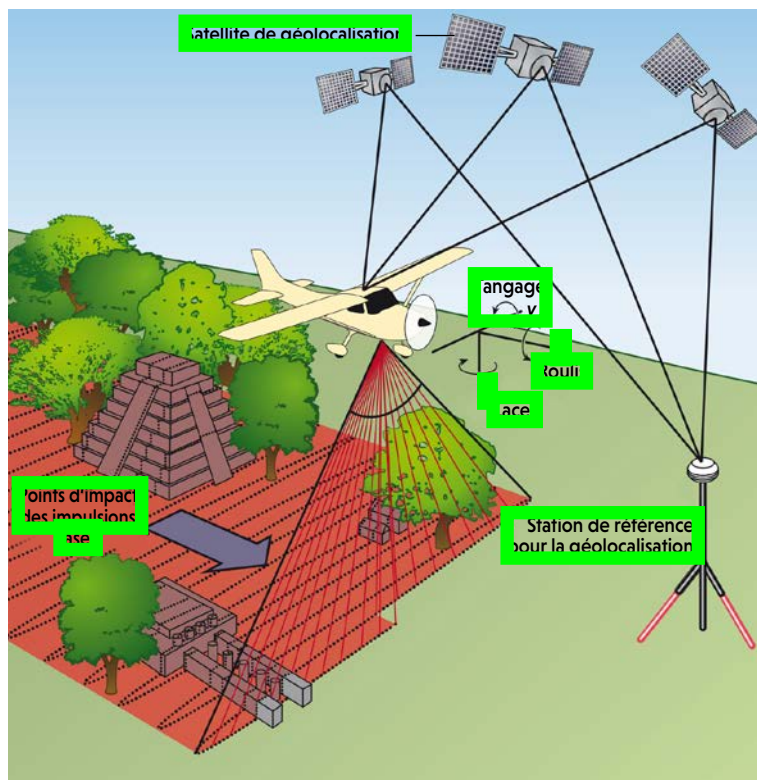
LE PRINCIPE DU LIDAR AEROPORTE

Les avions équipés d'un lidar volent à basse altitude (entre 300 et 1 000 mètres au-dessus du sol) et à des vitesses relativement faibles par rapport au sol (de 60 à 100 mètres par seconde, soit moins de 300 kilomètres par heure). Un lidar aéroporté combine des données issues d'un système de géolocalisation, des gyroscopes et des accéléromètres du système de navigation inertielle avec celles des scanners et détecteurs laser. La combinaison de ces différents types de données est nécessaire pour calculer les coordonnées précises de chaque point ayant réfléchi un écho laser émis vers la surface.

Le cœur d'un système lidar aéroporté est constitué par un ou plusieurs lasers émettant de brèves impulsions lumineuses, le plus souvent dans l'infrarouge, d'une durée typique de quelques nanosecondes, se répétant de quelques dizaines à quelques centaines de milliers de fois par seconde. Pour couvrir le terrain, les impulsions doivent y être envoyées selon deux dimensions: la première est parcourue grâce à la progression de l'avion, tandis que la seconde, qui doit être couverte de façon quasi instantanée (d'où la très haute fréquence d'émission des impulsions), lui est perpendiculaire. Elle est parcourue très vite au moyen d'un balayage optique, réalisé le plus souvent à l'aide d'un miroir oscillant ou d'un polygone en rotation. Combiné au balayage optique ultrarapide, le déplacement de l'avion permet de sonder une large bande de terrain. Les impulsions laser émises s'éloignent dans un premier temps de l'avion, avant de rencontrer soit de la végétation, soit des structures anthropiques, soit des structures géologiques (le sol), qui réfléchissent toutes des photons vers le détecteur. Ces derniers sont enregistrés par un photodétecteur, tandis qu'un chronomètre mesure le temps d'aller-retour entre le capteur et les réflecteurs. En divisant le temps de vol de la lumière par 2, puis en multipliant le résultat par la vitesse de la lumière, on obtient la distance oblique, c'est-à-dire la distance en ligne droite entre la position instantanée de l'émetteur et la surface réfléchissante.

Afin de déterminer les coordonnées de chaque réflecteur, il faut connaître non seulement la distance oblique et l'angle de balayage à l'instant d'émission de chaque impulsion, mais aussi la position géocentrique (X, Y et Z) et l'orientation (roulis, tangage et lacet) de l'avion. Cette information est produite par un système de navigation intégré (qui traite les observations des systèmes de géolocalisation par satellite) et d'une unité de mesure inertielle.

Une fois calculées toutes les positions tridimensionnelles de tous les échos laser, on obtient un énorme nuage de points (voir l'illustration de la première page). Des algorithmes déterminent alors si la surface qui a produit chaque point de données était plus probablement une structure d'origine humaine, de la végétation, ou du sol, ce qui permet de dresser une carte de la zone sondée.



Uniquement par le sol produit une grille 3D qui constitue une carte approximative de la surface sous-forestière – ce que l'on nomme un modèle altimétrique numérique. Très utiles pour nombre d'applications, les modèles altimétriques numériques le sont en particulier en archéologie, puisqu'ils permettent de repérer sur le terrain toutes les structures anthropiques ayant une signature lidar (renvoyant les échos distincts de ceux de leur environnement naturel).

UNE RESOLUTION SPATIALE DE L'ORDRE DU MÈTRE

Ce sont particulièrement les lidars aéroportés émettant des centaines de milliers d'impulsions laser par seconde et dotés d'une électronique capable d'enregistrer plusieurs échos laser à la fois qui se sont révélés très utiles en cartographie archéologique. Même dans les denses forêts tropicales d'Amérique centrale, ces détecteurs aéroportés enregistrent suffisamment d'échos renvoyés par les constructions anciennes, les routes, les murs, les réservoirs d'eau et les terrasses agricoles pour que l'on puisse produire des images en relief de ces structures cachées par le couvert végétal. La résolution spatiale des images est de l'ordre du mètre, 10 à 20 fois meilleure que celles atteintes avec les satellites.

Même un œil non averti reconnaît alors des structures anthropiques, soit par leurs formes géométriques régulières – carrés, rectangles, cercles, lignes droites... – soit parce que leur disposition sur le territoire est aussi géométrique. Toutes les structures linéaires – routes, canaux d'irrigation, etc. – ressortent particulièrement bien. Dans certains cas cependant, il peut être difficile, même pour un expert, de déterminer si la signature lidar d'un monticule isolé est une structure géologique ou culturelle (pyramide). Les modèles altimétriques numériques venant avec des coordonnées déterminées par géolocalisation, les archéologues peuvent aller vérifier sur le terrain.

Au cours de la dernière décennie, avec le soutien de la NSF (National science foundation), le Centre américain de cartographie par laser aéroporté (NCALM, pour National center for airborne laser mapping) a mené plus de 20 projets d'intérêt archéologique au Mexique, au Belize, au Guatemala et au Honduras. La surface totale cartographiée dépasse 6500 kilomètres carrés.

L'essentiel de ces travaux a porté sur les basses terres mayas, une région qui inclut la péninsule du Yucatán, le nord du Guatemala et le Belize. Prédominante dans cette région, la culture maya est connue pour ses majestueuses agglomérations composées de pyramides à degrés, de temples et d'autres bâtiments de pierre calcaire magistralement taillée et gravée.

Parmi les autres régions cartographiées figurent les cités de la culture Purépecha dans les hautes terres de l'État mexicain du Michoacán, aux bâtiments de pierre volcanique; les pueblos de maçonnerie (grès brut ou cailé et mortier) de la culture Chaco du sud-ouest des États-Unis; et des régions jamais cartographiées jusque-là de la jungle de la Mosquitia au Honduras, où un groupe culturel moins connu, probablement ancêtre d'un groupe actuel se nommant les Pech, a créé des tertres de terre servant de base à des bâtiments publics ou à des temples et maisons construits en bois et en chaume.

La plupart des grandes agglomérations de la zone maya sont déjà connues des archéologues, qui les étudient depuis des décennies. Celles qui sont facilement accessibles depuis les stations balnéaires, telles Cancún, Puerto Morelos, Playa del Carmen, Tulum ou Cozumel, ont été visitées par des myriades de touristes du monde entier. En dépit de cela, les images lidar ont souvent révélé que ces agglomérations étaient plus étendues qu'on ne le pensait. Elles ont aussi permis de repérer des milliers de structures auparavant inconnues telles que routes, canaux d'irrigation et autres terrassements défensifs ou agricoles.

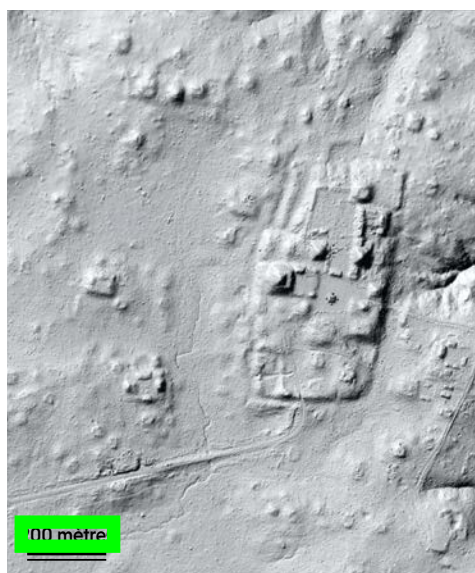
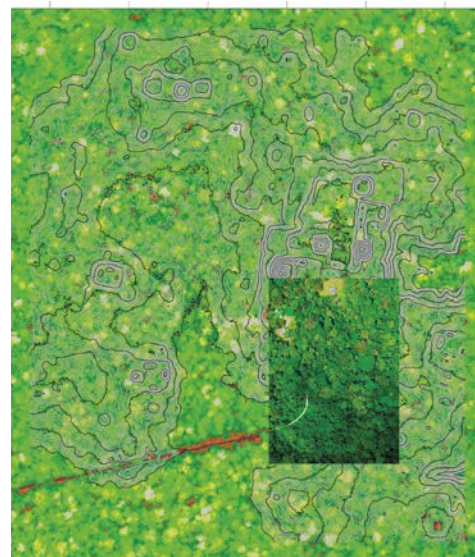
UN PREMIER RELEVÉ PAR LIDAR AÉROPORTÉ EN 2009

Le NCALM a effectué son premier relevé lidar en 2009, en couvrant une zone d'environ 210 kilomètres carrés. Centré sur la cité maya de Caracol, dans l'ouest de l'actuel Belize, le relevé a révélé un grand nombre de bâtiments, de chaussées, de réservoirs d'eau et de terrasses agricoles éparpillés. Ces découvertes vont bien au-delà de ce que soupçonnaient les archéologues étudiant la zone depuis des décennies.

En 2013, le relevé initial a été augmenté de 1 057 kilomètres carrés supplémentaires. Arlen et Diane Chase, qui travaillent aujourd'hui à l'université du Nevada, dirigeaient alors l'équipe des archéologues. Selon eux, le lidar aéroporté a transformé l'archéologie de la région maya. De fait, les données recueillies ont amené les archéologues à conclure que vers l'an 650, quelque 140 000 Mayas vivaient dans un rayon de 100 kilomètres autour de Caracol, soit un effectif supérieur d'au moins 150% à ceux estimés précédemment.

En 2015, le NCALM a réalisé un autre relevé à grande échelle dans le département du Petén, au Guatemala. Le lidar aéroporté a couvert quelque 480 kilomètres carrés centrés sur la cité maya d'El Ceibal. Cette région comprend des zones forestières protégées, des zones agricoles modernes, des prairies ainsi que des implantations anciennes et modernes. Quand les archéologues ont visualisé les





Les fouilles du site d'El Ceibal (ci-dessus) ont révélé que cette cité fondée il y a quelque 1 500 ans a été occupée pendant une longue période. Agglomération maya majeure, elle comprenait des milliers de bâtiments allant de grandes pyramides à de modestes maisons ; à l'apogée de la ville, on estime que 33 000 à 52 000 habitants y vivaient. Photographié depuis un avion, son quartier cérémoniel est pratiquement invisible (à droite, image du haut), alors qu'il apparaît clairement sur un relevé lidar (à droite, image du bas).

Images des levés géodésiques réalisés par lidar aéroporté, ils ont été stupéfaits de découvrir les ruines inconnues dispersées dans la région tout entière. Un décompte rapide a identifié plus de 15 000 structures anciennes, dont des pyramides, des plateformes, des temples, des murs et des maisons urbaines ou rurales (voir les images ci-dessus).

Les chercheurs, dirigés par Takeshi Inomata, de l'université de l'Arizona, ont utilisé des données lidar et archéologiques afin d'estimer que, dans les 480 kilomètres carrés entourant El Ceibal, la population a culminé entre 33 000 et 52 000 habitants au cours de la période allant de 600 à 950 de notre ère. La densité de population semble avoir été de 780 à 1 200 habitants par kilomètre carré

dans le centre urbain d'El Ceibal, et de 2,4 à 3,7 habitants par kilomètre carré en périphérie. Une pyramide d'une dizaine de mètres de hauteur située au milieu d'une zone déjà bien explorée par les archéologues constitue la découverte la plus étonnante.

7 À 11 MILLIONS DE MAYAS

En 2016, un relevé de 2 100 kilomètres carrés juste au nord d'El Ceibal a révélé 61 480 structures artificielles, dont un grand nombre étaient inconnues, ainsi que des terrains modifiés : de probables champs, des levées de terre soit défensives soit à fonctions hydrauliques. Ce relevé a également mis au jour de nombreuses grandes agglomérations contenant des bâtiments cérémoniels. Sur

Sur cette base, les chercheurs travaillant sur le projet PLI (*Pacunam lidar initiative*) estiment qu'entre l'an 600 et l'an 850, les basses terres mayas comptaient peut-être 7 à 11 millions d'habitants.

Ces chercheurs fondent leur estimation sur le nombre de structures révélées par les données lidar et sur la superficie estimée de terres cultivées, compte tenu des pratiques agricoles traditionnelles de la région, de la production agricole moyenne et des besoins caloriques élémentaires d'un humain. Cette estimation est assez prudente, et tombe dans la fourchette d'un certain nombre d'autres évaluations réalisées pour cette zone et cette période. Mais pour l'équipe du projet PLI, les données lidar, par leur niveau de détail inédit, lui confèrent une fiabilité plus grande.

A 500 kilomètres au sud-est de la région maya, au Honduras, une jungle différente – la Mosquitia – cache les ruines d'une culture moins connue, qui serait à l'origine du groupe actuel des Pech. En 2012, le NCALM a effectué dans la Mosquitia un relevé de trois zones reculées, dans l'objectif d'aider des explorateurs recherchant la *Ciudad Blanca*. Selon la légende, une mystérieuse « Cité blanche » aurait existé dans ces parages. Dans une seule vallée, le relevé lidar a mis en évidence les traces de 19 villages, le plus gros couvrant plus de 2 kilomètres carrés. Ce village se situe le long d'un ruisseau et comporte des tertres rectangulaires de 60 mètres de long, 10 mètres de large et 5 mètres de haut (voir l'image page 79). Disposés perpendiculairement, ils dessinent une sorte de place publique.

Les vérifications menées trois ans plus tard dans les principaux sites repérés ont montré que ces tertres sont en terre compactée. Il n'est pas possible de déterminer si cette

Entre 600 et 850, les basses terres mayas auraient compté 7 à 11 millions d'habitants

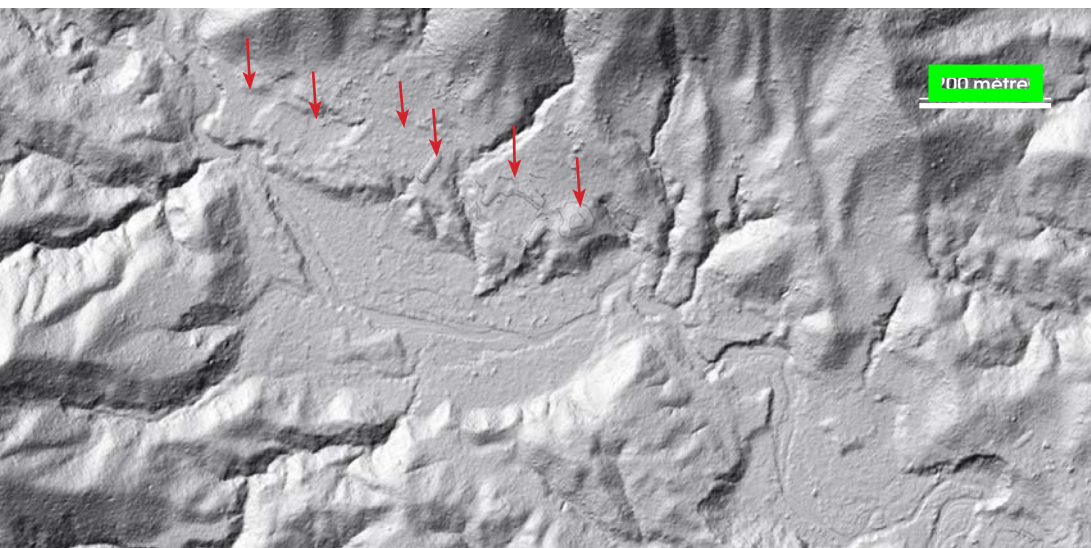
agglomération particulière ou une autre correspond à la légendaire *Ciudad Blanca*, mais les données lidar montrent que ces habitats sur monticules de terre étaient répandus dans toute la région de la Mosquitia. Comme les terrassements réalisés ont dû exiger beaucoup d'organisation et de main-d'œuvre dans le transport des matériaux, les cultures et l'irrigation, ces villages des monticules de terre suggèrent l'existence dans la région de populations importantes et de systèmes politiques complexes.

LE LIDAR EST UN OUTIL PRÉCIEUX, MAIS IL A SES LIMITES

Tous les sites explorés jusqu'ici illustrent à la fois tout ce que nous savons déjà, et tout ce qu'il nous reste encore à apprendre sur la distribution géographique des peuples qui vivaient aux Amériques avant l'arrivée des Européens, à la fin du xv^e siècle. Dans ce processus de découverte, la cartographie par lidar aéroporté est un outil précieux, mais qui a ses limites.

Le tumulus du Moine (ci dessous, gauche) est le plus grand tumulus du site historique de Cahokia, sur la rive du Mississippi qui fait face à Saint Louis, dans le Missouri. Aujourd'hui, des marches et une allée ont été construites pour que les visiteurs voient mieux les quelque 20 tertres de diverses tailles et usages de cette ancienne agglomération amérindienne. Une vue d'artiste à droite montre le tumulus du Moine et un autre tumulus (au premier plan) tels qu'on a pu les voir à l'époque, quand des temples, des bâtiments publics ou d'autres structures de bois et de chaume occupaient leur sommet.





Dans la jungle de la Mosquitia du Honduras, une dense végétation dissimule de nombreux sites archéologiques possibles. Les relevés par lidar aéroporté ont cependant apparaître à l'œil exercé des structures qui semblent d'origine humaine et non pas naturelle (flèches).

La première et la plus évidente est qu'une grande partie des implantations anciennes ont été détruites par les villages et infrastructures modernes, ce qui ne peut que fausser les estimations de la démographie ancienne. Dans les zones où la forêt a tout figé et où les anciens habitats semblent conservés dans l'état dans lequel ils ont été abandonnés, le lidar n'est en mesure que de détecter les grandes structures gouvernementales ou cérémonielles. Les petites structures, telles les fondations de petites constructions résidentielles, peuvent être aujourd'hui indétectables parce qu'elles sont enfouies sous des sédiments ou parce qu'elles ont été érodées au fil des siècles.

LES STRUCTURES REPEREES N'ETAIENT PAS FORCEMENT OCCUPEES A LA MEME PERIODE

Un problème plus important encore est que les structures anthropiques repérées par les archéologues dans les données lidar n'étaient pas forcément toutes occupées à la même période, ce dont il faut tenir compte pour éviter les surestimations. Déterminer quelles agglomérations étaient habitées à un moment donné est un processus long et ardu, qui implique des fouilles et des datations, éventuellement de restes humains.

Les archéologues ont tiré plusieurs enseignements de ces premières explorations au lidar aéroporté en Mésoamérique. D'une part, on a découvert des agglomérations inconnues dans presque toutes les zones cartographiées. D'autre part, les sites déjà connus se sont révélés bien plus vastes et plus complexes qu'on ne le pensait. Il est aussi apparu que les investissements faits dans les infrastructures, la gestion de l'eau, le transport et la défense étaient bien plus importants qu'on ne l'avait précédemment identifié ou imaginé.

Toutes ces nouvelles données changent nos hypothèses sur le peuplement, l'agriculture, l'aménagement des sols, le commerce, la guerre, les structures politiques et les interactions sociales précolombiennes.

ENCORE DE VASTES ETENDUES A EXPLORER

Etant donné qu'il reste de vastes étendues couvertes de jungles peu explorées – la Mosquitia au Honduras et au Nicaragua, le Darién au Panama et dans le nord de la Colombie, les hautes forêts brumeuses des Andes, et la plus grande de toutes, la forêt amazonienne –, il est probable que le lidar continuera à nous révéler de nouvelles cités disparues et d'autres installations humaines oubliées, ce qui devrait nous faire revoir régulièrement à la hausse les effectifs de la population précolombienne.

Les importants efforts des archéologues déployés jusqu'à présent pour cartographier au lidar les zones archéologiques du Mexique et d'Amérique centrale ont révélé moins de 5% des zones de la région couvertes par une forêt dense. Le lidar aéroporté pourrait couvrir le reste en une décennie environ, pourvu qu'un soutien financier suffisant soit garanti. Le grand défi consistera alors à recruter l'armée d'archéologues nécessaire afin d'analyser, d'interpréter et de valider sur le terrain toutes les données recueillies à distance.

Nous espérons que ces futures observations au lidar aéroporté produiront une meilleure estimation de la population précolombienne, et permettront de mettre enfin d'accord les *low counters* et les *high counters*. Même s'il s'avère que cet objectif est inatteignable, le lidar aéroporté continuera de nous alimenter en découvertes fascinantes sur les peuples qui habitaient les Amériques avant l'arrivée des Européens.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

BIBLIOGRAPHIE

M. A. Canuto et al., **Ancient lowland Maya complexity is revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala**, *Science*, vol. 361, pp. 1313-1314. 2018.

T. Inomata et al., **Archaeological applications of airborne LiDAR to examine social changes in the Ceibal region of the Maya lowlands**, *Plos One*, vol. 13(2), e0191619. 2018.

N. E. Carter et al., **Archaeology from the air**, *American Scientist*, vol. 104, pp. 28-35. 2016.

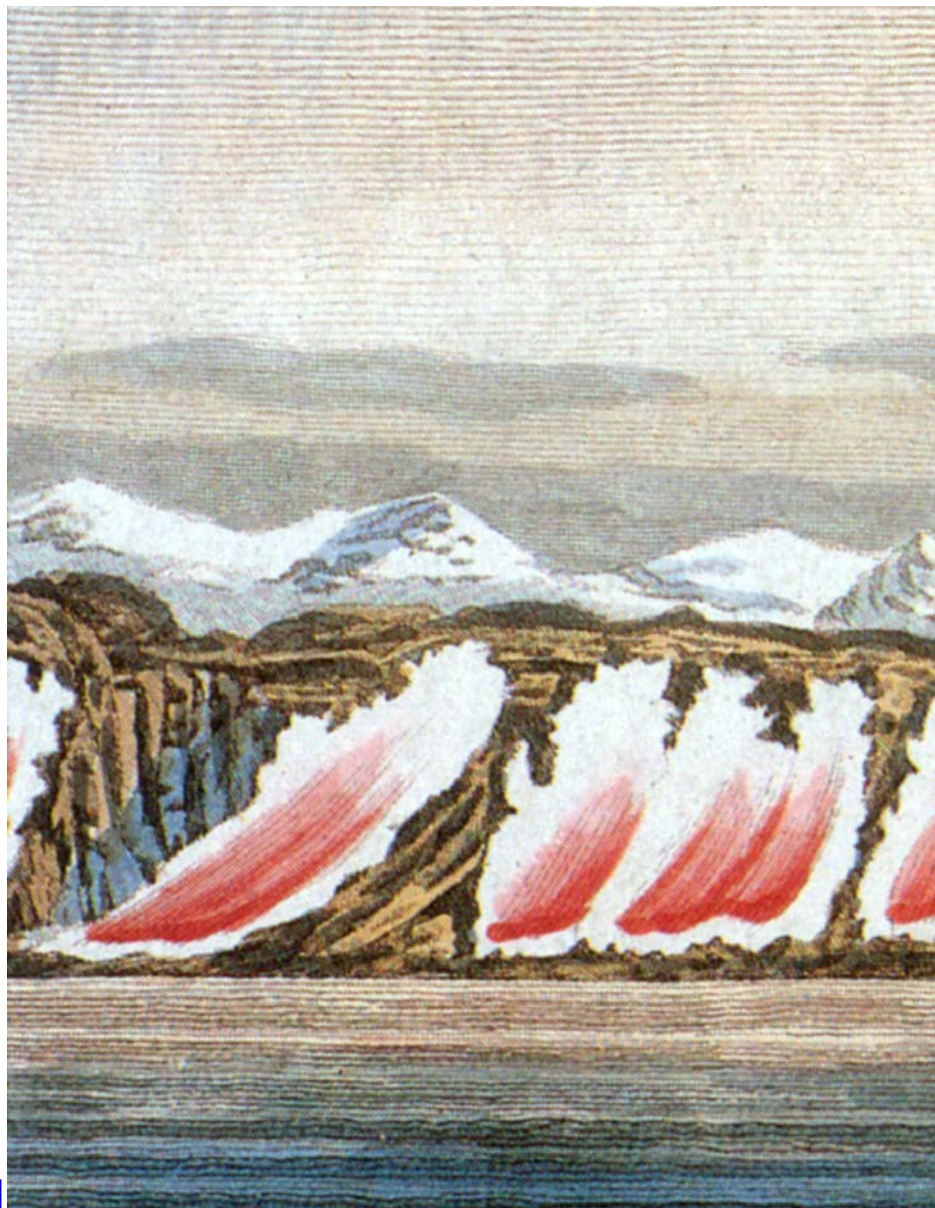
A. F. Chase et al., **The use of LiDAR in understanding the ancient Maya landscape**, *Advances in Archaeological Practice*, vol. 2(3), pp. 208-221. 2014.

Rouge...

Des champs de neige rouge dans
les montagnes, des averses pourpres,
des traces sanglantes de pas sur
un tapis neigeux immaculé...
Au XIX^e siècle, les savants multipliaient
les hypothèses et les études
pour comprendre cet étrange
phénomène. Éluclidé il y a peu.

« **L**ycosthenes raconte qu'en Saxe il pleut des poissons en grand nombre: et que du temps de Loys empereur, il pleut trois jours et trois nuits durant, du sang: et que l'an 989, il tomba vers la ville de Venise, neige rouge comme du sang », relate Ambroise Pare en 1579 dans l'*Appendice au livre des monstres*. De la neige rouge comme du sang? Les preuves de ce phénomène singulier affluent de toutes parts. Parfois, une fine couche de neige blanche la recouvre et, lorsque le voyageur la foule, il laisse des traces sanglantes sur son passage. Ce phénomène effrayant accentue la crainte que provoquent les montagnes. Traverser un tel champ, est-ce une punition de Dieu? Est-on alors maudit par des esprits maléfiques ou des mauvais génies?

Durant plusieurs siècles, les voyageurs redoutent ainsi de rencontrer cette terrible neige rouge. De premières explications



MESSIAUTH

Des le ^{xvi}^e siècle, divers récits témoignaient de neige rouge, mais les savants ne se sont penchés sur ce phénomène qu'au ^{xviii}^e siècle, quand le naturaliste d'Horace Bénédic de Saussure en a observé de vastes étendues dans les Alpes.

Algues, pollen, champignons,

avance diverses hypothèses, sans toutefois réussir à trancher.

Il a fallu attendre le ^{xx}^e siècle pour se convaincre que la neige rouge était due à une algue, et les années 2000 pour s'apercevoir qu'une multitude d'espèces d'algues étaient

MAURICE

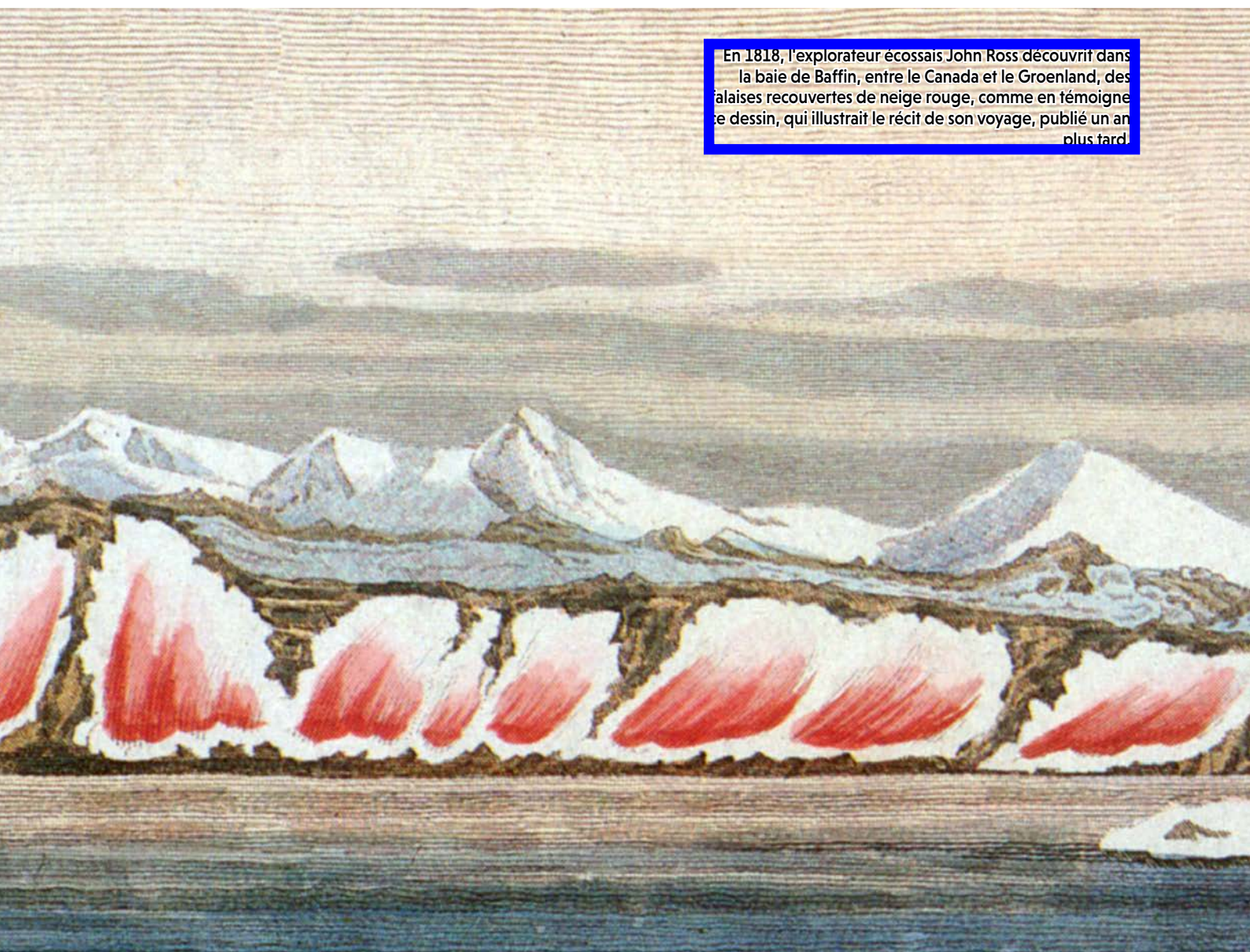


FREDERIQUE REMY
Directrice de recherche du CNRS
au Laboratoire d'études en géophysique
et océanographie spatiales,

Toulouse

comme neige

En 1818, l'explorateur écossais John Ross découvrit dans la baie de Baffin, entre le Canada et le Groenland, des falaises recouvertes de neige rouge, comme en témoigne ce dessin, qui illustre le récit de son voyage, publié un an plus tard.





assurantes sont proposées au milieu du XVIII^e siècle. Ce phénomène serait dû à la couleur de la terre ou de l'air local. « En Arménie, il tombe des neiges rouges qu'Eustazio attribue au vermillon qui se trouve dans ces contrées », affirme le chroniqueur de la *Gazette de France* en 1772. Il ajoute que parfois les marins qui croisent au large de cette région voient leurs voiles devenir rouges. Pour d'autres, cette couleur provient des exhalaisons. Mais personne n'a encore pris le temps d'examiner attentivement cette neige. Et quand les savants commencent à s'y intéresser, intrigués par deux observations du naturaliste suisse Horace Bénédic de Saussure, à la fin du XVIII^e siècle, ils se heurtent à une énigme coriace, dont les dernières ombres ne se dissiperont... qu'au XXI^e siècle.

UN CHAMP DE NEIGE ROUGE

Horace Bénédic de Saussure est le premier naturaliste à avoir compris l'importance, pour les nombreux domaines scientifiques, de l'étude des montagnes. C'est lors de son ascension du Brévent, dans les Alpes, en 1760, qu'il est confronté au phénomène pour la première fois : un immense champ de neige rouge s'étend devant lui. Il l'observe méticuleusement : le champ n'est pas compact, on ne voit pas de marques de vent, la neige rouge pénètre peu en profondeur. Elle semble plutôt suivre l'écoulement de l'eau de fonte. Pollen ? Algues ? Lichens ? Saussure, qui ne dispose pas de matériel pour étudier plus avant cette neige, ne peut trancher entre ses différentes hypothèses. Mais près de

aujourd'hui encore, on rencontre les étendues de neige rouge aux pôles, comme ici en Antarctique, ou en altitude, à des périodes où la température extérieure devient supérieure à celle de fusion de la neige.



HORACE BÉNÉDICT DE SAUSSURE

Le naturaliste genevois passionné de montagne observa plusieurs champs de neige rouge dans les Alpes en 1760 et 1778.

vingt ans plus tard, alors qu'il traverse les Alpes, il aperçoit de nouveau un champ de neige rouge. Et cette fois, il est équipé ! En distillant cette neige au bain-marie, il remarque que sa couleur et son odeur sont inchangées. Il reste par ailleurs, au fond de la cornue, une matière huileuse qui ne se dessèche pas. Il récupère la « poudre » rouge et la passe au chalumeau : elle s'enflamme et laisse une odeur d'herbes brûlées. Pour lui, il s'agit donc probablement d'une poussière d'étamines, quoiqu'il ne connaisse pas de plantes rouges dans les Alpes. Cependant, il n'exclut pas que ce soit « une terre séparée de la neige même, et imprégnée de matières inflammables par une combinaison immédiate de la lumière, qui brille avec tant de vivacité dans l'air pur de ces hautes régions ». Il prélève quelques échantillons de cette neige rouge pour la rapporter à ses collègues, mais rien de concluant n'en sort.

Les croyances ancestrales n'en sont pas publiées pour autant. Encore en 1810, la *Gazette de l'Empire* relate qu'il est tombé en Italie de la neige rouge pendant un orage. Attesté par un grand nombre de témoins, ce phénomène n'apporte-t-il pas la preuve de l'existence de « pluie d'un rouge de sang » dont parlent les Anciens dans leurs histoires ? De même, le 14 mai 1813, un certain Pourtatez observe un épais brouillard qui donne une teinte bleue à tous les objets lorsque de la neige rouge tombe sur les montagnes et effraie les habitants. Mais c'est une nouvelle expédition qui relance les recherches.

En 1818, une quarantaine d'années après le second voyage de Saussure dans les Alpes. Le

Le lieutenant de vaisseau écossais John Ross explore l'Arctique lorsqu'il aperçoit sur la côte des coulées de neige rouge. Il envoie ses officiers en récolter des échantillons. À leur retour, ceux-ci racontent que des petites particules rouges sont visibles jusqu'à douze pieds de profondeur et donnent, en fondant, une eau semblable à du vin. Certains pensent que la coloration vient des excréments d'oiseaux qui mangent des chevrettes rouges, sortes de crevettes des eaux polaires. Ou du frai de ces chevrettes. Ross réfute, car les oiseaux mangeurs de la chevrette rouge se rassemblent parfois par milliers sur la neige, or jamais il ne l'a vue ainsi. Pour lui, la coloration vient toutefois du monde animal.

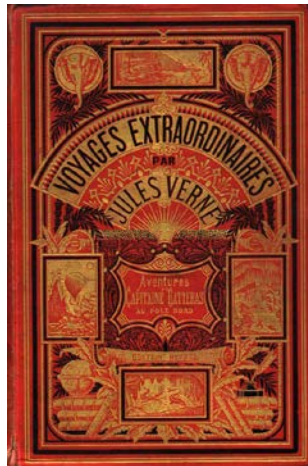
Les échantillons qu'il prélève font le tour de l'Europe et sont passés au crible. La coloration vient de petits globules rouges, d'enveloppe transparente et remplis de matière rouge et huileuse. Jusqu'à huit globules se trouvent à l'intérieur de l'enveloppe, les plus petits étant blancs. Par distillation, une odeur fétide se dégage. Certains pensent donc à des œufs. Mais des œufs de tailles différentes, ça n'existe pas, rétorquent les détracteurs de l'hypothèse. Des globules chauffés au rouge se consument très vite et donnent de la cendre grise, ce qui exclut une origine animale, aucun animal connu n'ayant ces caractéristiques. Le botaniste suisse Augustin Pyrame de Candolle examine toutes les possibilités : animalcules (terme utilisé à l'époque pour désigner des animaux microscopiques) ? Champignons ? Algues ? Il penche pour ces dernières. Des biologistes les nomment alors *Protococcus nivalis*.

ANIMALCULE, ALGUE OU CHAMPIGNON ?

Mais le botaniste et peintre Franz Bauer remarque, lui, que si les petits globules deviennent rouges lorsqu'ils sont secoués, ils restent blancs en culture. En revanche, conservés dans l'eau, ils végètent et deviennent verts. Et s'il les fait sécher, ils tournent gris. Il les écrase ensuite dans sa main et les morceaux prennent la couleur d'un rouge vermillon. Enfin, quand il dépose les globules sur la neige, ils virent au rouge et se multiplient... Pour lui, il s'agit d'un champignon, l'*Uredo nivalis* ou « rouille des neiges ». Les chimistes s'en mêlent alors. Entre autres, le Napolitain Luigi Sementini examine cette neige de près. Elle lui semble onctueuse au toucher. Il remarque qu'elle brunit avec la chaleur avant de rougir. Une multitude de petites paillettes brillantes sont visibles sous l'effet de la chaleur. Il analyse les globules et y trouve de la silice, de l'alumine, de la chaux, du chrome, du fer et de l'acide carbonique... Il élimine l'hypothèse du champignon et de l'œuf et penche, lui aussi, pour une algue.

En ce début du XIX^e siècle, cependant, bien que l'hypothèse des algues semble s'imposer.

Deux longs tentacules en mouvement apparaissent lorsque l'organisme se déplace



COUSTA PLUME DE JULES VERNE

La neige rouge n'échappe pas aux écrivains de l'époque qui cherchent des phénomènes curieux à vulgariser, dont Jules Verne. Ses compères du Capitaine Hatteras aperçoivent un jour un long « rideau armoisi » un peu terrifiant... Mais le docteur Clawbonny les rassure : Cette couleur provient de la présence de corpuscules organiques. Longtemps les chimistes se sont demandés si ces corpuscules étaient de nature animale ou végétale mais ils reconnurent qu'ils appartenaient à la famille des champignons du genre *Uredo*.

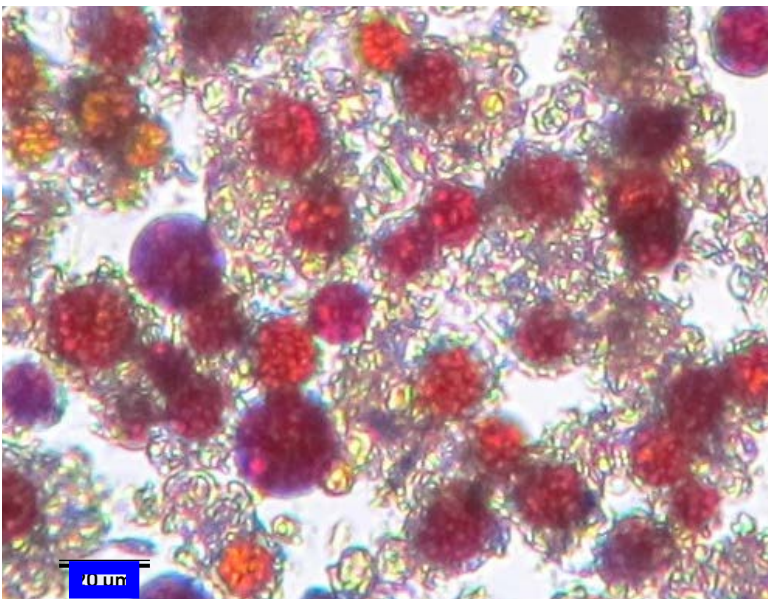
Mais tout le monde n'est pas convaincu. En 1828, le chanoine suisse Jean-François-Benoît Lamon propose que la coloration vienne d'infusoires, des animalcules vivant dans les liquides. Cette hypothèse tient un temps la vedette et a la préférence des vulgarisateurs, dont Louis Figuier. Une nouvelle observation semble d'ailleurs la conforter. Au fil de plusieurs expéditions sur des glaciers alpins à la fin des années 1830, le naturaliste et médecin suisse Carl Vogt a en effet longtemps examiné cette drôle de neige au microscope, instrument dont la précision s'est considérablement améliorée depuis les premières observations d'animalcules, au XVII^e siècle, par le Néerlandais Antoni Van Leeuwenhoek. Pour Vogt, sa couleur provient bien d'un animal, ovale et entouré d'une carapace à l'état adulte. Avec un fort grossissement, il distingue deux tentacules très longs et continuellement en mouvement lorsque l'animal se déplace. Dès qu'il s'arrête, les tentacules se rétractent et deviennent invisibles. L'animal se propage par division : deux, quatre ou six petits animalcules s'agitent dans la carapace jusqu'à ce qu'elle cède et libère les animaux.

La couleur pose aussi problème. Le botaniste français Charles Martins, de voyage au Spitzberg en 1838, observe en effet... de la neige verte. Mais en l'examinant de près, il se rend compte que certains globules, plus petits, tirent sur le rouge. Il en conclut que les jeunes globules sont rouges et verdissent avec le temps. Pour d'autres, au contraire, ce qui cause cette coloration semble être vert au début et rougir avec le temps. En revanche, on s'accorde à penser qu'elle se développe juste à la température de fusion de la neige, ce qui paraît très curieux. D'ailleurs, Charles Darwin, dans son *Voyage d'un naturaliste autour du monde* (1839), témoigne que les empreintes de pas de ses mules dans la neige deviennent rouges. Il confirme aussi que la neige rougit là où sa température s'approche du point de fusion. Cette faculté de l'animal à exister et se multiplier au-dessous du point de

NEIGE ROUGE ET ALBEDO

Un paramètre clé du recul des glaces et des neiges est la baisse de leur albedo – la capacité à renvoyer l'énergie reçue du soleil : initialement élevé, l'albedo diminue à cause du dépôt de poussières atmosphériques.

Stefanie Lutz, de l'université de Leeds, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré qu'un autre facteur contribue de façon considérable à la baisse d'albedo : les algues responsables de la neige rouge. Les chercheurs ont choisi 40 sites répartis dans l'Arctique, au Groenland, en Islande, au Svalbard et en Suède en échantillonnant altitude, latitude et régime (maritime ou continental) de chacun. Ils ont mesuré la température, la conductivité thermique, le rayonnement ultraviolet et l'albedo de ces sites ainsi que les caractéristiques des algues. La composition variait peu d'un lieu à l'autre, malgré des conditions géochimiques et minéralogiques variées : une espèce d'algue majoritaire, de la famille des *Chlamydomonadaceae*, et cinq autres en proportions variées. L'équipe a évalué qu'en proliférant ces algues diminuent l'albedo de la neige de 13 % durant la saison des fontes, augmentant l'absorption de l'énergie solaire de plus de 10 %.



JOURN

La congélation fascine les savants, sans qu'ils parviennent à l'expliquer.

En 1858, dans *La Clef de la science*, le révérend anglais Ebenezer Cobham Brewer récapitule les connaissances sur les causes de la neige rouge : cela peut être une maladie cryptomatique, sorte de pourriture grise causée par l'*Uredo nivalis*, mais parfois cette teinte est due à la présence de petits œufs d'infusoires nommés *Philodina roseola* ou à de petites algues, *Hematococcus nivalis*. Aucune hypothèse n'est encore éliminée, car les indices contradictoires s'accumulent : d'après l'écrivain botaniste Samuel Berthoud, dans ses *Petites Chroniques pour la science*, parues en 1862, cette matière n'est ni purement végétale ni purement animale, elle tient des deux règnes : ses petits globules sphériques, de couleur rouge, qui renferment eux-mêmes d'autres granules, semblent relever du règne végétal, mais l'odeur fétide qui s'en dégage après distillation suggère une appartenance au règne animal.

De fait, le vivant est alors réparti en deux règnes, animal et végétal, et les naturalistes

éprouvent un certain embarras pour classer l'énigmatique organisme parmi les plantes ou les animaux. Mais en 1866, cette classification binaire du vivant ne suffit plus. L'Allemand darwiniste Ernst Haeckel forge alors le mot «protiste» pour désigner un troisième règne rassemblant organismes unicellulaires et pluricellulaires sans tissus différenciés – algues, champignons unicellulaires, protozoaires et bactéries – et qui serait arrivé en premier sur Terre. Tout le monde s'accorde pour classer les globules dans ce nouveau règne (aujourd'hui obsolète), mais la question de sa nature reste entière jusqu'au début du xx^e siècle.

Avec les progrès des connaissances, il devient alors clair que la coloration rouge vient d'une algue. Des chercheurs se convainquent qu'elle est du genre *Chlamydomonas*. Elle s'enroule d'une membrane gélifiée pendant sa période de repos en hiver, ce qui lui donne l'aspect d'une autre algue, *Protococcus*. En fait, depuis les années 2000, on sait que plusieurs genres d'algues sont responsables de la neige rouge. On recense même plusieurs centaines de familles d'algues vivant dans la neige. On sait aussi qu'elles sont munies de flagelles leur permettant de se déplacer dans l'eau : Carl Vogt avait vu juste. En revanche, leur vitesse dans la neige est extrêmement faible. Le mystère des pas sur la neige blanche se muant en traces sanglantes est aussi résolu : les algues se reproduisent dans la neige, à quelques centimètres de profondeur, ce qui les protège du rayonnement ultraviolet tout en leur fournissant assez de lumière visible pour la photosynthèse. Lorsque l'on marche sur la neige, on écrase la fine couche blanche et le rouge apparaît. Quant aux chutes de neige rouge attestées par le passé, elles n'ont aucun rapport avec ces algues : elles correspondent à la présence de masses d'air d'origine saharienne...

LE RETOUR DE LA NEIGE ROUGE

Mais l'histoire de la neige rouge n'est pas terminée pour autant. Vertes au printemps, les algues qui la produisent deviennent orange au cours de l'été et rougissent fortement l'hiver. Ce faisant, elles emmagasinent de la chaleur qui les aide à résister au froid. Elles ont tendance alors à diminuer l'albedo de la neige, donc sa capacité à résister à la chaleur du soleil. Elles se développent par ailleurs juste quand la température dépasse le point de fusion de la neige. Or, de nos jours, la température des glaciers et des glaces de mer augmente, s'approchant souvent du point de fusion. Les algues se propagent alors et diminuent l'albedo de la neige, laquelle absorbe davantage la chaleur du soleil, ce qui augmente sa fusion et donc la propagation des algues. C'est ainsi que les algues qui terrifiaient nos ancêtres pourraient devenir un nouveau cauchemar. D'ailleurs, elles ont comme surnom «le sang des glaciers».

BIBLIOGRAPHIE

S. Lutz et al.,
The biogeography of red
snow microbiomes and
their role in melting
arctic glaciers, *Nature
Communications*, vol. 7,
article 11968. 2016.

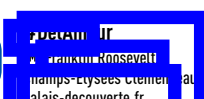
J.-B. de Saussure,
Voyages dans les Alpes,
précédés d'un Essai sur
l'histoire naturelle des
environs de Genève,
Barde et Manget. 1786.



ÉTUDE N°1
La rencontre

de l'amour

EXPOSITION, À PARTIR DU 08.10.2019



france+tv

Le Monde



marie claire

Cerveau & Psycho

Slate.fr

SCIENCE

NEON

philosophie



R

ENDEZ-VOUS

2.86 Idées de physique
2.90 Art & science
2.92 Chroniques de l'évolution
2.96 Science & gastronomie
2.98 À visiter

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et EDOUARD KIERLIK
Professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

Il est difficile de créer des champs magnétiques à la fois permanents et très intenses. Les records actuels ne dépassent pas 50 teslas.

Produire des champs magnétiques très intenses est un enjeu de taille, tant en recherche fondamentale, pour sonder les propriétés de la matière, que du côté de la santé, pour augmenter la résolution de l'imagerie médicale. Mais le champ à la surface des meilleurs aimants permanents n'atteint que quelques teslas, environ 30 000 fois le champ magnétique terrestre. Une valeur modeste et, de plus, limitée à de petits volumes.

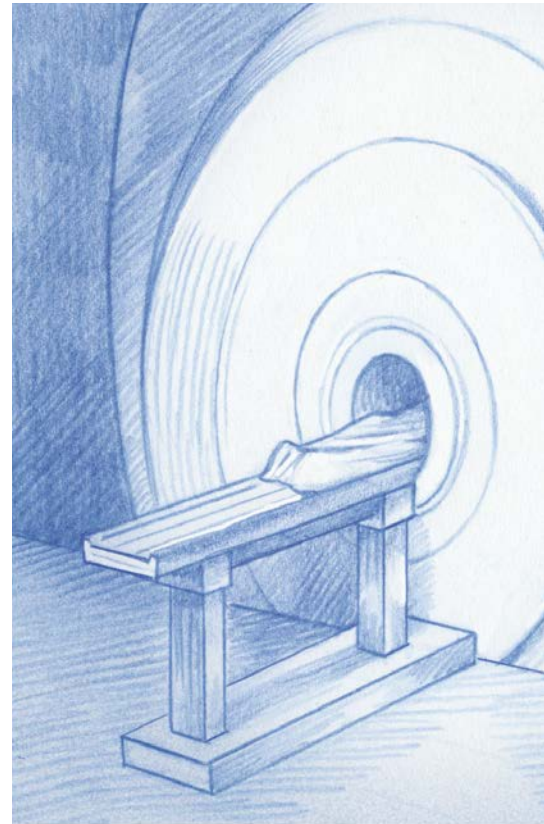
Pour des champs plus intenses et plus étendus, il y a les électroaimants, présents dans de nombreuses applications du quotidien, par exemple les moteurs électriques ou les verrouillages de porte. Mais des obstacles apparaissent dès que l'on souhaite des champs de plusieurs dizaines de teslas. Lesquelles, et comment les surmonter ?

Voyons d'abord le principe d'un électroaimant. Tout courant électrique

crée un champ magnétique dans son voisinage. Celui-ci est toutefois très faible, même pour des courants intenses : pour atteindre 1 millièème de tesla, il faut se placer à 2 centimètres d'un conducteur où circulent 100 ampères !

DU COURANT ÉLECTRIQUE AU CHAMP MAGNÉTIQUE

Afin d'obtenir un champ plus intense, on enroule le fil conducteur autour d'un cylindre. Le champ magnétique d'un tel solénoïde est non seulement plus intense que pour un fil droit, il est aussi quasiment uniforme à l'intérieur de cette bobine (voir l'encadré page ci-contre). Le champ central est proportionnel au courant et au nombre de tours de fil par unité de longueur de la bobine. Avec un courant de 10 ampères et 20 000 tours de fil par mètre, on atteint déjà 0,25 tesla. Ne suffit-il donc pas d'augmenter l'intensité et le nombre de tours par unité de longueur, bref de faire des

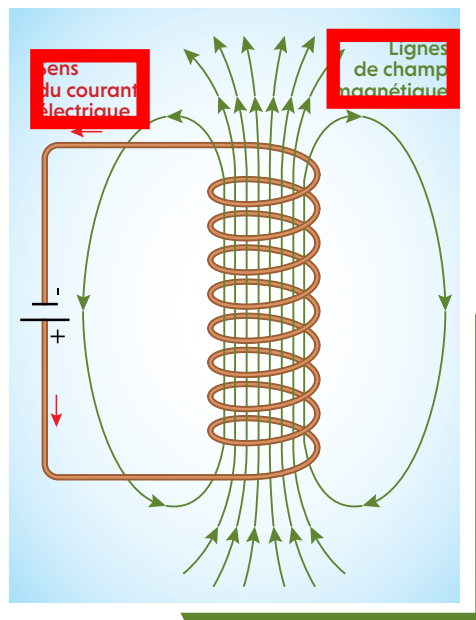
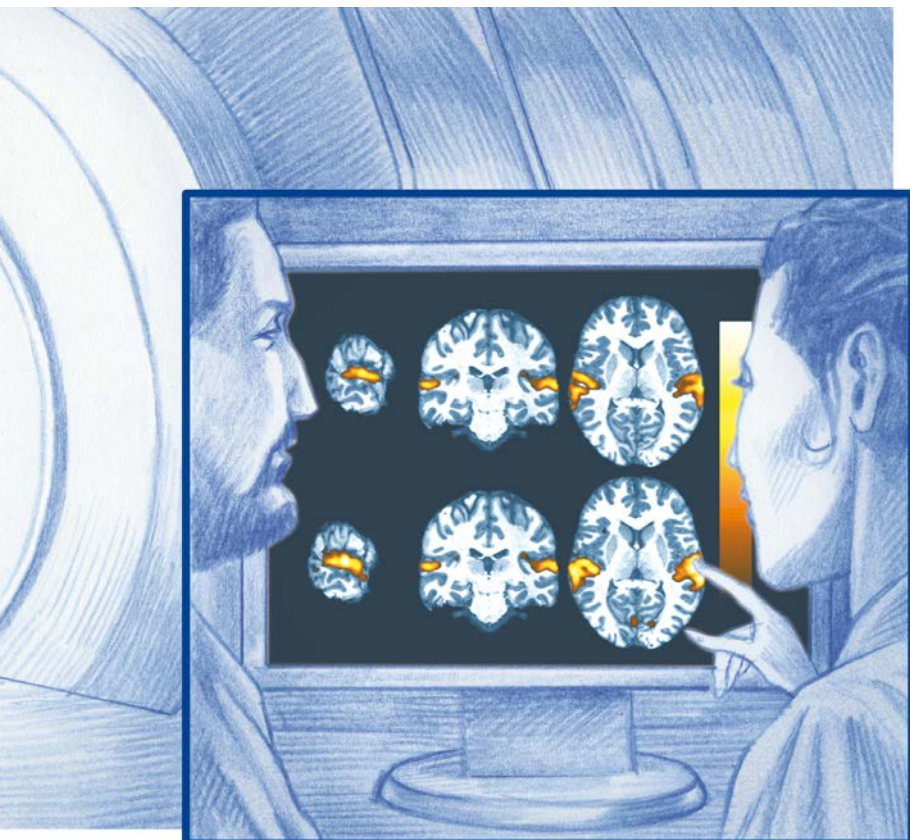


bobines géantes, pour obtenir des champs aussi forts que souhaité ?

On est vite confronté à deux problèmes. Le premier est l'effet Joule, c'est-à-dire la chaleur dégagée à cause de la résistance électrique du conducteur. Si notre bobine faisait 10 centimètres de long et de diamètre, avec du fil de cuivre de 1 millimètre carré de section, il faudrait un courant de 40 ampères pour obtenir 1 tesla, mais la puissance dissipée serait d'environ 16 kilowatts, de quoi faire fondre rapidement le dispositif. Et inutile de chercher à réduire cette valeur en augmentant le diamètre du fil comme on le fait pour les rallonges électriques des appareils électroménagers : pour garder un même encombrement, il faudrait réduire le nombre de tours, donc

PRINCIPE D'UN ELECTROAIMANT

Tout courant électrique s'accompagne d'un champ magnétique. Pour un fil conducteur rectiligne, ce champ, proportionnel à l'intensité du courant, est faible et décroît comme l'inverse de la distance au fil. En enroulant le fil conducteur autour d'un cylindre, on montre que le champ magnétique produit à l'intérieur de ce solénoïde est considérablement plus intense, car il est proportionnel au nombre de tours que fait le conducteur par unité de longueur mesurée le long de l'axe. De plus, ce champ est relativement uniforme à l'intérieur du solénoïde.



Au centre NeuroSpin du CEA, au sud de Paris, une infrastructure de neuro-imagerie par IRM est en passe d'utiliser un électroaimant supraconducteur de 11,7 teslas, un record pour ce type d'application.

augmenter le courant, et la puissance dissipée serait exactement la même.

Ce n'est pas tout. Un fil parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique subit une force dite « de Laplace ». Il s'ensuit que les fils de la bobine se repoussent les uns les autres, avec une pression proportionnelle au carré du courant électrique – une dizaine d'atmosphères dans la bobine que nous avons considérée. En raison de la puissance dissipée ou des contraintes mécaniques, les bobinages ne semblent donc pas adaptés à l'obtention de champs magnétiques très intenses.

Une solution parfois adoptée est d'accepter la destruction de la bobine ! À ce prix, on produit des champs atteignant 300 teslas et, quitte à tout détruire, on

peut « comprimer le flux magnétique » avec des explosifs et obtenir ainsi près de 2000 teslas pendant quelques dizaines de microsecondes. Laissons de côté ces solutions extrêmes et concentrons-nous sur la production de champs forts permanents.

UN COURANT DANS LA MASSE

En 1933, le physicien américain Francis Bitter a proposé une solution consistant à utiliser un empilement de disques conducteurs percés, séparés par des isolants dont la découpe impose une circulation hélicoïdale du courant, afin d'engendrer un champ magnétique le long de l'axe (voir l'encadré page suivante).

Grâce à l'emploi d'un matériau massif, les contraintes mécaniques sont bien mieux supportées : par ailleurs, les perces

permettent la circulation d'eau qui refroidit efficacement le dispositif. Le National High magnetic field laboratory, au Nouveau-Mexique, a ainsi obtenu un champ de 35 teslas dans une zone cylindrique d'environ 3 centimètres de diamètre en faisant circuler 40000 ampères à 500 volts, soit 40 mégawatts de puissance électrique et 15000 litres d'eau par minute ! On comprend pourquoi on n'envisage pas forcément de faire des électroaimants de Bitter encore plus gros...

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



Une autre solution pour obtenir des champs intenses est de faire appel aux matériaux supraconducteurs, qui perdent leur résistance électrique à température suffisamment basse. Pas de résistance, pas d'effet Joule et, cerise sur le gâteau, une alimentation électrique très réduite. Ainsi, les 9 000 électroaimants du collisionneur LHC, au Cern, qui produisent un champ de 8 teslas, sont faits d'un alliage niobium-titane supraconducteur. Hélas, cette solution est elle aussi fortement limitée: la supraconductivité disparaît si le matériau est plongé dans un champ magnétique trop élevé, 9 teslas par exemple pour l'alliage niobium-titane à sa température de refroidissement au LHC.

LES SUPRACONDUCTEURS À LA RESCousse

D'où l'idée de construire des électroaimants hybrides, avec un électroaimant extérieur supraconducteur et un électroaimant intérieur «résistif». Dans cette configuration, le champ magnétique à la périphérie du dispositif n'est pas suffisant pour faire perdre sa supraconductivité à l'électroaimant externe, tandis qu'au centre, les champs créés par les deux électroaimants s'ajoutent: on atteint aujourd'hui 45 teslas, mais au prix d'une grande consommation d'énergie.

Plusieurs équipes dans le monde cherchent à réaliser des dispositifs entièrement à base de supraconducteurs en utilisant des matériaux, tels les cuprates, qui restent supraconducteurs à des températures moins basses et à des champs de plusieurs dizaines de teslas, et qui supportent des courants très intenses – par exemple plus de 1 000 ampères pour un fil en alliage ReBCO (pour *rare-earth barium copper oxide*) de 1 millimètre carré de section.

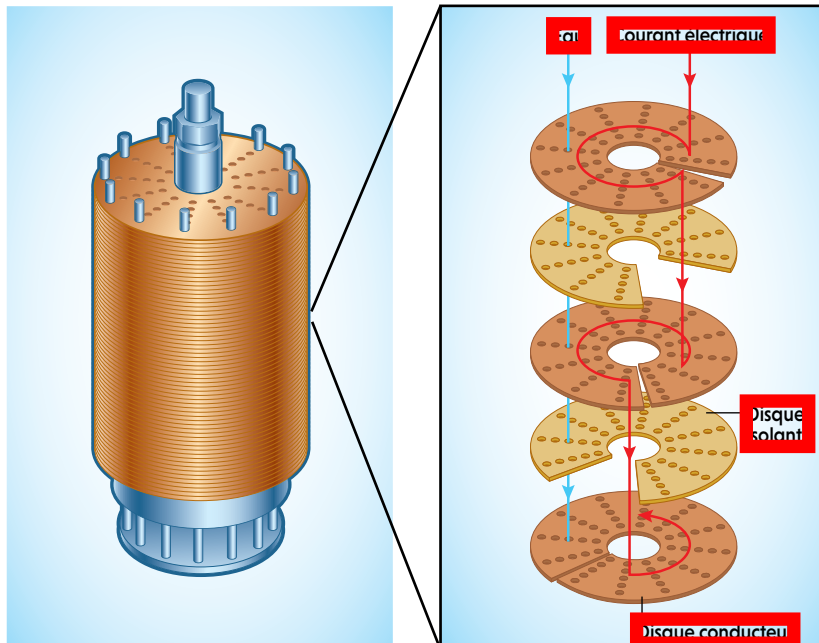
Pour des raisons de fabrication et de résistance mécanique, on élabore ces matériaux sous la forme de films de micromètre d'épaisseur déposés sur un ruban isolant épais de quelques dizaines de micromètres et de largeur centimétrique. Les aimants sont alors construits en empilant plusieurs galettes obtenues en enroulant le ruban sur lui-même.

Reste une difficulté: pour des champs très intenses, le moindre incident peut faire perdre localement sa supraconductivité au matériau. L'effet Joule réapparaît, réchauffe le matériau, la perte de supraconductivité s'étend de proche en proche et le circuit tout entier est menacé d'endommagement par échauffement.

Pour remédier à ce problème, les physiciens du Laboratoire national des

LES ELECTROAIMANTS DE BITTER

Un électroaimant de Bitter est constitué d'un empilement qui alterne disques conducteurs et disques isolants. Ces disques sont fendus et disposés de telle façon que le courant, qui circule dans toute la masse du matériau conducteur, crée globalement une trajectoire hélicoïdale, comme dans un solénoïde. Les disques sont par ailleurs percés de nombreux trous à travers lesquels circule de l'eau, ce qui assure un refroidissement efficace. La masse du conducteur autorise le passage d'un courant très intense et offre une bonne résistance aux contraintes mécaniques exercées par le champ magnétique, qui peut alors atteindre des valeurs record.



champs magnétiques intenses, à Grenoble, ont fait le choix d'utiliser, en guise d'isolant entre les enroulements de ruban... du métal. Lorsque tout fonctionne bien, le courant circule dans le supraconducteur, de résistance électrique nulle, plutôt que dans le métal: malgré sa faible résistance, ce dernier se comporte comme un isolant. Mais en cas d'incident, le courant bloqué par la perte de supraconductivité passe par le métal sur tout le périmètre de la bobine. Au lieu d'être local et destructeur, l'échauffement, réparti sur toute la galette, est bien plus faible et n'endommage plus le dispositif.

Ainsi, cette année à Grenoble, la bobine prototype nommée Nougat, placée pour être testée au sein d'un électroaimant classique produisant déjà 20 teslas, a permis d'atteindre un champ magnétique total de 32,5 teslas pendant plusieurs minutes. Ces expériences ouvrent la voie à la production de champs magnétiques très intenses – 30 à 50 teslas – en continu, par des dispositifs intégralement supraconducteurs, compacts et économes en énergie. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Battesti et al., **High magnetic fields for fundamental physics**, *Physics Reports*, vol. 765-766, pp. 1-39, 2018.

P. Pugnat et al., **Progress in the construction of the 43 T hybrid magnet at LNCMI-Grenoble**, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28(3), pp. 1-7, 2018.

Développez votre analyse critique en physique !

NOUVEAUTÉ

Vous êtes un enseignant cherchant à améliorer ses explications ? Ce livre est fait pour vous !
Vous y trouverez des moyens d'enrichir et de libérer votre esprit critique.

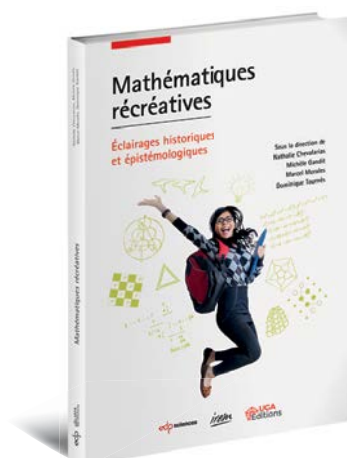
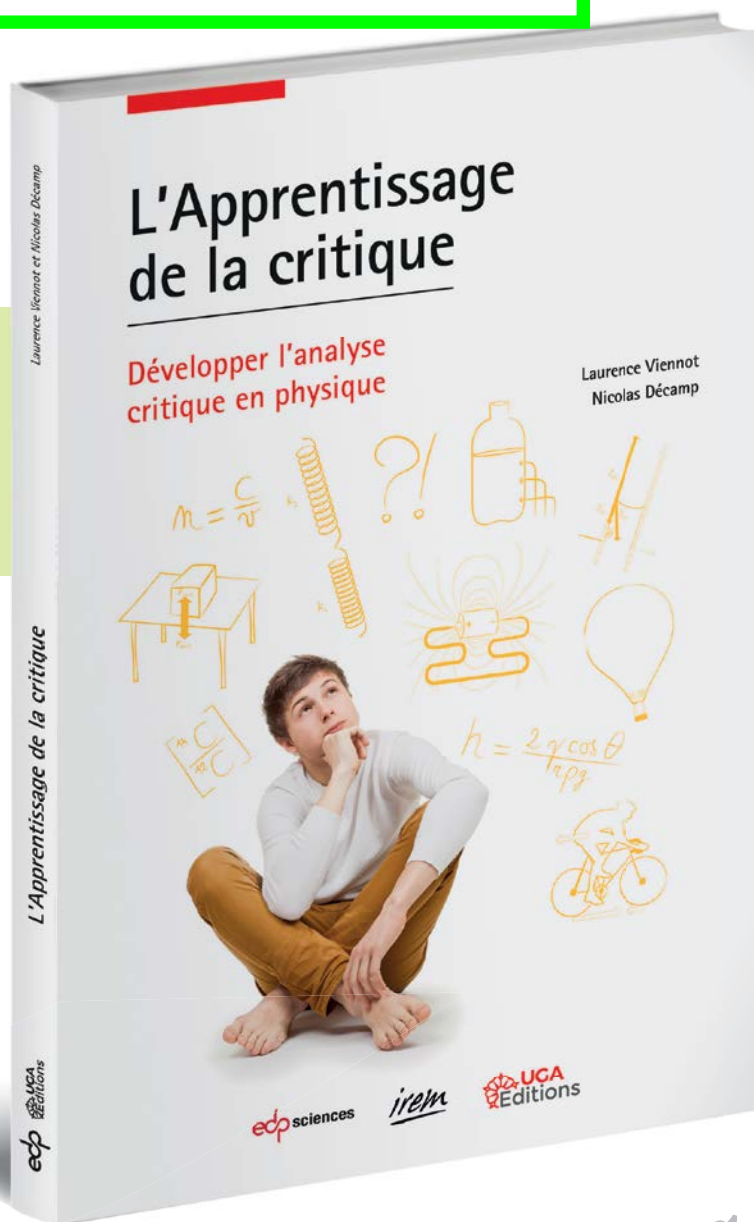
L'apprentissage de la critique Développer l'analyse critique en physique

Laurence Viennot Et Nicolas Décamp

Lisez ce livre si vous voulez davantage savoir à quoi vous en tenir sur les explications de phénomènes physiques qui vous sont livrées.

SBN : 978-2-7598-2355-0 – Prix : 25 €
Format : 16 x 24 cm – 202 pages

Public : enseignants du second degré et de l'université, formateurs d'enseignants.



DÉJÀ PARU

Mathématiques récréatives Éclairages historiques et épistémologiques

Sous la direction de Nathalie Chevalarias, Michèle Gandit, Marcel Morales, Dominique Tournès
SBN : 978-2-7598-2318-5 – Prix : 25 € – Format : 16 x 24 cm – 256 pages

Public : enseignants du second degré et de l'université, curieux des mathématiques

COLLECTION
Enseigner les sciences

MAUVEUR



JÉRÉMIE MANGIN
édacteur en chef adjoint
Pour la Science

LE CORAIL FAIT DANS LA DENTELLE

La dentelle est similaire à la structure du corail. De ce parallèle, le plasticien Jérémie Gobé a bâti un projet entre art et science pour aider à la régénération et à la sauvegarde des récifs coralliens.

P

êche industrielle, réchauffement climatique, acidification des océans, hausse du niveau marin, pollutions... les menaces qui pèsent sur les coraux sont légion. Et, de fait, pour ne prendre qu'un seul exemple, la Grande Barrière, en Australie, a perdu plus de la moitié de ses coraux en moins de trente ans... Pourtant, les récifs coralliens abritent à eux seuls 25% de la biodiversité marine et protègent les côtes des tempêtes et de la montée des eaux. Peut-on remédier à cette situation catastrophique? Peut-être, et, par la même occasion, sauver des savoir-faire en voie de disparition. C'est la double ambition

du projet *Corail Artefact*, conduit par le plasticien Jérémie Gobé, dont les œuvres magnifient les deux problématiques.

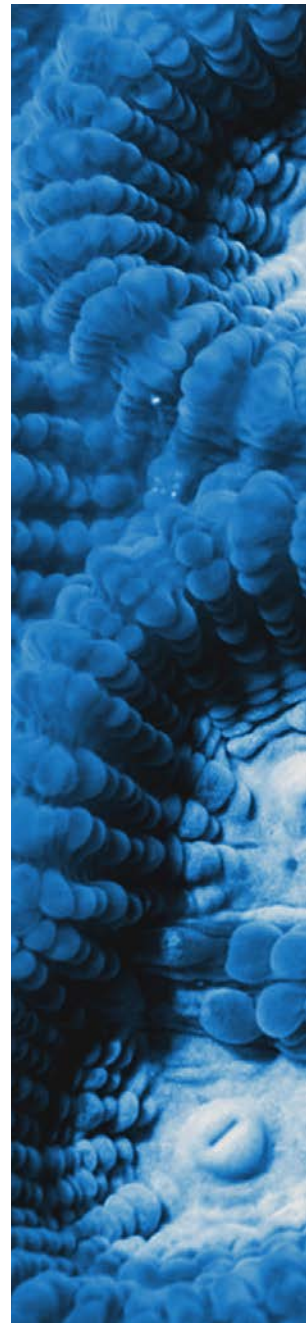
Tout commence en 2010, quand l'artiste, séduit par leur esthétique, acquiert des fragments de corail chez Emmaüs. Il y a deux ans, pour le Festival international des textiles extraordinaires, à Clermont-Ferrand, l'association organisatrice HS Projets lui offre une carte blanche. À cette occasion, il rencontre la Scop Fontanille, une entreprise de plus de 50 ans, sauvée de la faillite par ses propres salariés. Sa spécialité? La dentelle. Quel rapport avec le corail? Le point d'esprit!

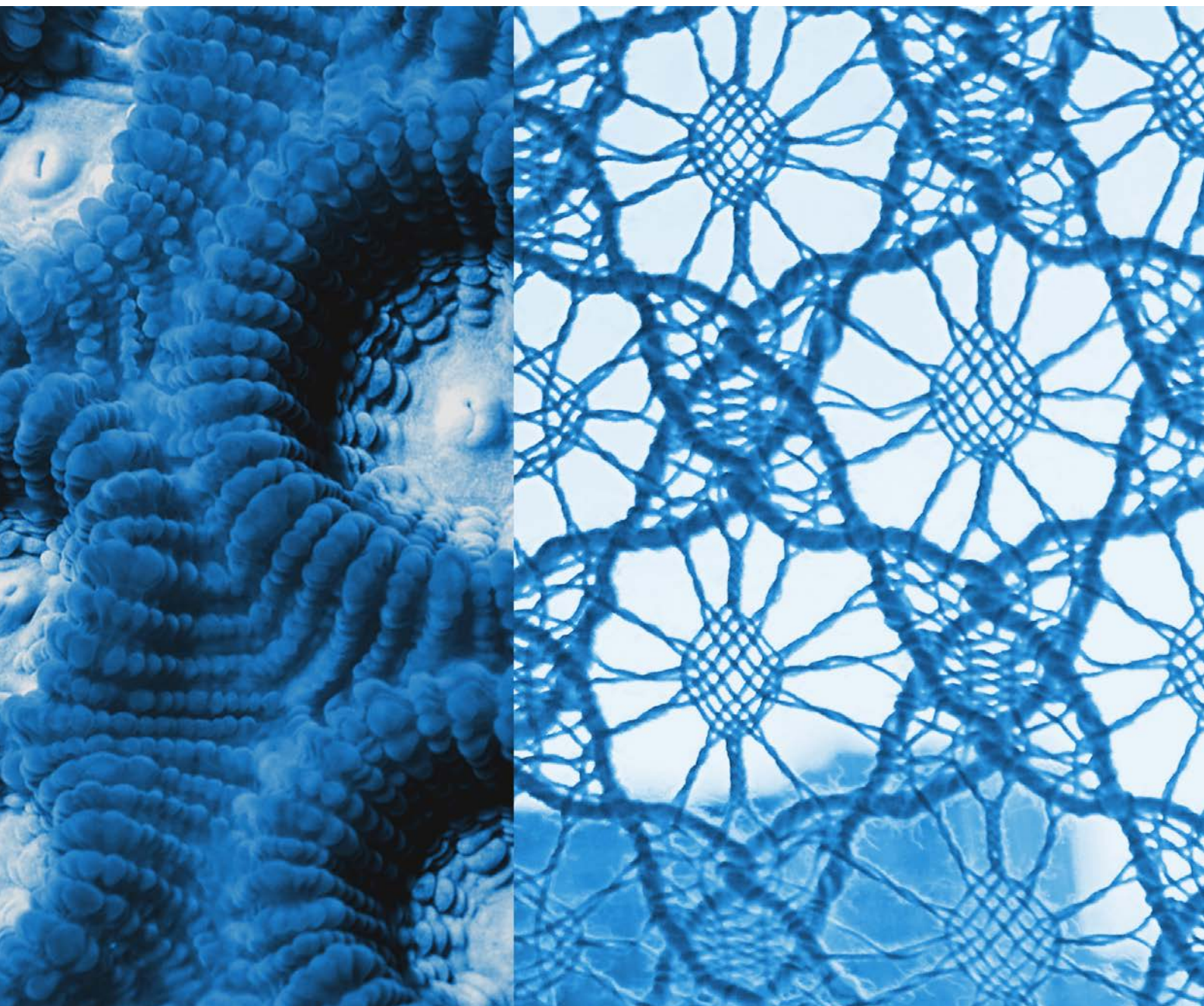
Ce point traditionnel, inventé il y a 150 ans au Puy-en-Velay, est la réplique exacte du squelette d'un certain type de corail (*voir les images*). De cette passerelle étée entre deux domaines *a priori* très éloignés sont nés deux projets. D'abord, pour le festival, Jérémie Gobé réalise avec Fontanille une œuvre monumentale, une sculpture à partir de 1,5 kilomètre carré de dentelle – la blancheur de cette dernière renvoyant au blanchissement qui frappe les

La structure
du corail (à gauche)
et le point d'esprit
de la dentelle (à droite)
sont très similaires

récifs. L'objectif, précise le plasticien, est de «sensibiliser sur le savoir-faire de la dentelle et sur l'état des récifs coralliens: les deux sont en train de disparaître à cause de l'activité humaine.» Plusieurs sculptures, entre dentelle et corail, ont été confectionnées par l'artiste et sont régulièrement exposées.

L'autre projet consiste à venir en aide au corail. La dentelle, grâce à ses similitudes avec celui-ci, pourrait-elle aider à la régénération des récifs en fournissant un support sur lequel les larves coralliennes pourraient se fixer? L'idée a convaincu Isabelle Domart-Coulon, du laboratoire Molécules de communication et





l'adaptation des microorganismes au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Elle étudie l'affinité du corail, plus précisément des larves, pour la dentelle, un matériau biodégradable mieux adapté que le béton ou le métal généralement utilisés pour régénérer (ces supports fonctionnent à court terme, mais polluent les océans et dégradent les coraux à long terme). Les premiers résultats sont très encourageants.

Des expérimentations de plus grande ampleur, avec des fragments de corail (des boutures), sont entreprises à l'aquarium tropical du palais de la Porte Dorée, à Paris. Et, depuis septembre, des tests *in*

situ ont lieu sur une île des Philippines, en partenariat avec la fondation Sulubaaï.

Pour améliorer l'efficacité du procédé, différents points de dentelle, toujours produits par Fontanille, sont testés. Il s'agira également d'envisager d'autres matériaux que le coton, comme les fibres de bananier, pour s'adapter aux contraintes locales, et ainsi impliquer les populations dans le projet.

Jérémy Gobé travaille à la conception d'un nouveau type de béton, en commençant comme toujours par réaliser des sculptures avant d'engager un protocole de recherche scientifique et industriel. Des premières œuvres

réalisées en collaboration avec Saint-Gobain Weber dans un matériau contenant moins de 8% de ciment seront présentées à la fondation Bullukian, dans le cadre de la Biennale de Lyon, jusqu'en janvier 2020. L'occasion de se rendre compte que l'art est un vecteur émotionnel idéal pour sensibiliser le public aux enjeux de notre époque. ■

Le site du projet : www.corailartefact.com
Le site de la Biennale de Lyon : www.biennaledelyon.com



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

AUTEUR



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

LA MYXINE

UN VERTÉBRÉ SANS VERTÈBRES?

Les myxines, nécrophages des fonds marins, n'ont pas de vertèbres. Cela signifie-t-il que ce ne sont pas des vertébrés? Non...

Dépourvues de nageoires latérales, le corps allongé et souple comme celui d'une anguille, une bouche sans mâchoires mais ornée de plusieurs rangées de dents, les myxines, nécrophages des

lamproies... à un détail près: elles n'ont pas de vertèbres. Doit-on en conclure pour autant que les myxines ne sont pas des vertébrés? La réponse n'est pas aussi simple et nombre d'évolutionnistes ont buté sur cette énigme. Jusqu'à ce que, tout récemment, un nouveau fossile fournisse la solution.

La question est d'importance, certes pour réaliser la classification la plus pertinente de l'embranchement des vertébrés au sein de l'arbre du vivant, mais surtout pour dévoiler un joyau jusque-là enfoui dans le passé: l'hypothétique ancêtre commun aux vertébrés. Or, pour en déboucher les caractères, il faut connaître avec certitude la succession des premières émergences, les plus éloignées dans le temps, donc les plus difficiles à établir. Un problème d'autant plus fascinant qu'il concerne «notre» embranchement.

Au début du XIX^e siècle, la question ne se posait pas. Les zoologistes avaient séparé les vertébrés en quatre classes: les mammifères, les oiseaux, les amphibiens

et les poissons. Et parmi ces derniers, ils distinguaient deux groupes suivant la présence de mâchoires: les gnathostomes en avaient, les agnathes en étaient dépourvus. Les gnathostomes se divisaient ensuite en deux taxons: les poissons à squelette cartilagineux (les chondrichthyens) et ceux à squelette osseux (les ostéichthyens). Les agnathes, quant à eux, comprenaient les lamproies et les myxines. En 1806, vu la ressemblance entre lamproies et myxines, le zoologiste français Constant Duméril, dans sa *Zoologie analytique*, les rassembla dans un groupe qu'il appela «cyclostomes» («bouche ronde» en grec). Concernant les organismes actuels, cyclostomes et agnathes signifient la même chose, mais ce n'est plus le cas si l'on introduit les fossiles.

LES VERTÈBRES, POSTÉRIEURES AUX MYXINES:

Avec l'avènement de la théorie de l'évolution de Charles Darwin, cependant, la classification du vivant est devenue, à la fin du XIX^e siècle, une phylogénie, c'est-à-dire l'étude des liens de parenté des espèces, avec l'idée de construire un arbre où chaque branche représenterait un taxon monophylétique, constitué par un ancêtre et l'ensemble de ses descendants. Depuis, les vertébrés ne sont plus séparés en deux classes, mais constitués de deux groupes:

les cyclostomes, rassemblant les lamproies, les myxines et divers fossiles proches, et les gnathostomes, avec tous les autres vertébrés. Mais les cyclostomes forment-ils un taxon monophylétique?

Surprise les phylogénies des années 1990, fondées sur des descriptions morphologiques d'une grande précision, l'ont infirmé et ont proposé une première émergence des myxines, suivie de celle des lamproies (voir l'encadré page 94). Deux nœuds successifs seraient apparus: celui des craniates (myxines et vertébrés), puis celui des vertébrés (lamproies et gnathostomes). Dans ce modèle, les myxines ont acquis une place privilégiée, qui paraît d'ailleurs cohérente: les vertèbres seraient apparues après l'émergence de leur groupe. Or, au même moment, les biologistes ont disposé d'assez de séquences d'ADN pour réaliser des phylogénies moléculaires fiables. Et, cette fois, ils ont obtenu que les cyclostomes étaient monophylétiques, donnant raison à Duméril!

Qui avait raison? Le doute s'est porté d'abord sur les phylogénies moléculaires, pour lesquelles on commençait à bien comprendre plusieurs artefacts qui faussaient les arbres. Mais certains chercheurs, comme Christopher Braun, de l'université de Californie à San Diego, en 1998, se sont aussi penchés sur la description des caractères morphologiques des lamproies et des



Lamproie de rivière
(*Lampetra fluviatilis*)
taille : jusqu'à 45 cm de longueur



Myxine de Stout
(*Eptatretus stoutii*)
taille : jusqu'à 60 cm de longueur

EN CHIFFRES

485 MILLIONS

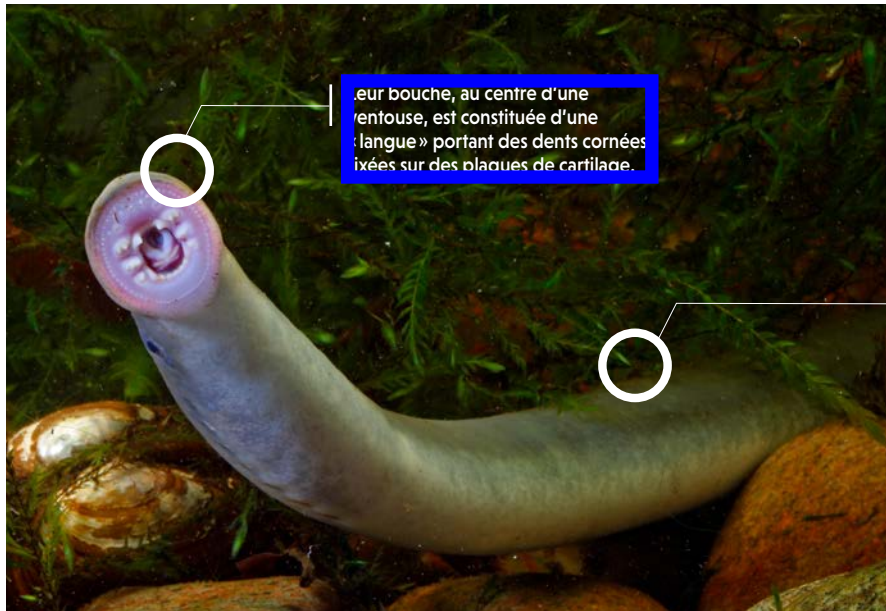
l'ancêtre le plus récent des cyclostomes, qui rassemble les myxines et les lamproies, vivait probablement il y a 485 ± 50 millions d'années.

22

est le nombre d'espèces de myxines répertoriées à ce jour, contre 38 espèces de lamproies.

300 MILLIONS

Decouvert dans l'Illinois, aux États-Unis, le plus ancien fossile de myxine, *Myxiniakella siroka*, est vieux de 300 millions d'années. Les myxines actuelles se sont diversifiées plus tard, il y a entre 183 et 103 millions d'années.



Leur bouche, au centre d'une ventouse, est constituée d'une « langue » portant des dents cornées fixées sur des plaques de cartilage.

Qu'elles soient marines ou d'eau douce, comme celle-ci, les lamproies ont une colonne vertébrale rudimentaire : une baguette fibreuse (ou corde) qui sert d'axe rigide dorsal et est entourée de pièces squelettiques (des vertèbres rudimentaires).



Leur corps porte de multiples glandes qui sécrètent un mucus repoussant les prédateurs. Leur autre stratégie d'évasion consiste à faire des nœuds avec leur corps.

Les myxines vivent seulement en milieu marin. Leurs yeux sont sous la peau et leur bouche est entourée de plaques munies de dents actionnées par un ensemble de cartilages et de muscles.

myxines. Ils savaient en effet que la distribution de ces caractères est «asymétrique»: certains traits, comparables chez les lamproies et les gnathostomes, sont tout simplement absents chez les myxines, si bien que l'on ne peut rien en conclure en termes de classification. Par exemple, les myxines sont dépourvues d'électrorécepteurs sur les flancs, de bourgeons du goût et bien sûr de vertèbres, traits largement distribués chez les autres vertébrés aquatiques. Or ce type d'asymétrie peut entraîner des artefacts comme casser la monophylie d'un groupe. N'était-ce pas le cas ici?

Certains zoologistes et paléontologues, comme Philippe Janvier, au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, avaient déjà soulevé cette question de fond. Devait-on interpréter l'absence de ces caractères chez les myxines comme primitive ou secondaire? Dans le premier cas, les ancêtres des myxines n'ont jamais été pourvus de ces caractères, qui sont apparus plus tard, dans la lignée menant aux gnathostomes. Dans le second, certains ancêtres des myxines ont présenté de tels caractères, qui ont ensuite été perdus dans la lignée menant aux myxines. Ces dernières seraient alors les vertébrés ayant perdu leurs vertèbres...

UN FOSSILE REMARQUABLE

De tels cas sont légion en biologie. Par exemple, les serpents sont des «tétrapodes apodes». Nichés parmi des animaux tétrapodes (geckos, varans, iguanes, lézards...), leurs ancêtres ont eu quatre pattes, qui ont été perdues secondairement. De même, les cétacés, qui n'ont plus que des pattes antérieures, les ailerons, ont perdu secondairement leurs pattes postérieures. Remarquons que, dans ces deux cas, des organes vestigiaux (bassin réduit chez les pythons et chez les baleines) sont des indices convaincants.

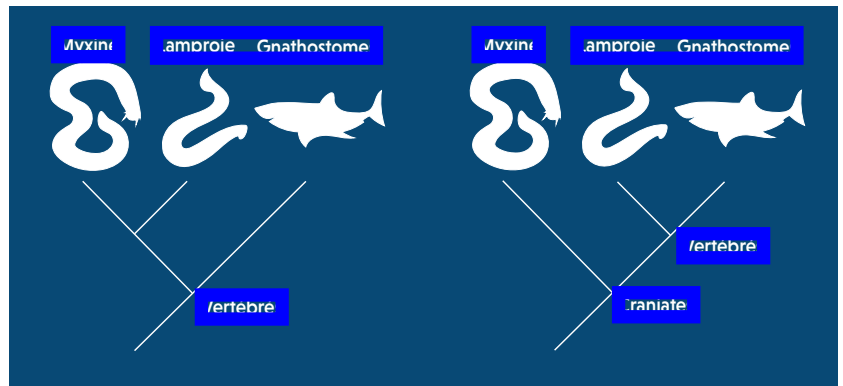
Comment résoudre ce problème? On pense évidemment à la paléontologie. Mais le plus ancien fossile de myxine, *Myxinikela siroka*, du Carbonifère (il y a environ 300 millions d'années), présente les mêmes difficultés d'interprétation que les myxines actuelles. Or, par un heureux hasard, *Tethymyxine tapirostrum*, fossile en remarquable état de préservation, vient d'être exhumé dans un site calcaire du Liban datant du Crétacé supérieur (il y a environ 100 millions d'années). Tetsuto Miyashita, de l'université de Chicago, et ses collègues l'ont étudié avec minutie.

Le nouveau fossile présente des caractères de myxine actuelle introuvables chez

QUEL ARBRE POUR LES MYXINES ?

Les évolutionnistes hésitent entre deux classifications pour les myxines.

Dans l'une, fondée sur des phylogénies moléculaires, elles auraient appartenu, avec les lamproies, à un taxon monophylétique, c'est-à-dire constitué d'un ancêtre commun et de toutes ses descendantes (à gauche). Dans l'autre, d'après des descriptions morphologiques, elles se seraient diversifiées avant les vertébrés (à droite). Les cyclostomes, qui historiquement rassemblent les myxines et les lamproies, auraient alors été un groupe non pas mono-, mais paraphylétique. La première classification était la bonne.



l'animal du Carbonifère, comme des glandes à mucus dispersées sur le corps, la situation de l'appareil branchial ou la structure du foie. En le comparant aux animaux actuels (myxines, lamproies, gnathostomes) et à de nombreux agnathes fossiles comme les anaspides ou les euconodontes, dont les situations évolutives sont problématiques, l'équipe a montré que les cyclostomes sont monophylétiques, avec deux caractères morphologiques propres: des plaques munies de dents kératineuses et la migration particulière des muscles du tronc autour des yeux. Les myxines se retrouvent nichées à l'intérieur des cyclostomes. Elles ont donc évolué depuis leur émergence, développant des organes qui leur sont propres, en perdant d'autres.

Enfin, dans la lignée qui mène aux cyclostomes se trouvent des animaux fossiles comme les anaspides et les euconodontes, qui portent des traces de minéralisation d'une matrice squelettique. La possibilité d'une telle minéralisation précède donc la diversification des myxines – un scénario cohérent avec les observations de Tetsuto Miyashita sur des embryons de myxines et de lamproies, qui présentent des dépôts de phosphate de calcium dans leurs oreilles internes.

Les myxines sont donc bel et bien des vertébrés. Ce qui complique le portrait-robot de l'ancêtre commun des vertébrés, car l'indice qu'elles auraient fourni en étant extérieures a disparu...



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

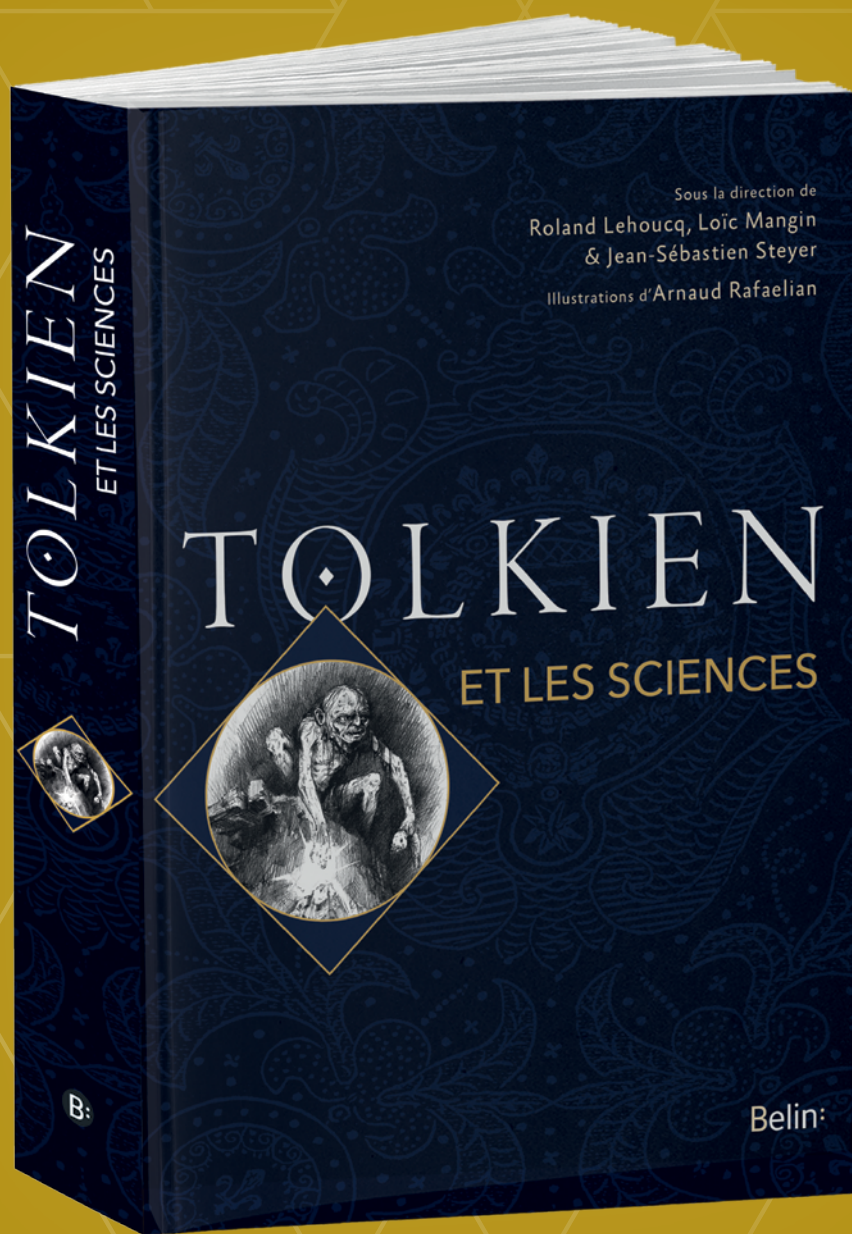
BIBLIOGRAPHIE

T. Miyashita et al., *Hagfish from the Cretaceous Tethys Sea and a reconciliation of the morphological-molecular conflict in early vertebrate phylogeny*, *PNAS*, vol. 116, no. 2146-2151, 2019.

P. Janvier, *Early Vertebrates*, Oxford University Press, 2003.

C. B. Braun, *Schreiner organs: a new craniate chemosensory modality in hagfishes*, *J. Comp. Neurol.*, vol. 392(2), pp. 135-163, 1998.

QUAND LA SCIENCE NOUS ÉMERVEILLE...



En librairie le 16 octobre

Belin:

AUTEUR



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

DES ÉMULSIONS PLUS PARFUMÉES

Évitons de mettre trop de farine dans les sauces émulsionnées : l'amidon qu'elle contient empêche les composés odorants de s'échapper et donc de nous ravir.

Nous consommons très souvent des émulsions, qui se forment à la moindre agitation mécanique là où de l'eau, composant majoritaire de la plupart des ingrédients culinaires, est réuni à de l'huile ou une autre matière grasse.

Dans ces émulsions, la matière grasse liquide est dispersée dans la phase aqueuse sous la forme de gouttelettes. La dispersion nécessite des composés tels que protéines ou phospholipides, qui se placent aux interfaces eau-huile et réduisent ainsi l'énergie nécessaire à la création de celles-ci. C'est, par exemple, le cas pour la mayonnaise, où l'huile est émulsionnée grâce aux protéines du jaune d'œuf. Mais en observant une telle émulsion avec un simple microscope optique, on ne voit que deux phases, l'interface eau-huile étant bien trop mince.

La mayonnaise dérive de la remoulade qui, elle, contient de la moutarde... Or avec de tels ingrédients, on passe des émulsions simples à des émulsions plus complexes, nommées émulsions de Ramsden, où l'interface eau-huile est tapissée de particules visibles au microscope. Ces systèmes contiennent d'innombrables composés susceptibles d'interagir avec les espèces diffusantes, notamment les composés odorants.

Or Xiaolu Pu, à l'université de Nottingham, et ses collègues viennent de publier les résultats d'études d'émulsions modèles, pour lesquelles ils ont déterminé la libération de composés odorants. Ils ont comparé des solutions aqueuses, des émulsions d'huile dans de l'eau, et des émulsions d'eau dans de l'huile.

L'amidon de la farine est formé notamment de molécules d'amylose. Or ces molécules piègent des composés odorants et nuisent ainsi au parfum des émulsions.



elles-mêmes émulsionnées dans l'eau (ces dernières sont de plus en plus utilisées par l'industrie alimentaire pour ralentir la diffusion des composés odorants, réduire la teneur en matière grasse ou favoriser la perception du sel, ce qui permet d'en réduire la teneur).

Les chercheurs ont placé dans ces systèmes des composés ayant des affinités variées pour l'eau ou l'huile, et ont ajouté des polymères variés aux émulsions afin d'en modifier la viscosité, comme le font l'industrie alimentaire... et les cuisiniers : la gomme xanthane (un polysaccharide produit par la bactérie *Xanthomonas campestris*) ou amidon. Les gaz surmontant les émulsions étaient analysés en continu, pendant plusieurs jours.

Dans l'hypothèse d'une simple diffusion des composés odorants ajoutés à une solution aqueuse, à une émulsion ou à une double émulsion, un composé tel que le diacétyle (odeur beurrée) aurait dû se dégager de moins en moins aisément dans l'ordre des systèmes énoncés ici, et la tendance aurait dû être inverse pour le 3-pentanone (odeur du dissolvant pour vernis à ongle).

Or ce n'est pas ce qui a été observé, pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, le crémage des émulsions fait venir en surface principalement les gouttelettes les plus grosses, ce qui perturbe les transferts des composés odorants.

Avec la gomme xanthane, des interactions supplémentaires ont été observées avec le diacétyle, mais pas avec le 3-pentanone. Mais avec l'amidon, c'était l'inverse.

Ces résultats éclairent un débat culinaire ancien, à propos de l'usage de la farine dans les sauces, certains l'accusant de réduire le goût. Effectivement, l'amylose de l'amidon est un polymère hérissé de groupes hydroxyle (OH), qui s'enroule en hélice quand il est placé dans l'eau. Ces hélices piègent alors de petits composés odorants tels que la 2-pentanone.

Moralité : il ne faut pas rouler les légumateurs dans la farine !



LA RECETTE

- 1 Faire tremper six feuilles de gélatine.
- 2 Cuire deux échalotes émincées avec du vinaigre de vin.
- 3 Quand le liquide est presque évaporé, ajouter 20 centilitres de vin rouge, un clou de girofle, deux baies de genièvre, un peu de piment, du poivre et du sel. Porter à ébullition et passer.
- 4 Ajouter la gélatine (qui confère de la consistance et évite la farine) au liquide passé, et chauffer pour la dissoudre.
- 5 Ajouter 200 grammes de beurre et chauffer pour émulsionner le beurre.
- 6 En fin de cuisson, ajouter une cuillerée de soupe de vin qui ne cuira pas.

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE RENTRÉE 1 AN

3 FORMULES
AU CHOIX

Le magazine papier 12 numéros par an



Le magazine en version numérique 12 numéros par an



Le hors-série papier 4 numéros par an



Le hors-série en version numérique 4 numéros par an



Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996



10 € DE RÉDUCTION



VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

29 %

69€

Au lieu de 114,00€

40 %

89€

Au lieu de 174,00€

49 %

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90055 – 67402 Illkirch Cedex – email : pouirlascience@abopress.fr



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

Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE
PAPIER

12 n° du magazine papier

59€

82,80€

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE

12 n° du magazine papier
4 Hors-série papier

69€

114,00€

☐ FORMULE
INTÉGRALE

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

89€

174,00€

2/ l'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 enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2020 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.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, la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris CEDEX 14 – Sarl au capital de 32.000€ – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P. 38

455

EXAOCTETS

Il serait théoriquement possible
d'archiver une telle quantité
de données (455×10^{18} octets)
dans un seul gramme d'ADN.

Cette densité de stockage est
1 million de fois plus importante
que celle des disques durs.
L'ensemble des informations
produites dans le monde tiendrait
dans moins de 1 kilogramme.

P. 22

INÉGALITÉ

Fracture numérique : nous ne sommes pas
tous égaux devant l'accès à internet. Près de 1 %
des Français et plus de 70 % des Erythréens n'ont
pas de connexion.

P. 4

« En matière de sécurité alimentaire, 25 % de la production est perdue
(dans les pays en développement) ou gaspillée (dans les pays développés,
notamment par la surconsommation) »

NATHALIE DE NOBLET-DUCOUDRE

P. 86

45 T

C'est l'intensité
de champ
magnétique obtenue
en laboratoire grâce
à un système constitué
de deux électroaimants.
Mais ces 45 teslas
sont atteints au prix
d'une grande dépense
d'énergie.

P. 52

TÉLÉPORTATION

On parle de téléportation quantique quand
on transfère l'état quantique d'un système
à un autre, bien que séparé spatialement
du premier. Cette technique est mise à profit
dans un test de Bell sans faille réalisé à l'université
de Delft pour transférer un état d'intrication
à deux électrons pourtant distants de 1280 mètres.

P. 86

CHLAMYDOMONADACEAE

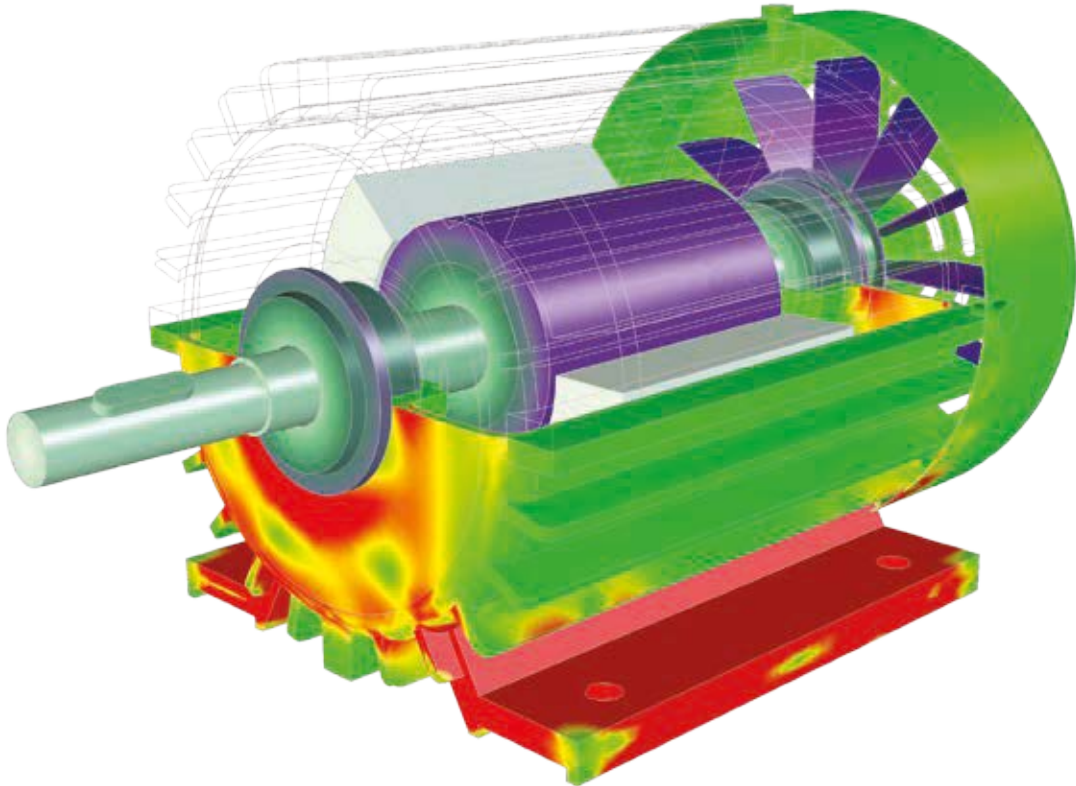
Une espèce de cette famille d'algues vit,
avec d'autres, dans la neige et se propage
particulièrement au moment des fontes.
Selon alors la neige. Résultat : ces microorganismes
diminuent son albédo de 13 %. D'où une
augmentation de la fusion... Mauvaise nouvelle
en ces temps de réchauffement climatique.

P. 72

MAYAS

D'après les archives historiques,
25 millions de personnes vivaient
au Mexique central avant l'arrivée
des Européens. Un chiffre contesté :
certains spécialistes pensent
qu'ils étaient moins nombreux,
mais d'autres pensent qu'ils étaient
40 millions ou plus.

Inventé au 19^{ième} 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 19^{ème} 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

FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.



AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

www.ademe.fr/theses