

SCIENCE

ECONOMIE

**BITCOIN : UN COÛT
ASTRONOMIQUE
EN ÉNERGIE**

ANTHROPOLOGIE

**CES ESCLAVES
QUI ONT FAÇONNÉ
NOS SOCIÉTÉS**

BIOLOGIE MARINE

**CULTIVER
LES CORAUX
POUR LES SAUVER**



FÉVRIER 2018
N° 484

ENQUÊTE SUR LA MATIÈRE NOIRE

Les nouvelles observations
qui chamboulent
les théories



Grâce à l'engagement des bénévoles,

Sarah a vu son rêve se réaliser.

Pour que d'autres enfants et adolescents gravement malades puissent vivre une parenthèse enchantée dans leur combat contre la maladie, **l'Association Petits Princes a besoin de vous.**

DEVENEZ BÉNÉVOLE

01 43 35 49 00

www.petitsprinces.com

**RÉALISEZ
LES RÊVES
DES ENFANTS
GRAVEMENT
MALADES.**

Chaque jour, un rêve d'enfant est réalisé.



Certifié PEFC

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

10-31-1282

pefc-france.org



**MAURICE
MASHAAL**
Rédacteur
en chef

MATIÈRE NOIRE, MATIÈRE À IDÉES

Au début des années 1930, l'astronome américano-suisse Fritz Zwicky mettait le doigt sur ce qui allait devenir une énigme majeure de la cosmologie. Il remarqua que, si l'on se fiait à la matière visible dans les amas de galaxies, les masses étaient insuffisantes pour que les interactions gravitationnelles expliquent les mouvements des galaxies au sein de ces amas. Ce problème de masse manquante, ~~encore incertain à l'époque, a été confirmé depuis par de~~ nombreuses observations, tant à l'échelle des amas de galaxies qu'à l'échelle d'une galaxie individuelle. De fait, les spécialistes estiment aujourd'hui qu'environ 85% de la masse contenue dans l'Univers est invisible et n'est pas constituée de matière ordinaire.

D'où la grande question qui agite astrophysiciens et cosmologistes: en quoi consiste cette matière noire, comme on l'a dénommée? L'inconnu, c'est bien connu, stimule l'imagination et fait naître moult idées. Les spécialistes du cosmos n'en ont pas manqué. Mais l'hypothèse qui domine depuis longtemps est celle des *wimps*, des particules censées interagir très peu avec la matière ordinaire et que de nombreuses équipes de physiciens dans le monde s'acharnent à détecter.

Hélas, les recherches de *wimps* ont été vaines jusqu'ici. Cela encourage une partie des théoriciens à développer des scénarios moins consensuels. Ainsi, dans ce numéro (*voir pages 26 à 33*), Juan García-Bellido et Sébastien Clesse défendent la théorie que la matière noire serait constituée par les trous noirs primordiaux, des corps cosmiques qui se sont formés très vite après le Big Bang, avant même les premières étoiles. Une théorie pour laquelle les récentes détections d'ondes gravitationnelles constituent un signe positif.

Reste que cette théorie n'est pas la seule en lice pour résoudre l'énigme de la matière noire. C'est pourquoi nous avons demandé à l'astrophysicien Benoît Famaey de nous brosser un tableau du problème et des différentes solutions envisagées (*voir pages 34 à 39*). Au filtre des observations récentes, chacune présente des atouts, mais aussi des défauts. Une situation propice à l'émergence de nouvelles idées?

SOMMAIRE

N° 484 /
Février 2018

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Sur la piste des sursauts radio rapides
- Un glaciologue argentin au banc des accusés
- La protéine qui n'existait pas
- La mouche qui ne craint pas l'eau hypersalée
- La surface d'une géante rouge dévoilée
- Un pas de plus vers l'ordinateur quantique
- Des legos d'ADN
- Un dinosaure pingouin

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Cohabiter sur le réseau: un défi
Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Jérusalem et le paradoxe de Newcomb
Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 40

BIOLOGIE MARINE

CULTIVER LES CORAUX POUR LES SAUVER

Rebecca Albright

Le réchauffement océanique menace les coraux. Des pépinières sous-marines de ces animaux les aideront-elles à résister?



P. 50

CLIMATOLOGIE

LES NUAGES, AMPLIFICATEURS DU RÉCHAUFFEMENT

Kate Marvel

Quel rôle jouent et joueront les nuages dans le réchauffement climatique en cours? Les observations et modélisations commencent enfin à apporter des réponses convergentes à cette question complexe. Des réponses qui ne sont pas vraiment rassurantes.



P. 58

MÉDECINE

LE MYSTÈRE HIRSCHSPRUNG

Nicolas Chevalier

La maladie de Hirschsprung, qui affecte l'intestin, a longtemps été une énigme. Aujourd'hui, non seulement on saisit mieux ses causes, mais leur exploration a renouvelé notre compréhension du développement embryonnaire.



P. 66

ANTHROPOLOGIE

CES ESCLAVES QUI ONT FAÇONNÉ NOS SOCIÉTÉS

Catherine Cameron

Au sein des petites sociétés du passé, les captifs, c'est-à-dire les personnes enlevées à d'autres groupes, conféraient de la richesse et du pouvoir à leurs maîtres. Ils ont de ce fait contribué à l'émergence de sociétés de type étatique.



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 :
© D'après Vchal / shutterstock.com

Les portraits des contributeurs
sont de Seb Jarnot



P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

LA NAISSANCE DE L'ÉVALUATION DES SAVANTS

Alex Csiszar

C'est au XIX^e siècle que, pour évaluer la productivité des scientifiques, on a commencé à dénombrer les articles publiés par chacun d'eux. Cette bibliométrie a eu un impact important sur le fonctionnement de la science.

À LA
UNE

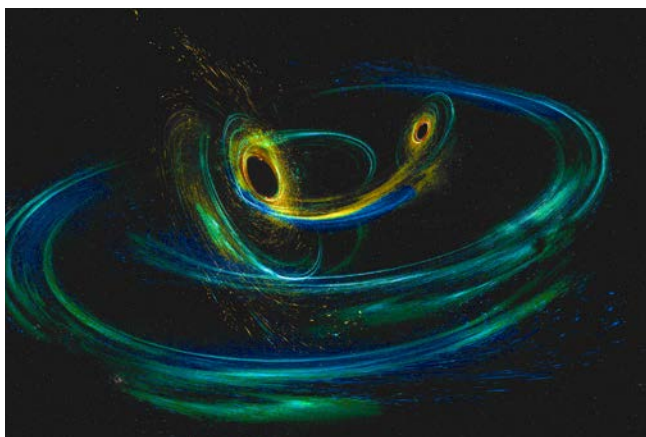
COSMOLOGIE

P.26

MATIÈRE NOIRE : LA PISTE DES TROUS NOIRS

Juan Garcia-Bellido et Sébastien Clesse

De quoi est faite la masse manquante de l'Univers? Des observations récentes appuient l'hypothèse des trous noirs primordiaux, des objets nés moins d'une seconde après le Big Bang, bien avant les étoiles.



P.34

« LA MATIÈRE NOIRE POURRAIT ÊTRE TRÈS DIFFÉRENTE DE CE QUE L'ON PENSAIT »

Entretien avec Benoît Famaey

Peut-on se passer de l'hypothèse de la matière noire? Sinon, de quoi celle-ci est faite? Les récentes observations malmènent les principales pistes suivies pour résoudre cette grande énigme de l'astrophysique. Avec Benoît Famaey, tour d'horizon du problème et des issues possibles.

RENDEZ-VOUS

P. 80

LOGIQUE & CALCUL

LA FOLIE ÉLECTRIQUE DU BITCOIN

Jean-Paul Delahaye

Les cryptomonnaies telles que le bitcoin se substitueront-elles un jour au dollar et à l'euro? Rien n'est moins sûr, si l'on considère l'effrayante consommation d'électricité liée au fonctionnement de ces monnaies numériques.



P.86

ART & SCIENCE

Des vases pour fleurs calcinées

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Des situations déchirantes

Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92

**CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION**

Comment les tortues géantes ont conquis les Galápagos

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Feuilletés sans pâte ni beurre

Hervé This

P.98

À PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Echos des labos
P.18 Livres du mois
P.20 Agenda
P.22 Homo sapiens informaticus
P.24 Cabinet de curiosités
sociologiques

ASTROPHYSIQUE

SUR LA PISTE DES SURSAUTS RADIO RAPIDES



L'observatoire d'Arecibo, à Porto Rico, sur un fond étoilé. L'astre lumineux (en haut, à gauche) est une représentation d'artiste de la source extragalactique d'un sursaut radio rapide.

À trois milliards d'années-lumière de nous, un objet cosmique émet de très puissantes et brèves bouffées d'ondes radio. Une étoile à neutrons proche d'un trou noir supermassif ?

Les «sursauts radio rapides» constituent une nouvelle grande énigme pour l'astrophysique. Certains pulsars sont déjà connus pour être des sources d'ondes radio, mais dans les sursauts en question, la source émet en quelques millisecondes la même énergie que des centaines de millions de soleils. Il ne s'agit donc pas de pulsars ordinaires. De quels objets cosmiques peut-il s'agir? Daniele Michilli, de l'université d'Amsterdam, et une équipe internationale ont analysé des sursauts radio provenant d'une source unique et ainsi

découvert un indice sur l'environnement dans lequel ce phénomène se développe.

Les astrophysiciens n'ont commencé à s'intéresser aux sursauts radio rapides que récemment. En effet, malgré leur puissance phénoménale, ils n'ont été découverts qu'en 2007 par Duncan Lorimer, de l'université de Virginie-Occidentale, aux États-Unis, et ses collègues alors qu'ils étudiaient des données sur les pulsars. À l'époque, la plupart des astrophysiciens n'avaient pas fait grand cas de cette observation, pensant qu'il s'agissait d'erreurs de mesures. Depuis, plus d'une vingtaine de ces bouffées

d'ondes radio ont été observées. Les astrophysiciens s'accordent à penser que les sources sont extragalactiques, c'est-à-dire bien au-delà de la Voie lactée. Les candidats sont nombreux: magnétars (étoiles à neutrons présentant un champ magnétique intense), noyaux actifs de galaxies (dont le cœur est occupé par un trou noir supermassif avalant de grandes quantités de matière), etc. Mais les chercheurs n'ont encore que trop peu d'éléments pour clarifier la situation.

Pour en savoir plus, Daniele Michilli et ses collègues ont utilisé les données des observatoires d'Arecibo, à Porto Rico, et de Green Bank, en Virginie-Occidentale, afin d'étudier le cas du sursaut radio FRB121102. Ce sursaut radio est particulier à plus d'un titre. L'astrophysicienne Laura Spitler, de l'institut Max-Planck de

radioastronomie à Bonn, en Allemagne, l'a découvert en 2014 alors qu'elle analysait d'anciennes données d'un des programmes de l'observatoire d'Arecibo. Captée pour la première fois par le télescope en novembre 2012, la source FRB121102 a la particularité d'être la seule source connue qui émet des bouffées radio de façon répétée (mais aléatoire). Plus de 200 événements provenant de cette source ont été observés à ce jour. D'ailleurs, grâce à ce phénomène répété, Shami Chatterjee, de l'université Cornell, et ses collègues ont déterminé en 2017 que FRB121102 appartient à une galaxie naine distante de plus de 3 milliards d'années-lumière.

Daniele Michilli et ses collègues ont analysé 16 bouffées émises par FRB121102. Ils ont montré que ces émissions électromagnétiques sont polarisées linéairement, c'est-à-dire que le champ électrique de ces ondes oscille dans une direction déterminée. On sait que des ondes électromagnétiques peuvent être partiellement polarisées lorsqu'elles traversent un milieu où règne un fort champ magnétique. Or les chercheurs ont montré que les ondes radio de FRB121102 sont polarisées à 100%! Le champ magnétique traversé serait donc extrêmement intense. De telles polarisations d'ondes radio ont été observées autour de trous noirs supermassifs, de plus de 10 000 masses solaires.

Par ailleurs, comme les bouffées émises par FRB121102 sont très brèves (entre 30 microsecondes et 2 millisecondes), les chercheurs suggèrent que la source est un petit objet, d'une dizaine de kilomètres de diamètre, la taille typique d'une étoile à neutrons. Ainsi, les observations de Daniele Michilli et ses collègues semblent indiquer que la source FRB121102 est une étoile à neutrons plongée dans le champ magnétique intense d'un trou noir supermassif présent à proximité. Mais ces chercheurs n'excluent pas d'autres possibilités.

Si le rôle du champ magnétique semble crucial dans la dynamique de FRB121102, il reste à en comprendre le mécanisme en détail. Par ailleurs, il n'est pas certain que les sources non répétitives de sursauts radio soient de même nature que FRB121102. Pour répondre aux diverses interrogations, une trentaine d'observatoires, notamment le télescope *Chime*, au Canada, traquent ces sursauts avec des programmes de recherche dédiés. ■

SEAN BAILLY

D. Michilli et al., *Nature*, vol. 553, pp. 182-185, 2018

Un glaciologue argentin au banc des accusés

Le 27 novembre 2017, un juge fédéral de Buenos Aires a accusé Ricardo Villalba, ancien directeur de l'Institut argentin de la neige, de la glace et de la recherche environnementale, d'avoir favorisé l'activité minière dans les Andes en omettant d'inventorier les plus petits glaciers. Des collègues du monde entier s'insurgent contre cette situation. Les explications de l'un d'eux.



Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

ÉTIENNE BERTHIER
glaciologue du CNRS
au LEGOS, à Toulouse

Quelle était la mission dont Ricardo Villalba était chargé ?

Il dirigeait l'inventaire national des glaciers d'Argentine. Assisté d'une équipe d'une dizaine de chercheurs, ingénieurs et techniciens, il était responsable de la réalisation d'un catalogue informatisé et exhaustif de l'ensemble des glaciers sur le territoire argentin des Andes. Cet inventaire est un besoin scientifique, mais répond aussi à la promulgation, en octobre 2010, d'une loi visant à identifier et protéger les glaciers et le milieu périglaciaire en tant que ressources hydrologiques stratégiques.

Que lui reproche-t-on ?

On l'accuse de ne pas avoir cartographié les plus petits glaciers (ceux de moins de 1 hectare) et, ainsi, d'avoir permis que l'extraction de minerais se poursuive dans la province de San Juan, en particulier dans le complexe minier de Veladero, exploité par la multinationale Barrick. Outre la mise à mal des glaciers, cette mine a causé des fuites importantes de cyanure dans les rivières voisines entre 2015 et 2017. À la suite de ces fuites désastreuses pour l'environnement, un groupe de citoyens nommé Jáchal No Se Toca a déposé une plainte. Barrick a été jugée à l'échelle provinciale et s'en est sortie avec une simple amende. Mais à l'échelle nationale, c'est Ricardo Villalba qui est jugé. Comme s'il était responsable des erreurs de l'industrie minière !

Ces accusations sont-elles fondées ?

Non ! D'abord, il faut du temps pour produire un inventaire précis et exhaustif des glaciers, notamment dans une région aussi compliquée que les Andes centrales où de nombreux glaciers sont couverts de rochers et donc difficiles à délimiter. Précisons que le premier inventaire des glaciers du globe n'est paru qu'en 2014, et reste très incomplet et améliorable.

L'inventaire de la province de San Juan n'était donc pas terminé lors des fuites de cyanure. De plus, il est impossible techniquement de cartographier les glaciers les plus petits. Et toute la communauté internationale s'accorde à dire que la taille minimum de 1 hectare est appropriée et respecte des protocoles établis par l'Unesco. Les Argentins ont même fait l'effort de cartographier des glaciers de taille inférieure.

Où en est la situation aujourd'hui ?

Ricardo Villalba a fait appel pour gagner du temps avant le procès afin de constituer un dossier solide avec un avocat et d'obtenir des soutiens en Argentine (pour le moment, son organisme de rattachement, le Conicet, l'équivalent du CNRS, ne lui apporte aucune aide, ni juridique ni financière) et dans le reste du monde. Le tribunal d'appel devrait rendre sa décision en février.

Comment réagit la communauté scientifique ?

La mobilisation des scientifiques est très forte en Argentine, mais aussi partout dans le monde. Les glaciologues ont d'abord réaffirmé que les protocoles des collègues argentins étaient conformes à l'état de l'art. Je peux en témoigner directement, car j'ai été rapporteur de l'inventaire des glaciers dans la province de Mendoza. Ensuite, nous nous mobilisons pour venir financièrement en aide à Ricardo Villalba. Il est très regrettable et incompréhensible que la justice argentine se trompe de cible en accusant un chercheur intègre et reconnu, qui a lutté toute sa carrière pour préserver l'environnement dans les Andes, en lieu et place de l'industrie minière. Espérons que notre mobilisation permette de l'innocenter. Dans le cas contraire, il y a un risque que, pour éviter d'être exposés à des poursuites judiciaires, les scientifiques refusent d'apporter leur expertise sur des sujets trop sensibles. Ce serait très préjudiciable à l'heure où leur éclairage est si important dans de nombreux débats de société. ■

Pétition de soutien à R. Villalba : bit.ly/2CRWCQF

BIOLOGIE

LA PROTÉINE QUI N'EXISTAIT PAS

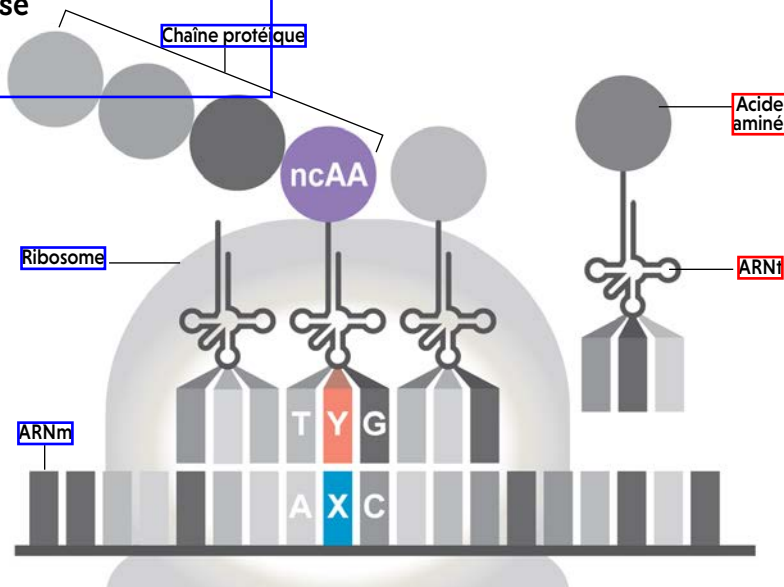
Une bactérie a été modifiée de façon à ce qu'elle intègre une information génétique de synthèse et qu'elle la restitue sous la forme d'une protéine artificielle.

Comment fabriquer une protéine inédite? L'idée n'est pas seulement de modifier une bactérie pour qu'elle ajoute ou supprime des constituants des protéines, les acides aminés dits naturels, dans une chaîne protéique existante. Les biologistes savent le faire depuis longtemps. Non, les chercheurs en biologie de synthèse visent un objectif bien plus ambitieux: modifier une cellule de façon qu'elle insère dans ses protéines, aux endroits souhaités, de nouveaux acides aminés non naturels. C'est ce que viennent de réussir Yorke Zhang, de l'institut de recherche Scripps, en Californie, et ses collègues avec une bactérie *Escherichia coli*.

Depuis plus de trente ans, diverses pistes sont explorées pour y parvenir. Toutes consistent à agir sur le code génétique. Les organismes vivants codent leurs informations héréditaires à l'aide de quatre nucléotides ou bases notés A, T, C et G, qui forment des paires agencées en une longue molécule en double hélice, l'ADN. Les cellules lisent cette séquence et, à chaque triplet de bases ou codon, associent un acide aminé. Avec quatre bases différentes, il existe 64 combinaisons possibles de trois bases. Mais seuls 20 acides aminés interviennent habituellement dans la fabrication des protéines, car certains codons correspondent au même acide aminé (et trois codons ont d'autres fonctions).

Des biologistes ont pu assigner des codons existants à de nouveaux acides aminés. Par exemple, en 2013, l'équipe de George Church, à la faculté de médecine de l'université Harvard, a associé le codon TAG, qui habituellement stoppe la lecture de l'ADN, à un acide aminé non standard. D'autres chercheurs imaginent de nouveaux codons. En 2010, Jason Chin, au Medical Research Council, à Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont produit par mutagenèse une machinerie cellulaire capable de décoder non pas des triplets de bases, mais des quadruplets, et de les traduire en acides aminés non naturels. Ils ont ainsi construit une protéine avec deux acides aminés non naturels.

Yorke Zhang et ses collègues, eux, ont choisi d'introduire directement dans l'ADN une nouvelle paire de bases synthétisées. Dans un premier temps, ils ont montré que la bacté-



Dans la bactérie modifiée, les ribosomes incorporent un nouvel acide aminé (en violet) dans la chaîne protéique lorsqu'ils rencontrent un codon portant la nouvelle base X.

30

C'EST, À TOUT LE MOINS, LE NOMBRE D'ACIDES AMINÉS DE SYNTHÈSE QUI ONT ÉTÉ INCORPORÉS DANS DES PROTÉINES DURANT LEUR FABRICATION PAR DES ORGANISMES VIVANTS VIA LA TECHNIQUE DE RÉASSIGNATION DE CODONS. ON CONNAÎT PLUS DE 1 000 ACIDES AMINÉS, DONT SEULEMENT 20 INTERVIENNENT DANS LES PROTÉINES NATURELLES.

rie semi-synthétique ainsi produite vivait bien et que l'incorporation était stable. Il fallait ensuite que l'information ajoutée soit transmise correctement dans la chaîne de production des protéines: la nouvelle paire de bases doit être transcrite au sein de l'ARN messager (ARNm), l'intermédiaire entre l'ADN et la machinerie de lecture (les ribosomes). Dans les ribosomes, des ARN de transfert (ARNt) spécifiques doivent alors être recrutés, capables de reconnaître les nouveaux codons de l'ARNm et de leur associer des acides aminés non naturels; pour cela, une enzyme spécifique doit reconnaître le bon ARNt et y fixer le bon acide aminé. Pas à pas, les biologistes ont levé ces obstacles. Grâce à leurs bactéries, ils ont ainsi réussi à incorporer dans une protéine connue – une protéine fluorescente verte – un acide aminé non naturel.

Pourquoi introduire de nouveaux acides aminés dans les protéines? Pour les doter de nouvelles fonctions. Les biologistes du domaine imaginent déjà de multiples applications dans la recherche de médicaments, la fabrication de matériaux ou l'agriculture. Certes, la production de protéines artificielles n'en est qu'à ses balbutiements, mais il est à parier qu'elle aboutira un jour. Serons-nous alors prêts à encadrer ces nouvelles pratiques en connaissance de cause? ■

M.-N. C.

Y. Zhang et al., *Nature*, vol. 551, pp. 644-647, 2017

LES JEUNES ANNEAUX DE SATURNE

On pensait que les anneaux s'étaient formés très tôt autour de Saturne, il y a près de 4,5 milliards d'années, lors de la destruction d'une lune saturnienne. Selon cette hypothèse, l'anneau B, le plus grand, aurait une masse totale comparable à celle de la lune Mimas. Or Luciano Iess, de l'université de Rome-Sapienza, a montré grâce aux données de la sonde Cassini que l'anneau est plus léger. D'après les modèles, les anneaux n'auraient donc que quelques centaines de millions d'années. Résultat qui conforte d'autres observations de Cassini.

50^e NOMBRE PREMIER DE MERSENNE

Les nombres premiers sont les entiers divisibles uniquement par 1 et par eux-mêmes. Certains de ces nombres sont de la forme $2^p - 1$, où p est lui-même un nombre premier. Ce sont les « nombres premiers de Mersenne ». Un projet informatique collaboratif, Gimps, les traque depuis 1996. Le 50^e nombre premier de Mersenne, $2^{77\ 232\ 917} - 1$, a été découvert en décembre 2017 par un ingénieur américain, Jonathan Pace. Ce nombre s'écrit avec 23 249 425 chiffres !

TEST URINAIRE POUR LA TUBERCULOSE

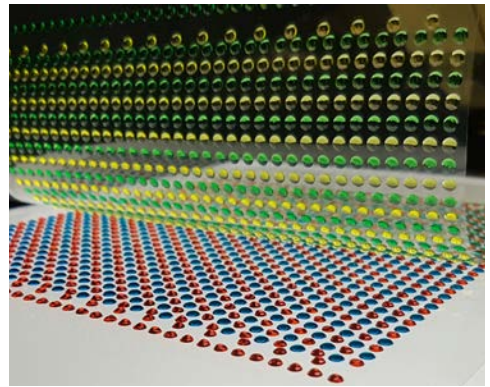
Avec près de 10 millions de nouveaux cas annuels dans le monde, la tuberculose est un grave problème de santé publique. Sa gestion efficace exige un bon dépistage, qui pourrait être considérablement facilité grâce aux travaux de l'équipe d'Alessandra Luchini, à l'université George Mason, aux États-Unis : ces chercheurs ont développé un test urinaire qui détecte en moins de 12 heures un antigène spécifique de la maladie. Qui plus est, ce test simple à mettre en œuvre détermine aussi la gravité de l'infection.

ÉLECTRICITÉ BIO-INSPIRÉE

L'anguille *Eletrophorus electricus* peut générer une tension de 600 volts et un courant de 1 ampère. Thomas Schroeder, de l'université du Michigan, aux États-Unis, et ses collègues se sont inspirés des cellules de cet animal pour mettre au point un assemblage d'hydrogels générateur d'électricité.

Dans les cellules de l'anguille nommées électrocytes, la production d'électricité est assurée par la circulation asymétrique d'ions entre les milieux intra et extracellulaires. Pour créer une décharge, un stimulus nerveux commande l'ouverture de canaux membranaires spécifiques : des ions Na^+ pénètrent d'un côté des cellules pendant que des ions K^+ sont relargués dans le milieu extracellulaire. Il se constitue une distribution hétérogène de charges qui se traduit par une différence de potentiel électrique entre les deux membranes opposées de chaque électrocyte. Mis en réseaux par milliers, les électrocytes génèrent globalement un choc électrique capable d'étourdir des prédateurs ou des proies.

Afin d'imiter ce mécanisme, Thomas Schroeder et ses collègues ont utilisé quatre types d'hydrogels : un premier est très concentré en ions Na^+ et Cl^- , un deuxième ne l'est que très faiblement, le troisième ne laisse circuler que les cations (ions chargés positivement), et



Inspirés des cellules de l'anguille électrique, des hydrogels placés sur des films transparents génèrent de l'électricité.

le quatrième, à l'inverse, ne laisse passer que les anions (chargés négativement).

En mettant en contact ces hydrogels d'une façon appropriée, les chercheurs ont reproduit la structure et le comportement des électrocytes. Et en accolant leurs électrocytes artificiels, ils ont généré une tension globale de 110 volts. Ils espèrent utiliser cette source d'énergie souple et biocompatible pour des implants médicaux. Quelques difficultés restent néanmoins à surmonter : la recharge du dispositif, comme pour une batterie, et la densité énergétique, qui est 10 000 fois plus faible que chez l'anguille. ■

MARTIN TIANO

T. B. H. Schroeder et al., *Nature*, vol. 552, pp. 214-218, 2017

UN RÉSEAU DE FORTS EN SYRIE

La mission géoarchéologique franco-syrienne des « Marges arides de Syrie du Nord » a prospecté entre 1995 et 2002, ainsi qu'en 2010, une zone d'environ 7 000 kilomètres carrés à l'est de Hama, bordée à l'ouest des régions très peuplées du Croissant fertile, et à l'est des steppes arides où vivent des nomades. En exploitant ses résultats et des photographies aériennes ou satellitaires prises depuis 1960, Marie-Odile Rousset, du laboratoire Archéorient (CNRS-université Lyon 2), et trois collègues viennent de décrire un réseau défensif d'une étendue exceptionnelle et datant du II^e millénaire avant notre ère (de 2000 à 1550).

Ce réseau est constitué de près d'une soixantaine de forteresses, fortins et tours qui longent en arc la steppe de Syrie centrale sur une distance nord-sud d'environ 150 kilomètres. Ces



La muraille nord d'une des forteresses du réseau, le site de Qal'at al-Rahiyya, vue vers l'est.

places fortes étaient composées de gros blocs de basalte non taillés, avec parfois des murs de plusieurs mètres d'épaisseur et de hauteur. Souvent édifiés sur des reliefs, ces forts étaient espacés de moins d'une vingtaine de kilomètres, pour assurer la continuité du contact visuel. ■

MAURICE MASHAAL

M.-O. Rousset et al., *Paléorient*, vol. 43(2), pp. 115-163, 2017

EN IMAGES



LA MOUCHE QUI NE CRAINT PAS L'EAU HYPERSALÉE

Non, cette mouche n'est pas recouverte d'une couche métallique. Ses reflets argentés sont dus à l'air piégé à sa surface lorsqu'elle s'immerge dans l'eau hypersalée de certains lacs nord-américains, dont le lac Mono, en Californie. Les biologistes Floris van Breugel et Michael Dickinson, de l'institut de technologie de Californie (Caltech) viennent d'étudier ce qui confère à ces mouches mesurant 4 à 7 millimètres, de l'espèce *Ephydra hians*, leurs extraordinaires facultés d'immersion.

Ces facultés sont en effet remarquables: l'insecte peut descendre, en rampant le long des concrétions calcaires dont le lac est parsemé, jusqu'à des profondeurs de quelques mètres et y rester une quinzaine de minutes pour se nourrir d'algues ou pondre ses œufs. Puis la mouche lâche prise pour remonter rapidement, sous l'effet de la poussée d'Archimède, et s'envole comme si de rien n'était, aussi sèche qu'avant sa plongée.

L'eau du lac Mono, trois fois plus salée que l'océan Pacifique, est très riche en carbonate de sodium (Na_2CO_3) et son pH est égal à 10. Sa composition la rend beaucoup plus mouillante que l'eau douce. Comment les mouches *Ephydra hians* restent-elles alors au sec? Les observations et expériences de Floris van Breugel et Michael Dickinson ont mis en évidence deux traits grâce auxquels ces diptères ne se mouillent pas et piègent l'air nécessaire à leur respiration: leur cuticule est recouverte de soies en grande densité et elle contient des hydrocarbures à petites chaînes carbonées qui contribuent à l'hydrophobie. Une adaptation remarquable aux lacs hypersalés qui, sans les nuées d'*Ephydra hians* dont profitent les oiseaux, seraient des milieux de vie très pauvres. ■

M. M.

F. van Breugel et M. H. Dickinson, *PNAS*, vol. 114(51), pp. 13483-13488, 2017



© Kris van Bruggel/Collect

PHYSIQUE

UNE GOUTTE EN LÉVITATION

Lâchez une goutte d'eau à la surface d'un verre d'eau à la même température: la goutte se mélange aussitôt. Mais réalisez la même opération avec une goutte de lait froid dans du café chaud et vous verrez parfois la goutte léviter à la surface un certain temps. La goutte ne se mélange pas avec le fluide tant qu'un coussin d'air reste intercalé entre les deux. Michela Geri, de l'institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, et ses collègues ont expliqué le rôle de la température dans ce retard à la coalescence de la goutte.

Ces physiciens ont mesuré le temps entre le dépôt de la goutte à la surface et sa coalescence en fonction de la différence de température. Ils ont observé que la coalescence est immédiate en dessous d'un seuil critique. Puis le retard croît avec cette différence de température. Avec des particules insérées dans la goutte et éclairées au laser, les chercheurs ont aussi observé des mouvements de convection dans la goutte et dans le fluide. Ils ont alors modélisé la dynamique du système pour expliquer le phénomène.

La goutte chauffe à proximité du fluide, mais pas de façon uniforme: on observe une variation graduelle de température à sa surface. Or la tension de surface dépend de la température. Le fait que la tension de surface ne soit pas identique partout à la surface de la goutte entraîne un déplacement de matière: c'est



Des particules éclairées par un laser vert mettent en évidence des mouvements de convection dans la goutte.

l'effet Marangoni, qui dans la goutte prend la forme de mouvements de convection.

Ces mouvements de convection entraînent aussi une circulation dans la couche d'air piégée sous la goutte et dans son voisinage. Ce phénomène augmente la pression de l'air sous la goutte et ralentit son échappement. Comme la goutte se réchauffe peu à peu, la différence de température finit par passer sous le seuil critique où la circulation de l'air devient faible, et la coalescence a lieu. ■

S. B.

M. Geri et al., *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 833, R3, 2017

GÉNÉTIQUE

À L'ORIGINE DES AMÉRINDIENS

Dix-sept. C'est le nombre de séquences du génome du fossile USR1 accumulés par l'équipe d'Eske Willerslev, de l'université de Copenhague, afin de lire le plus fidèlement possible l'ADN. Ce fossile de nourrisson mort il y a 11 500 ans a été découvert dans la haute vallée de la Sun River, en Alaska. Il appartient à une relique de la population béringienne, qui peuplait le pont terrestre reliant l'Asie à l'Alaska entre 25 000 et 14 000 ans avant notre ère, puis a persisté en Asie et en Alaska. Or tout le monde s'accorde à dire que les Amérindiens descendent des Béringiens, mais aucun indice concret ne le prouvait. Jusqu'à USR1.

Les chercheurs ont en effet déterminé que le génome d'USR1 est davantage apparenté à ceux des populations amérindiennes qu'à ceux de toute autre population et qu'il est le plus

proche de celui de l'ancêtre commun de tous les Amérindiens. Cette constatation suggère que les Amérindiens descendent des Béringiens.

Après avoir élaboré un modèle démographique, Eske Willerslev et ses collègues avancent que la population béringienne s'est séparée d'une population de l'extrême nord de l'Eurasie orientale il y a quelque 36 000 ans, même si des échanges de gènes ont persisté encore 10 000 ans. Ces paléo-Béringiens se seraient séparés à leur tour en deux branches il y a entre 22 000 et 18 000 ans, avant qu'une partie des Béringiens alaskais ne parviennent à franchir (par la côte ou le long des Rocheuses) les calottes glaciaires couvrant le nord de l'Amérique du Nord, puis évoluent pour donner les Amérindiens. ■

FRANÇOIS SAVATIER

J. V. Moreno-Mayor et al., *Nature*, en ligne le 3 janvier 2018

EN BREF

L'ÉTOILE DE TABBY ET LA POUSSIÈRE

Cet astre a un comportement étrange: il présente des baisses sporadiques et inexpliquées de luminosité. Plusieurs hypothèses ont été avancées, mais aucune n'était totalement satisfaisante. Tabetha Boyajian, de l'université d'État de Louisiane, et ses collègues ont regardé si les baisses de luminosité étaient identiques à toutes les longueurs d'onde, ce qui indiquerait que l'objet occultant est opaque. Ils ont montré que ce n'était pas le cas. Le coupable le plus probable serait donc de la poussière.

ANTISEPSIE CHEZ LES FOURMIS

Dans les colonies de fourmis, les maladies peuvent se propager très vite. Christopher Pull, de l'Institut de science et technologie d'Autriche, et ses collègues ont observé un comportement de « désinfection destructive » chez la fourmi *Lasius neglectus*. Lorsqu'une puppe est infectée par un champignon, elle émet un signal reconnu par les fourmis qui lui injectent alors un antiseptique. Celui-ci bloque la propagation du pathogène; mais il tue aussi la larve!

UNE PISTE POUR TRAITER LA RÉTINITE PIGMENTAIRE

Cette pathologie touche 30 000 personnes en France. Elle se traduit par une dégénérescence progressive des cellules de la rétine. Pour remplacer les cellules déficientes, l'équipe de Christelle Monville, du laboratoire I-Stem créé par l'Inserm et l'AFM-Téléthon, a mis au point une nouvelle approche. Des cellules souches embryonnaires ont été différenciées en cellules épithéliales afin de réaliser un « patch cellulaire ». Les rats malades ayant subi une greffe de ce patch ont de meilleures performances visuelles que ceux traités par d'autres méthodes.

NÉOLITHIQUES BIEN MUSCLÉES

Au Néolithique, l'invention de l'agriculture aurait été associée, au moins parmi certaines populations d'Europe centrale, à un renforcement des membres supérieurs chez les femmes, qui s'expliquerait par un travail manuel important.

En comparant les tibias et les humérus de femmes de diverses époques, Alison Macintosh, de l'université de Cambridge, et ses collègues ont constaté que les femmes du Néolithique étaient plus musclées que les athlètes modernes. D'après ces chercheurs, la mouture des céréales, qui exige un effort considérable, était peut-être une activité féminine. Aline Thomas, du Muséum national d'histoire naturelle, note l'importance de cette nouvelle approche méthodologique, mais souligne que, faute de données supplémentaires, on ne peut préciser quelles activités physiques pratiquaient les femmes. ■

NOËLLE GUILLON

A. Macintosh et al., *Science Advances*, vol. 3, article 11, 2017

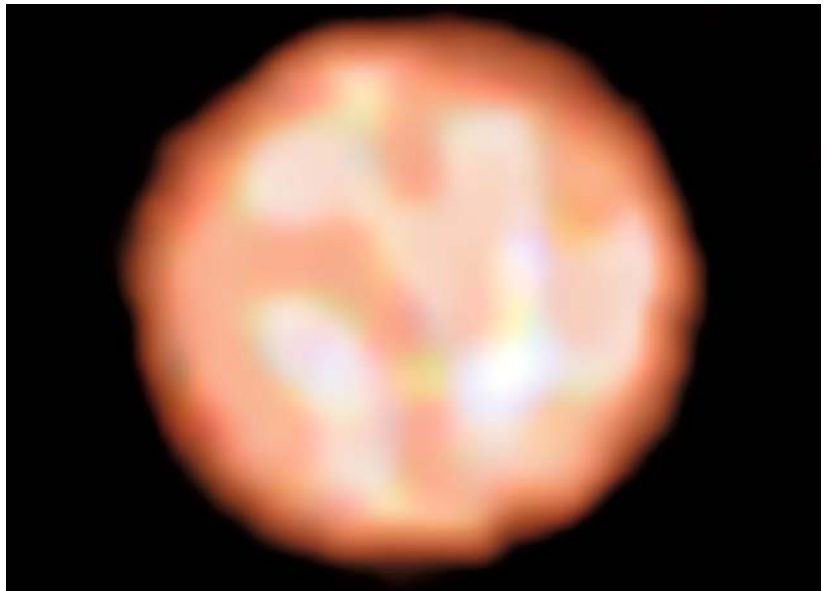
L'IBUPROFÈNE, UN PROBLÈME?

L'ibuprofène est un antalgique, un antipyrétique et un anti-inflammatoire d'usage courant. Or une étude franco-danoise coordonnée par Bernard Jégou, de l'Inserm et de l'EHESP, vient de montrer qu'il perturbe les hormones testiculaires. Les chercheurs ont administré 1200 milligrammes d'ibuprofène par jour à 14 hommes pendant 6 semaines, puis comparé leur taux hormonal à celui d'un second groupe sous placebo. Au bout de 14 jours, les hommes sous ibuprofène présentaient un taux sanguin de testostérone normal et un taux d'hormone lutéinisante (l'hormone stimulant la production de testostérone) très élevé. Connus sous le nom d'hypogonadisme compensé, ce phénomène ne se rencontre normalement que chez environ 10% des hommes âgés, chez qui il doit être suivi médicalement afin d'éviter des complications. Suite à cette étude, l'Inserm vient d'avertir sur les conséquences potentiellement délétères de la «prise soutenue» d'ibuprofène par des hommes sans raison médicale (notamment athlètes de haut niveau, sportifs, etc.). ■

F. S.

D. Moberg Kristensen et al., *PNAS* en ligne le 8 janvier 2018

LA SURFACE D'UNE ÉTOILE GÉANTE ROUGE DÉVOILÉE



Les cellules de convection de l'étoile géante rouge π^1 Gruis sont d'une taille comparable à la distance qui sépare le Soleil de Vénus.

Dans près de 5 milliards d'années, le Soleil gonflera et ressemblera probablement à l'étoile nommée π^1 Gruis, une étoile géante rouge. Cette dernière, distante de 530 années-lumière, a une masse de seulement 1,5 fois celle du Soleil, mais son diamètre est 700 fois plus grand. Claudia Paladini, de l'université libre de Bruxelles, et ses collègues ont utilisé l'instrument Pionier du VLT (*Very Large Telescope*), au Chili, pour observer la surface de π^1 Gruis. Ils ont ainsi mis en évidence certaines structures en accord avec les modèles théoriques.

Qu'ont montré les images de π^1 Gruis? La surface n'est pas uniforme et présente des cellules de convection. Ces structures d'écoulement se forment du fait du flux de gaz chaud qui monte de l'intérieur de l'astre vers la surface. On n'en avait jamais observé dans une étoile géante rouge jusqu'à présent. Les cellules de convection de π^1 Gruis sont immenses: leur taille est d'environ 120 millions de kilomètres, soit près de 30% du diamètre de l'étoile.

Par comparaison, la photosphère du Soleil présente environ 2 millions de cellules convectives dont le diamètre est de l'ordre de 2 000 kilomètres. Andrea Chiavassa, de l'observatoire de la Côte d'Azur et membre de l'équipe qui a étudié π^1 Gruis, explique cette différence: «La taille des cellules convectives est principalement contrôlée par l'intensité de la gravité à la surface de l'étoile. Avec une masse sensiblement équivalente à celle du Soleil, mais un diamètre 700 fois plus élevé, la gravité à la surface de π^1 Gruis est beaucoup plus faible. On s'attendait donc à voir des cellules convectives bien plus étendues que pour le Soleil.» Cela a bien été confirmé par les observations du VLT, validant ainsi les modèles qui décrivent la dynamique des couches supérieures de ce type d'étoiles dans une des phases ultimes de leur vie. ■

S. B.

C. Paladini et al., *Nature*, en ligne le 20 décembre 2017

PHYSIQUE

UN PAS DE PLUS VERS L'ORDINATEUR QUANTIQUE

Une équipe de chercheurs propose de réaliser un ordinateur quantique en utilisant une architecture fondée sur des technologies actuelles.

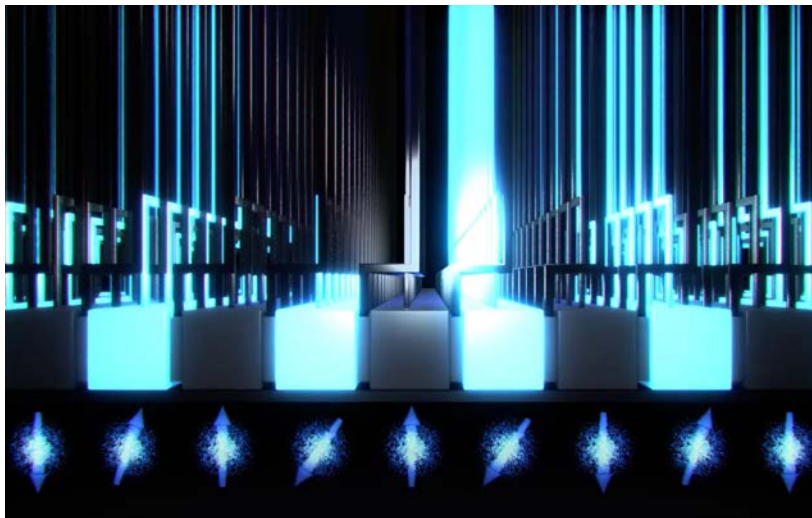
L'ordinateur quantique est peut-être pour demain. De nombreux chercheurs travaillent sur cette idée consistant à exploiter les principes de la physique quantique pour obtenir des capacités de calcul qui dépasseraient de loin celles des ordinateurs classiques actuels. Dans ce sens, une petite équipe menée par Andrew Dzurak, de l'université de la Nouvelle-Galles du Sud, à Sydney, propose une architecture théorique d'ordinateur quantique utilisant les technologies déjà existantes dans les machines classiques.

Dans un ordinateur classique, les bits, les unités d'information, prennent la valeur 0 ou 1. Faire un calcul revient à réaliser une série d'opérations sur ces bits. Dans les calculateurs quantiques, il n'est plus question de bits, mais de qubits (ou bits quantiques). Le qubit exploite les propriétés quantiques de la matière et notamment le principe de superposition. Ainsi, de la même façon que le célèbre chat de Schrödinger est à la fois mort et vivant tant que l'on n'a pas ouvert la boîte où il est enfermé, un qubit peut être dans une superposition des deux états 0 et 1. Grâce à de telles superpositions, les chercheurs ont conçu des algorithmes quantiques bien plus performants que leurs équivalents classiques.

Mais les qubits sont très fragiles: la moindre perturbation du système détruit les états de superposition. C'est le problème de la «décohérence». Pour surmonter cette difficulté, l'une des approches est d'utiliser un grand nombre de qubits et de corriger, parmi eux, les erreurs dues à la décohérence. L'ensemble de ces qubits, nommés qubits physiques, forme alors un qubit logique utilisable pour le calcul quantique.

Le principe d'architecture proposé et détaillé par l'équipe d'Andrew Dzurak correspond exactement à cela. Dans une couche de silicium, 480 électrons font office, grâce à leur spin (une propriété purement quantique), de 480 qubits physiques, cet ensemble formant un qubit logique. Cette couche quantique est soumise à un champ magnétique qui agit sur le spin des électrons.

Un système de transistors placés dans une couche supérieure, permet de lire et exploiter la valeur des qubits physiques. Cette couche est



Vue d'artiste du dispositif proposé. La couche inférieure est constituée d'électrons dont on utilise le spin pour définir les qubits. La couche supérieure est composée de transistors classiques.

10

L'ÉQUIPE D'ANDREW DZURAK A OBTENU UN FINANCEMENT DE 43 MILLIONS D'EUROS POUR DÉVELOPPER, D'ICI À 2022, UN PROTOTYPE D'ORDINATEUR QUANTIQUE COMPOSÉ DE 10 QUBITS LOGIQUES.

semblable à celle présente dans les ordinateurs classiques pour accéder aux différents bits. Elle utilise ainsi des techniques déjà existantes.

Entre ces deux couches, classique et quantique, une couche intermédiaire contient des électrodes placées au-dessus de chaque qubit physique, mais aussi au-dessus de l'espace séparant deux tels qubits. L'application de tensions particulières à ces électrodes permet alors de réaliser des opérations entre les qubits physiques. Et pour contrôler en permanence l'état de ces 480 éléments quantiques, un algorithme de correction d'erreurs est appliqué régulièrement, ce qui assure la stabilité du qubit logique ainsi formé.

Afin de réaliser un ordinateur quantique complet, ce dispositif devra être répliqué des milliers de fois sur une puce électronique, pour former un calculateur contenant autant de qubits logiques. Cette architecture théorique, fondée sur des technologies déjà existantes, est prometteuse et montre que l'on s'approche petit à petit des ordinateurs quantiques. Reste à la réaliser, ce qui nécessitera encore de grands efforts, notamment dans la miniaturisation des composants électroniques. ■

DONOVAN THIEBAUD

M. Veldhorst et al., *Nature Communications*, vol. 8, article 1766, 2017

DE L'INDIGO PLUS VERT

Depuis 6 000 ans, on utilise l'indigo comme teinture bleue. En 2011, on a synthétisé 50 000 tonnes de ce pigment, surtout pour donner leur couleur aux jeans. Mais le procédé de synthèse de l'indigo utilise des produits toxiques. Tammy Hsu, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont amélioré une technique de substitution fondée sur une bactérie *Escherichia coli* génétiquement modifiée pour produire de l'indigo. Ce procédé nécessitait encore un traitement final toxique, qui a été éliminé en faisant produire par la bactérie une enzyme stabilisant le précurseur de l'indigo.

LE QUASAR DU BOUT DU MONDE

Eduardo Bañados, de l'institut Carnegie en Californie, et ses collègues ont découvert un trou noir supermassif au centre d'une galaxie active (un quasar), présent dans l'Univers seulement 690 millions d'années après le Big Bang. Comment un objet ayant 800 millions de fois la masse du Soleil a-t-il pu se former si vite ? Les chercheurs suggèrent que la coalescence de trous noirs primordiaux de 1 000 masses solaires en est à l'origine.

RECORD POUR L'EAU EN SURFUSION

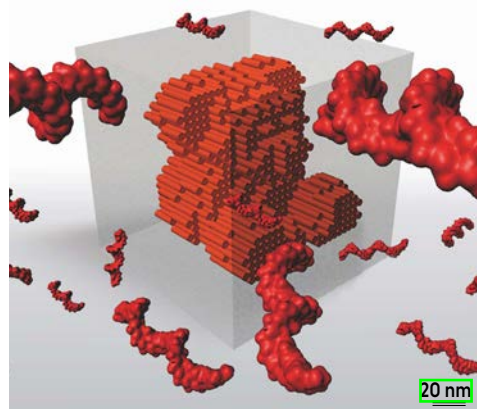
En l'absence de perturbations, il est possible de refroidir de l'eau au-dessous de 0 °C sans qu'elle se solidifie : on parle de surfusion. Robert Grisenti, de l'université de Francfort, et ses collègues ont atteint une valeur record de - 42,55 °C, mesurée sur des gouttes micrométriques. Lorsque les gouttes tombent dans une enceinte sous vide, elles perdent une partie du liquide par évaporation, ce qui les refroidit et diminue leur diamètre. Les chercheurs ont mesuré ce diamètre pour déterminer la température des gouttes.

DES LEGOS FAITS D'ADN

Les nanotubes de carbone sont sans doute les objets nanométriques les plus connus. Un nouveau champ de recherche des nanosciences porte sur les structures constituées à partir d'ADN – des sortes d'origamis d'ADN. Gaëtan Bellot, de l'Inserm à Montpellier, et des collègues de divers pays ont ainsi créé des briques constituées de petits brins d'ADN et capables de s'autoassembler pour former des objets plus complexes.

Ces briques contiennent des brins d'ADN composés de 52 nucléotides. Elles ont 67 millions de formes possibles. Grâce au logiciel Nanobricks qu'ils ont développé, les chercheurs peuvent concevoir des objets comportant jusqu'à 30 000 briques et définir la forme désirée à la main, à l'aide d'une formule mathématique ou avec un fichier 3D comme ceux des imprimantes 3D. Une tomographie électronique assure alors la visualisation des objets obtenus. « Les prédictions du logiciel sont très robustes, avec des structures 3D bien prédites. L'efficacité de la réaction est encore à améliorer, elle n'est que de l'ordre de quelques pour cent; une étape de purification est nécessaire », note Gaëtan Bellot.

Cette nouvelle technique pourrait produire des vecteurs pour acheminer des médicaments



Les chercheurs peuvent construire une grande variété d'objets nanométriques à partir de briques en ADN.

au niveau des cellules ciblées. « On peut aussi imaginer fabriquer des nanoréacteurs à plusieurs cavités, dans lesquelles des réactions chimiques en chaîne pourraient se produire, et pourquoi pas des nanorobots ayant des fonctions dynamiques pour reproduire des systèmes photosynthétiques ou photoniques », indique le chercheur. La nanostructure nue et inerte présente une durée de vie de 48 heures dans un environnement cellulaire, mais son innocuité reste à évaluer. Outre son rendement, le coût de l'approche s'avère également limitant pour le moment : 50 000 dollars pour un cube de 30 000 briques. ■

N. G.

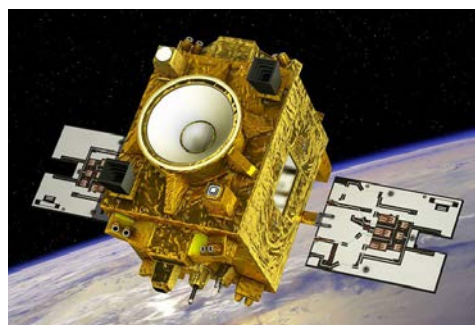
L. L. Ong et al., *Nature*, vol. 552, pp. 72-77, 2017

PHYSIQUE

LA GRAVITÉ AU MICROSCOPE

En 1971, lors de la mission *Apollo 15*, David Scott a lâché une plume et un marteau à la surface de la Lune. Les deux objets sont tombés exactement à la même vitesse ; l'astronaute illustrait ainsi le principe d'équivalence, qui veut que deux objets de masses ou de compositions différentes tombent avec la même accélération en chute libre (en l'absence d'autres forces, comme les frottements de l'air). Ce principe, qui remonte à Galilée, est aux fondements de la relativité générale d'Einstein.

Le principe d'équivalence vient d'être vérifié avec une précision inégalée grâce au satellite *Microscope* du Cnes, en partenariat notamment avec l'Onera, le CNRS et l'université Côte d'Azur. Pierre Touboul, responsable scientifique de la mission, et ses collègues ont étudié la chute libre de deux cylindres de masses et de compositions



Le satellite *Microscope*, qui teste le principe d'équivalence.

différentes embarqués par le satellite. En analysant seulement 10 % des données, ils ont vérifié le principe d'équivalence avec une précision d'environ 10^{-14} , un ordre de grandeur de mieux qu'avec les précédentes expériences. Avec l'ensemble des données, les chercheurs espèrent atteindre une précision de 10^{-15} . ■

S. B.

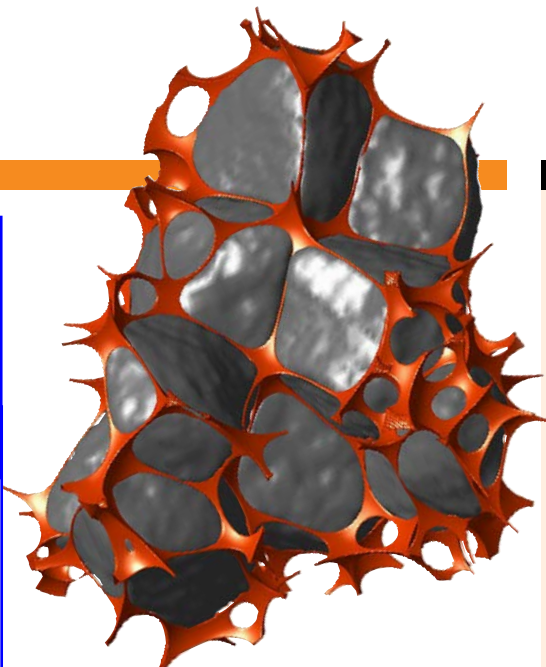
P. Touboul et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, 231101, 2017

GÉOSCIENCES

PERCOLATION DE FER

Les planétésimaux, des corps d'une dizaine de kilomètres de diamètre, se sont formés, à l'instar de la Terre, dans les premiers temps du Système solaire par l'accrétion d'une multitude de météorites. Ces dernières étaient constituées d'un mélange indifférencié de métal et de roche silicatée. Or les planétésimaux présentent, comme la Terre, un noyau de fer. Comment cet élément a-t-il migré vers le centre de ces petits corps? Peut-être par percolation: le fer liquide se serait écoulé entre les grains de roche, comme l'eau dans le café moulu d'un percolateur. Mais les géophysiciens n'arrivaient pas à confirmer ce scénario par des expériences ou des simulations. Dans ces dernières, l'écoulement du fer liquide présentait des discontinuités et de grandes quantités de fer restaient dans le manteau rocheux.

Soheil Ghanbarzadeh, à l'université du Texas à Austin, et ses collègues ont identifié le problème: dans les simulations, les grains rocheux étaient de taille identique. Les chercheurs ont



Le fer liquide (en rouge) s'infiltre entre les grains irréguliers de la roche et dessine un réseau complexe.

donc fait une simulation plus réaliste, impliquant des grains de différentes tailles. Le fer liquide s'écoule alors mieux, et seuls 1 à 2% du fer présent initialement dans le manteau y restent piégés. Un résultat en accord avec la composition d'astéroïdes provenant de planétésimaux détruits. ■

S. B.

S. Ghanbarzadeh et al., PNAS, vol. 114(51), pp. 13406-13411, 2017

EN BREF

DE L'ART DE RANGER LES DÉS

Diego Maza, de l'université de Navarre, en Espagne, et ses collègues ont mis en vrac 25 000 dés dans un grand cylindre. Ils ont alors exercé sur le cylindre une suite de rotations autour de son axe dans les deux sens. Si l'accélération subie par les dés est supérieure à 0,5 g, les cubes atteignent un ordre maximal (une densité maximale) assez vite. À quoi ressemble cet ordre? Les dés s'organisent en couches horizontales superposées et suivant des cercles presque parfaitement concentriques dans chaque couche. Un résultat intéressant pour les industriels qui manipulent des matériaux granulaires. En effet, la méthode utilisée jusqu'à présent pour optimiser le volume occupé – par tapotement sur le côté du récipient – n'est pas toujours efficace.

CONFÉRENCES-DÉBATS

Les roches terrestres et les météorites : jeux de miroir

Lundi 29 janvier - 18h : De la minéralogie des premiers instants du Système solaire à la diversité minérale planétaire

Avec M. Roskosz, professeur de cosmochimie, Muséum

Lundi 5 février - 18h : Co-évolution minérale et biologique

Avec F. Guyot, minéralogiste, professeur au Muséum

Lundi 19 février - 18h : Les roches martiennes : les archives perdues de la Terre

Avec V. Sautter, géologue extraterrestre, directeur de recherche, Muséum

Lundi 26 février - 18h : La matière organique extraterrestre : entre mythes et réalités

Avec L. Rémusat, géochimiste, enseignant-chercheur, Muséum

UNE EXPO, DES DÉBATS

Autour de l'exposition *Météorites, entre ciel et terre*, animé par Marie-Odile Monchicourt, journaliste scientifique à France Info

Lundi 12 février - 18h : Catastrophes célestes, catastrophes terrestres

Avec M. Foessel, philosophe, Université de Bourgogne ; J.-B. Fressoz, historien des sciences, CNRS et M. Gounelle, cosmochimiste, Muséum

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 25 février - 15h : Météoritologue

Avec B. Zanda

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

{ Partagez les savoirs }

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA
SCIENCE



VIRUS ZIKA ET MICROCÉPHALIE

En 2015, au Brésil, une flambée de cas de **microcéphalie** (un développement incomplet du cortex cérébral se manifestant par un crâne et un cerveau de tailles réduites) a été observée, touchant des milliers d'enfants. Le lien avec une infection de la mère par le virus Zika durant la grossesse est désormais prouvé. Une équipe menée par Laurent Nguyen, de l'université de Liège, et Marc Lecuit, de l'institut Pasteur, a mis en lumière un mécanisme par lequel l'agent pathogène trouble le développement du cortex cérébral.

D'une part, le virus perturbe la phase de la neurogenèse qui augmente le nombre de neurones produits; d'autre part, il favorise l'auto-destruction (apoptose) des neurones créés. Avec ces deux actions conjuguées, le nombre de neurones est très faible, ce qui conduit à une microcéphalie. ■

ALINE GERSTNER

I. Gladwyn-Ng et al., *Nature Neuroscience*, vol. 21, pp. 63-71, 2017

BATTERIE PAR GRAND FROID

A -40°C, les performances des batteries commerciales lithium-ion sont diminuées de 90%. En cause? Principalement la cinétique ralentie des ions lithium (Li⁺) dans le graphite qui compose les anodes des batteries de ce type. Ces ions sont les porteurs de charge qui se déplacent entre les électrodes; de leur mobilité et de leur adsorption à l'anode et à la cathode dépend la performance de l'accumulateur électrique.

Les solutions actuelles, notamment de préchauffage du dispositif, sont onéreuses et peu satisfaisantes. Yao Liu, de l'université Fudan, à Shanghai, et ses collègues ont mis au point une batterie à anode en carbone amorphe qui conserve une grande capacité d'adsorption des ions Li⁺. Résultat: la batterie a une puissance instantanée maximale bien supérieure aux batteries commerciales à température ambiante et conserve 67% de sa capacité à -40°C. ■

M. L.

Yao Liu et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 56(52), pp. 16606-16610, 2017

UN DINO PINGOUIN



Le fossile de *Halszkaraptor escuilliei* suggère qu'il s'agissait d'un dinosaure ressemblant à un pingouin à cou de cygne et museau de crocodile.

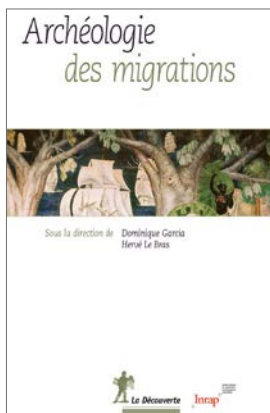
MPC D-102/109 a bien failli n'être qu'un canard à trois pattes, un fossile composite irrémédiablement douteux. Toutefois, après des vérifications et une étude poussée à l'ESRF, le synchrotron européen à Grenoble, une équipe de chercheurs menée par le paléontologue belge Pascal Godefroit l'a sorti des limbes scientifiques où l'avaient fait basculer les braconniers qui l'avaient illégalement mis au jour. Il s'avère qu'il s'agit d'une nouvelle espèce de dinosaure ressemblant à un pingouin à cou de cygne et museau de crocodile, qui a été nommée *Halszkaraptor escuilliei*.

À peu près de la taille d'un canard, MPC D-102/109 provient de la formation à grès orange de Djadochta, en Mongolie méridionale, datant de 75 à 71 millions d'années. D'après les paléontologues, ce fossile serait celui d'un jeune dromæosauridé (famille de dinosaures apparentée aux oiseaux) presque adulte. Son curieux mélange de caractéristiques le rapproche non seulement des oiseaux, mais aussi de nombreux animaux du passé et du présent pratiquant un mode de vie aquatique. Ainsi, le prémaxillaire (l'avant du museau) est aplati et occupe un tiers de la longueur du museau. La forme allongée de la mâchoire et le nombre de dents, qui semblent adaptés tant à la saisie des proies qu'à leur écrasement, évoquent la gueule allongée des crocodiles piscivores, tel le gavial. Détail remarquable, des canaux neurovasculaires partent d'une chambre à l'arrière du prémaxillaire et irriguent l'os entier du maxillaire. Selon les chercheurs, ils abritaient des organes sensoriels, sans doute utiles à la chasse. Alors que la queue des dromæosauridés était raide, il semble que celle de *Halszkaraptor* était souple. Au point d'onduler et d'aider à la nage? *Halszkaraptor* avait en outre un cou de cygne, souple et articulé, qui lui permettait peut-être de fouiller la vase ou de tendre son museau denté vers un poisson...

Ces traits suggèrent que l'animal pouvait passer du temps sur la terre ferme et dans l'eau. Sa queue, courte pour un dromæosauridé, permettait sans doute de garder un centre de gravité placé vers l'avant, créant une posture favorable à la nage et peut-être à la plongée. Ses membres antérieurs, courts, trempaient dans l'eau s'il nageait et servaient probablement de nageoires, comme chez un pingouin, s'il plongeait. Ses pattes postérieures ne semblent pas palmées: elles lui servaient avant tout à courir, puisque, comme tous les dinosaures, *Halszkaraptor* pondait à terre et donc y séjournait. Très vertical, le torse aurait favorisé une extension vers l'arrière des membres postérieurs, qui devait l'aider à courir. Un drôle de canard! ■

M. S.

A. Cau et al., *Nature*, vol. 552, pp. 395-399, 2017



ARCHÉOLOGIE

ARCHÉOLOGIE DES MIGRATIONS

Dominique Garcia et Hervé Le Bras (dir.)

La Découverte/Inrap, 2017
392 pages, 24 euros

Voici un ouvrage qui replace la notion de migration dans une perspective historique et même préhistorique: pour reprendre le titre du second chapitre de l'introduction, *Homo* est en effet «le seul singe migrateur».

L'ouvrage, qui rassemble

les actes d'un colloque international, est découpé selon les divisions traditionnelles en époque préhistorique, ancienne, médiévale, moderne et contemporaine. Le propos est riche et varié. D'amples fresques sur les déplacements de nos lointains ancêtres depuis l'Afrique jusqu'à l'occupation de l'ensemble des terres émergées côtoient des études concernant un espace plus restreint, comme les migrations phéniciennes en extrême Occident ou l'encadrement migratoire dans l'Empire romain. Océanie, expansion bantoue en Afrique, populations africaines arrivées malgré elles en Amérique à la suite de l'esclavage, les territoires concernés sont très divers, jusqu'à de microterritoires tels que le cimetière italien des Crottes, à Marseille.

La réflexion bénéficie de nombreux

outils de recherche venant appuyer l'archéologie, avec l'utilisation de l'ADN ou de la linguistique pour saisir l'expansion bantoue ou le questionnement sur l'origine des Étrusques, abordée du triple point de vue de l'archéologie, de la linguistique et du fait religieux.

Cet ouvrage a surtout le mérite de mettre en évidence la dimension humaine d'une aventure multimillénaire, nous aidant par là à prendre une distance bienvenue vis-à-vis d'un phénomène d'actualité.

NADINE GUILHOU / UNIV. DE MONTPELLIER



MÉDECINE

PRÉDIRE ET PRÉVENIR LE CANCER

Suzette Delaloge et Lionel Pourtau

CNRS Éditions, 2017
176 pages, 20 euros

Le cancer est une maladie multifactorielle, dont la genèse est cependant déterminée en grande partie par le patrimoine génétique. La banalisation du décryptage du génome et les techniques génomiques ont donc bouleversé les perspectives de la gestion du risque cancéreux. Ces techniques permettent idéalement de mieux anticiper le processus pathologique par des mesures préventives, bien avant les premiers signes cliniques. On peut désormais traiter une tumeur en fonction de ses spécificités génétiques et biologiques, mais aussi en tenant compte de l'environnement et du mode de vie du patient. Là se trouve l'enjeu de ce livre, écrit à quatre mains par une oncologue et un sociologue.

Désormais, l'histoire de la maladie ne commence plus par l'apparition des premiers symptômes, ni par la modification de marqueurs, mais dès la naissance, par la cartographie du génome. La prévention consiste alors à agir avant même le déclenchement du mal, car il est désormais possible de prédire à l'avance les sujets à risque et les médicaments potentiellement efficaces. Ainsi, une avancée décisive en cancérologie s'est produite, qui rend possible une médecine de précision ou personnalisée, à la fois prédictive, préventive et participative.

Cette nouvelle situation pose toutefois de nombreux problèmes éthiques, individuels, familiaux et sociétaux: la question de vouloir savoir ou pas, le déni du risque, vivre «comme si», la tentation eugénique du dépistage anténatal, les données massives sur le déterminisme médical de la population...

Ce livre a le mérite de poser clairement les enjeux d'une approche dorénavant banalisée de la prise en charge du cancer, et de mettre en garde contre les dérives et mésusages potentiels de cette approche.

BERNARD SCHMITT / CERNH, LORIENT



EXOBILOGIE

OÙ SONT-ILS ? LES EXTRATERRESTRES ET LE PARADOXE DE FERMI

Mathieu Angelou et al.

CNRS Éditions, 2017

208 pages, 19 euros

Nous sommes des cirons pascaliens assez intrépides pour vouloir conquérir l'Univers et trouver des civilisations extraterrestres. En 1950, le physicien italien Enrico Fermi s'était interrogé (les soucoupes volantes étaient à la mode) sur la probabilité qu'une civilisation extraterrestre nous rende visite et a conclu que cela était très possible. Le paradoxe était non pas que les extraterrestres existent éventuellement, mais qu'ils ne se soient pas encore manifestés ! Depuis, les scientifiques de tous bords ont précisé les divers facteurs qui interviennent dans la probabilité pour que nous puissions communiquer avec ces ectoplasmes : les termes de l'« équation de Drake » forment l'ossature du livre (l'existence d'une planète habitable, le degré de son développement technologique, nos possibilités de transport, nos moyens de communication, etc.).

La quête nous amène à examiner nos traits essentiels afin de reconnaître une possible civilisation « semblable ». Cette double exploration, de l'Univers et de nous-mêmes, fait intervenir nombre de disciplines – physique, géologie, biologie, psychologie, cryptographie... – et amène des réflexions philosophiques fondées sur l'histoire de notre humanité.

Citons quelques remarques judicieuses. Si nous croyons en un Dieu créateur personnel, pourquoi aurait-il créé pour les humains un univers aussi grand et divers ? Sur Terre, donc dans notre propre environnement, parmi les millions d'espèces, seule la nôtre a su développer une technologie de communication. Comment communiquer avec des extraterrestres si nous ne savons déchiffrer aucun langage animal ? Comment imaginer les capacités des extraterrestres si lointains dans le temps si nous ne savons pas discerner ce que sera notre évolution dans quelques millions d'années ?

Ce livre, original et passionnant, nous fait rêver rationnellement.

PHILIPPE BOULANGER

HISTOIRE DES SCIENCES

LES SCIENCES NATURELLES À ROUEN AU XIX^e SIÈCLE

Bénédicte Percheron

Éditions Matériologiques, 2017

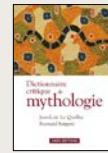
710 pages, 35 euros

Le XIX^e siècle fut à bien des égards l'âge d'or des sciences naturelles, par l'intérêt qu'elles suscitèrent alors auprès du public. Ce livre, issu d'un travail de recherche impressionnant, le démontre en prenant pour exemple une grande ville de province, Rouen. Après avoir retracé les prémices de cette discipline sous la forme notamment des cabinets de curiosité du XVIII^e siècle, l'auteur explore le développement des institutions scientifiques de la capitale normande sous tous leurs aspects – et ils sont nombreux. Les jardins botaniques (il y en eut plusieurs) et le Muséum d'histoire naturelle étaient naturellement les principaux lieux où s'affichait l'intérêt des Rouennais pour les sciences de la nature. Mais l'abondance des cours publics qui leur étaient consacrés (dans une ville qui ne disposait pas encore d'une université) ainsi que l'activité des sociétés savantes, où l'on discutait avec passion des grandes controverses du moment, qu'il s'agisse de l'évolution ou de l'existence de l'homme fossile, témoignaient du dynamisme des sciences naturelles. Quelques grands noms, qui sont souvent ceux de médecins, dominent cette période.

L'auteur attire en outre l'attention sur des aspects plus inattendus, comme le rôle des exhibitions présentées dans les foires et les expositions coloniales, ou celui des sociétés ayant pour objet les progrès de l'agriculture. En notre temps où beaucoup de sociétés savantes s'étiolent et où trop de musées d'histoire naturelle délaissent la recherche au profit de l'esthétisme ou des distractions enfantines, la lecture de ce remarquable livre peut susciter une certaine nostalgie...

ERIC BUFFETAUT / CNRS-ENS, PARIS

ET AUSSI



DICTIONNAIRE CRITIQUE DE MYTHOLOGIE

Jean-Louis Le Quellec et Bernard Sergent

CNRS Éditions, 2017

1554 pages, 39 euros

L'étude des mythes de l'humanité

est à l'origine d'une discipline scientifique, qui a développé ses propres concepts et techniques. Un anthropologue et un spécialiste de mythologie comparée se sont associés pour produire ce gros dictionnaire dont les quelque 1 400 entrées se rapportent aux grands mythes (par exemple « incestes », « ours », « zodiaque »...), aux concepts de la discipline (par exemple « axiologie », « décepteur », « tabou »...) et à plus de 170 scientifiques du domaine. Un ouvrage de référence sur la science mythologique sans équivalent.

INSTITUT PASTEUR RECHERCHES D'AUJOURD'HUI, MÉDECINE DE DEMAIN

Collectif

La Martinière, 2017

208 pages, 29,90 euros

Ce bel ouvrage publié à l'initiative de l'institut Pasteur présente la vocation passée, récente et future de cette fondation scientifique privée. On y trouve notamment de passionnantes mises au point sur ses recherches fondamentales : paludisme, sida, microbiote intestinal, autisme, etc. Sont également détaillés le rôle de l'institut dans la médecine et la santé publique, ainsi que dans la formation des chercheurs. Un dernier chapitre est dédié à l'étonnant soutien du public, qui fournit à l'institut un tiers de ses moyens.

DANS LA COMBI DE THOMAS PESQUET

Marion Montaigne

Dargaud, 2017

208 pages, 22,50 euros

Vous aussi, les multiples reportages qu'ont consacrés de nombreux

médias français à l'aventure du cosmonaute Thomas Pesquet vous ont lassés ? Eh bien, en voici encore un, en bandes dessinées qui plus est. C'est une bonne surprise. On rit beaucoup à la lecture de cet ouvrage, tout en apprenant énormément sur la réalité de la sélection, de l'entraînement et de la vie d'un astronaute. Bref, l'auteur de ces quelques lignes a enfin trouvé le média qui rend l'aventure de Thomas Pesquet à la fois vivante, intéressante et délectable.

PARIS

JUSQU'AU 26 AOÛT 2018
Cité des sciences et de l'industrie
www.cite-sciences.fr

Froid

On a tendance à l'oublier, mais la maîtrise du froid fait partie des avancées techniques les plus révolutionnaires. En facilitant grandement la conservation des aliments, elle a bouleversé la vie quotidienne: qui, dans les sociétés industrialisées, se passerait aujourd'hui d'un réfrigérateur à domicile? Et les applications des basses températures sont loin de se limiter à l'alimentation et au secteur agroalimentaire.

Le froid mérite donc pleinement qu'on lui consacre une exposition. Qu'est-ce que le froid? Quels effets a-t-il? Quelles sont ses limites? Comment le produit-on? À quoi sert-il? Bien qu'il s'agisse d'une sensation et d'un phénomène produits quotidiennement, nous en avons souvent une connaissance et une compréhension plutôt vagues. Visiter cette exposition permet d'y remédier...

On est conduit dans un premier espace qui fournit des repères – objets, pratiques, applications... – permettant de situer les différentes échelles de températures inférieures à 37 °C (celle de notre corps) jusqu'au zéro absolu, c'est-à-dire -273,15 °C.

À partir de cet espace s'en ouvrent trois autres, où sont présentés les défis liés au froid dans trois registres différents: celui du corps humain et du vivant, où l'on décrit des phé-



mènes physiologiques et des applications du froid en biologie et en médecine; celui de la société, où l'on se focalise sur la production du froid et ses nombreuses utilisations industrielles; celui de la science, enfin, où l'on explore le domaine des très basses températures et les comportements surprenants de la matière à l'approche du zéro absolu. Un tour d'horizon du monde du froid qui ne laissera sans doute pas les visiteurs de glace! ■

VILLENEUVE-D'ASCQ

JUSQU'AU 4 MARS 2018
Forum départemental des sciences
www.forumdepartementaldessciences.fr

Survie en Himalaya



En 1902, le médecin suisse Jules Jacot Guillarmod et le poète anglais Aleister Crowley entreprenaient l'ascension du K2, le deuxième plus haut sommet du monde, à 8611 mètres. Cette exposition vous fait revivre en sept étapes cette expédition à la fois alpiniste et scientifique, notamment grâce aux images et au journal de Guillarmod retrouvés il y a quelques années. ■

BORDEAUX

JUSQU'AU 25 FÉVRIER 2018
Cap Sciences - Hangar 20
www.cap-sciences.net

Cellules souches



Les cellules souches constituent depuis plusieurs années un domaine de recherche très actif. Cette exposition explique aux visiteurs ce que sont ces cellules, ce qu'elles font dans notre corps, leurs utilisations actuelles en médecine régénérative et les grands espoirs que la recherche médicale place en elles. Sans faire l'impasse sur les questions sociétales soulevées. ■

ET AUSSI

Mercredi 7 février, 14 h
Université de Poitiers
www.emf.fr
ALAN TURING
L'historien Pierre-Éric Mounier-Kuhn précise le rôle d'Alan Turing dans le développement de l'informatique, au-delà des clichés.

Mercredi 7 février, 18 h 30
BnF - Paris
www.bnf.fr
MATHÉMATIQUES
DÉRAISONNABLEMENT EFFICACES
Ingrid Daubechies, de l'université Duke, illustre avec des exemples récents la grande question: en mathématiques, découvre-t-on les résultats ou les invente-t-on?

Samedi 10 février, 22 h 20
Sur la chaîne Arte
www.arte.tv
LE PROTÉOME
Un documentaire sur les recherches relatives au protéome, c'est-à-dire l'ensemble des protéines que synthétise une cellule.

Mardi 13 février, 17 h
Acad. des sciences, Paris
www.academie-sciences.fr
COMBUSTION
Une conférence de Sébastien Candel sur la combustion, en lien avec les questions d'énergie et la propulsion aéronautique et spatiale..

Mercredi 14 février, 14 h
Université de Poitiers
www.emf.fr
LES ARAIGNÉES
Spécialiste des araignées au Muséum national d'histoire naturelle, Christine Rollard nous introduit à ce groupe souvent méconnu.

Samedi 24 février, 14 h
Domaine de Montauger (Essonne)
www.essonne.fr
Tél. 01 60 91 97 34
SIRÈNES DU STAMPIEN
Une conférence sur les siréniens, groupe de mammifères marins représenté aujourd'hui par le lamantin et le dugong, que l'on rencontrait il y a 30 millions d'années en Essonne (submergée à l'époque...).

MONS (BELGIQUE)

JUSQU'AU 20 MAI 2018
Mundaneum
www.mundaneum.org

Top secret!



Le cryptage de messages confidentiels est une activité aussi vieille que l'humanité, mais qui n'a jamais eu autant d'importance qu'aujourd'hui. Secrets militaires ou diplomatiques, espionnage, surveillances de masse, activités clandestines en tous genres, sécurité informatique, sécurité des transactions bancaires, etc. : la cryptographie concerne d'innombrables activités humaines, qu'elles soient utiles ou néfastes. Cette exposition, dont le commissaire scientifique est l'éminent cryptologue Jean-Jacques Quisquater, introduit les visiteurs à ce monde du secret à travers de nombreux exemples et en suivant un fil conducteur historique, qui va des débuts de la cryptographie mécanique jusqu'à la cryptographie quantique, en passant par les développements cruciaux réalisés au cours de la Seconde Guerre mondiale, notamment grâce au mathématicien britannique Alan Turing. Une exposition au riche contenu. ■

ÉTOILE-SUR-RHÔNE (DRÔME)

JUSQU'AU 25 FÉVRIER 2018
Les Clévos
www.lesclevos.com

Quoi de neuf au Moyen Âge?

Le Moyen Âge fait l'objet d'un bon nombre de clichés : période obscurantiste et sans innovations, organisation sociale en riches seigneurs tout puissants régnant sur des serfs miséreux, guerres et invasions perpétuelles... Cette exposition, présentée à Étoile-sur-Rhône en exclusivité après Paris, a l'ambition de balayer ces idées reçues et de montrer, à la lumière des découvertes archéologiques et travaux historiques récents, que l'ère médiévale est plus complexe et passionnante qu'on ne croyait. On y apprend notamment que le Moyen Âge a connu de grands



mouvements migratoires et des mélanges culturels, ce qu'étaient les élites médiévales et quelles étaient leurs pratiques, comment vivaient au quotidien les habitants de la campagne. On prend aussi conscience que la boussole, les lunettes de vue, le sablier et autres objets remarquables sont des inventions médiévales, que l'industrie a fait ses débuts avec la multiplication des moulins et l'apparition des hauts-fourneaux, que la gestion des forêts et autres espaces s'est développée... ■

PARIS

DU 8 FÉVRIER AU 5 MARS 2018
Grandes serres
du jardin des Plantes
www.jardindesplantes.net



Mille & une orchidées

La grande serre tropicale présente, pour cette sixième édition du rendez-vous des orchidophiles parisiens, des milliers d'orchidées en fleurs. Et la galerie de botanique met en valeur les orchidées récoltées et décrites au début du XIX^e siècle par Alexander von Humboldt et Aimé Bonpland lors d'une expédition en Colombie. Sont aussi présentées des photos prises en 2017 sur le trajet suivi par les deux naturalistes. Ces expositions entrent dans le cadre de l'année croisée France-Colombie. ■

SORTIES DE TERRAIN

Vendredi 2 février, 9 h
Arles (Bouches-du-Rhône)
www.cen-paca.org
Tél. 04 42 20 03 83
MARAIS DE BEAUCHAMP
Excursion de deux heures pour visiter un concentré de Camargue en périphérie de la ville d'Arles.

Les 2 et 22 février
Rosnay (Indre)
parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13/11 00
RÉSERVE NATURELLE MASSÉ-FOUCAULT
Une demi-journée de balade (2 km) dans les 319 hectares de la Réserve naturelle régionale Terres et étangs de Brenne Massé-Foucault, créée en 2014.

Samedi 3 février, 8 h 30
Migné (Indre)
parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13
HIVERNAGE AU PLESSIS
Dans le cadre de la journée mondiale des zones humides, deux heures de découverte des oiseaux d'eau sur un site privé en plein cœur de la Brenne.

Dimanche 4 février
Marais de la basse vallée de l'Essonne
Tél. 01 60 91 97 34
AVIFAUNE ET ZONES HUMIDES
Animation tout public d'une matinée pour comprendre le rôle des zones humides et apprendre à identifier les oiseaux d'eau qui hivernent en Essonne.

Samedi 24 février, 9 h
Saint-André-le-Gaz (Isère)
www.lepicvert.org
Tél. 04 76 91 34 33
AMPHIBIENS
Sortie à la découverte des amphibiens (et des oiseaux) du marais du Guâ, site peu perturbé géré par l'association Le Pic Vert.

Dimanche 18 février, 8 h 30
Jablins (Seine-et-Marne)
www.lpo.fr
Tél. 07 62 38 30 89
OISEAUX À JABLINS
Une matinée d'observation des nombreux oiseaux d'eau hivernant sur la vaste étendue d'eau de l'île de loisirs de Jablins-Annet.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

COHABITER SUR LE RÉSEAU : UN DÉFI

Le Web n'a pas de frontières. S'y expriment des individus aux valeurs et aux lois souvent bien différentes. Mais la Toile n'est pas pour autant condamnée à la foire d'empoigne...



Les photons, qui voyagent dans les fibres optiques et qui transportent nos idées, nos opinions, etc., ne s'arrêtent pas aux frontières pour y présenter leurs papiers. Cependant, alors que le réseau Internet est global, nos valeurs et nos lois sont locales. Ainsi, ce qui peut être autorisé dans un pays ne l'est pas nécessairement ailleurs.

Même quand les valeurs sont les mêmes dans deux pays différents, leur hiérarchie diffère souvent. Ainsi, en France comme aux États-Unis, la liberté d'expression est chérie et les crimes contre l'humanité sont haïs. Mais quand ces valeurs entrent en conflit, le dilemme est arbitré différemment : en faveur de la condamnation de l'apologie de crimes contre l'humanité en France, en faveur de la liberté d'expression aux États-Unis. Ainsi, le port d'un uniforme nazi est condamné par le code pénal français, mais protégé par le premier amendement de la constitution américaine.

Quand une telle manifestation se produit sur le Web, qui n'est situé dans

aucun pays en particulier, il n'est pas facile de savoir quelle loi appliquer. Ainsi, il y a longtemps déjà, un procès a opposé la Ligue internationale contre le racisme et l'antisémitisme et le site web Yahoo!, sur lequel des objets nazis étaient vendus. Ce procès a commencé en France en 2000 et s'est achevé aux États-Unis en 2004. Il a abouti à une décision d'une

**Nous devons apprendre
à juger une action
dans plusieurs systèmes
de valeurs à la fois**

cour américaine reconnaissant que la France avait le droit d'interdire la vente d'un objet sur son territoire et que Yahoo!, développant ses activités en France, devait en respecter les lois.

Au-delà de cette affaire, le fait est que le réseau nous met en contact avec

des personnes dont la culture, les valeurs et les lois sont différentes des nôtres. Comment, alors, notre vie en commun peut-elle s'organiser ?

Une première manière de le faire est de s'appuyer sur le fait que, les personnes étant désormais plus proches grâce au réseau, leurs valeurs se rapprochent également. Ainsi, l'abolition de la peine de mort ou le respect des droits des minorités sont des valeurs promues par des mouvements mondiaux, qui ignorent nos particularismes. L'émergence de ces valeurs communes pourrait nous inciter à les inscrire dans des lois universelles et à imaginer des tribunaux internationaux chargés de les faire respecter. De nombreuses structures intergouvernementales consacrées, par exemple, à la santé, au travail, à l'énergie atomique, fonctionnent déjà ainsi.

Cependant, même si de telles institutions émergeaient, des différences culturelles persisteraient vraisemblablement, et, comme dans *Le Tartuffe* de Molière, la vue du sein de Dorine continuerait de faire venir de coupables pensées aux uns et non aux autres. Une seconde façon d'organiser cette vie en commun est alors, pour chacun, de faire un pas vers l'autre. Cela consiste, pour Dorine, à couvrir une partie de son sein et, pour Tartuffe, à souffrir la vue de celle qui n'est pas couverte, car ils savent l'un et l'autre que ce demi-effort est la condition de leur cohabitation pacifique.

Dans un cas comme dans l'autre, nous devons apprendre à juger une action, non dans un système de valeurs considérées comme absolues, mais simultanément dans plusieurs systèmes, en cherchant, non un jugement parfait, mais un compromis acceptable.

Penser différemment n'est pas impossible, à l'image des géomètres du XIX^e siècle qui ont appris à raisonner simultanément dans un cadre euclidien et dans un cadre non euclidien. Que, grâce au réseau, nous adoptions une telle attitude est sans doute un progrès moral, dont nous devons nous réjouir. ■

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

NUMÉRO 300

Sciences Humaines

SCIENCES HUMAINES

SPÉCIAL N° 300

Comment va le monde ?

- ce qui **progress**e • ce qui **régress**e
- ce qui **change**

A word cloud featuring various French terms related to social and political values. The words are arranged in a dense, overlapping manner. The most prominent words are 'DÉMOCRATIE' (top left, large, orange), 'LIBERTÉS' (middle left, large, red), 'PAIX' (middle right, large, yellow), and 'SANTÉ' (bottom right, large, yellow). Other visible words include 'VIOLENCE' (top left, yellow), 'ÉDUCATION' (top right, blue), 'CROISSANCE' (middle left, green), 'ÉGALITÉS' (middle left, green), 'INNOVATION' (middle right, red), 'ENVIRONNEMENT' (middle left, black), 'CULTURE' (middle right, purple), 'FAMILLE' (bottom left, pink), 'ALIMENTATION' (bottom right, black), and 'BIEN-ÊTRE' (bottom left, black). The background is white with a faint grid of small blue dots.

BELUX 7.20 € - SUISSE 11.60 CHF - CANADA 11.50 \$CAN - ESP/GR/ITA/PORT (CONT) 7.40 € - ALL 7.00 € - DOM/USA 8.50 € - DOM/USA 7.20 € - TOM/USA 10.00 F CFP

WWW.SCIENCESHUMAINES.COM - MENSUEL N° 300S - FÉVRIER 2018 - 6,90 €

M 01866 - 3005 - F: 6.90 € - RD





LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

JÉRUSALEM ET LE PARADOXE DE NEWCOMB

La décision du président américain concernant Jérusalem a-t-elle été influencée par les évangélistes ? Si oui, elle est sous le coup d'un paradoxe soulevé en 1960.



Reconnaître Jérusalem comme capitale de l'État d'Israël, une décision annonciatrice de la fin des temps ?

D'entre toutes les décisions qu'aura prises Donald Trump, la reconnaissance de Jérusalem comme capitale d'Israël sera peut-être l'une des plus lourdes de conséquences. Beaucoup de spécialistes s'accordent à dire que les évangélistes américains sont pour quelque chose dans cette décision, parce qu'ils constituent 26% de la population de leur pays et votent massivement pour le parti républicain.

Pourquoi ce mouvement religieux trouve-t-il désirable que Jérusalem soit la capitale d'Israël ? S'inspirant d'une lecture littérale de la Bible, 82% d'entre eux (selon une étude du Pew Research Center) considèrent que la terre d'Israël a été donnée au peuple juif par Dieu lui-même. De plus, ces groupes de croyants sont significativement millénaristes, c'est-à-dire qu'ils croient en la survenue d'événements qui aboutiront à la fin des temps. Selon un sondage du même centre de recherches, 58% d'entre eux se déclarent persuadés que Jésus reviendra sur Terre avant 2050. Il ne faut donc pas lambiner.

Or l'un des signes avant-coureurs de cette apocalypse tant désirée est justement le regroupement du peuple juif sur la terre qu'il considère sainte. Et c'est là qu'un paradoxe, passé inaperçu, commence.

En effet, Dieu est censé avoir décidé de toute éternité la date de l'apocalypse, mais attendre ses signes annonciateurs

Attendre les signes annonciateurs d'un événement n'est pas la même chose que les provoquer soi-même

n'est pas tout à fait la même chose que les provoquer soi-même. Comment imaginer qu'une action au présent (comme la décision sur Jérusalem) puisse influencer la réalisation d'une prédiction faite dans le passé ?

La situation rappelle le paradoxe de Newcomb, une expérience de pensée imaginée en 1960 par le physicien américain William Newcomb, mais vraiment analysée pour la première fois par le philosophe américain Robert Nozick dans un article de 1969. Elle met en scène le dilemme d'un individu confronté à un être omniscient et à deux boîtes opaques A et B. Le joueur devra choisir soit de les ouvrir toutes deux, soit d'ouvrir uniquement la boîte A. Le devin dépose 1000 euros dans la boîte B. Dans la boîte A, il introduit 1 million d'euros s'il prévoit que le joueur n'ouvrira que la boîte A, mais n'y dépose rien s'il prévoit que le joueur ouvrira les deux boîtes.

Le dilemme est donc le suivant : au moment où le joueur décide d'ouvrir une ou deux boîtes, l'argent a déjà été placé ; il paraît donc rationnel d'ouvrir les deux, car le contenu des deux boîtes sera toujours supérieur à celui d'une seule. Mais puisque le devin connaît l'avenir, il aura pris sa décision en fonction de celle du joueur, qui risque alors de n'empocher que 1000 euros... Celui-ci peut donc être conduit à penser que le choix fait au présent a pu influencer celui du devin dans le passé. Il reste que, au moment de choisir, la prédiction a été faite : n'est-il pas rationnel d'ouvrir les deux boîtes dans ce cas ? Mais alors, le devin ne le saura-t-il pas nécessairement ?

On peut raisonner ainsi indéfiniment. Ce paradoxe soulève en fait la question d'une inversion de la chaîne causale habituelle : ici, le présent détermine causalement le passé.

C'est exactement à cette forme de causalité inversée que s'abandonnent ceux d'entre les millénaristes qui cherchent à provoquer la fin des temps en affichant les signes. Ceux-ci ne sont que les effets de la décision divine, mais deviennent obscurément, dans l'esprit des croyants, les éléments déclencheurs des événements attendus. Tous ces préteurs d'apocalypse, qu'ils s'agitent aux États-Unis ou en Syrie, cherchent à remonter la pente naturelle de la causalité et sont embourbés, sans le savoir, dans le paradoxe de Newcomb. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

les conférences

février 2018

accès gratuit

colloque

Milieux polaires et biomimétisme

vendredi 2 février de 14h à 18h

samedi 3 février de 9h30 à 18h

Les espèces vivantes qui ont pu s'adapter aux conditions extrêmes des régions polaires ont développé tout un arsenal de réponses morphologiques, physiologiques et comportementales, qui inspirent la technologie.

EN PARTENARIAT AVEC



LES PARTENAIRES DU COLLOQUE



AVEC LE SOUTIEN DE



© Remy Marion / Pôles d'images

table ronde

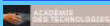
Virtuelle ou augmentée, quelles réalités ?

mercredi 14 février à 18h

D'abord ludiques, les technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée touchent de nombreux domaines : la chirurgie, l'industrie, la formation, la culture....

Avec Alain Berthoz, David Cage, François Garnier, Gael Kuhn, Serge Tisseron.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



@republica.fr

L'ESSENTIEL

> L'hypothétique matière noire assure, par sa masse, la cohésion gravitationnelle des galaxies. Mais sa nature reste inconnue.

> Elle pourrait être constituée de particules interagissant très peu avec la matière ordinaire, les wimps. Mais aucun wimp n'a été détecté jusqu'ici.

> Des trous noirs « primordiaux », formés peu de temps après le Big Bang, constituent un autre candidat au titre de matière noire.

> Les détecteurs d'ondes gravitationnelles ont mis en évidence des trous noirs dont les caractéristiques s'accordent avec cette hypothèse.

LES AUTEURS



JUAN GARCIA-BELLIDO
physicien théoricien
et professeur à l'Institut
de physique théorique
de Madrid, en Espagne

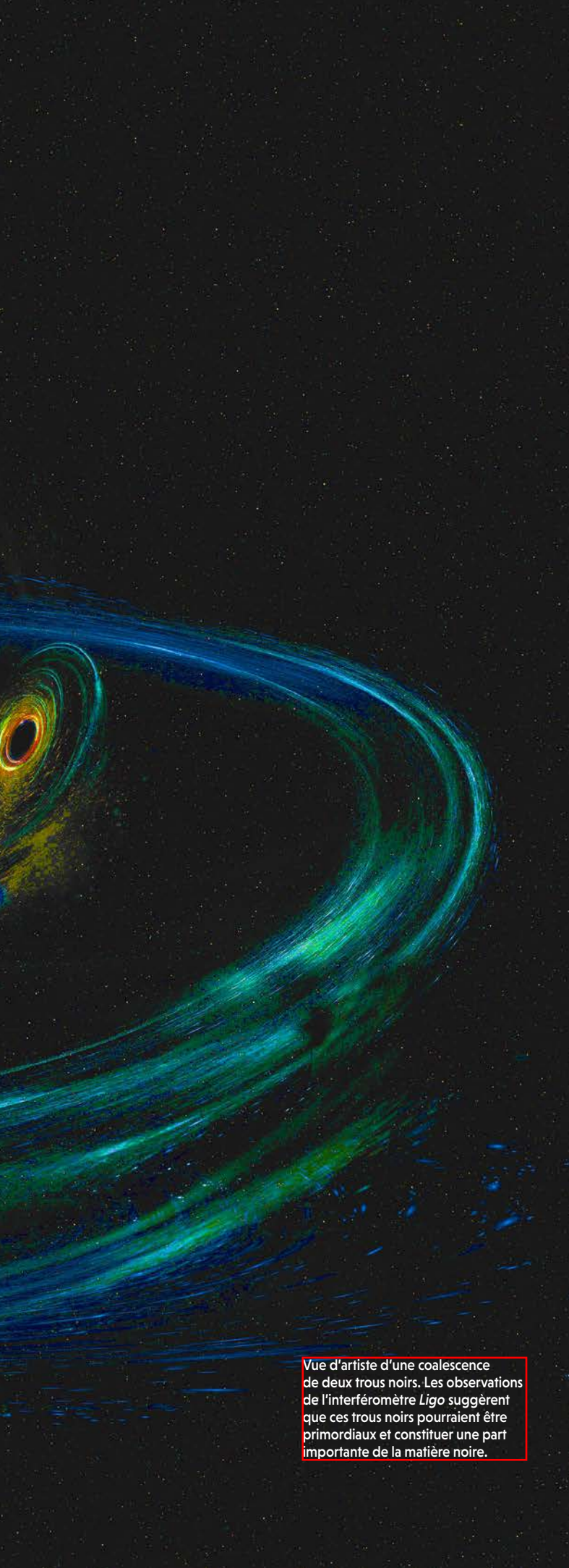


SÉBASTIEN CLESSE
chargé de recherche FNRS
à l'université de Namur
et à l'université catholique
de Louvain, en Belgique

Matière noire

la piste des trous noirs

De quoi est faite la masse manquante de l'Univers ? Des observations récentes appuient l'hypothèse des trous noirs primordiaux, des objets nés moins d'une seconde après le Big Bang, bien avant les étoiles.



Vue d'artiste d'une coalescence de deux trous noirs. Les observations de l'interféromètre *Ligo* suggèrent que ces trous noirs pourraient être primordiaux et constituer une part importante de la matière noire.

© Ligo/Caltech/MIT/Sonoma State/Aurore Monnet

Il y a plus d'un milliard d'années, dans l'Univers lointain, deux trous noirs tournaient l'un autour de l'autre. Ils se sont rapprochés progressivement jusqu'à fusionner. Cette spirale mortelle s'est soldée par une collision d'une extrême violence. Le choc a secoué la trame de l'espace-temps, émettant des perturbations – des ondes gravitationnelles – qui se sont propagées à la vitesse de la lumière dans toutes les directions. En septembre 2015, après avoir parcouru plus d'un milliard d'années-lumière, ces ondes ont atteint la Terre et fait vibrer les interféromètres laser géants du complexe de détection *Ligo*, aux États-Unis. C'était la première fois que les physiciens détectaient directement des ondes gravitationnelles. Cette observation a confirmé de façon définitive leur existence, prédite un siècle auparavant par Albert Einstein.

LA SURPRISE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

À partir de la forme du signal capté par *Ligo*, les physiciens ont calculé que chacun des deux trous noirs impliqués dans la fusion était environ trente fois plus massif que le Soleil. En d'autres termes, leur masse était le double ou le triple de celle des trous noirs ordinaires, qui naissent au cœur de l'explosion en supernova d'étoiles massives. Ces trous noirs étaient si lourds qu'il est difficile d'expliquer comment ils ont pu se former à partir d'étoiles.

De plus, même en admettant qu'ils sont nés de façon indépendante lors de la mort d'étoiles massives, il reste à expliquer comment ils ont pu se rencontrer dans l'immensité du cosmos et former un système binaire: un scénario qui semble très improbable.

Il est donc raisonnable de supposer que ces trous noirs massifs se sont formés par un autre mécanisme, plus exotique, ne faisant intervenir aucune étoile. Au-delà de la détection des ondes gravitationnelles, *Ligo* pourrait bien avoir mis au jour quelque chose d'encore plus extraordinaire: des trous noirs antérieurs à la formation des étoiles elles-mêmes.

Bien que ces hypothétiques trous noirs «primordiaux» n'aient jamais été observés, certains modèles théoriques suggèrent qu'ils se seraient formés en grand nombre dans le plasma dense et brûlant qui remplissait le cosmos moins d'une seconde après le Big Bang. Cette population cachée serait alors la solution à plusieurs énigmes de la cosmologie moderne.

En particulier, ces trous noirs primordiaux pourraient constituer tout ou partie de la matière noire, qui représente 85% de la matière de l'Univers. Bien qu'invisible et de nature inconnue, la matière noire a été imaginée pour servir de liant gravitationnel: elle assurerait la cohésion des galaxies et des amas

> galactiques. Car il semble que les galaxies tournent trop vite pour être tenues gravitationnellement par la seule masse de la matière visible que nous observons dans ces galaxies. La matière noire apporterait le supplément d'attraction qui empêche les galaxies en rotation d'éjecter le gaz et les étoiles de leurs régions les plus externes.

Mais quelle est la nature de la matière noire? Les physiciens ont envisagé de nombreuses possibilités. Or les observations de *Ligo* suscitent un regain d'intérêt pour l'une de ces pistes, celle des trous noirs primordiaux. Les futures observations de *Ligo* et d'autres observatoires, tel *Virgo*, en Italie, mettront bientôt cette idée à l'épreuve, et notre compréhension de l'Univers pourrait alors connaître une révolution.

De prime abord, les trous noirs sont de bons candidats à la matière noire puisqu'ils n'émettent pas de lumière. De fait, ils appartiennent à une classe de solutions pour la matière noire proposées dans les années 1980 et nommées *machos* (acronyme de *massive compact halo objects*). En plus des trous noirs, les machos incluent aussi les planètes et les naines brunes (étoiles trop peu massives pour déclencher les réactions de fusion de l'hydrogène). Présents à la fois dans les halos sphériques entourant les galaxies et à proximité du centre lumineux de chaque galaxie, les machos produiraient le surplus d'attraction gravitationnelle requis pour expliquer le mouvement du gaz et des étoiles.

Quelle que soit sa nature, machos ou autres, la matière noire se manifeste à différentes échelles dans l'Univers. Elle influe sur la dynamique des galaxies et des amas de galaxies, mais elle a aussi contribué à la naissance de ces structures. Elle a déterminé où et à quelle vitesse grandissent les galaxies ainsi que les amas et superamas de galaxies. Ces objets se sont en effet formés à partir de l'accumulation de gaz vers le centre de grands nuages de matière noire. Les cosmologistes ont cartographié avec précision la distribution spatiale de ces grumeaux de matière au moyen des relevés de galaxies. Et ils ont relié l'émergence de ces structures aux minuscules variations de température du fond diffus cosmologique, la lueur résiduelle du Big Bang qui imprègne tout l'Univers et dont les caractéristiques ont été mesurées avec précision.

Par ailleurs, la matière noire se manifeste aussi par des effets dérivés de la relativité générale. La masse diffuse de la matière noire des galaxies et des amas galactiques contribue à courber l'espace et à dévier la lumière des objets lointains, un phénomène nommé lentille gravitationnelle que les astronomes observent partout dans le ciel.

Si la plupart des physiciens sont convaincus que la matière noire existe bel et bien,

l'hypothèse des machos est tombée en disgrâce il y a près d'une décennie, leur recherche expérimentale indirecte n'ayant rien donné. En particulier, les astronomes les ont recherchés par le biais des effets de microlentille, une variante des lentilles gravitationnelles où un trou noir, une naine brune ou même une simple planète passe devant une étoile lointaine et amplifie momentanément la lumière de cet astre distant.

De prime abord, les trous noirs sont de bons candidats à la matière noire

Plusieurs programmes d'observation par microlentilles portant sur des millions d'étoiles des grand et petit Nuages de Magellan, les principales galaxies satellites de la Voie lactée, n'ont trouvé aucune preuve que les machos constituaient une grande portion du halo galactique. Plus précisément, les physiciens ont exclu les machos de masses inférieures à environ 10 masses solaires comme constituants principaux de la matière noire. Et tandis que ces relevés étaient effectués, les scientifiques ont développé l'argumentaire en faveur d'une autre hypothèse, les *wimps* (*weakly interacting massive particles* ou «particules massives interagissant faiblement»).

LA CHUTE DES MACHOS, L'ASCENSION DES WIMPS

L'existence des wimps est motivée par les travaux en physique des particules. Ces particules sont prédites de façon naturelle dans des extensions du modèle standard de la physique des particules, mais elles restent au moins aussi insaisissables que les machos. À ce jour, aucune détection n'a été confirmée, en dépit de décennies de recherches au moyen d'accélérateurs de particules, de détecteurs souterrains et de télescopes spatiaux. Les résultats négatifs s'accumulant pour les wimps, des chercheurs ont commencé à reconsidérer l'hypothèse des machos, en se concentrant en particulier sur les trous noirs primordiaux.

Mais si ces objets peuplent en grand nombre l'Univers, il fallait expliquer comment ils ont pu échapper si longtemps à la détection.

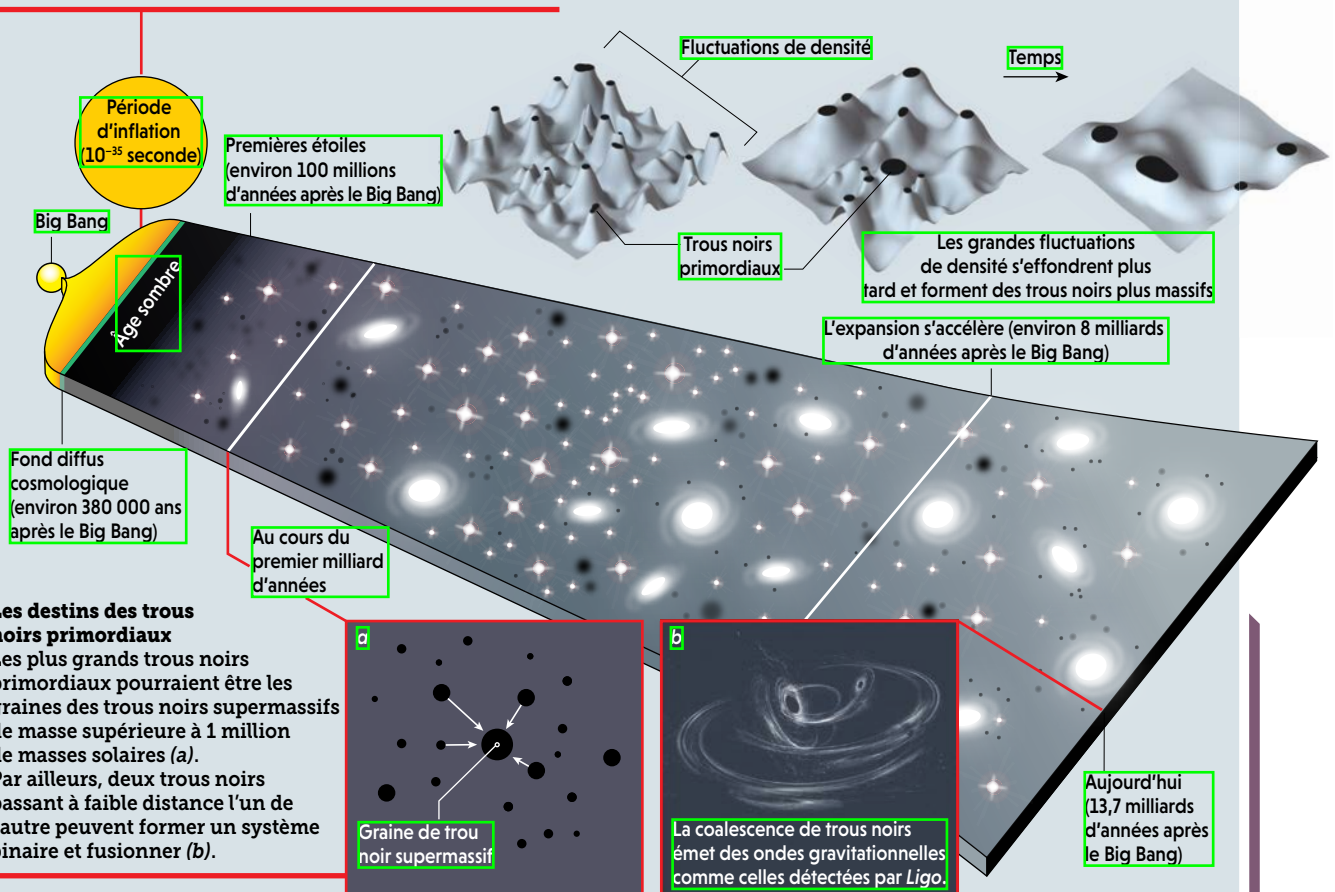
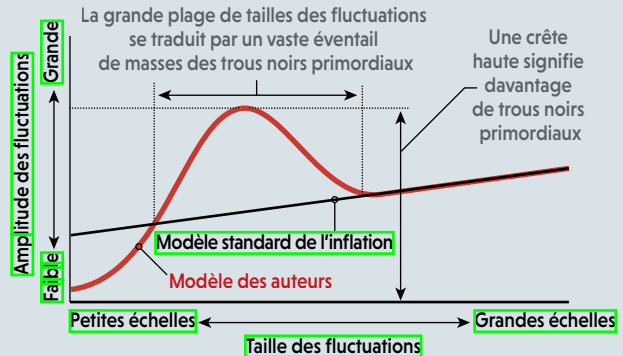
LES TROUS NOIRS NÉS DU BIG BANG

Les premiers trous noirs de l'Univers sont peut-être apparus aux premiers instants du temps cosmique, quand tout n'était encore qu'un épais plasma bouillonnant de particules élémentaires. Dans les années 1970, des physiciens théoriciens ont suggéré que des régions un peu plus denses de ce plasma pouvaient s'effondrer sous l'effet

de leur propre gravité moins d'une seconde après le Big Bang, formant les trous noirs dits primordiaux, qui allaient dès lors façonner la structure de l'Univers en expansion. Puisqu'ils n'émettent aucune lumière, les trous noirs primordiaux sont des candidats naturels (quoique difficiles à détecter) à la matière noire.

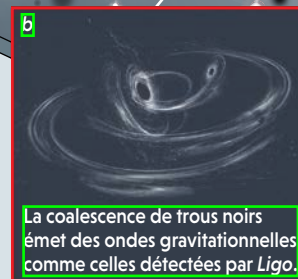
Les trous noirs primordiaux se forment regroupés dans des amas

L'inflation (la phase d'expansion accélérée de l'Univers moins d'une seconde après le Big Bang) aurait amplifié, jusqu'à des échelles immenses, les fluctuations quantiques qui apparaissent spontanément dans le cosmos. Ces fluctuations ont ensuite donné naissance à de vastes zones présentant une surdensité de matière. Ces régions se sont effondrées sous leur propre gravité pour donner naissance aux trous noirs primordiaux. Le modèle inflationnaire des auteurs prédit les caractéristiques des fluctuations amplifiées et des zones de surdensité (voir ci-contre). Ils montrent que les trous noirs primordiaux se forment regroupés en amas. Et la masse de chacun de ces trous noirs primordiaux serait comprise entre 0,01 et 10 000 masses solaires. Environ 500 000 ans après le Big Bang, un amas pouvait s'étendre sur des centaines d'années-lumière et contenir des millions de trous noirs primordiaux. En fusionnant, en s'éparpillant et en se nourrissant de gaz ordinaire et de poussière, les trous noirs primordiaux de ces amas ont orchestré la croissance des galaxies et des amas galactiques.



Les destins des trous noirs primordiaux

Les plus grands trous noirs primordiaux pourraient être les graines des trous noirs supermassifs de masse supérieure à 1 million de masses solaires (a). Par ailleurs, deux trous noirs passant à faible distance l'un de l'autre peuvent former un système binaire et fusionner (b).



COMMENT TESTER L'HYPOTHÈSE DES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX?



L'interféromètre laser géant, Virgo, en Italie, a détecté ses premières ondes gravitationnelles issues de la coalescence de trous noirs à l'été 2017. Il fonctionne de concert avec Ligo, aux États-Unis.

Différentes stratégies d'observation sont possibles.

1. Détection de nouvelles ondes gravitationnelles

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles tels que *Ligo* (*Laser interferometer gravitational-wave observatory*), aux États-Unis, et *Virgo*, en Italie, ont montré leur efficacité pour détecter des fusions de trous noirs. Le nombre étonnamment grand de fusions de trous noirs massifs détectées suggère que ces objets pourraient avoir une origine primordiale, mais cela n'est pas une preuve suffisante que les trous noirs primordiaux constituent la matière noire. Une telle preuve ne pourrait être obtenue qu'avec la corroboration d'autres observations.

La détection d'un trou noir de masse inférieure à la limite dite de Chandrasekhar (1,45 masse solaire), au-dessous de laquelle les étoiles ne peuvent pas produire de trou noir, serait la manifestation indéniable d'une origine primordiale. Et justement, *Ligo* pourrait très bientôt atteindre la sensibilité nécessaire pour détecter un tel trou noir si son compagnon est plus massif (plus de 10 masses solaires). Enfin, à l'échelle cosmologique, des systèmes binaires de trous noirs abondants devraient produire un fond diffus d'ondes gravitationnelles, qui pourrait être détecté par le futur observatoire spatial *Lisa* (*Laser interferometer space antenna*) et par d'autres expériences fondées sur l'observation des pulsars.

2. Découverte de nouvelles galaxies naines de luminosité ultrafaible

En 2015, des astronomes travaillant sur les données de la collaboration *DES* (*Dark energy survey*, «relevé de l'énergie

sombre») ont découvert des dizaines de galaxies naines de luminosité ultrafaible dans le halo galactique. Cette découverte suggère qu'il pourrait y avoir en orbite autour de la Voie lactée des centaines de ces galaxies naines dominées par la matière noire. Elles sont susceptibles d'être détectées en grand nombre par de futurs observatoires spatiaux, comme la mission *Euclid* de l'Agence spatiale européenne (ESA) et le télescope *WFIRST* (*Wide-field infrared survey telescope*, «télescope de relevé infra-

En se gavant de matière, les trous noirs primordiaux émettent des rayons X

rouge à grand champ») de la Nasa. Si la matière noire est constituée de trous noirs primordiaux, la plupart d'entre eux pourraient se trouver dans ces galaxies naines, voire dans des amas plus petits et plus denses.

3. Mesure des variations de position des étoiles

La mission en cours *Gaia*, de l'ESA, mesure la position et la vitesse d'environ un milliard d'étoiles de la Voie lactée avec une précision inégalée. Ces mesures pourraient révéler la présence de nombreux trous noirs massifs isolés par le biais de minuscules perturbations que ces objets exercent sur le mouvement des étoiles voisines. Par ailleurs, les populations d'étoiles binaires à grande

séparation (c'est-à-dire assez éloignées l'une de l'autre) devraient être moins nombreuses que prévu, car les trous noirs qui s'en approchent les détruiraient.

4. Cartographie de l'hydrogène neutre cosmique

Avant et pendant la formation des premières étoiles, l'Univers était essentiellement composé d'hydrogène neutre, qui émet un rayonnement caractéristique, à une longueur d'onde radio de 21 centimètres. Dès 2020, le radiotélescope *SKA* (*Square kilometre array*) – qui devrait être le plus grand jamais construit – commencera à réaliser une carte du ciel entier à cette longueur d'onde. L'accrétion de matière par les trous noirs primordiaux produit un rayonnement X intense, ionisant l'hydrogène neutre environnant et imprimant des signatures sur cette carte du ciel à 21 centimètres. Le *SKA* devrait ainsi détecter la présence de trous noirs primordiaux massifs.

5. Exploration des distorsions du fond diffus cosmologique

Les rayons X issus des trous noirs primordiaux qui se gavent de gaz et de poussière dans l'Univers primordial devraient également induire des distorsions dans le spectre du fond diffus cosmologique. L'importance de cet effet est encore controversée, en particulier dans les modèles où les trous noirs primordiaux sont regroupés en amas denses. Leurs signatures sur le fond diffus cosmologique pourraient néanmoins être détectées par de futurs instruments et ainsi contraindre fortement les modèles de matière noire correspondant à des trous noirs primordiaux.

➤ Dès les années 1970, les physiciens Stephen Hawking, Bernard Carr et George Chapline ont suggéré que des trous noirs étaient apparus dans les premiers instants de l'Univers. Ils ont surtout considéré le cas de trous noirs de masse inférieure à celle d'une montagne. Ces trous noirs, parce qu'ils étaient petits, auraient subi un important phénomène d'évaporation par un processus quantique nommé rayonnement de Hawking (car Stephen Hawking en a prédit l'existence). Près de 13,8 milliards d'années plus tard (l'âge de l'Univers), ils auraient complètement disparu, ne laissant derrière eux que du rayonnement. Ils ne peuvent donc constituer actuellement la matière noire. Stephen Hawking et ses collègues ont aussi envisagé la possibilité de trous noirs primordiaux massifs, dont l'évaporation peut être négligée. Ils seraient donc encore présents dans l'Univers et pourraient constituer la matière manquante du cosmos.

L'idée que les trous noirs primordiaux massifs contribuent à la matière noire, voire représentent sa composante majeure, a été davantage développée dans les années 1990. Ce scénario s'appuyait sur les théories de l'inflation cosmique, idée proposée par le physicien américain Alan Guth au début des années 1980. L'inflation est une phase d'expansion prodigieuse qui aurait immédiatement suivi le Big Bang. Selon cette idée, en 10^{-35} seconde, tous points distants de moins d'un rayon atomique se sont retrouvés éloignés de quatre années-lumière, une distance comparable à celle qui sépare le Soleil de ses voisins stellaires les plus proches.

De la même façon, des fluctuations quantiques infimes, qui apparaissaient spontanément dans l'espace, ont été amplifiées à des échelles macroscopiques par la rapide expansion. Elles ont ensemencé l'Univers de régions présentant des surdensités de matière et d'énergie, à partir desquelles toutes les structures cosmiques ultérieures émergeront. Aussi surprenante que puisse paraître l'idée de l'inflation, les astrophysiciens observent ces fluctuations amplifiées dans le fond diffus cosmologique.

DES TROUS NOIRS NÉS DE L'INFLATION

En 1996, l'un de nous (Juan García-Bellido), avec Andrei Linde, de l'université Stanford, et David Wands, de l'université de Portsmouth, au Royaume-Uni, a découvert un processus par lequel l'inflation amplifiait les fluctuations quantiques de façon à produire naturellement des régions très denses qui s'effondrent en formant une grande population de trous noirs moins d'une seconde après le Big Bang (voir l'encadré page 29). De tels trous noirs se comporteraient alors comme de la matière noire et domineraient le contenu en matière de l'Univers actuel. Ce modèle prévoit

une population de trous noirs dont la masse est déterminée par la quantité d'énergie présente au sein de la région qui s'effondre. De nombreux autres groupes de cosmologistes ont alors commencé à explorer ces idées avec différents modèles d'inflation.

Une grande population de trous noirs s'est formée moins d'une seconde après l'inflation

En 2015, nous avons proposé un scénario, dans la continuité de celui de 1996, où les régions de surdensité s'effondrent à proximité les unes des autres, ce qui engendre des amas de trous noirs de masse variant dans une gamme allant de 0,01 à 10 000 masses solaires. En moins de 500 000 ans après le Big Bang, chaque amas aurait alors contenu des millions de trous noirs primordiaux dans un volume de quelques centaines d'années-lumière de diamètre seulement.

Grâce à ces amas, il est possible d'expliquer les détections de *Ligo* qui laissent penser que la rencontre et la fusion de deux trous noirs massifs ne sont pas si rares. Dans un tel amas, la densité de trous noirs est assez élevée pour que, de temps en temps, les trajectoires de deux trous noirs primordiaux se croisent et que ces objets deviennent gravitationnellement liés. Ils se mettent alors à décrire une spirale en se rapprochant l'un de l'autre sur une durée allant jusqu'à quelques millions d'années, qui s'achève avec leur coalescence.

En janvier 2015, dans le cadre de notre modèle, nous avons suggéré que *Ligo* pourrait détecter les ondes gravitationnelles produites par ces fusions de trous noirs primordiaux. Or, plus tard cette même année, *Ligo* a effectivement détecté une fusion de trous noirs dans la bonne gamme de masses. En mars 2016, en même temps que des chercheurs de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, nous avons estimé le taux d'événements de fusion au sein des amas de trous noirs primordiaux. Si ces trous noirs forment la matière noire (ou une fraction importante de celle-ci), ces taux coïncident avec les limites expérimentales calculées à partir des données de *Ligo*.



> Depuis 2016, *Ligo* ainsi que l'interféromètre *Virgo*, opérationnel depuis l'été 2017 dans sa version améliorée, ont détecté quatre nouveaux signaux d'ondes gravitationnelles, émises lors de la fusion de deux trous noirs massifs (voir la figure page ci-contre). Les masses des astres renforcent l'idée d'une origine primordiale. Par ailleurs, dans un cas, les axes de rotation des trous noirs progéniteurs suggèrent que le système binaire se soit formé par capture plutôt que par l'évolution d'un système de deux étoiles préexistantes nées dans un même nuage de gaz. Or le scénario de la capture est privilégié par le cas des trous noirs primordiaux. Ces détections suggèrent que les trous noirs binaires seraient aussi beaucoup plus fréquents qu'on ne s'y attendait, conformément à notre scénario des trous noirs primordiaux massifs.

Pour l'instant, les données sont encore peu nombreuses. Si *Ligo* et *Virgo* ont effectivement détecté la fusion de certains membres d'une population cachée de trous noirs primordiaux massifs, nous devrions nous attendre à en détecter beaucoup d'autres dans les années à venir. Il sera possible d'établir une analyse statistique des masses et des autres caractéristiques (tels l'axe et la vitesse de rotation) des trous noirs progéniteurs de coalescences. Des données cruciales pour tester leur possible origine primordiale.

Un atout de notre modèle est qu'il échappe aux contraintes sur les machos établies par les relevés observationnels de microlentilles. Ces contraintes excluaient que les trous noirs de moins de 10 masses solaires constituent le principal ingrédient de la matière noire. Or, dans notre scénario, les trous noirs primordiaux couvrent une large gamme de masses et seule une petite fraction d'entre eux seraient visibles dans ces observations de microlentilles, l'essentiel restant invisible. En outre, si les trous noirs primordiaux sont effectivement regroupés en amas, la probabilité qu'un amas se trouve le long de la ligne de visée des relevés d'observations de microlentilles tombe à moins de 1/1000.

Pour détecter ces amas, il faudrait étendre la recherche des événements de microlentilles à d'autres régions du ciel, en traquant par exemple la lumière amplifiée des étoiles de la galaxie d'Andromède, voisine de la Voie lactée, ou même de quasars dans de lointaines galaxies. Les astronomes sonderaient ainsi un volume beaucoup plus important du halo galactique à la recherche des trous noirs primordiaux qui s'y cachent. Des observations récentes suggèrent que les machos de masse comprise entre un dixième de masse solaire et quelques masses solaires pourraient tout de même représenter environ 20% de la masse d'un halo de galaxie typique. Cette valeur concorde avec la gamme de masses de trous noirs primordiaux de notre scénario.

Pour résumer, la possibilité que la matière noire soit principalement constituée de trous noirs primordiaux n'est pas exclue. Par ailleurs, ce type de scénario pourrait résoudre plusieurs autres énigmes cosmiques liées à la matière noire et à la formation des galaxies.

UNE SOLUTION À PLUSIEURS PROBLÈMES

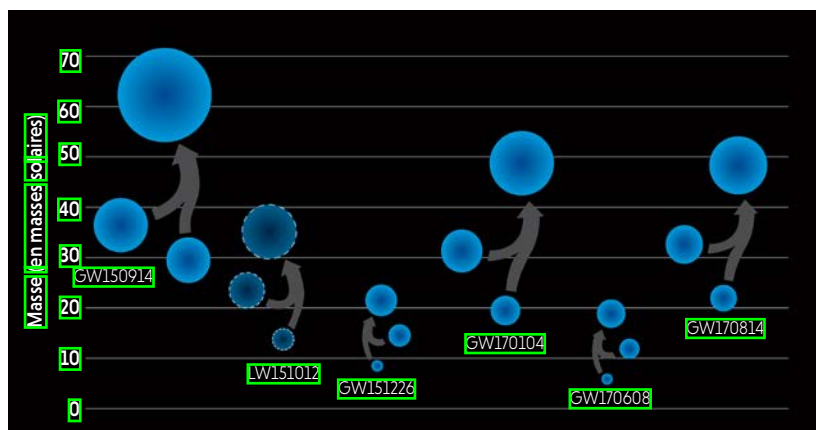
Les amas de trous noirs primordiaux pourraient régler le problème dit des galaxies naines, à savoir le manque apparent de petites galaxies satellites qui devraient théoriquement se former autour des galaxies massives telles que la Voie lactée. Des modélisations récentes de la distribution cosmique de matière noire reproduisent avec précision la structure à grande échelle de l'Univers observé : les amas de galaxies se forment dans d'immenses filaments de matière noire entourant de grandes régions vides de matière. Mais à plus petite échelle, ces simulations prédisent l'existence de nombreux minihalos de matière noire en

Les signaux détectés par *Ligo* et *Virgo* suggèrent qu'il s'agissait de trous noirs primordiaux

orbite autour des galaxies massives. Chacun de ces minihalos devrait abriter une galaxie naine, et il devrait y en avoir des centaines entourant la Voie lactée.

Or les astronomes ont trouvé beaucoup moins de galaxies naines que prévu. Plusieurs explications au problème des galaxies naines sont possibles : par exemple, elles seraient bien présentes, mais difficiles à détecter car trop peu lumineuses ; ou les simulations surestiment le nombre de ces galaxies naines, car elles ne reproduiraient pas correctement l'influence de la matière ordinaire sur la formation des galaxies naines.

Si les trous noirs primordiaux en amas constituaient l'essentiel de la matière noire, ils seraient très nombreux dans les minihalos entourant la Voie lactée. Ils engloutiraient alors une fraction de la matière ordinaire et réduiraient ainsi la formation d'étoiles dans



Les interféromètres laser géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté cinq coalescences de trous noirs (et peut-être une sixième, en pointillés). La masse des trous noirs progéniteurs est de l'ordre de la dizaine de fois celle du Soleil, ce qui suggère que ces corps ont une origine primordiale plutôt que stellaire.

les minihalos. De plus, même si ces minihalos formaient beaucoup d'étoiles, ces astres pourraient facilement être éjectés par des rencontres rapprochées avec des trous noirs primordiaux massifs. Ces deux effets réduiraient fortement la brillance des galaxies satellites et les rendraient très difficiles à détecter sans l'aide de caméras à grand champ d'une extrême sensibilité.

Heureusement, de telles caméras existent aujourd'hui, et les astronomes ont ainsi découvert des dizaines de galaxies naines extrêmement peu lumineuses autour de la Voie lactée. Ces objets semblent héberger jusqu'à des centaines de fois plus de matière noire que d'étoiles lumineuses, et notre modèle prédit qu'il devrait y en avoir des milliers supplémentaires en orbite autour de la Voie lactée.

Les simulations de formation des galaxies prédisent également une population de galaxies de taille intermédiaire, entre les galaxies naines et les galaxies massives. De tels objets seraient assez gros pour former facilement des étoiles et seraient aisément visibles. Pourtant, ils n'ont pas été trouvés par les astronomes qui fouillent les environs de la Voie lactée. Ce problème a une solution semblable à celui des galaxies naines manquantes : les trous noirs primordiaux massifs présents au cœur des galaxies de taille intermédiaire bloqueraient la formation des étoiles en raison de l'accrétion du gaz et éjecteraient les astres formés. Ces galaxies intermédiaires seraient donc invisibles pour la plupart des relevés.

Les trous noirs primordiaux résoudraient également la question de l'origine des trous noirs supermassifs. Ces monstres pèsent des millions, voire des milliards, de masses solaires. On les trouve au centre des quasars et des galaxies massives très tôt dans l'histoire de l'Univers, moins d'un milliard d'années après le Big Bang. Pourtant, si ces trous noirs supermassifs se sont formés et ont grossi à partir de trous noirs nés de l'explosion des premières étoiles de l'Univers et à la suite de leurs fusions

successives, ils n'ont pas pu acquérir une masse aussi gigantesque en un temps si court.

Dans notre scénario, même si la plupart des trous noirs primordiaux ne dépassent pas quelques dizaines de masses solaires, il en reste une petite fraction qui sont beaucoup plus lourds, entre quelques centaines et quelques dizaines de milliers de masses solaires. Nés moins d'une seconde après le Big Bang, ces objets monstrueux agiraient comme des graines pour la formation des premières galaxies et quasars, et l'accrétion de matière ainsi que l'absorption de trous noirs moins massifs permettrait d'atteindre rapidement les caractéristiques des trous noirs supermassifs.

Ces trous noirs primordiaux pourraient aussi rendre compte de l'existence de trous noirs de taille intermédiaire (entre 1000 et 1 million de masses solaires) dont on soupçonne l'existence au centre des galaxies naines et des amas globulaires d'étoiles. Ainsi, les trous noirs primordiaux pourraient être le chaînon manquant entre les trous noirs classiques de masse stellaire et les trous noirs supermassifs.

Les preuves observationnelles de ce scénario s'accumulent : des détections récentes de sources de rayons X étonnamment abondantes dans l'Univers primordial s'expliqueraient par de grandes quantités de trous noirs primordiaux produisant des rayons X tandis qu'ils se gavent de gaz, moins d'un milliard d'années après le Big Bang.

Ainsi, les trous noirs primordiaux massifs constituent des candidats prometteurs pour la matière noire et apportent des réponses à de nombreux autres problèmes qui tracassent les cosmologistes depuis longtemps. Mais il est trop tôt pour conclure. D'autres hypothèses sont encore possibles, et de nouvelles observations fort attendues pourraient en éliminer certaines. Dans les années à venir, plusieurs observations pourraient mettre à l'épreuve le scénario des trous noirs primordiaux (voir l'encadré page 30). Elles incluent la détection des galaxies naines d'ultrafaible luminosité, l'influence des trous noirs primordiaux massifs sur la position des étoiles dans la Voie lactée, la cartographie de l'hydrogène neutre au cours de la première époque de formation stellaire et l'étude des distorsions du fond diffus cosmologique.

Outre ces expériences, nous disposons désormais avec les interféromètres laser géants (*Virgo*, *Ligo*, mais aussi ceux en construction, *Kagra*, au Japon, *Ligo India*, en Inde, et le projet européen *Einstein Telescope*) d'un nouvel outil pour démêler les énigmes cosmiques. L'ensemble de toutes ces observations pourrait confirmer l'existence de trous noirs primordiaux et leur possible lien avec la matière manquante de l'Univers. D'ici à quelques années, nous leverons peut-être le voile sur le mystère de la matière noire. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Clesse et J. García-Bellido, **The clustering of massive primordial black holes as dark matter : measuring their mass distribution with Advanced LIGO**, *Physics of the Dark Universe*, vol. 15, pp. 142-147, 2017.

N. Deruelle et J.-P. Lasota, **L'astronomie gravitationnelle est née**, *Pour la Science*, n° 481, novembre 2017.

S. Clesse et J. García-Bellido, **Massive primordial black holes from hybrid inflation as dark matter and the seeds of galaxies**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 023524, 2015.

BENOÎT FAMAHEY

est chargé de recherche au CNRS et travaille à l'observatoire astronomique de Strasbourg, où il est responsable de l'équipe Galhecos. Ses recherches portent sur la détermination du potentiel gravitationnel des galaxies et sur le problème de la masse manquante.



La matière noire pourrait être très différente de ce que l'on pensait

Peut-on se passer de l'hypothèse de la matière noire ? Sinon, de quoi celle-ci est faite ? Les récentes observations malmènent les principales pistes suivies pour résoudre cette grande énigme de l'astrophysique. Avec Benoît Famaey, tour d'horizon du problème et des issues possibles.

Pour commencer, pouvez-vous nous rappeler comment le problème de la matière noire est apparu ?

On attribue la découverte des premiers indices à Fritz Zwicky, un astronome suisse émigré aux États-Unis. Au début des années 1930, en étudiant la dynamique des galaxies dans l'amas de Coma, il a constaté que la contribution gravitationnelle de la matière visible était très insuffisante pour expliquer les mouvements de ces galaxies. Il a alors parlé du problème de la masse manquante. Mais à l'époque, les astrophysiciens n'ont pas pris cette idée très au sérieux... pour de bonnes raisons.

Lesquelles ?

D'une part, les données sur la distribution de vitesse des galaxies étaient très lacunaires. D'autre part, on connaissait mal le contenu en matière des amas. La matière ordinaire composée d'atomes, ou « matière baryonique », n'est pas toujours visible et peut échapper au recensement. On pense aujourd'hui que près de 80% de la matière baryonique d'un amas galactique est sous la forme d'un gaz chaud, qui n'émet que des rayons X. À l'époque de Zwicky, les instruments d'observation n'étaient pas sensibles à ce rayonnement. De l'avis général des astrophysiciens, l'idée de Zwicky était prématurée. Cependant, même si on prend en compte le gaz chaud, il faudrait cinq fois plus de matière pour expliquer la dynamique des galaxies au sein des amas. Zwicky avait donc eu une bonne intuition, même si la confirmation n'est venue que bien plus tard.

Jusqu'à quand le problème de la masse manquante est-il resté ignoré ?

La question est revenue sur le tapis à la fin des années 1970 avec l'avènement de la radioastronomie. Les chercheurs ont commencé à mesurer la vitesse de rotation du gaz dans les galaxies spirales. Les travaux d'Albert Bosma, aux Pays-Bas, et de Vera Rubin, aux États-Unis, ont été pionniers. Ils ont clairement montré que le gaz a une vitesse trop élevée dans les parties externes des galaxies compte tenu de la distribution de masse de matière baryonique de la galaxie : la force gravitationnelle exercée par la matière ordinaire est insuffisante pour retenir au sein de la galaxie un gaz qui se déplace aussi vite. Le gaz devrait s'échapper, alors que ce n'est pas le cas.

L'explication pouvait-elle encore invoquer de la matière baryonique cachée ?

Tout à fait. À cette époque, on n'avait pas la preuve formelle que la masse manquante n'est pas de la matière baryonique. Même aujourd'hui, si l'on sait détecter les gaz chauds, l'hydrogène moléculaire (H_2) reste très difficile à observer et pourrait contribuer en partie à la masse manquante. Mais nous avons des arguments pour

conclure que l'hydrogène moléculaire ne constitue pas une grande part de la masse manquante et qu'il faut chercher ailleurs.

Quels sont ces arguments ?

Ils viennent de l'étude des galaxies naines en orbite autour de la Voie lactée. Ces petites galaxies satellites sont soumises aux forces de marée de la Voie lactée. Elles sont progressivement détruites par ces effets gravitationnels et laissent derrière elles une traînée de matière, qu'on nomme un courant de marée. En analysant la forme de ces courants de marées, les astrophysiciens ont montré que la forme du champ gravitationnel de la Galaxie, plus précisément le potentiel gravitationnel, qui est directement relié à la distribution de toute la matière qu'elle contient (visible et invisible), est plutôt sphérique. Or la matière visible de la Voie lactée est répartie dans un disque. L'hydrogène moléculaire a sans doute une distribution aplatie elle aussi, et ce gaz ne peut donc pas conférer au potentiel gravitationnel de la Galaxie sa sphéricité.

Peut-on imaginer d'autres candidats de matière ordinaire pour expliquer la masse manquante ?

Dans les années 1980, les astrophysiciens ont aussi envisagé que la masse manquante corresponde à une importante population de petites étoiles froides et peu lumineuses, des naines brunes, mais aussi des planètes flottantes ou des trous noirs, dont la distribution ne suivrait pas nécessairement celle de la matière visible. Cependant, divers programmes d'observation, tel *Eros* mené par le CEA et le CNRS, ont permis d'écarter cette hypothèse. L'idée d'*Eros* était d'observer les nuages de Magellan et de recenser les effets de microlentille gravitationnelle : lorsqu'une naine brune (de la Voie lactée) passe devant une étoile lointaine (des nuages de Magellan), elle en amplifie la luminosité, comme le prévoit la théorie de la relativité générale. On a observé trop peu de tels effets pour soutenir que les petits objets sombres puissent constituer la masse manquante galactique.

Il restait encore une fenêtre ouverte, pour des trous noirs d'environ 30 masses solaires. La détection, par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*, de coalescences de paires de trous noirs dans cette gamme de masse (voir l'article de J. García-Bellido et S. Clesse, pages 26 à 33) a relancé récemment cette piste. L'un des grands tests sera le recensement des systèmes binaires à grande séparation, où les deux étoiles liées gravitationnellement sont encore loin l'une de l'autre. Si les trous noirs sont assez nombreux pour constituer la masse manquante, ils devraient fréquemment passer à proximité de ces systèmes binaires et les déstabiliser. Les données de *Gaia*, satellite spécialisé dans l'observation des étoiles, nous indiqueront bientôt si c'est le cas.

Finalement, comment les astrophysiciens en sont venus à écarter la piste baryonique ?

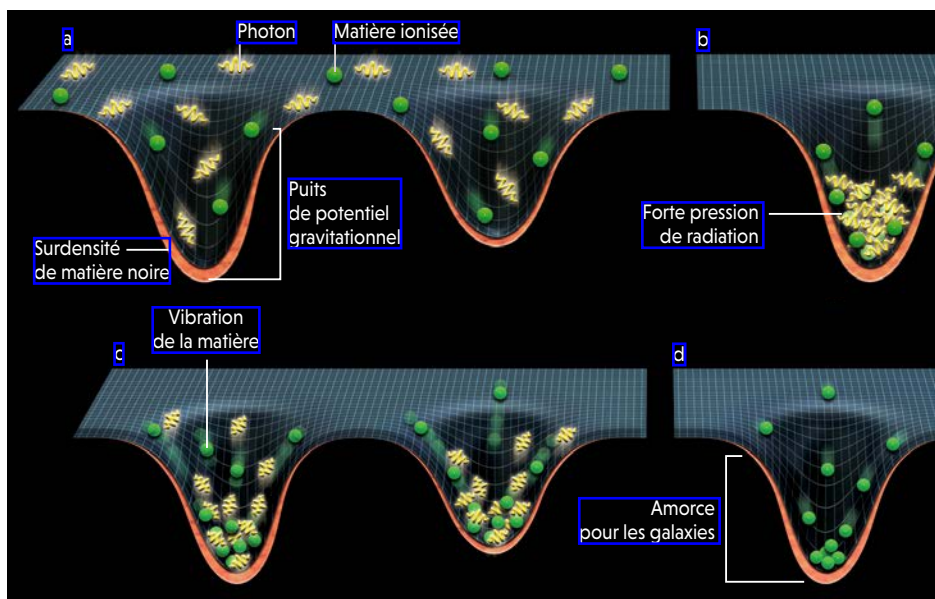
Les observations cosmologiques de ces dernières décennies ont montré que la masse manquante devait prendre la forme d'une matière noire non baryonique. Pour comprendre pourquoi, il faut rappeler l'état de l'Univers quand il était âgé d'environ 380 000 ans. Il était rempli d'un plasma très chaud de noyaux atomiques et d'électrons. Les photons, les particules de lumière, étaient piégés, car ils interagissaient en permanence avec les particules chargées du plasma. Vers 380 000 ans, la température, qui diminuait avec l'expansion de l'Univers, est devenue assez basse pour que les noyaux et les électrons se combinent en atomes neutres. Les photons ont alors pu se propager et constituer un rayonnement encore détectable aujourd'hui, le fond diffus cosmologique.

Ce fond diffus porte beaucoup d'information sur l'Univers primordial. Bien que la température associée à ce rayonnement soit globalement homogène sur l'ensemble du ciel, les satellites WMAP et Planck ont détecté de petites fluctuations thermiques, d'amplitude relative atteignant 10^{-5} . Ces fluctuations de température correspondent à des zones plus ou moins denses dans le plasma primordial. Les zones de surdensité ont attiré de plus en plus de matière au cours du temps et ont donné naissance aux grandes structures, les amas et les galaxies.

Cependant, vu la faiblesse des fluctuations initiales, et si l'on ne prend en compte que la matière baryonique, l'effet d'accumulation n'a pas été assez fort et rapide pour produire les grandes structures observées aujourd'hui. Il faut donc ajouter au plasma primordial un autre ingrédient, une composante qui n'interagit pas avec la matière ordinaire autrement que par ses effets gravitationnels, mais qui contribue à augmenter l'efficacité de formation des grandes structures : la matière noire non baryonique.

Y a-t-il d'autres arguments cosmologiques ?

Un deuxième argument est également lié au fond diffus. Le plasma primordial est le siège d'une compétition entre la matière baryonique, qui tend à s'accumuler dans les zones de surdensité, et les photons, qui s'opposent à ce mouvement par leur pression de radiation (voir la figure ci-dessus). Il s'ensuit des mouvements d'oscillation dans le plasma qui influent sur la taille et les propriétés des fluctuations de température. Une courbe, dite du spectre de puissance, met en évidence de nombreuses caractéristiques du fond diffus. Cette courbe contient notamment de nombreux pics. Or, en ne considérant que de la matière baryonique, il n'est pas possible de reproduire correctement l'amplitude de ces pics. Il faut supposer



qu'une composante supplémentaire dans le plasma primordial aide à engendrer les oscillations par une contribution gravitationnelle, sans interagir avec les baryons. Encore une fois, cela ne peut être que de la matière noire non baryonique.

Avec d'autres observations, celles du fond diffus cosmologique décrivent un scénario de l'histoire de l'Univers cohérent et convaincant, d'après lequel le cosmos se compose alors de 4,9% de matière baryonique, 26,6% de matière noire et 68,6% d'énergie sombre (responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers).

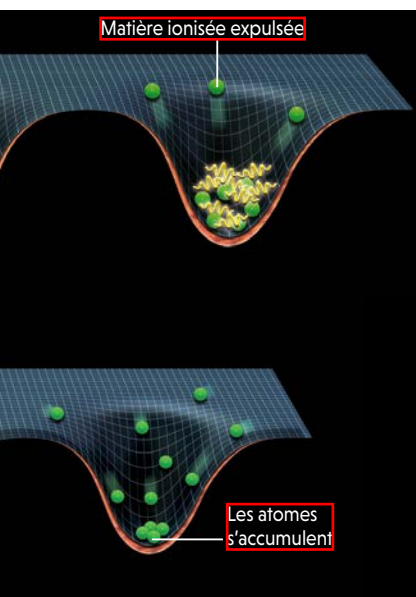
En quoi consiste cette matière noire non baryonique ?

Les travaux en physique des particules ont suggéré de nombreuses possibilités. Depuis son élaboration dans les années 1960, le modèle standard de la physique des particules a été expérimentalement très bien confirmé. Mais divers indices suggèrent qu'il n'est qu'une approximation à basse énergie d'un modèle plus fondamental. Et les modèles d'extension du modèle standard s'accompagnent souvent de candidats à la matière noire. Dans le cadre de la supersymétrie, une piste d'extension particulièrement en vogue, il existerait des particules électriquement neutres n'interagissant que rarement avec la matière ordinaire : les « wimps » (acronyme de *weakly interacting massive particles*). L'argument le plus attrayant en faveur de ces candidats est qu'ils seraient produits dans l'Univers primordial dans des proportions qui correspondent à ce qu'on attend pour la matière noire. C'est le « miracle des wimps » !

A-t-on détecté de tels wimps ?

En théorie, il était possible de les produire dans les accélérateurs de particules tels que le LHC, de les détecter directement dans des

A l'âge d'environ 380 000 ans, l'Univers contenait un plasma de matière ordinaire et de la matière noire qui formaient des zones de surdensité (a). La compétition entre la pression de radiation des photons (b) et l'accumulation de la matière ordinaire dans les zones de surdensité (c) engendrait des vibrations dans le plasma. Après recombinaison des ions et des électrons, les photons se sont échappés, créant le fond diffus cosmologique, tandis que les atomes se sont accumulés et ont pu à peu près former les grandes structures (d).



expériences dédiées ou d'en voir une signature indirecte dans l'étude des rayons cosmiques. Mais aucun de ces programmes n'a été couronné de succès.

Ces résultats négatifs permettent d'éliminer les wimps ayant certaines caractéristiques de masse et de probabilité d'interaction avec la matière ordinaire. Les contraintes les plus sévères proviennent des expériences de détection directe. Il s'agit par exemple de grandes cuves remplies de xénon liquide, où les physiciens cherchent à repérer la trace d'une (rare) collision entre une particule de matière noire et un atome de xénon. Si ces physiciens ne voient rien, ils peuvent alors conclure que la probabilité d'interaction des wimps avec la matière ordinaire est inférieure à une certaine limite.

Ces expériences sont aujourd'hui si sensibles que les limites trouvées nous éloignent de plus en plus des paramètres qui correspondent au miracle des wimps. À tel point que l'enthousiasme des physiciens pour cette hypothèse est en train de diminuer, s'il n'est pas déjà sérieusement entamé. Bien sûr, il y a

Ces difficultés sont liées à la distribution supposée de la matière noire dans une galaxie spirale. Les simulations numériques de formation des galaxies et de leur halo de matière noire montrent que ce dernier présente une densité sphérique et inversement proportionnelle à la distance r au centre de la galaxie, c'est-à-dire un profil de densité en $1/r$. En toute rigueur, la densité ne devient pas infinie au centre: elle est remplacée par un petit cœur de densité constante. En supposant ce halo de matière noire doté d'un petit cœur et d'un profil en $1/r$, on obtient le bon profil de vitesse du gaz dans certaines galaxies.

Mais cette distribution de matière noire ne fonctionne pas pour un grand nombre de galaxies, notamment celles dites à faible brillance de surface. Ces galaxies sont très diffuses et le gaz y prédomine (voir la photo page 39); très peu d'étoiles s'y forment. Pour reproduire la dynamique de ces galaxies, il faut modifier la distribution de matière noire et supposer que le cœur est très étendu, sur plusieurs kiloparsecs (un kiloparsec correspond à environ 3200 années-lumière). Or ce n'est pas ce que prévoient les simulations de formation galactique.

L'enthousiasme des physiciens pour l'hypothèse des wimps est en train de diminuer

encore des expériences en cours, car il faut être sûr d'avoir éliminé toutes les possibilités. Et même si l'on ne trouve rien, ces expériences auront permis de tester l'hypothèse des wimps.

On ne peut pas non plus écarter l'hypothèse de particules de matière noire dont la probabilité d'interaction avec la matière ordinaire serait quasi nulle. Mais cette hypothèse est un peu désespérante...

Et qu'en est-il du scénario des wimps pour expliquer la dynamique des galaxies?

Comme on l'a vu, l'étude des galaxies a donné le premier indice sérieux de l'existence de la matière noire, dès la fin des années 1970. Il est ironique que ce soient les galaxies qui, actuellement, posent le plus de problèmes à l'hypothèse de la matière noire.

Est-ce le seul problème?

Non, il en existe un autre, plus subtil mais peut-être plus intéressant, avec ces galaxies à faible brillance de surface. C'est d'ailleurs, selon moi, le plus gros souci actuel avec la matière noire. On a remarqué, depuis une quinzaine d'années, une corrélation entre la taille du cœur de densité constante de matière noire nécessaire pour obtenir la bonne dynamique de rotation du gaz et la taille du disque de matière baryonique. En d'autres termes, plus la galaxie est diffuse et étendue, plus son cœur de densité constante de matière noire est lui-même étendu. Il semble donc y avoir une relation directe entre la distribution de la matière ordinaire et celle de la matière noire. Or une corrélation aussi forte est difficile à expliquer si la matière noire et la matière baryonique n'interagissent que par la gravitation ou d'autres forces très faibles.

Comment alors expliquer cette corrélation?

On peut envisager une rétroaction gravitationnelle de la matière baryonique sur la distribution de matière noire. Par exemple, lorsqu'une étoile massive explose en supernova, elle déplace de grandes quantités de matière. Cela modifie le potentiel gravitationnel localement. La matière noire va alors suivre ce nouveau potentiel. On peut montrer qu'avec une rétroaction efficace, la partie centrale d'une distribution en $1/r$ peut se lisser et donner un cœur de densité constante.

C'est pourquoi la plupart des astrophysiciens ne voient pas dans la corrélation des

▢ distributions de matière un danger mortel pour l'hypothèse de la matière noire. Mais dans les galaxies à faible brillance de surface, il y a très peu d'étoiles pour obtenir une rétroaction efficace. Et c'est dans ces galaxies que les cœurs sont les plus étendus.

Le vrai problème est la force de cette corrélation, comme si les processus de rétroaction devaient « connaître » avec précision l'étendue de la galaxie pour ajuster leur intensité. Et ça, on ne sait pas l'expliquer.

Le bilan des wimps est donc mitigé. Ils sont parfaits pour la cosmologie, mais posent de nombreux problèmes à l'échelle galactique...

Tout à fait. Et c'est pour cette raison qu'à l'échelle des galaxies, certains chercheurs, dont moi-même, continuent d'explorer une piste totalement différente, qui consiste à modifier les lois de la gravitation. En 1983, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a suggéré de modifier la dynamique newtonienne – on parle de théorie Mond, pour *Modified newtonian dynamics* – pour les plus petites accélérations, bien en dessous de ce qu'on peut mesurer en laboratoire. On a alors deux régimes, le régime normal puis, lorsque l'accélération passe sous un certain seuil (estimé à environ 10^{-10} mètre par seconde au carré), la relation qui relie l'accélération à la force gravitationnelle est modifiée. Ce régime mondien se manifeste sur les parties externes des galaxies comme la nôtre, mais dès le centre des galaxies à faible brillance de surface.

Par cette approche, on reproduit très bien le profil de vitesse au sein des galaxies. Et il n'y a plus de problème de corrélation entre la distribution de la matière ordinaire et le cœur de matière noire, puisqu'il n'y a plus de matière noire.

Comment se comportent ces modèles à plus grande échelle ?

Si on applique la théorie Mond dans les amas de galaxies, le résultat n'est pas aussi satisfaisant. On trouve qu'il manque encore de la masse baryonique pour coller aux observations. Pour rappel, avec une dynamique newtonienne classique, le facteur de masse manquante est d'environ 5, la matière noire représentant cette masse manquante. Dans le cadre de Mond, il reste un facteur 2 environ. Il y a donc une partie de la matière des amas qui nous échappe. En outre, ce facteur 2 se manifeste principalement dans la partie centrale de l'amas. Mordehai Milgrom a proposé qu'il pourrait s'agir de nuages très froids d'hydrogène moléculaire, qui sont très difficiles à détecter.

Mais cette grande quantité d'hydrogène n'entre-t-elle pas en conflit avec les contraintes cosmologiques sur les baryons ?

Eh bien non. En réalité, sur la quantité de matière ordinaire prévue par le modèle

cosmologique (notamment la nucléosynthèse primordiale), il reste 30% de baryons que nous n'avons pas détectés. Dans le scénario standard, on suppose qu'ils se cachent dans le milieu intergalactique. Il y aurait donc largement assez de matière pour compenser la dynamique des amas dans le cadre de la théorie Mond.

L'hypothèse de Mordehai Milgrom reste malgré tout assez alambiquée. Mais il existe d'autres possibilités, comme des neutrinos plus massifs que ceux du modèle standard. Ce scénario ne reproduit pas correctement le spectre du fond diffus cosmologique, même en prenant des versions relativistes de Mond telles que le modèle TeVeS proposé en 2004 par Jacob Bekenstein, alors à l'université hébraïque de Jérusalem.

Avec Gary Angus, j'ai aussi examiné des scénarios à neutrinos dits stériles, c'est-à-dire qui n'interagissent par aucune des forces fondamentales, ayant une masse de 10 à 100 électronvolts. Nous obtenons la bonne dynamique dans les amas de galaxies mais, quand nous avons regardé des simulations de formation des structures dans ce scénario, nous avons remarqué qu'il se formait trop d'amas très massifs. Dans la théorie Mond, l'efficacité de la formation des amas est déjà

Les observations tendent aussi à exclure le scénario de la gravitation modifiée

grande; en ajoutant les neutrinos stériles, on augmente encore cette efficacité.

L'observation récente de la coalescence de deux étoiles à neutrons a aussi porté un coup dur à l'approche de gravitation modifiée...

Effectivement. Lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons, il y a émission d'ondes gravitationnelles et d'ondes électromagnétiques. En août 2017, les interféromètres géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté les ondes gravitationnelles d'un tel événement et le satellite *Fermi* a observé un rayonnement gamma juste 1,7 seconde plus tard, provenant de la même source. Dans le cadre de la relativité générale, les deux types d'ondes se propagent à la même vitesse. On peut donc supposer que la lumière a été émise un peu après.



La galaxie naine IC 2574 est dite à faible brillance de surface. Elle contient beaucoup de gaz et très peu d'étoiles. Pour décrire correctement la dynamique de telles galaxies, il faut supposer qu'elles ont un cœur de densité de matière noire très étendu, ce qui est en désaccord avec les simulations de formation de galaxies.

Mais il existe une autre explication possible au retard, l'effet Shapiro: en raison de la présence de matière sur le trajet, les ondes gravitationnelles et lumineuses se propagent plus lentement. En relativité générale, l'effet de retard est le même pour les deux types d'ondes. Mais il peut différer dans des théories de gravitation modifiée.

C'est le cas avec le modèle relativiste TeVeS. Sibel Boran, de l'université technique d'Istanbul, et ses collègues ont montré que, pour la coalescence d'étoiles à neutrons détectée en août 2017, le décalage entre l'arrivée des ondes gravitationnelles et le sursaut gamma aurait dû se compter en centaines de jours... Comme il n'était que de 1,7 seconde, on peut dire aujourd'hui que TeVeS est exclu et il en va de même pour de nombreux autres modèles relativistes. Il existe d'autres modèles de gravitation modifiée qui n'ont pas le problème de l'effet Shapiro, mais ils souffrent d'autres difficultés.

Quelles sont donc les perspectives pour expliquer la masse manquante ?

Quand on fait le bilan, on voit que la théorie Mond fonctionne bien à l'échelle des galaxies, et que les wimps conviennent à l'échelle des amas et sont compatibles avec les contraintes cosmologiques. On peut donc envisager des solutions hybrides, comme celles de la matière noire dipolaire de Luc Blanchet, de l'institut d'astrophysique de Paris, ou de la matière noire superfluide de Justin Khoury, de l'université de Pennsylvanie.

En quoi consiste la matière noire superfluide ?

Cette matière noire serait composée de particules se comportant comme des wimps dans le plasma primordial et dans les amas. C'est dans le cœur des galaxies que le modèle devient original. Dans ces régions centrales, la densité de matière noire est assez élevée et la température relativement basse. Les particules de matière noire subiraient une transition de phase et se

comporteraient comme un condensat de Bose-Einstein (un état de la matière obtenu en laboratoire, où les atomes se retrouvent tous dans le même état quantique).

Justin Khoury a alors supposé que la matière baryonique se comporte comme des impuretés dans le condensat. Et ces impuretés interagissent avec le condensat de la matière noire par des échanges de phonons (des vibrations). On obtient ainsi le couplage qui reproduit précisément les effets de Mond. En dehors de la partie centrale de la galaxie, la densité de matière noire est trop faible pour produire un condensat. On a donc une zone de transition entre les deux régimes, à environ 60-100 kiloparsecs du centre galactique. Ce scénario pourrait donc prévoir des choses intéressantes sur la dynamique des traînes de marée des galaxies satellites de la Voie lactée qui traverseraient cette zone de transition.

La matière noire superfluide est une façon d'obtenir la bonne forme du potentiel galactique, mais peut-on l'obtenir autrement ?

Avec Justin Khoury, nous avons proposé une autre piste, qui n'en est qu'à ses débuts. L'idée est la suivante. Pour expliquer la corrélation entre le cœur de matière noire et la distribution de matière ordinaire, il faut un couplage entre ces deux composantes de matière. Nous avons donc supposé que, dans les galaxies, les baryons et la matière noire entrent en collision et échangent de l'énergie. C'est le genre d'interaction que l'on cherche dans les expériences de détection directe de wimps et que l'on ne trouve pas. Pour échapper aux contraintes imposées par ces expériences, il faut supposer que la matière noire est composée de particules très légères (du type axions) ou très lourdes (comme des *quarks nuggets*).

Le modèle que nous avons esquissé indique que les collisions sont très rares dans un plasma dense comme celui de l'Univers primordial. Cette matière noire se comporte donc comme les wimps à l'échelle cosmologique. Et nous commençons seulement à explorer ce que ce modèle peut donner à l'échelle d'une galaxie. C'est un programme de recherche qui prendra encore des années.

Finalement, à quoi pourrait ressembler la matière noire ?

Ce qu'on appelle la matière noire pourrait être très différent de ce que l'on pensait jusqu'à présent. Les observations récentes tendent à exclure les scénarios en vogue, tels les wimps et la gravitation modifiée. Quelque chose de très profond et fondamental nous échappe peut-être. Ce qui est certain, c'est qu'il n'y a pas de solution simple à ce jour. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

B. Famaey et al., **Emergence of the mass discrepancy-acceleration relation from dark matter-baryon interactions**, en ligne, 4 décembre 2017. <https://arxiv.org/abs/1712.01316>

S. Boran et al., **GW170817 falsifies dark matter emulators**, en ligne, 17 octobre 2017. <https://arxiv.org/abs/1710.06168>

B. Dobrescu et D. Lincoln, **Les multiples visages de la matière noire**, *Pour la Science*, n°463, mai 2016.

L. Berezhiani et J. Khoury, **Theory of dark matter superfluidity**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 103510, 2015.

Cultiver les coraux pour les sauver

Le réchauffement océanique menace les coraux. Des pépinières sous-marines de ces animaux les aideront-elles à résister ?



L'ESSENTIEL

> Des biologistes essaient plusieurs approches pour aider les coraux à s'adapter au réchauffement climatique.

> Ils les poussent à se cloner plus vite et créent des larves en laboratoire pour accroître leur diversité génétique.

> Un stress thermique favorise l'activation de gènes qui

conduisent à des descendants plus résilients ; la stimulation des algues symbiotiques des coraux pourrait aussi renforcer leur santé.

> Ces techniques sont prometteuses à l'échelle locale, mais un sauvetage à l'échelle mondiale ne sera possible que si nous ralentissons le réchauffement océanique.

L'AUTEURE



REBECCA ALBRIGHT
biologiste marine
à l'Académie
des sciences
de Californie

Debout sur une plage australienne, je me prépare à plonger sur la Grande Barrière de corail. Ma précédente plongée en ce lieu remonte à dix ans. Mon émotion était grande ce jour-là. Il faut dire que le chemin avait été long avant que je puisse enfin découvrir cet immense récif : élevée dans l'Ohio, j'avais passé mon enfance à lire des livres sur la

biologie marine – du moins quand je n'avais pas les yeux rivés sur Discovery Channel. Et c'était dans les eaux troubles des carrières de calcaire de cet État, que j'avais passé mes niveaux de plongée avant de partir, un an plus tard, explorer la Grande Barrière. Mon amie Émilie, aujourd'hui une experte des algues marines, m'accompagnait. Nous avions fait des paris sur la durée de notre provision d'air. Elle nous offrit deux merveilleuses heures durant

Les coraux du genre *Acropora* se reproduisent une fois par an en été. Tout au long des milliers de kilomètres de la Grande Barrière de corail, ils émettent alors des paquets de sperme et d'ovules.

➤ Lesquelles, fascinées, nous contemplâmes une prospère forêt de corail regorgeant de seiches, de bénitiers géants violets et de gracieuses tortues marines...

Et me voilà de retour, cette fois en tant que chercheuse postdoctorale à l'Institut australien des sciences marines situé à Cape Ferguson dans le Queensland. Prête à m'émerveiller à nouveau, j'entre dans l'eau jusqu'au menton, puis regarde à travers mon masque. Mon cœur se serre: plus aucune seiche, plus de tortues non plus... Le corail est pâle. Le foisonnement de vie auquel je m'attendais a été remplacé par des algues et des sédiments. Certes, j'ai déjà entendu des chercheurs confirmés raconter des histoires déchirantes quant à la dégradation de tel ou tel récif au cours de leur carrière, mais, à peine dix ans après le début de la mienne, j'ai l'impression d'être trop jeune pour faire le même constat.

50 % DES CORAUX SONT MORTS, 70 % ONT BLANCHI

Ce choc, c'est en 2014, alors que commençait le troisième grand épisode de blanchiment, que je l'ai vécu. Les coraux – que l'on confond souvent avec des rochers – sont en fait de petits animaux – les polypes – sécrétant un exosquelette et vivant en symbiose avec des microalgues – les zooxanthelles –, qui leur fournissent la majeure partie de leur nourriture (de 60 à 90%) et leur donnent leurs couleurs. Quand l'élévation de la température des eaux marines stresse les coraux, ils tendent à expulser leurs microalgues. Leurs colonies perdent alors leurs couleurs pour adopter celle du calcaire constitutif de l'exosquelette des polypes: elles blanchissent. Le blanchiment massif des coraux entamé en 2014 a duré trois ans, dévastant les récifs et brisant des cœurs sur toute la planète. En fait, même si la surpêche, la pollution et l'acidification des océans menacent aussi les récifs coralliens, la principale inquiétude à leur propos aujourd'hui est bien leur destruction rapide et massive par le réchauffement des eaux océaniques.

Provoquées par des épisodes El-Niño, les premières grandes phases de blanchiment se sont produites en 1998 et en 2008. Celle de 2014-2017 a de loin été la plus longue et la plus ample puisqu'elle a concerné pas moins de 70% des récifs coralliens du monde. Deux tiers des coraux de la Grande Barrière de corail ont été soit sévèrement blanchis, soit détruits. Et la dévastation continue: les récifs coralliens disparaissent sous nos yeux. Au cours des 30 dernières années, nous avons perdu approximativement 50% des coraux de la planète et les chercheurs estiment que pas plus de 10% des coraux du monde survivront jusqu'en 2050. Nous avons besoin de solutions pour les sauver et il nous les faut très vite!

Même si les récifs coralliens ne couvrent que 0,1% de la surface du fond océanique, on



y rencontre 25% des espèces marines connues, dont certaines nourrissent des millions de gens. Ils représentent aussi des protections côtières naturelles capables d'abattre jusqu'à 97% de l'énergie des vagues et 84% de leur hauteur. Et puis, les coraux sont aussi à l'origine d'une activité touristique. Si nous devons les perdre, nous compromettrions les vies de quelque 500 millions de personnes et un volume d'activité annuel de plus de 30 milliards d'euros de ressources naturelles et de services.

Poussés par l'urgence de la situation, des chercheurs se sont mis à développer des moyens de plus en plus audacieux et créatifs pour maintenir les récifs coralliens et les restaurer. Les techniques nécessaires doivent être bon marché et adaptables à grande échelle. Ces critères ont conduit à une poignée d'options fondées sur des processus naturels et des interventions humaines. Ensemble, ces actions pourraient aider les coraux à traverser les prochaines décennies – et atteindre, espérons-le, une période où l'humanité aura assez réduit ses émissions pour que le réchauffement climatique ralentisse.

Si vous plongez un jour à quelque sept kilomètres de la côte de Floride, peut-être tomberez-vous sur des forêts d'arbres en plastique aux branches ornées de coraux, semblables à des sapins de Noël décorés. Les chercheurs emploient de tels élevages en mer ou en bassin

Les plongeurs fixent sur un récif des coraux élevés au laboratoire marin Mote, en Floride, afin de repeupler le récif, un peu comme on plante de jeunes arbres pour reconstituer une forêt.

A PROPOS DE L'AUTEURE



REBECCA ALBRIGHT
s'est spécialisée dans l'étude des coraux ; elle travaille comme conservatrice à l'Académie des sciences de Californie.

afin de cultiver des coraux qui, ensuite, seront transplantables sur des récifs dégradés. Ces pépinières marines tirent parti du fait que la reproduction des coraux peut être sexuée ou asexuée. Une colonie corallienne est en effet un organisme clonal constitué de centaines de milliers de polypes qui sont les clones les uns des autres. Chacun a la capacité de se reproduire de façon sexuée en émettant des œufs et du sperme qui fusionneront pour former des larves et de façon asexuée par bourgeonnement de ses polypes pour en former d'autres (voir l'encadré page 45).

Quand une tempête endommage un récif corallien, il arrive qu'un fragment de colonie se détache, soit emporté, se fixe au fond et recommence à prospérer en se clonant. C'est pourquoi les éleveurs de corail fragmentent volontairement des coraux afin d'en créer des clones. Aujourd'hui, presque 90 espèces différentes sont élevées à travers le monde. Les éleveurs des Caraïbes et de l'Atlantique occidental font couramment pousser des dizaines de milliers de coraux et les transplantent sur des récifs dégradés, financés le plus souvent par des donateurs privés, des subventions ou des programmes gouvernementaux de restauration.

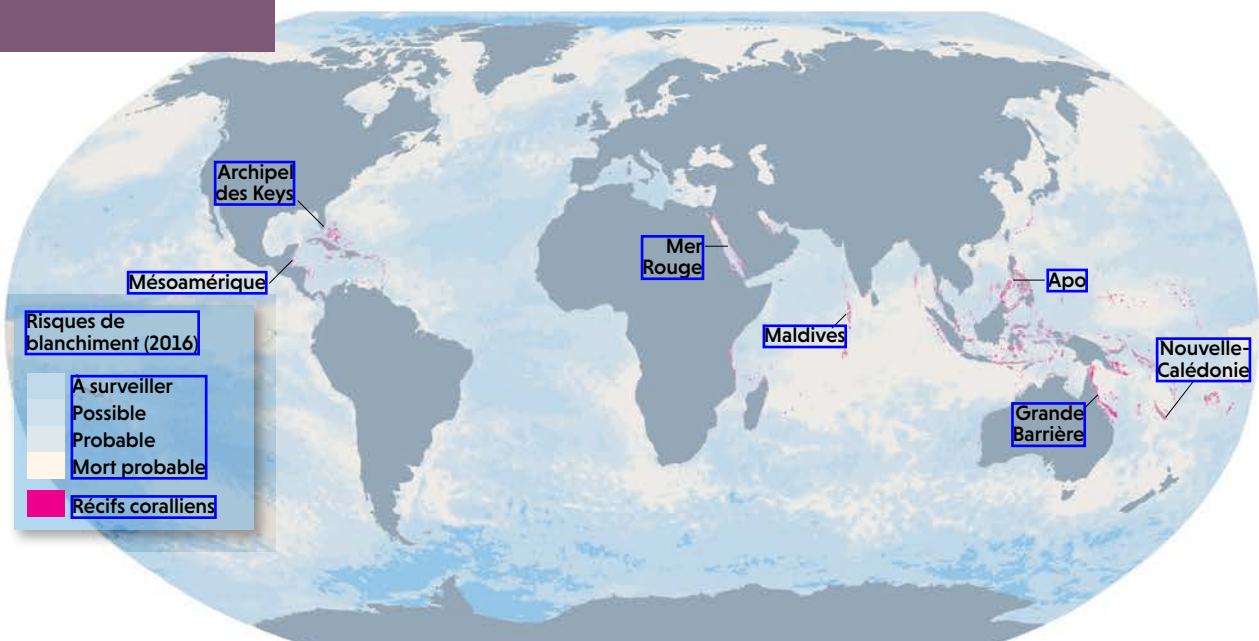
Les chercheurs aimeraient amplifier ce type de restauration. Dave Vaughan, du laboratoire marin Mote, à Sarasota, en Floride, a découvert récemment que lorsqu'on réduit les coraux en fragments de la taille d'une gomme, ils se régénèrent 25 à 50 fois plus vite que dans la nature. Et si des morceaux génétiquement équivalents sont disposés à quelques centimètres les uns des autres, ils fusionnent à nouveau pour former une grande colonie. En quelques mois, l'équipe de Dave Vaughan obtient ainsi des colonies coralliennes de la taille d'un ballon de football, ce qui, dans la nature, aurait pris des années.

600 CORAUX EN UN APRÈS-MIDI

Il y a douze ans, quand elle débutait dans la culture corallienne, l'équipe de Dave Vaughan était parvenue à produire 600 coraux en six ans, alors qu'elle en produit aujourd'hui 600 en un après-midi. Entre-temps, elle a appliqué avec succès sa technique de fragmentation à une demi-douzaine d'espèces coralliennes. Dave Vaughan prévoit de produire et de transplanter 50 000 coraux cette année et 100 000 l'année prochaine, et il s'est juré de ne pas prendre sa retraite avant d'en avoir transplanté un million. ➤

LE PIRE BLANCHIMENT DE TOUS LES TEMPS

Entre 2014 à 2017, un échauffement anormal des eaux océaniques a provoqué le blanchiment de coraux de la plus grande ampleur jamais enregistrée. Au cours de l'année 2016, en effet, les conditions de vie difficiles pour les coraux dues à cette élévation de température se sont multipliées sur la planète. Stressés, les polypes coralliens ont expulsé en masse leurs algues symbiotiques, ce qui a privé les colonies coralliennes de leur source de nourriture, dans nombre de cas jusqu'à la mort.





Les spermatozoïdes et les ovules des coraux corne d'élan sont prélevés sous l'eau à l'aide d'un entonnoir en tissu (ci-dessus) et viennent se concentrer dans un tube (à gauche). Au laboratoire, les chercheurs fusionnent ces gamètes avec ceux d'autres coraux afin de produire de nouvelles variétés, et par là d'augmenter la diversité génétique du récif.

Or quand il a commencé dans la culture de coraux, la production d'un seul corail coûtait quelque 800 euros. Grâce à la technique de fragmentation et après avoir amélioré l'efficacité de ses méthodes, son équipe produit aujourd'hui couramment un corail pour moins de 17 euros. En faisant appel à des scientifiques amateurs et à des volontaires, Dave Vaughan est convaincu qu'il réduira ce coût à deux euros par corail – un euro pour assurer la reproduction et un autre pour financer la transplantation. Même si le Service américain de la pêche maritime estime que restaurer le corail corne de cerf et le corail corne d'élan typiques des Caraïbes demandera... 400 ans et 216 millions d'euros, l'objectif de Dave Vaughan est de les retirer de la liste des espèces en danger avant sa mort.

Ses techniques nous ont permis de rétablir de nombreux récifs tels qu'on les avait connus en termes de taille et de fonctionnement. Cela n'a toutefois été possible que localement: les mêmes résultats à l'échelle de l'écosystème signifieraient un saut énorme. De fait, la plupart des campagnes menées jusqu'à présent ont restauré moins de un hectare, alors que les récifs se dégradent sur des centaines de milliers de kilomètres carrés. Le passage à grande échelle est donc l'un des plus grands défis à relever: on a par exemple estimé que la restauration des 2300 kilomètres de la Grande Barrière à l'aide de fragments de corail à quatre euros pièce coûterait 170 milliards d'euros.

Parallèlement à ces pépinières fondées sur la reproduction asexuée des coraux, des chercheurs tentent de favoriser leur reproduction sexuée dans l'espoir d'augmenter leur diversité génétique. C'est important, car la baisse

de diversité génétique accompagnant le déclin des populations réduit la résilience des colonies coralliennes face au réchauffement des eaux marines. Dans de nombreux récifs des Caraïbes, par exemple, un unique clone domine. Or la science et même l'histoire nous enseignent qu'une diversité génétique trop faible conduit vite une population au désastre, particulièrement quand les conditions environnementales changent.

La reproduction sexuée est le moyen par lequel la nature accumule de la diversité. Comme les coraux sont fixés au sol de l'océan, ils ne peuvent se déplacer à la recherche de partenaires. Pour se reproduire de façon sexuée, la plupart libèrent des ovules et des spermatozoïdes dans la colonne d'eau où, avec un peu de chance, des fécondations se produisent. Un phénomène qui devient de plus en plus improbable à mesure qu'une zone récifale se dégrade puisque les coraux vivants se retrouvent de plus en plus éloignés les uns des autres.

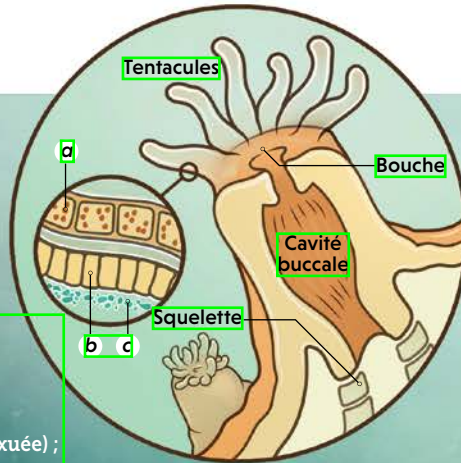
À l'Académie des sciences de Californie, en collaboration avec Nature Conservancy – une organisation non gouvernementale (ONG) américaine de protection de l'environnement – et Secore International – une ONG pour la conservation des coraux –, nous travaillons à assister la délicate sexualité des coraux. Nous avons désormais une bonne idée du moment pendant lequel frayent les colonies: vers la fin de l'été, après le coucher du soleil et à la pleine lune (les coraux sont étonnamment romantiques). Au cours d'une des nuits où cela se produit, nous plongeons munis de filets afin de prélever les gamètes. Nous les apportons ensuite au laboratoire, où nous les mélangeons dans des

LES CORAUX ENTRENT DANS L'ANTHROPOCÈNE

Au cours des 40 dernières années, l'intervalle de temps séparant deux événements de blanchiment a été divisé par cinq. C'est la constatation à laquelle l'équipe de Terry Hughes de l'université James Cook en Australie est parvenue après avoir examiné de près les évolutions de cent récifs coralliens situés dans les eaux territoriales de 54 pays à travers le monde. Selon les chercheurs, il est clair que les coraux sont entrés dans l'ère géologique dite de l'Anthropocène, c'est-à-dire de la domination de la vie sur Terre par l'humanité.

ASSISTER LA VIE CORALLIENNE

Mi-animaux, mi-végétaux, les coraux produisent leur descendance en se clonant (reproduction asexuée) ou par la fusion d'un ovule et d'un spermatozoïde (reproduction sexuée) ; ils vivent aussi en symbiose avec des algues. D'où les quatre méthodes pour les aider à se multiplier et à prospérer présentées ci-dessous.



TROIS EN UN

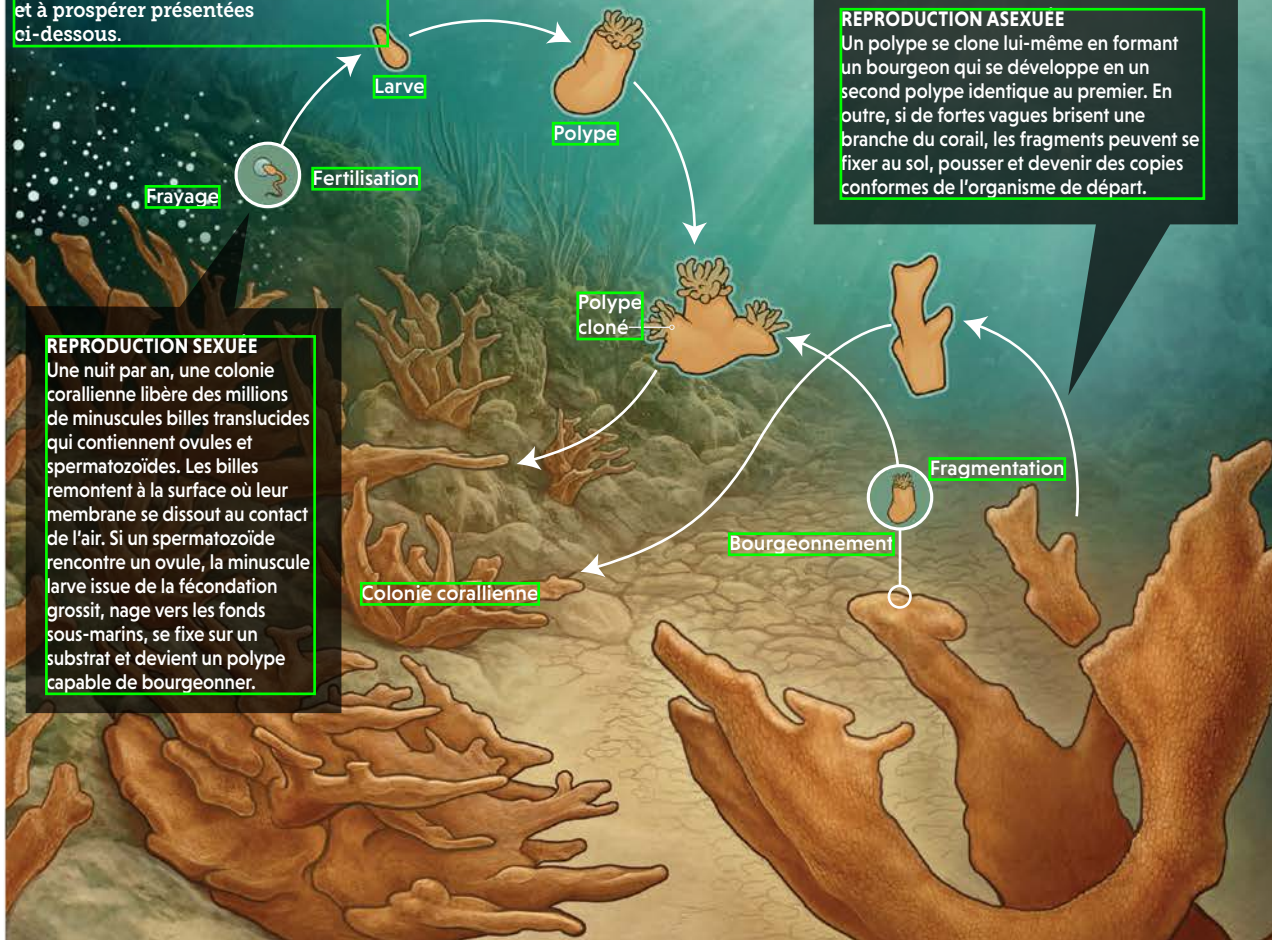
Un corail est fait de nombreux polypes dotés d'un squelette et d'une bouche. Chacun est nourri par des algues (a) vivant sous un épiderme (b) entretenu par des bactéries (c). Ces trois organismes symbiotiques bénéficient les uns des autres. Ce sont les algues qui donnent leurs couleurs aux coraux.

REPRODUCTION ASEXUÉE

Un polype se clone lui-même en formant un bourgeon qui se développe en un second polype identique au premier. En outre, si de fortes vagues brisent une branche du corail, les fragments peuvent se fixer au sol, pousser et devenir des copies conformes de l'organisme de départ.

REPRODUCTION SEXUÉE

Une nuit par an, une colonie corallienne libère des millions de minuscules billes translucides qui contiennent ovules et spermatozoïdes. Les billes remontent à la surface où leur membrane se dissout au contact de l'air. Si un spermatozoïde rencontre un ovule, la minuscule larve issue de la fécondation grossit, nage vers les fonds sous-marins, se fixe sur un substrat et devient un polype capable de bourgeonner.



Quelles solutions ?

ALGUES

Développer des algues résistantes à la chaleur et les inoculer aux bébés coraux afin de les rendre plus résistants à la chaleur.

FÉCONDATION CROISÉE

Prélever spermatozoïdes et ovules et les fusionner au laboratoire afin d'obtenir une grande diversité génétique de larves, puis les planter sur le récif afin de le rendre plus résilient.

GÈNES

Stresser thermiquement les coraux favoriserait l'activation de gènes de résistance thermique. Une fois dans un récif, les coraux entraînés transmettraient leur résilience.

MICROFRAGMENTS

Briser des coraux en petits morceaux, ce qui favorise la croissance de clones. En planter des milliers sur les récifs dégradés afin qu'ils se reconnectent en colonies.

seaux d'eau de mer afin de déclencher des fécondations. Les larves ainsi produites ont la taille d'un grain de sésame. Dans la nature, tant qu'elles n'ont pas eu l'occasion de se fixer afin de commencer à croître, elles sont vulnérables, susceptibles d'être mangées à tout moment. D'où l'intérêt de les élever jusqu'à ce qu'elles soient assez grandes et fortes pour être transplantées sur le récif. L'objectif n'est pas de replanter des récifs entiers, mais plutôt d'y augmenter la diversité génétique tout en reconstituant assez la population afin que le récif puisse se rétablir par lui-même tout en devenant plus résilient aux changements de l'environnement.

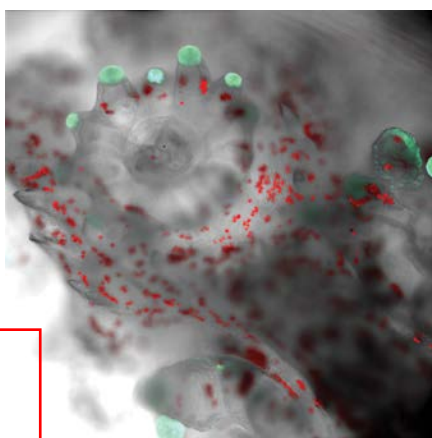
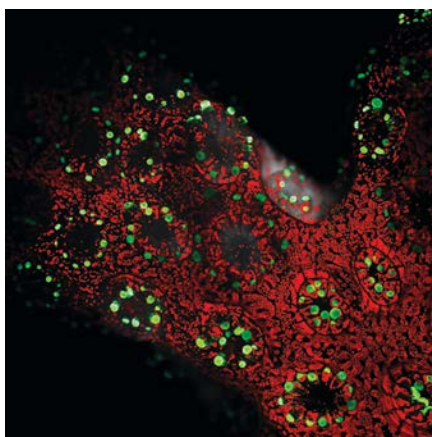
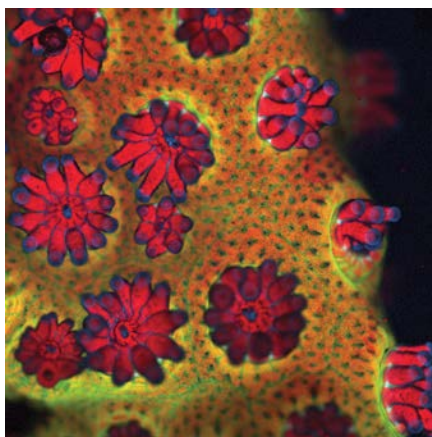
FIV CORALLIENNE

Nombre de récifs ont une trop faible diversité génétique pour produire des bébés coraux. En combinant multiplication asexuée et sexuée, nous serions à même de reconstruire des récifs sains dans le voisinage. L'objectif est de créer des coraux propagateurs de vie.

Dans la nature, environ un bébé corail sur un million survit. D'où le grand intérêt de les aider à traverser les premiers stades de leur vie. Nous en sommes aujourd'hui à 100% de succès dans la fécondation des coraux en laboratoire et la fixation des larves sur des tuiles pouvant être placées en mer. Lors d'un frai corallien à Curaçao dans les Caraïbes l'an passé, j'ai aidé Secore International à récolter les ovules de 25 colonies. En deux petites journées, notre équipe en a ramassé pas moins de cinq millions. «Un nouveau record de Secore, qui montre à quelle échelle nous pourrions travailler», commente Dirk Petersen, son fondateur.

L'un de nos grands défis est de maintenir les coraux juvéniles en vie une fois que nous les avons implantés dans l'océan. Après tout, les conditions de vie qui y règnent actuellement sont la cause principale du déclin corallien, de sorte que tant que nous n'avons pas maîtrisé le changement climatique, la pollution et la surpêche, nous ne faisons qu'accorder un peu de répit aux coraux. Qui sait, en chemin, avec un peu de chance, nous réussirons à créer des génotypes que nous reproduirons en masse et dont certains, peut-être, survivront.

Toutefois, pour qu'un tel scénario se produise, nous ne pouvons nous fier à la chance. Les conditions régnant dans les océans changent trop vite pour que la plupart des coraux s'adaptent naturellement, de sorte que les chercheurs s'intéressent aussi aux moyens d'accélérer leur adaptation. Une approche



Ces algues (en rouge) nourrissent un corail du genre *Pocillopora* en bonne santé (en haut). Le réchauffement de l'eau conduit à leur expulsion (au centre) de sorte que le corail adopte la couleur de son exosquelette : il blanchit (en bas). Une fois séparés de leurs algues, les coraux manquent de sucres (les points verts sont des protéines).

possible consiste à renforcer les traits favorisant la tolérance au stress thermique et la capacité à se rétablir après une phase de blanchiment. Cette évolution «assistée» est déjà très présente dans notre quotidien, puisque la plus grande partie de la nourriture que nous consommons provient d'espèces ayant été modifiées par l'humanité. Nos animaux de compagnie ont aussi été élevés et sélectionnés en fonction de traits esthétiques ou de personnalité. Dès lors, pourquoi ne pas en faire autant avec les coraux afin de favoriser leur résistance au changement climatique?

Ruth Gates, de l'Institut de biologie marine de Hawaï, et Madeleine van Oppen, de l'Institut australien de science marine, travaillent ensemble à augmenter la résistance corallienne au stress. Afin de conditionner les coraux, Ruth Gates les place sur ce qu'elle nomme des «tapis roulants environnementaux». Ils y sont exposés à des températures sublétales, dans l'espoir de favoriser l'activation de gènes aidant à affronter durablement le stress thermique. Cette technique, nommée réglage épigénétique, serait plus enthousiasmante encore si les coraux entraînés étaient ensuite implantés sur des récifs, où ils transmettraient leur résistance à leurs rejetons, créant en quelque sorte des générations de «supercoraux». Le réglage épigénétique nous servirait ainsi à augmenter la résistance corallienne au blanchiment. En théorie du moins.

De fait, nous ne faisons que commencer à comprendre ce processus. Si les premiers essais de laboratoire sont prometteurs, il reste à en mener en mer. Ils révéleront si les coraux entraînés transmettent effectivement leur résilience à leurs rejetons une fois intégrés à un récif, ce qui permettra d'envisager cette approche à plus grande échelle, d'étudier son coût et d'éventuels risques inhérents.

Madeleine van Oppen, quant à elle, étudie la sélection artificielle. Un certain degré de diversité génétique existant au sein d'une même espèce, chaque individu est plus ou moins résistant au blanchiment ou à la maladie. Comme des sélectionneurs cherchant à favoriser certains traits d'une espèce d'animal de compagnie, il serait intéressant d'identifier les colonies de coraux résistantes et de s'en servir pour produire une progéniture résistante. Nous serions alors en mesure d'améliorer la tolérance à la température d'un récif entier puisque les gènes utiles seraient transmis aux générations suivantes.

Sélectionner des coraux est difficile car leur maturation nécessite parfois une décennie. L'adaptation aux changements environnementaux est compliquée pour la même raison. Toutefois les microorganismes et les algues vivant en symbiose avec les coraux se reproduisent vite et influencent énormément leur santé. Nous tentons donc de manipuler ces organismes par sélection artificielle afin d'améliorer la santé des polypes. Ces dernières années, les biologistes ont réalisé à quel point notre microbiote (les microorganismes qui peuplent notre organisme) influence notre santé, pour le meilleur comme pour le pire.

Madeline van Oppen développe actuellement en laboratoire des souches d'algues et les inocule à des bébés coraux afin de voir si elles leur confèrent une tolérance thermique. Avec Ruth Gates, elle tente aussi de voir si la mise en œuvre de plusieurs de ces techniques – le réglage épigénétique, la sélection artificielle et la manipulation du microbiote – sur un même corail est plus efficace que l'application d'une seule à la fois.

La plupart des techniques que nous utilisons n'en sont qu'à leurs balbutiements. Toutefois, certains éléments suggèrent qu'en les associant, nous aurons plus de succès. Une approche combinée se déroulerait ainsi: nous utiliserions d'abord la reproduction sexuée et l'évolution assistée pour obtenir au sein de populations de coraux une plus grande diversité et des individus plus résistants au stress; ensuite nous passerions à la production en masse en élevage par multiplication asexuée; puis nous transplanterions les individus obtenus sur des récifs.

Tout cela pourra-t-il se produire bientôt? Pas exactement. Certaines techniques, comme

la sélection artificielle sont faciles à mettre en œuvre immédiatement; elles sont aussi peu coûteuses et efficaces. Toutefois, nous avons encore du travail afin d'établir la viabilité et l'adaptabilité à grande échelle des autres techniques, et de mesurer les risques d'entraîner des conséquences écologiques non anticipées. Il est possible, par exemple, que les traits artificiellement sélectionnés conduisent les coraux introduits à surclasser les populations natives au lieu de s'y intégrer, ce qui ruinerait nos efforts pour favoriser la survie des récifs.

BANQUES DE SPERME CORALLIEN

Que l'on utilise une ou plusieurs techniques pour renforcer les coraux, une autre étape est cruciale: il faut conserver des spermatozoïdes, des ovules, des larves et des fragments de coraux entiers au sein de réserves équivalentes aux banques de semences maintenues par les agronomes depuis des décennies pour améliorer le rendement des cultures, la résistance aux maladies et la tolérance à la sécheresse. De telles banques permettent aux chercheurs de se procurer des éléments biologiques essentiels à l'amélioration de la résilience et de la biodiversité.

En s'inspirant des méthodes employées pour la fécondation *in vitro*, Mary Hagedorn de l'Institut de biologie de la conservation de la Smithsonian Institution, à Washington, a mis sur pied la première banque génétique pour espèces de coraux en danger. En 2004, quelques années après la naissance du premier bébé humain issu d'un ovule cryopréservé (préservé dans l'azote liquide), elle a en effet créé le programme de cryoconservation des coraux. Son équipe a mis en place un système de congélation ➤

Le chercheur contrôle des coraux plantés dans une baie non loin du laboratoire de Ruth Gates, à l'Institut de biologie marine de Hawaï, pour déterminer comment l'acidification des océans, un stress lié au changement climatique, les affecte.



COMPRENDRE LA DIVERSITÉ DES RÉCIFS POUR MIEUX LES PROTÉGER

Pour bien protéger un écosystème, il faut en comprendre le fonctionnement. Aujourd'hui, la survie d'une majorité des récifs coralliens est menacée par la surpêche, les maladies, la pollution ou le réchauffement des océans. Certains, toutefois, résistent bien mieux que d'autres aux affres du climat et des stress anthropogéniques. Pourquoi observe-t-on une telle diversité des réponses au stress des communautés coralliennes ?

Dirigé par Stuart Sandin de l'institut Scripps d'océanographie à San Diego en Californie, un groupe de chercheurs dont

je fais partie essaie de répondre à cette question. Nous avons lancé le projet *100 Island Project Challenge* (littéralement le « Défi des 100 îles »). Il vise à mettre en place une expérience grandeur nature pour mieux comprendre les effets combinés des conditions océaniques, du climat et des activités humaines sur la structure et la dynamique des récifs coralliens.

Ainsi, nous sommes en train de recenser les espèces de coraux et de poissons vivant autour de 100 îles sélectionnées pour leurs profils uniques. Nous établissons des modèles en trois dimensions représentant 100 mètres carrés de huit récifs par île. Nous employons pour cela une technique – nommée *Structure from motion* en anglais – permettant de reconstruire un modèle en trois dimensions à partir d'un grand nombre de photographies. Sur les modèles établis par cette technique, la résolution est telle qu'il deviendra possible d'identifier les différents types de coraux et de les mesurer avec précision. Ces mesures seront faites directement au laboratoire par des chercheurs et par des étudiants, via une

interface s'apparentant à de la réalité virtuelle.

Chacun de ces modèles en voie d'étude peut contenir jusqu'à plusieurs milliers de colonies coralliennes. Nous pouvons ainsi étudier la biodiversité marine de chaque île, l'organisation dans l'espace des coraux et suivre avec précision la croissance, le rétrécissement ou la mort d'un million de colonies coralliennes. Finalement, nous pourrions bientôt corréler ces observations avec les conditions régnant dans l'océan, les conditions climatiques et la présence humaine connue. Bien entendu, les colonies seront revisitées plusieurs années de suite afin de suivre leurs évolutions. De telles informations sont cruciales dans le cadre de tout projet de conservation. Savoir à quoi un récif devrait ressembler sous des régimes climatiques donnés est essentiel pour qui souhaite le protéger ou doit le reconstruire. Les récifs coralliens n'ont plus souffert autant qu'aujourd'hui depuis longtemps, mais une chose est sûre : nous n'avons jamais été autant capables de les protéger !

YOAN EYNAUD
Institut Scripps, San Diego, États-Unis

du sperme corallien applicable à un large éventail d'espèces coralliennes. Pour le moment, elle a stocké 16 espèces provenant du monde entier, soit environ 2% des quelque 800 espèces coralliennes qui existeraient sur Terre d'après les estimations. Les spermatozoïdes décongelés ont des taux de fécondation comparables à ceux des spermatozoïdes frais et les embryons issus de la fécondation *in vitro* se développent en polypes juvéniles en bonne santé.

Mary Hagedorn a distribué ces germoplasmes, ou tissus vivants, dans les banques cryogéniques de divers pays. En théorie, ces banques sont capables de conserver ces tissus pendant des centaines, voire des milliers d'années. Les cellules pourront être décongelées un jour et servir à des projets d'élevage en mer ou en piscine. Les spermatozoïdes congelés serviraient par exemple à féconder des ovules venant de zones hors de leur territoire d'origine, et ainsi à introduire de nouveaux gènes dans un bassin génétique corallien. Les banques servent bien sûr aussi à préserver les espèces récifales susceptibles de décliner ou de disparaître.

Outre le sperme, Mary Hagedorn travaille aussi à cryopréserver des ovules et même des

larves entières. Elle espère y parvenir au cours des deux années à venir, puis elle s'attaquera à la cryoconservation de microfragments coralliens entiers. Son équipe développe aussi des techniques de cryopréservation de testicules de poissons afin d'aider à préserver la diversité des poissons récifaux. Son objectif ultime est de construire un ensemble de banques hautement sécurisées rassemblant les germoplasmes – ovules, spermatozoïdes, embryons... – des coraux et des autres espèces récifales en danger. « Nous n'avons aucune idée de ce que la science sera capable d'accomplir dans un siècle », estime-t-elle.

Ces différentes pistes peuvent surprendre. Nombre d'entre elles doivent encore être mises à l'épreuve, et de nombreuses interrogations subsistent quant à leur applicabilité à grande échelle, à leurs coûts et aux conséquences écologiques de la manipulation des systèmes récifaux. Toutefois, les risques de l'inaction sont connus : de fortes menaces pèsent sur les coraux et les nombreuses espèces qui en dépendent. Bien sûr, le premier défi reste de réduire les activités humaines responsables de ces menaces : les émissions de gaz à effet de serre, la pollution et la surpêche. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. P. Hughes et al., **Global warming and recurrent mass bleaching of corals**, *Nature*, vol. 543, pp. 373–377, 2017.

P. J. Edmunds et al., **Persistence and change in community composition of reef corals through present, past, and future climates**, *Plos One*, article e107525, 2014.

Projet de l'Académie des sciences de Californie pour les récifs coralliens : www.calacademy.org/explore-science/hope-for-reefs

Projet des microfragments du laboratoire marin Mote : <https://mote.org/research/program/coral-reef-restoration>

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ
VOTRE COLLECTION
SUR www.pourlascience.fr



Les nuages, amplificateurs du réchauffement

Quel rôle jouent et joueront les nuages dans le réchauffement climatique en cours ? Les observations et modélisations commencent enfin à apporter des réponses convergentes à cette question complexe. Des réponses qui ne sont pas vraiment rassurantes.

L'ESSENTIEL

> Pour prédire avec précision à quel point le changement climatique réchauffera la Terre, il faut déterminer l'influence des nuages. Or les modèles climatiques ont des difficultés à simuler les processus où les nuages interviennent.

> Des données satellitaires suggèrent que les nuages d'altitude vont s'élever davantage, que les bandes

nuageuses et dégagées se décaleront vers les pôles et que les nuages pourraient s'appauvrir en glace et s'enrichir en eau liquide.

> D'après les données, les effets des nuages qui amplifient le réchauffement climatique sont intenses et ceux qui l'atténuent sont plus faibles que prévu.

L'AUTEURE



KATE MARVEL climatologue à l'université Columbia, aux États-Unis, et à l'institut Goddard de la Nasa



Il est difficile de déterminer l'influence climatique des nuages, en raison notamment de leur diversité et des multiples échelles mises en jeu.

© Michael Jurek | Gallery Stock

Je déteste les nuages. Non pas parce qu'ils apportent parfois la pluie, mais parce qu'ils donnent du fil à retordre, à nous autres climatologues. Les nuages sont de toutes formes et de toutes tailles: cirrus élevés et vaporeux, cumulus joufflus, stratocumulus en couches grises et basses qui assombrissent le jour... Cette grande diversité fait qu'il est difficile de prédire comment les nuages, sur toute la planète, vont réagir aux changements de l'atmosphère terrestre.

Les climatologues comme moi savent, grâce à une multitude de données, que la Terre se réchauffera au cours de ce siècle et au-delà. Mais nous avons du mal à cerner avec précision l'amplitude de ce réchauffement: peut-être un degré de plus? Ou deux degrés, voire trois ou quatre? La réponse dépend en grande partie des nuages. Le changement climatique modifie la répartition des nuages, ce qui pourrait ralentir ou accélérer le réchauffement global. La connaissance du résultat serait extrêmement utile pour guider les actions entreprises aujourd'hui et celles de demain.

De grandes équipes de spécialistes ont développé plus d'une vingtaine de modèles complexes du climat, testés avec un grand nombre de données climatiques. Tous ces modèles montrent que la Terre se réchauffe en réaction aux émissions actuelles de gaz à effet de serre. Mais pendant des années, ces différents modèles étaient obstinément en désaccord pour ce qui concerne les nuages. La situation est en train de changer: les simulations des effets exercés par les nuages commencent à converger. Des données satellitaires et d'autres observations commencent à révéler comment les changements relatifs aux nuages modifient le climat planétaire. Ces nouveaux aperçus accroissent nos inquiétudes, comme nous allons le voir.

RÉTROACTIONS POSITIVES OU NÉGATIVES

Imaginons la Terre juste avant la Révolution industrielle. Partout, on a abattu des forêts pour les remplacer par des pâturages et des villes. Cependant, la concentration du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère est restée stable à environ 280 parties par million (ppm).

➤ Puis vient le moteur à combustion interne. Avançons rapidement jusqu'à la fin des années 1900: la concentration en CO_2 a grimpé en flèche. En 2017, elle a dépassé 400 ppm. Ce choc a des répercussions planétaires. La troposphère, qui contient l'air que nous respirons, se réchauffe. La circulation atmosphérique de l'air et de la vapeur d'eau commence à changer. Compte tenu des tendances actuelles, la concentration atmosphérique en CO_2 doublera vers 2050, par rapport aux valeurs préindustrielles. Le réchauffement s'accroîtra. Enfin, après plusieurs centaines d'années, la planète atteindra un nouvel équilibre à une température plus élevée.

La réaction de la planète, en termes de température, au doublement de la concentration en CO_2 est appelée sensibilité du climat à l'équilibre, ou ECS (de l'anglais *equilibrium climate sensitivity*). Tous les modèles climatiques indiquent que l'ECS est supérieure à zéro: nous devrions nous attendre à un réchauffement. Mais l'ampleur du réchauffement qu'ils prédisent va d'environ 2°C à $4,5^\circ\text{C}$, – des valeurs qui s'échelonnent entre le significatif et le catastrophique.

Si les modèles ne concordent pas sur ce chiffre, c'est en grande partie parce qu'ils sont en désaccord sur l'effet des nuages. En le cernant mieux, on pourra faire une prévision plus précise. Mais l'étude de l'influence des nuages est difficile pour deux raisons. D'abord, l'impact du réchauffement sur les nuages dépend de leur nature. Ensuite, les changements ainsi induits dans la couverture nuageuse agissent en retour sur le réchauffement, et ce de diverses façons.

Cette interaction à double sens est une «rétroaction». Certaines rétroactions climatiques sont bien connues. La glace de mer, par exemple, est d'un blanc brillant et réfléchit donc la plus grande partie du rayonnement solaire incident vers l'espace; mais quand elle fond, elle devient plus sombre et ne réfléchit plus autant le rayonnement. L'air se réchauffe alors davantage, ce qui fait fondre plus de glace réfléchissante et expose plus d'eau sombre, qui réfléchit encore moins de rayonnement solaire, et ainsi de suite: un cycle de rétroaction s'établit et accélère le réchauffement global. Nous comprenons bien cette rétroaction dite positive, et la plupart des modèles sont à peu près d'accord sur son rôle dans le changement climatique.

Comprendre les rétroactions liées aux nuages est plus difficile. Les climatologues ont classé grossièrement les nuages en les regroupant par caractères distinctifs. Deux propriétés fondamentales sont leur altitude et leur opacité. Les nuages bas peuvent être relativement transparents, comme certaines bouffées de vapeur présentes lors d'une journée ensoleillée, ou opaques, comme les épaisses couches



de brume côtière. Les nuages élevés, eux aussi, vont de petits filets, à travers lesquels passe presque tout le rayonnement solaire, jusqu'aux «enclumes» qui obscurcissent le ciel au cours d'un orage.

Cette taxonomie est utile, car elle met en lumière les principales façons dont les nuages réchauffent ou refroidissent la planète. Certains nuages renforcent l'effet de serre. Ils piègent une partie de la chaleur émanant de la Terre; sans eux, la planète serait plus froide. Les nuages contenus dans les couches supérieures froides de l'atmosphère sont particulièrement efficaces à cet égard.

D'autres nuages ont l'effet opposé: ils empêchent la lumière du Soleil d'atteindre la surface de la Terre et maintiennent la planète au frais. C'est en particulier le cas des nuages bas et épais. Dans le climat actuel, cette influence est plus forte que l'effet de serre dû aux nuages. De fait, le refroidissement net dû aujourd'hui aux nuages est considérable: il est environ cinq fois plus important que le réchauffement dû au doublement de la concentration en CO_2 .

Cela signifie que même de légers changements dans la couverture nuageuse peuvent avoir de gros impacts. Ajoutez plus de nuages élevés et transparents qui laissent passer la

Les nuages (ici au-dessus de l'océan Pacifique) couvrent en permanence plus de 70 % de la surface du globe.



lumière solaire mais retiennent la chaleur, et la Terre se réchauffe. Ajoutez plus de nuages bas et opaques qui ne laissent pas passer la lumière du Soleil, et elle se refroidit. La migration des nuages a de l'importance, elle aussi; une redistribution des nuages réfléchissants, des latitudes tropicales et subtropicales ensoleillées vers les pôles froids et sombres, diminue leur pouvoir refroidissant.

L'altitude est un autre facteur. Si l'altitude des nuages élevés augmente pour atteindre celle des couches supérieures plus froides de l'atmosphère, leur effet de serre s'accroît. Mais dans une atmosphère plus chaude, la proportion de cristaux de glace par rapport aux gouttelettes d'eau pourrait diminuer dans les nuages froids, ce qui rendrait ces nuages plus humides et plus épais, donc plus efficaces pour bloquer la lumière solaire incidente.

Aucun de ces effets ne se produit isolément, et c'est pourquoi les modèles ont du mal à s'accorder. Certains montrent des rétroactions globales qui sont fortement positives, c'est-à-dire qui amplifient beaucoup le réchauffement. D'autres montrent des rétroactions globales faiblement négatives, qui diminuent légèrement le réchauffement. Les modèles qui prévoient la rétroaction positive globale la plus forte finissent par prédire une ECS située à l'extrémité supérieure de la fourchette 2-4,5 °C.

Une autre raison pour laquelle il n'est pas surprenant que les modèles simulent impar-

faitement les nuages est que les différents processus à l'œuvre vont des petites aux grandes échelles. La formation des nuages et leurs effets radiatifs impliquent de minuscules gouttelettes d'eau et cristaux de glace. La thermodynamique et les mouvements des masses nuageuses mettent en jeu des échelles plus grandes et, à l'échelle planétaire, les nuages recouvrent généralement plus de 70% de la Terre à chaque instant. Or, lorsque nous effectuons des simulations à partir d'un modèle

informatique, nous devons faire un choix: faire un zoom avant et simuler explicitement les mouvements turbulents des gouttelettes qui font que chaque nuage se forme et se dissipe dans une petite zone, ou bien simuler les mouvements à grande échelle des masses d'air ascendantes et descendantes qui répartissent la vapeur d'eau autour de la planète. Nous ne pouvons pas faire les deux, car suivre soigneusement le comportement de chaque gouttelette d'eau dans toute l'atmosphère et à tout instant nécessiterait une puissance de calcul beaucoup trop grande.

Nous essayons donc de combiner les petites et les grandes échelles, en sachant que cela nécessitera des compromis. Dans un modèle climatique global, on essaie de trouver des paramètres simplifiés permettant de décrire l'ensemble de ces comportements. Nous élaborons ces paramètres en nous fondant sur la physique de l'atmosphère et nous les testons et les améliorons en effectuant des comparaisons avec des modèles décrivant les plus petites échelles et exécutés sur de petites régions du globe. Néanmoins, il n'existe pas de façon parfaite de mélanger petites et grandes échelles.

NUAGES ÉLEVÉS, NUAGES BAS

Attaquons-nous au premier problème: les nuages de haute altitude. Les mesures nous donnent de bonnes raisons de penser que le changement climatique va réorganiser l'atmosphère et repousser vers le haut la frontière entre la troposphère – la basse atmosphère où se produisent les phénomènes météorologiques – et la stratosphère, juste au-dessus d'elle. Les nuages d'altitude, pensons-nous, vont s'élever avec cette frontière.

Mark Zelinka, du laboratoire américain Lawrence-Livermore, en Californie, a beaucoup travaillé sur les implications de cette élévation. Selon lui, comme la planète se réchauffe en raison des émissions de CO₂, elle pourrait se refroidir en dissipant de l'énergie sous la forme de rayonnement infrarouge vers l'espace. Si les nuages élevés restent à leur altitude habituelle, ils se réchaufferont comme l'atmosphère et, ce faisant, la quantité de chaleur qu'ils évacuent vers l'espace augmentera. Cependant, Mark Zelinka et d'autres spécialistes pensent que ces nuages s'élèveront de telle façon qu'ils conserveront à peu près leur température actuelle. En conséquence, ils n'émettraient pas autant d'énergie thermique excédentaire dans l'espace, ce qui réchaufferait encore plus l'atmosphère. Il s'agit ainsi d'une rétroaction positive: en s'élevant de plus en plus, les nuages d'altitude réduisent la capacité de la planète, en phase de réchauffement, à se refroidir.

Qu'en est-il à présent des nuages bas? Les modèles climatiques semblent s'accorder sur

Les nuages ont des effets dont certains amplifient le réchauffement, tandis que d'autres l'atténuent

faitement les nuages est que les différents processus à l'œuvre vont des petites aux grandes échelles. La formation des nuages et leurs effets radiatifs impliquent de minuscules gouttelettes d'eau et cristaux de glace. La thermodynamique et les mouvements des masses nuageuses mettent en jeu des échelles plus grandes et, à l'échelle planétaire, les nuages recouvrent généralement plus de 70% de la Terre à chaque instant. Or, lorsque nous effectuons des simulations à partir d'un modèle

Le fait qu'un globe plus chaud signifie moins de nuages bas. Cependant, Mark Webb, climatologue au Met Office (le service météorologique du Royaume-Uni) et participant au *Cloud Feedback Model Intercomparison Project*, sait que l'affaire est plus compliquée. Pourquoi y aurait-il moins de nuages bas? Le mécanisme semble dépendre de la façon dont l'air humide des nuages bas est dilué par la convection ou la turbulence de l'air plus sec situé au-dessus. Selon Mark Webb, les modèles habituels n'ont pas la puissance de calcul nécessaire pour représenter directement ces processus locaux et finissent par en donner des approximations différentes. Les divers modèles montrent des changements plus ou moins importants dans la couverture nuageuse basse. Mais, fait décisif, la plupart d'entre eux prévoient des réductions. Or moins de nuages bas signifie moins de lumière solaire réfléchi vers l'espace – une rétroaction positive supplémentaire, qui amplifie le réchauffement.

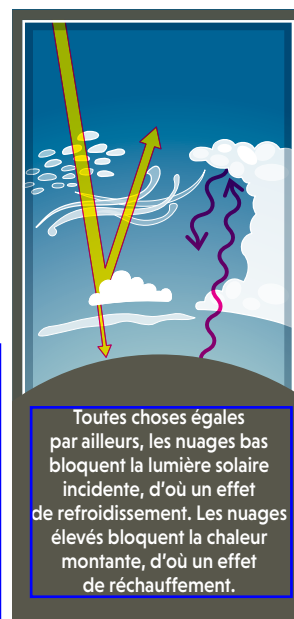
Un autre effet encore est à considérer. La circulation globale de l'atmosphère est en grande partie régie par les différences d'ensoleillement et de température entre l'équateur et les pôles. L'air tropical chaud s'élève et, ce faisant, se refroidit. Les hauteurs du ciel atteintes, il commence à se déplacer latéralement vers les pôles, plus froids. En cours de route, il se refroidit suffisamment pour redescendre vers la surface, à une latitude d'environ 30 degrés, tout en se réchauffant et en s'asséchant. Au sol, on obtient des climats pluvieux sous la bande tropicale d'air qui s'élève et perd de l'eau en se refroidissant, tandis qu'on a des climats de type désertique sous les bandes où l'air descend.

Le changement climatique va modifier ce schéma. Les hautes latitudes septentrionales vont se réchauffer plus rapidement que les tropiques; ce phénomène, nommé amplification arctique, réduit la différence de température entre les pôles et l'équateur. Cette réduction, qui est déjà en cours, entraîne d'autres changements. Le fait le plus important, peut-être, est que les tropiques s'étendent, ce qui pousse en direction des pôles les bandes pluvieuses et les bandes sèches. Au sol, il s'ensuit que les zones marginales – les régions méditerranéennes, le Sahel, le Sud-Ouest américain – vont probablement devenir plus arides.

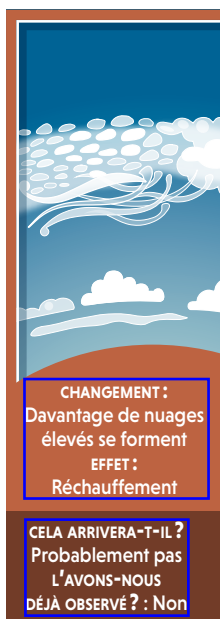
De fait, les observations satellitaires que j'ai analysées récemment avec Céline Bonfils, du laboratoire Lawrence Livermore, montrent que les zones de précipitations se déplacent exactement comme prévu. Si les nuages suivent cette migration, alors des couches de nuages réfléchissants pourraient se décaler des basses latitudes aux latitudes élevées, où le rayonnement solaire incident est plus faible, ce qui réduira leur effet refroidissant par rapport à

LES EFFETS DES CHANGEMENTS DANS LA COUVERTURE NUAGEUSE

Globalement, des changements de latitude ou d'altitude des nuages, ou dans leur composition en eau liquide et glace, peuvent entraîner un réchauffement ou un refroidissement. Certains des changements représentés ici sont déjà en cours, selon les données satellitaires. Jusqu'à présent, ils semblent conduire à un réchauffement, une tendance qui pourrait s'accroître.



Toutes choses égales par ailleurs, les nuages bas bloquent la lumière solaire incidente, d'où un effet de refroidissement. Les nuages élevés bloquent la chaleur montante, d'où un effet de réchauffement.



CHANGEMENT :
Davantage de nuages élevés se forment
EFFET :
Réchauffement

CELA ARRIVERA-T-IL ?
Probablement pas
L'AVONS-NOUS
DÉJÀ OBSERVÉ ? : Non

celui qu'ils exerçaient dans leur position habituelle au-dessus des tropiques.

Un autre facteur complique encore la situation et doit être pris en compte par les modèles climatiques améliorés: un monde plus chaud peut modifier la composition même des nuages. Les nuages sont formés de minuscules gouttelettes d'eau liquide et de cristaux de glace. Les nuages bas et épais sont riches en eau liquide et sont donc plus opaques que les nuages élevés et fins, riches en glace. En situation de réchauffement, une plus grande partie de la glace contenue dans les nuages élevés se transforme en liquide, ce qui les rend plus opaques et bloque une plus grande partie de la lumière solaire incidente. Avec ce dégel, les nuages de glace deviendront plus «juteux», selon les termes de Mark Zelinka, d'où une rétroaction négative qui limite le réchauffement.

UNE PRÉVISION PLUS POINTUE

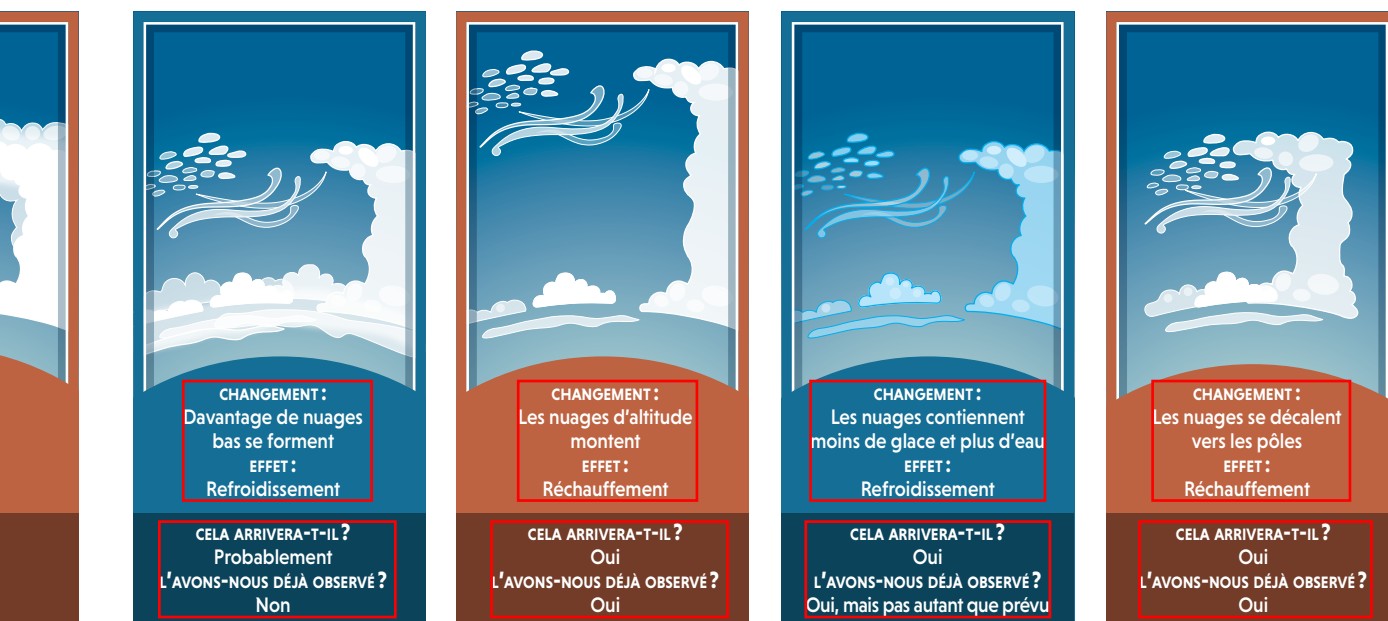
En raison de la nature changeante des nuages, il semble encore plus difficile pour les modèles climatiques d'affiner la prévision de la hausse des températures, c'est-à-dire de réduire la fourchette 2-4,5 °C. Mais il existe à ce propos des observations révélant l'histoire de ce qui s'est déjà passé.

Les mesures portant sur les nuages ont en pratique débuté au moment où l'on a commencé à mettre des satellites météorologiques en orbite, dans les années 1980. Pour améliorer nos modèles, nous pouvons comparer leurs prévisions du climat actuel à ces mesures. Cependant, certaines des anciennes mesures effectuées par satellite peuvent poser problème. Les instruments d'imagerie embarqués

À PROPOS DE L'AUTEUR



KATE MARVEL est chercheuse au département de physique appliquée et mathématiques appliquées de l'université Columbia et à l'institut Goddard d'études spatiales de la Nasa. Elle a écrit dans divers magazines et tient un blog (<http://marvelclimate.blogspot.fr/>) ainsi qu'un site internet (www.marvelclimate.com).



dans les satellites d'observation de la Terre repèrent des nuages en recherchant des objets réfléchissants sur des fonds sombres, mais ils ont du mal à distinguer des objets blancs différents, en particulier des nuages glacés situés au-dessus d'un sol enneigé. En outre, des nuages élevés peuvent cacher des changements dans la couverture nuageuse plus basse.

Toutefois, nos observations se sont fortement améliorées cette dernière décennie, notamment grâce à l'*A-Train* (ou *Afternoon Constellation*) de la Nasa, un ensemble de six satellites d'observation de la Terre évoluant en orbites coordonnées. L'un d'entre eux, *CloudSat*, est équipé d'un radar dont les ondes pénètrent facilement les nuages, ce qui permet de déterminer les précipitations. Un autre, *Calipso*, est muni d'un «lidar», un analogue du radar pour le laser, qui permet de distinguer les aérosols des nuages et de déterminer avec précision l'altitude de ceux-ci et leur phase thermodynamique (cristaux de glace ou gouttelettes liquides).

Ces satellites ont amélioré notre compréhension de la couverture nuageuse et ont fourni des indices sur la façon dont les nuages pourraient changer dans le futur. Par exemple, les observations semblent appuyer l'idée selon laquelle les nuages d'altitude vont s'élever encore plus à mesure que la Terre se réchauffe, et réduiront ainsi la capacité de la planète de se refroidir par elle-même. Et une étude récente a montré qu'une partie seulement des nuages élevés contiennent effectivement plus d'eau et moins de glace. Cela signifie que la rétroaction négative associée aux nuages devenus plus «juteux» pourrait ne pas être aussi forte que nous l'avions pensé.

BIBLIOGRAPHIE

J. R. Norris et al., **Evidence for climate change in the satellite cloud record**, *Nature*, vol. 536, pp. 72-75, 2016.

K. Marvel et al., **External influences on modeled and observed cloud trends**, *Journal of Climate*, vol. 28(12), pp. 4820-4840, 2015.

O. Boucher et al., **Clouds and aerosols**, dans *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of the IPCC* (sous la dir. de T. F. Stocker et al.), pp. 571-658, Cambridge University Press, 2013.

CloudSat et *Calipso* ayant été lancés en 2006, leurs données ne sont pas encore suffisantes pour que nous puissions détecter des effets du changement climatique se détachant du fond des fluctuations climatiques normales. Pour avoir plus de recul, les scientifiques regroupent des observations plus anciennes provenant de satellites météorologiques. Deux tentatives intéressantes sont à noter : l'*International Satellite Cloud Climatology Project* et le projet *Pathfinder Atmospheres-Extended*. Malgré les différences dans l'étalonnage des instruments satellitaires et dans les instants de la journée auxquels les données ont été recueillies, ces enregistrements livrent des indications utiles, à condition de savoir où regarder. Dans une étude de 2015, Mark Zelinka et moi avons essayé.

Nous nous sommes d'abord posé une question simple : d'après ces observations, quelles sont les latitudes les plus nuageuses et celles qui sont les plus dégagées ? Comme prévu, nous avons trouvé un pic de nébulosité dans les tropiques. La couverture nuageuse était aussi relativement élevée dans d'étroites bandes sous des latitudes moyennes, où les tempêtes sont poussées par les vents dominants. Sous les latitudes «désertiques» subtropicales, la pression atmosphérique élevée engendre des conditions sèches et ensoleillées qui gênent la formation des nuages – ce sont les bandes les plus dégagées.

Nous avons ensuite cherché à savoir si les bandes les plus nuageuses et les bandes les plus dégagées ont changé de latitude au cours des enregistrements à long terme des satellites météorologiques, de 1984 à 2009.

➤ Ce que nous avons découvert est remarquable: les zones les plus nuageuses des latitudes moyennes et les zones les plus dégagées des latitudes subtropicales se décalent vers les pôles, exactement comme les modèles nous l'indiquaient. Qui plus est, chacun des ensembles indépendants de données était en accord avec l'idée que les changements de circulation atmosphérique tirent vers les pôles les zones de couverture nuageuse. En comparant avec ce qu'indiquent des modèles climatiques où ne sont pas intégrées les émissions humaines de gaz à effet de serre, nous avons établi que ces changements étaient trop importants pour être attribuables à la seule variabilité naturelle du climat. Et ces changements sont plus importants qu'on ne l'avait prévu.

Les implications sont inquiétantes. Si des couches de nuages bas, réfléchissants, se décalent trop vers les pôles, alors leur pouvoir de refroidissement sera notablement réduit: ils bloqueront en effet une lumière solaire faible, tempérée, au lieu d'une lumière solaire intense, tropicale. Cette migration du système nuageux constituerait une forte rétroaction positive et indiquerait une sensibilité du climat plus élevée.

Une étude ultérieure conduite par Joel Norris, de l'université de Californie à San Diego, qui a pris en compte des artéfacts connus dans les observations satellitaires, a aussi mis en évidence un décalage vers les pôles des couches nuageuses. Ces données suggèrent également que les nuages d'altitude pourraient s'élever. Les scientifiques débattent de la signification de ces changements et se demandent si ceux-ci peuvent être attribués aux émissions de gaz à effet de serre, à la variabilité naturelle du climat, aux particules rejetées dans l'atmosphère par l'éruption du mont Pinatubo ou à une combinaison de ces facteurs. Mais une chose est claire: les observations à long terme n'indiquent en aucune façon que les nuages vont ralentir le réchauffement climatique.

LES NUAGES NE NOUS SAUVERONT PAS

Ainsi, dans le tableau qui émerge de ces observations, les nuages d'altitude s'élèvent et les systèmes nuageux se déplacent généralement vers les pôles. Ces deux tendances devraient accélérer le réchauffement de la planète. Les observations à courte échelle de temps suggèrent que les nuages tropicaux bloqueront moins de lumière solaire, accroissant ainsi le réchauffement, et que les nuages en dégel pourraient constituer un plus faible frein au réchauffement qu'on ne l'avait imaginé. Il y a là peu de choses pour nous réconforter.

Faut-il alors penser que les nuages porteront le réchauffement plus près de l'extrémité supérieure de la fourchette de l'ECS? La

MIEUX COMPRENDRE LE RÔLE DES NUAGES D'ALTITUDE

Comme ils recouvrent environ 30 % du globe, les nuages de la haute troposphère jouent un rôle clé dans le bilan d'énergie de la Terre et dans le transport de la chaleur. Abondants sous les tropiques, ces nuages prennent la forme soit d'« enclumes » de cirrus résultant de mouvements de convection profonde, soit de cirrus lorsque l'air froid devient sursaturé en glace.

Le changement climatique modifiera la convection tropicale, donc les systèmes nuageux de la haute troposphère, ce qui aura un impact sur le chauffage de l'atmosphère. Or les changements dans des gradients de chauffage

influencent sur la circulation atmosphérique, d'où une modification des zones de précipitations intenses.

Reste que la relation entre les enclumes de cirrus et la convection est mal représentée dans les modèles climatiques. Pour élucider ces interactions complexes, il faut combiner observations satellitaires, analyses des transferts de chaleur et modélisations à différentes échelles.

Les systèmes convectifs et leur structure horizontale d'opacité sont obtenus à partir du sondeur infrarouge de la constellation de satellites A-Train, tandis que leur structure verticale est déterminée grâce aux instruments actifs (radar et lidar) d'A-Train. Cela a permis de relier la structure horizontale des enclumes à l'intensité de convection. Il semble que les tempêtes tropicales plus intenses contiennent relativement plus de cirrus fins dans leurs enclumes et autour; cela pourrait avoir un effet sur la circulation atmosphérique à grande échelle.

La prochaine étape sera de mener des simulations à différentes échelles pour reproduire ce comportement, en testant divers mécanismes relatifs à la formation et au maintien des enclumes.

CLAUDIA STUBENRAUCH
Laboratoire de météorologie dynamique/Institut Pierre-Simon-Laplace, Paris

C. J. Stubenrauch et al.,
Atmosph. Chem. Phys., vol. 17,
pp. 13625-13644, 2017.

sensibilité du climat à l'équilibre est une quantité théorique. Elle décrit la réaction finale du climat à un doublement rapide de la concentration atmosphérique en CO₂ – un scénario artificiel qui offre une voie bien réelle à explorer. L'augmentation de la concentration en CO₂ n'est cependant pas théorique; le doublement se produira vers le milieu du siècle si tous les pays restent sur leur lancée actuelle. Davantage d'observations satellitaires, des modèles de plus haute résolution et l'arrivée de jeunes scientifiques créatifs nous aideront à trouver la réponse à cette question brûlante: de combien de degrés la Terre se réchauffera-t-elle?

Entre-temps, un gros travail est à mener sur une autre quantité que les émissions de gaz à effet de serre, qui a elle aussi obstinément refusé de bouger: les 50% de la population états-unienne qui refusent d'admettre que l'humanité est en train de changer le climat (autour de 25% dans d'autres pays tels que le Canada et la France). En fin de compte, si les émissions de CO₂ se poursuivent sans répit, la Terre va beaucoup se réchauffer. Les nuages, semble-t-il, ne feront qu'aggraver le problème et, au mieux, ne l'allégeront en rien. C'est à l'humanité que cette tâche incombe. ■

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ



FORMULE PASSION
-28%



FORMULE DÉCOUVERTE
-25%



FORMULE INTÉGRALE
-42%



BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ **FORMULE INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

8,20€
Par mois
-42%
PV8E2U

☐ **FORMULE PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

6,50€
Par mois
-28%
PPV6E5U

☐ **FORMULE DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

4,90€
Par mois
-25%
DPV4E2U

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____ @ _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

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

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) : _____

IBAN : _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

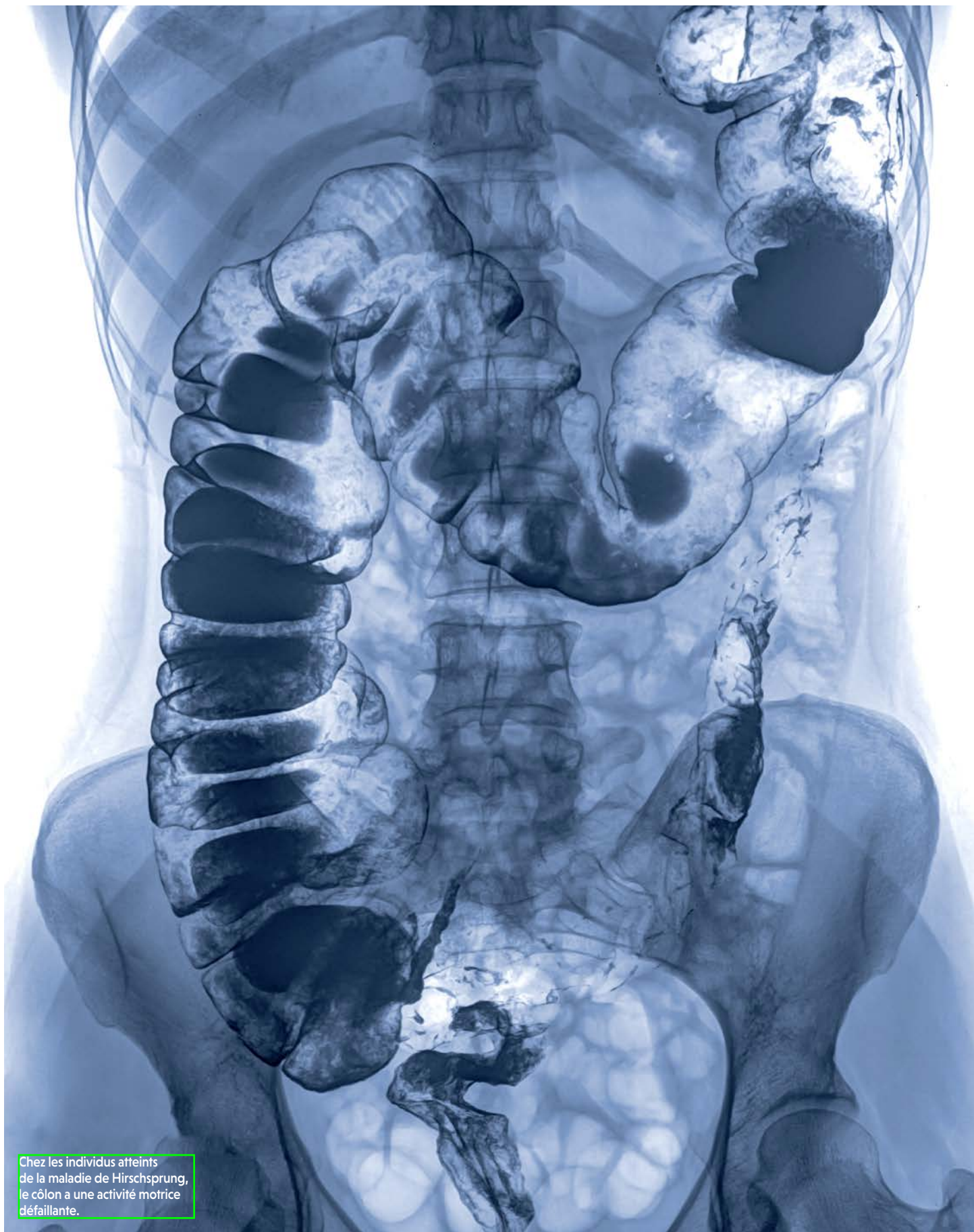
Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/06/2018 en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.



Chez les individus atteints de la maladie de Hirschsprung, le côlon a une activité motrice défaillante.

L'ESSENTIEL

> La maladie de Hirschsprung touche 1 nouveau-né sur 5 000 environ.

> Elle se manifeste par une constipation chronique qui, sans opération chirurgicale, peut être létale.

> En recherchant les causes de la maladie, les biologistes ont mis au jour, à partir des

années 1960, un mécanisme clé du développement embryonnaire : la formation du système nerveux de l'intestin.

> Aujourd'hui, diverses équipes continuent à caractériser les gènes impliqués dans la maladie, avec l'espoir de prévenir ses formes les plus graves et de percer d'autres mystères de l'intestin.

L'AUTEUR



NICOLAS CHEVALIER
chargé de recherche
en embryologie physique
au CNRS au laboratoire
Matière et systèmes complexes,
à l'université Paris-Diderot

Le mystère Hirschsprung

La maladie de Hirschsprung, qui affecte l'intestin, a longtemps été une énigme. Aujourd'hui, non seulement on saisit mieux ses causes, mais leur exploration a renouvelé notre compréhension du développement embryonnaire.

Berlin 1886, congrès annuel des maladies infantiles. Le pédiatre danois Harald Hirschsprung présente le cas de deux enfants morts en bas âge d'un déficit alimentaire lié à une constipation chronique. À l'autopsie, leur côlon s'est révélé hypertrophié : le bol alimentaire s'y était accumulé, distendant l'organe et y entraînant une inflammation prononcée. Le diagnostic est posé, mais la cause de la constipation échappe à Hirschsprung, qui ne décèle aucun obstacle visible au passage du bol alimentaire. La maladie, qui porte aujourd'hui son nom, frappe 1 nouveau-né sur 5000 dans le monde. Une maladie rare, donc. Pourtant, son étude non seulement a permis un traitement chirurgical qui conduit à une guérison dans 95% des cas, mais a été – et est encore – un fil d'Ariane pour la compréhension du développement de l'intestin et même, plus généralement, de l'embryon.

Durant les cinquante ans qui ont suivi la présentation de Hirschsprung, aucune piste de traitement n'a émergé. Comme on soupçonnait la partie hypertrophiée du côlon d'être à l'origine de la pathologie, on pratiquait son ablation, sans effet. C'est seulement en 1948 qu'un chirurgien d'origine danoise, Orvar

Swenson, alors interne au Children's Hospital de Boston, a remis en cause le raisonnement justifiant ce procédé opératoire. On avait admis dans son service un enfant atteint de la maladie et maintenu en vie grâce à une colostomie – une dérivation du côlon hypertrophié débouchant directement sur la peau : le bout de côlon relié à l'anus avait été suturé et laissé en place. À l'aide d'un ballon manométrique, Swenson mesura les variations de pression au niveau de la colostomie et de l'anus : alors que le côlon anciennement hypertrophié relié à la colostomie se contractait normalement, le côlon distal, situé juste au-dessus de l'anus, semblait inerte. Swenson en avait la preuve, on confondait cause et symptôme : c'était l'accumulation des chymes – le bol alimentaire digéré – qui causait l'hypertrophie et l'inflammation. La constipation, elle, était due à l'étranglement lié à l'activité contractile défaillante du côlon distal.

Swenson proposa donc de réaliser l'opération inverse : conserver le côlon hypertrophié, mais extraire la partie étroite la plus distale. Après quelques essais sur des chiens, le jeune patient fut le premier malade guéri par la méthode Swenson ; il vit encore aujourd'hui et a eu quatre enfants.

HIRSCHSPRUNG ET GENRE

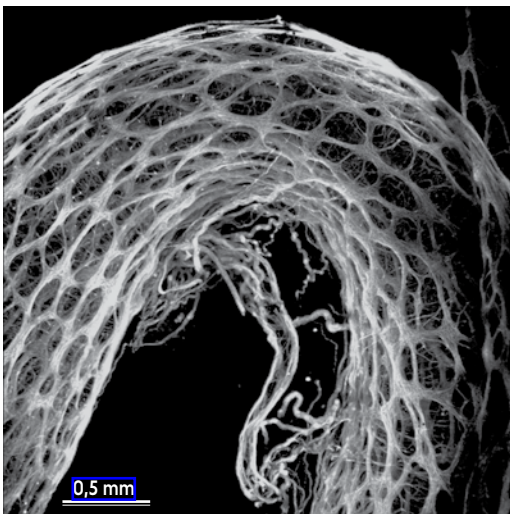
La maladie de Hirschsprung touche principalement les garçons, avec quatre garçons concernés pour une fille. La cause de cette différenciation reste inconnue. En particulier, à l'heure actuelle, aucun gène impliqué dans la maladie n'a été détecté sur le chromosome X.

Swenson alla plus loin. Il analysa les morceaux de côlon distal ôtés à la suite de l'opération et nota l'absence systématique de neurones entériques. Les neurones entériques constituent le système nerveux intrinsèque de l'intestin : on en dénombre 100 millions chez l'adulte, lesquels s'organisent en deux filets concentriques qui tapissent le tube digestif sur toute sa longueur (voir l'encadré ci-contre). Le filet interne régule l'activité chimique de la digestion, l'adsorption des nutriments, les flux enzymatiques. L'anneau plus périphérique est pris en sandwich entre deux couches de muscles : cet ensemble muscle-neurone enclenche et contrôle le mouvement péristaltique qui permet l'avancée du bol alimentaire. L'absence de neurones dans les côlons malades expliquait donc naturellement leur insuffisance péristaltique. Mais pourquoi les malades étaient-ils dépourvus de neurones à cet endroit précis ?

DES NEURONES VENUS D'AILLEURS

La réponse nous projette dans les années 1960, dans un des plus grands centres d'élevage murin pour la biologie, le laboratoire Jackson, dans le Maine, aux États-Unis. Plus de 7000 lignées de souris génétiquement identifiées y sont conservées, pour la plupart sous forme d'ovules et de spermatozoïdes congelés. La biologiste Priscilla Lane s'intéressait à deux lignées en particulier, nommées *lethal spotted* et *piebald lethal*. Un quart des souriceaux de ces lignées mouraient quelques jours après la naissance et présentaient, comme les enfants décrits par Hirschsprung, un côlon hypertrophié. Ces lignées fournissaient de toute évidence un modèle animal précieux. Le pelage de ces mêmes souriceaux était en outre parsemé de grandes zones de dépigmentation qui leur donnaient une apparence tachetée caractéristique.

Ce défaut de pigmentation mit la puce à l'oreille de plusieurs chercheurs. On savait que les cellules produisant les pigments de la peau, les



Le système nerveux entérique forme une maille régulière imbriquée dans la paroi intestinale. Ici celui d'un poulet marqué en fluorescence, l'intestin ayant été rendu transparent.

COMMENT L'INTESTIN SE CONTRACTE

Lorsque vous mangez, les aliments, malaxés et broyés, sont propulsés par l'intestin. Comment ? Grâce à un processus mécanique nommé **péristaltisme** : un mouvement coordonné de relaxation des muscles en aval du bol alimentaire et de contraction en amont qui permet son transport. Cette danse est orchestrée par le système nerveux de l'intestin – ou système nerveux entérique – réparti dans sa paroi sous la forme de deux filets cylindriques et concentriques. Le filet externe (le plus périphérique) contrôle les couches de muscles permettant l'avancée du bol alimentaire par péristaltisme. Le filet interne régule les flux chimiques (nutriments, enzymes, etc.) traversant la paroi intestinale. Ces deux tissus nerveux sont visibles en histologie par marquage au nitrate d'argent, par exemple.

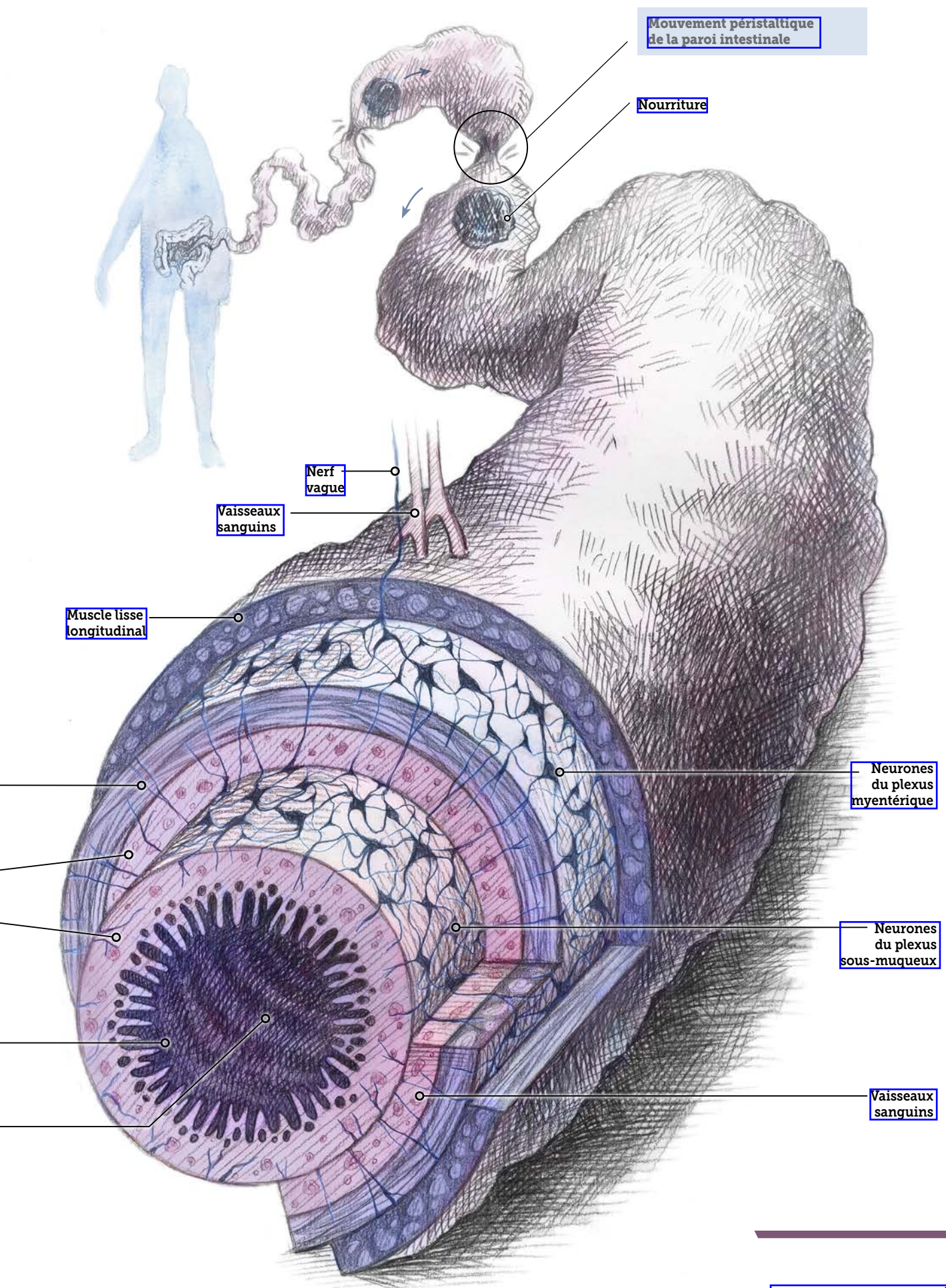
Notre système nerveux entérique compte 100 millions de neurones, mais a peu de connexions avec le cerveau : seuls 2 000 neurones assurent cette fonction (dont le nerf vague). Il fonctionne de façon autonome : disséquez l'intestin et déconnectez son système nerveux du reste de l'organisme, l'organe continuera de fonctionner normalement en culture. Il utilise par ailleurs plus de 35 neurotransmetteurs différents (les messagers chimiques des neurones), dont certains sont distincts de ceux trouvés dans le cerveau, et abrite 90 % des réserves en sérotonine – l'un de ces neurotransmetteurs – du corps humain. L'ensemble de ces propriétés lui vaut le surnom de « deuxième cerveau ».

Muscle lisse
circulaire

Muqueuse

Épithélium

Lumen



▼ mélanocytes, provenaient d'une structure transitoire commune à tous les vertébrés, la crête neurale (voir la figure ci-dessous). Or quelques années plus tôt, en 1954, Chester Yntema et Warner Hammond, à l'université d'État de New York à Syracuse, avaient publié une étude exhaustive décrivant les effets de l'ablation de différents segments de la crête neurale sur le développement de l'embryon de poulet. La suppression du segment dit vagal de la crête avait donné lieu à un intestin... dépourvu de neurones entériques! Sans percevoir le lien avec la maladie, les chercheurs avaient fabriqué un poulet « Hirschsprung ».

DES CHIMÈRES À LA RESCOUSSE

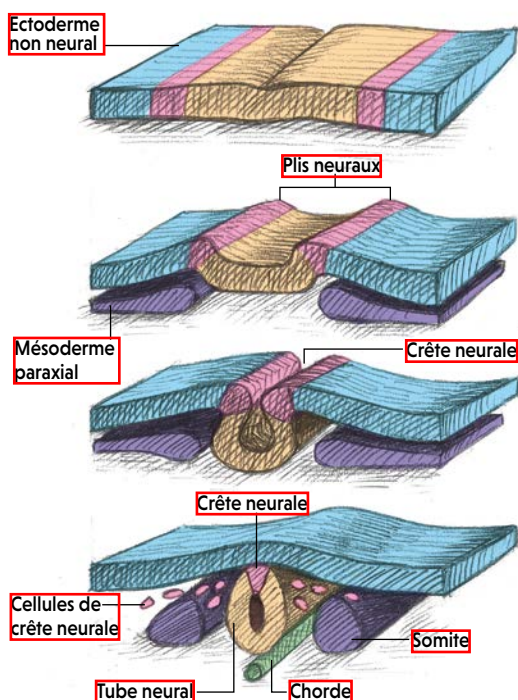
On y voyait d'un coup plus clair: les mélanocytes et les cellules nerveuses de l'intestin provenaient d'une même population de cellules migrantes, les cellules de la crête neurale. L'affection à la fois pigmentaire et intestinale des souris de Priscilla Lane s'expliquait donc tout naturellement en supposant que cette population cellulaire ne migrait pas correctement au cours de l'embryogenèse. Le pas conceptuel était énorme. Plus tard, cette idée donna naissance à la notion plus générale de neurocristopathie, qui regroupe toutes les anomalies du développement et les tumeurs dont l'origine est un dysfonctionnement des cellules de la crête neurale. La maladie de Hirschsprung est l'une d'elles, de même que le syndrome de Waardenburg, qui se caractérise par des défauts de pigmentation, une surdité et des malformations crâniennes, ou la maladie de DiGeorge, qui se traduit par l'absence

de thymus et de parathyroïde, et par des malformations cardiaques.

La maladie de Hirschsprung était donc due à un défaut de migration de cellules de la crête neurale vers l'intestin. Mais comment ces cellules, qui partent du pli embryonnaire primordial, se retrouvaient-elles dans l'intestin de l'animal en développement?   la fin des années 1960, Nicole le Douarin, alors à la faculté des sciences de Nantes, introduisit une approche nouvelle et moins invasive que l'ablation. Elle avait remarqué que les cellules de caille se distinguent facilement de celles du poulet par une coloration biochimique dite de Feulgen. Elle remplaça des segments de crête neurale de poulet par des morceaux prélevés chez la caille, juste avant que les cellules n'entament leur migration, et mit ces chimères caille-poulet à incuber. Puis, en analysant leurs tissus au cours du développement grâce à la coloration de Feulgen, elle suivit le devenir des cellules de caille.

Cette méthode présentait un avantage déterminant par rapport aux injections d'encre colorées utilisées jusqu'alors: l'encre se diluait au fil des divisions cellulaires jusqu'à devenir imperceptible, tandis que les cellules de caille transplantées continuaient à se diviser et s'intégraient à merveille dans ces chimères caille-poulet. La coloration de Feulgen révéla les trajectoires étranges des cellules de la crête neurale, comme les filons d'un gisement minier. Les cellules vagues entraient dans le tube digestif au niveau du futur œsophage, puis le d valaient jusqu' u côlon (voir la photo page ci-contre) en migrant à l'intérieur de la paroi de l'intestin en formation. Chez l'embryon humain, cet exode cellulaire

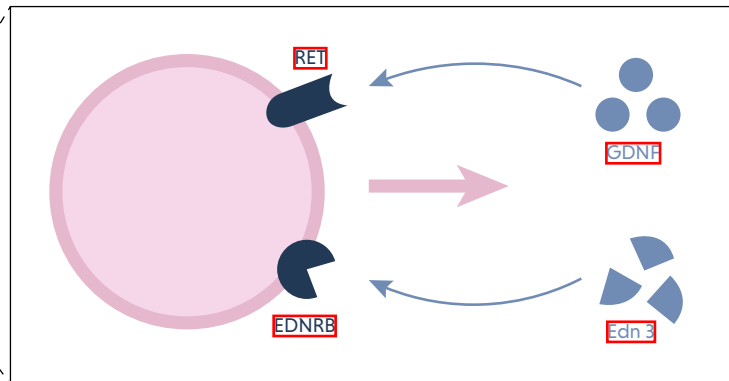
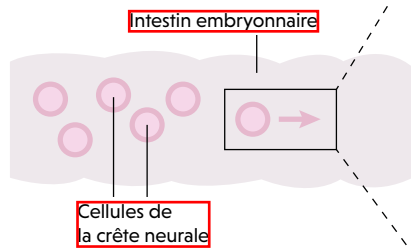
Environ 24 heures après la fertilisation, un embryon de poulet est un disque de cellules replié sur lui-même (  droite). Les deux plis neuraux se rencontrent pour former un tube qui abritera la future colonne vertébrale. Les cellules de la crête neurale – la zone supérieure du tube neural – migrent alors dans l'embryon pour former des structures diverses comme les os de la mâchoire, le cartilage des oreilles, des tissus cardiaques, le système nerveux périphérique et celui de l'intestin. On dit qu'elles sont multipotentes.



UN CHEMIN BALISÉ

Deux signaux biochimiques sont indispensables pour que les cellules de la crête neurale colonisent le tissu intestinal embryonnaire. Chacun est constitué d'un couple de protéines : un ligand et son récepteur. Les deux ligands sont GDNF et edn3, des protéines synthétisées dans le tube digestif en amont du front de migration. Ils attirent les cellules de la crête neurale qui expriment leurs récepteurs

– respectivement RET et EDNRB – sur leur membrane et se fixent à eux, ce qui les active. L'activation de RET a un effet chimotactique : elle provoque la migration des cellules vers la source de GDNF, ce qui permet aux cellules de s'orienter dans l'embryon. L'activation d'EDNRB commande aux cellules de la crête neurale de continuer à se diviser et de ne pas encore se différencier en neurone ou cellule gliale du futur système nerveux entérique.



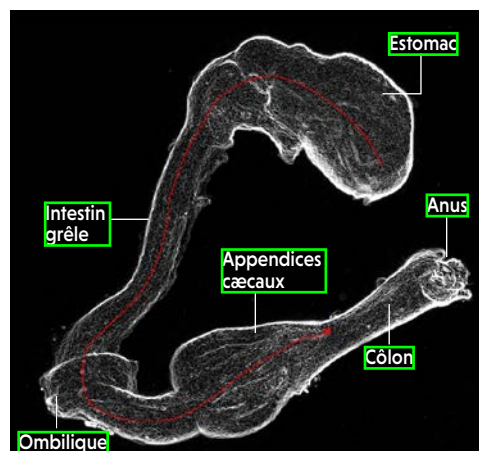
commence dès la quatrième semaine de gestation et dure entre cinq et douze semaines. Une fois en place, les cellules de la crête neurale se différencient progressivement en neurones qui composeront le système nerveux entérique.

Dans les années 1970-1980, grâce à cette nouvelle compréhension de la migration des cellules de la crête neurale, diverses équipes ont éclairci le cas des souris du laboratoire Jackson. En réalisant des greffes d'intestin de souris donneuses de crête neurale entérique sur des côlons de souris hôtes, elles montrèrent que le mégacôlon de la lignée *piebald lethal* était dû à un déficit migratoire des cellules de la crête neurale elle-même, tandis que celui des souris *lethal spotted* était lié à une anomalie dans le tissu d'accueil des cellules migrantes, le côlon embryonnaire. Les techniques de génie génétique étaient alors en plein essor : on serait bientôt en mesure d'identifier les mutations génétiques délétères dans chacune des lignées, de trouver les protéines codées par les gènes concernés et de remonter ainsi au mécanisme moléculaire du défaut de migration. L'histoire prit à rebrousse-poil ce scénario sans doute trop prévisible.

En 1988, le biochimiste japonais Masashi Yanagisawa et son équipe découvrirent trois petites protéines impliquées dans la régulation de la pression sanguine, les endothélines. Pour agir, ces protéines doivent s'associer à des récepteurs spécifiques localisés sur les membranes cellulaires. L'endothéline 3 ou *edn3*, par exemple, se lie avec une grande affinité au récepteur EDNRB. Plusieurs traitements de l'hypertension artérielle sont d'ailleurs fondés sur des

molécules de synthèse qui s'accrochent à ces récepteurs. En quête d'une théorie moléculaire de la pression artérielle, les chercheurs japonais supprimèrent le gène codant l'endothéline 3 chez la souris. Surprise : la pression sanguine de l'animal était normale, mais son côlon hypertrophié et son pelage tacheté ! Sans le vouloir, ils avaient reproduit les souris qui, trente ans plus tôt, avaient intrigué Priscilla Lane au laboratoire Jackson. Plus précisément, il fut ensuite montré que chez les souris *lethal spotted*, le gène de l'endothéline 3 était muté, tandis que chez les souris *piebald lethal*, il s'agissait du gène de son récepteur, EDNRB (voir la figure ci-dessus).

Cela expliquait les résultats des expériences de greffes : le récepteur étant habituellement localisé sur les cellules de la crête neurale, son absence chez les souris *piebald lethal* empêchait



Au bout de sept jours de développement, l'intestin d'un embryon de poulet mesure environ 1 centimètre de l'estomac à l'anus (ci-contre). À ce stade, les cellules de la crête neurale ont parcouru le chemin indiqué en rouge et se trouvent à peu près à l'entrée du côlon. Si elles s'arrêtent là, le côlon adulte sera dépourvu de cellules nerveuses.

► la migration de ces cellules mutantes dans le côlon, lui-même sain; et chez les souris *lethal spotted*, l'absence du ligand *edn3*, habituellement produit par l'intestin embryonnaire, rendait impossible la migration des cellules de la crête neurale dans le tube digestif.

Quelques années plus tard, le groupe de Nicole Le Douarin montra que l'endothéline 3 stimule fortement la prolifération des cellules de la crête neurale et les maintient dans un état indifférencié. On comprenait donc mieux l'affection de certains bébés présentant l'association d'une maladie de Hirschsprung et d'anomalies de pigmentation de la peau (syndrome de Waardenburg de type 4) : en l'absence d'endothéline 3, les cellules de leur crête neurale s'étaient différenciées prématurément en neurones. Or ces derniers ne migrent pas. Ils n'avaient donc pas envahi la partie la plus terminale du tube digestif, le côlon. L'endothéline 3 endosse ainsi deux rôles dans l'organisme: elle régule la pression artérielle chez l'adulte et retarde la différenciation cellulaire chez l'embryon. On nomme *moonlighting* («travail au noir») la capacité d'une protéine à remplir plusieurs rôles; la recherche révélera peut-être à l'avenir une unité cachée derrière ces fonctions en apparence si différentes.

L'histoire n'était cependant pas terminée. Les études génétiques montrèrent que les gènes de l'endothéline 3 ou de son récepteur n'étaient mutés que chez 5% environ des cas humains de

Hirschsprung. L'endothéline était donc bel et bien un acteur de la maladie, mais *quid* des 95% restants? La découverte en 1994 d'une seconde famille de gènes impliqués dans la maladie brava les recherches sur un récepteur nommé RET.

LA PISTE DU CHROMOSOME 10

Le groupe d'Arnold Munnich, à l'hôpital Necker enfants malades, à Paris, ainsi que celui de Giuseppe Martucciello, à l'université de Gênes, avaient découvert un patient atteint d'aganglionose intestinale totale (une maladie de Hirschsprung très étendue) auquel il manquait un fragment de chromosome 10. Ce fragment contenait donc probablement un gène essentiel à la migration des cellules de la crête neurale dans l'intestin. Des études de corrélation de séquences d'ADN dans des familles comportant plusieurs sujets atteints de la maladie permirent de resserrer l'étau autour d'une région particulière de ce chromosome.

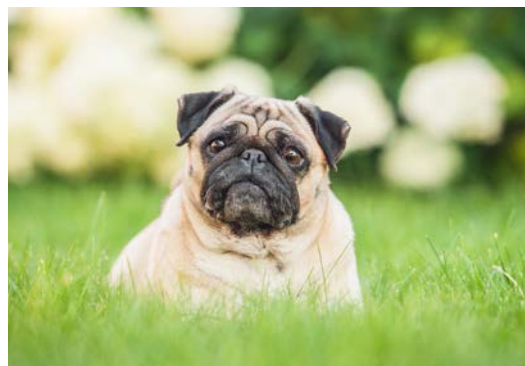
L'année suivante, on montra que nombre de malades portaient une mutation dans un gène de cette région qui codait le récepteur RET; l'invalidation des deux copies de ce gène chez la souris donnait lieu à des intestins dépourvus de ganglions nerveux ainsi qu'à des malformations rénales. La surexpression du gène menait au contraire à des cancers agressifs – de la thyroïde, par exemple. On trouve ici un exemple frappant d'un paradigme qui s'est imposé ces dernières années à la communauté scientifique: détournés

L'HYPOTHÈSE DE DOMESTICATION

La maladie de Hirschsprung a aidé à comprendre un tout autre phénomène: la domestication. Cette dernière consiste à croiser successivement des individus d'une espèce afin d'accentuer un trait, par exemple la masse d'entre-côte d'une vache ou la gentillesse d'un chien. Dans son ouvrage de 1868 *The Variation of Plants and Animals under Domestication*, Charles Darwin nota un ensemble de changements morphologiques et comportementaux communs à tous les mammifères sauvages domestiqués: ils deviennent plus dociles, leur pelage change de couleur et se tache, leurs dents et leur mâchoire rétrécissent, les oreilles jadis pointues tombent. Des changements similaires s'opèrent aussi chez les poissons, les oiseaux.

Leur origine demeurait mystérieuse jusqu'à ce qu'en 2014, Adam Wilkins, de l'université Humboldt, à Berlin, et ses collègues proposent une explication pour le moins séduisante. La sélection fondée sur la docilité tend à favoriser des individus ayant des réactions moins violentes. Or la violence est directement liée aux hormones de stress sécrétées par une partie de la glande surrénale dont les cellules proviennent de... la crête neurale. Un examen des changements observés par Darwin montre qu'ils sont tous liés à des organes formés par des cellules de la crête neurale: la mâchoire, les dents, le cartilage des oreilles, les pigments du pelage, etc. La domestication favoriserait ainsi, par des modifications génétiques ou épigénétiques, des individus ayant un léger déficit dans la quantité ou la vigueur migratoire des cellules de la crête neurale, ce qui se traduirait non seulement par une plus grande docilité, mais aussi par l'ensemble des traits que Darwin a constatés.

En 2017, une équipe menée par le paléogénéticien Ludovic Orlando, du Muséum d'histoire naturelle du Danemark et de l'université de Toulouse, a apporté une preuve en faveur de cette hypothèse: en étudiant le génome de chevaux d'un peuple nomade de l'âge du Fer, elle a montré qu'une forte proportion des mutations sélectionnées au cours de la domestication concernaient des gènes liés à la crête neurale.



chez l'adulte, les gènes de l'embryogenèse entraînent des cancers.

Quel est le rôle du récepteur RET dans la formation du système nerveux entérique? La réponse ne se fit pas attendre. Peu auparavant, on avait isolé une molécule, nommée GDNF, concentrée dans les reins et l'intestin d'embryons de grenouille. Des chercheurs firent le lien avec les déformations rénales et intestinales observées chez des souris dépourvues de RET. Suivant cette piste, ils montrèrent que GDNF était son ligand. À l'instar du couple *edn3-EDNRB*, le récepteur RET était exprimé à la surface des cellules de la crête neurale tandis que son ligand GDNF était concentré dans le tissu, devant le front de migration. Comme des fourmis tâtant de leurs antennes les traces de phéromones les menant à une source de nourriture, les cellules de la crête neurale suivaient la route du GDNF. Sans GDNF ou son récepteur RET, elles perdaient leur sens de l'orientation et ne migraient plus dans l'intestin.

UN MARATHON PÉRILLEUX

Ainsi, on connaît deux causes génétiques majeures de la maladie de Hirschsprung: des mutations touchant les couples *edn3-EDNRB* et *GDNF-RET*. On estime que la majorité des cas sont liés à un dysfonctionnement de la protéine RET. Cependant, des mutations du gène *RET* ne sont identifiées que dans environ 20 à 25% des cas. La majorité des patients produisent moins de protéine RET, conséquence d'une variation de régulation de l'expression du gène. Cette variation étant fréquente dans la population générale, elle ne suffit pas pour provoquer la maladie, mais constitue un facteur de prédisposition auquel s'ajoutent d'autres facteurs génétiques touchant un ou plusieurs gènes impliqués dans le développement du système nerveux intestinal.

Aujourd'hui, malgré ces avancées considérables et la découverte d'autres gènes impliqués, on ne sait établir de relation entre génotype et maladie que dans 50% des cas environ. Il est vraisemblable que les gènes susceptibles d'intervenir soient nombreux et variés. Plusieurs équipes, comme celle de Stanislas Lyonnet et Jeanne Amiel, à l'institut Imagine, à Paris, ou de Sylvie Dufour, à l'institut Mondor de recherche biomédicale, à Créteil, continuent de les caractériser.

On comprend en fait intuitivement que les causes de l'aganglionose du côlon sont multiples: pour coloniser l'ensemble du tube digestif, les cellules de la crête neurale doivent courir un marathon tout en se divisant. Ce périple est non seulement long, mais minuté: l'intestin s'allonge exponentiellement au cours du développement embryonnaire et atteint près de 3 mètres chez un nouveau-né. Les cellules migrantes ayant pris du retard courent le risque de ne pas franchir la ligne d'arrivée. Dans mon laboratoire, nous

avons par ailleurs montré que l'élasticité du tissu influe sur la migration: alors que les cellules de la crête neurale migrent initialement au travers d'un assemblage cellulaire très accommodant, celui-ci gagne en consistance d'heure en heure, déposant des fibres musculaires et de collagène qui structurent le tissu. Ces fibres et les muscles qui se différencient progressivement rendent la migration de plus en plus ardue. Des mutations des gènes codant le collagène ou des enzymes qui le découpent sont ainsi des candidats potentiels à certains cas non élucidés de la maladie et d'autres neurocristopathies.

Actuellement, l'identification des gènes impliqués dans la maladie de Hirschsprung permet de constater si une mutation associée est transmise au fœtus et de donner une probabilité d'apparition chez l'enfant. Néanmoins, on ne sait pas détecter le défaut de migration cellulaire durant la grossesse. De plus, à cause de l'expressivité variable des gènes impliqués, on ne sait pas non plus prévenir les formes les plus graves comme l'aganglionose totale, pour laquelle il n'existe aucune solution chirurgicale.

D'un point de vue thérapeutique, l'injection de cellules souches de la crête neurale pour rattraper les défauts d'innervation chez le nouveau-né est à l'étude. Des chercheurs ont ainsi récemment montré que, transplantées dans le côlon de souris *lethal spotted*, des cellules souches de la crête neurale humaine migraient et se différenciaient en neurones; toutes les souris transplantées ont survécu. Cependant, les difficultés sont encore nombreuses avant de passer à l'humain: quelle source de cellules souches? Comment les injecter et évaluer, au-delà du taux de survie, le rétablissement de la fonction digestive? Pour l'heure, la chirurgie reste la meilleure solution: des améliorations de la procédure de Swenson permettent de mieux préserver l'innervation du rectum et de la vessie et mènent à une guérison dans 95% des cas; les taux de complication postopératoire sont de l'ordre de 5 à 15%.

On dit souvent que la recherche du *xxi*^e siècle sera l'œuvre d'équipes spécialisées organisées dans des consortiums multinationaux. La vision romantique du savant solitaire laissant libre cours à ses observations et déductions a-t-elle encore une place? Une littérature scientifique partagée par tous est une clé qui a permis les avancées prodigieuses dans notre compréhension de la maladie de Hirschsprung. Mais ces fulgurances portent aussi, et même avant tout, la marque du coup d'œil singulier et obstiné d'individus: Harald Hirschsprung, qui posa le premier diagnostic de la maladie, Orvar Swenson, qui s'en remit à son bon sens plutôt qu'aux doctrines de l'époque, Nicole Le Douarin, qui déploya tout le potentiel d'une simple observation sur le noyau des cellules de caille... On le voit, le romantisme du savant, celui ne confinant pas à l'isolement, est plus que jamais d'actualité. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. R. Chevalier et al., **How tissue mechanical properties affect enteric neural crest cell migration**, *Scientific Reports*, vol. 6, article 20927, 2016.

T. N. E. Butler et P. A. Trainor, **The developmental etiology and pathogenesis of Hirschsprung disease**, *Transl. Res.*, vol. 162, 1-15, 2013.

O. Swenson, **Hirschsprung's disease : A review**, *Pediatrics*, vol. 109(5), pp. 914-918, 2002.

M. D. Gershon, **The Second Brain**, HarperCollins, 1998.

L'ESSENTIEL

> On imagine à tort que les petites sociétés du passé étaient égalitaires. En réalité, de nombreux membres de ces sociétés étaient marginalisés. Pour la plupart, il s'agissait d'individus qui avaient été enlevés dans d'autres groupes.

> On a longtemps négligé le rôle social de ces captifs, alors

que de nombreux témoignages historiques et travaux de recherche attestent de son importance sociopolitique.

> Les captifs conféraient de la richesse et du pouvoir à leurs maîtres et, de ce fait, ont probablement joué un rôle crucial dans l'évolution des petites sociétés vers des sociétés étatiques.

L'AUTEURE



CATHERINE CAMERON archéologue à l'université du Colorado à Boulder, aux États-Unis

Ces esclaves qui ont façonné nos sociétés

Au sein des petites sociétés du passé, les captifs, c'est-à-dire les personnes enlevées à d'autres groupes, conféraient de la richesse et du pouvoir à leurs maîtres. Ils ont de ce fait contribué à l'émergence de sociétés de type étatique.

Les combattants de Daech (acronyme arabe de «L'État islamique»), qui ont fondu sur la Syrie et le nord de l'Iraq à l'été 2014, ont occupé les villages des Yézidis. Parce qu'ils considèrent les membres de cette minorité confessionnelle kurde comme des hérétiques, ils ont tué les hommes et capturé les filles et les femmes. Dès l'âge de 12 ans, les filles sont devenues des «épouses», en réalité des esclaves sexuelles que se passaient les hommes de Daech. Une horreur qui pouvait sembler nouvelle, mais qui est en fait banale: le cauchemar des femmes yézidies est celui qu'ont vécu des millions de femmes captives au cours des âges.

J'étudie depuis une dizaine d'années la prise de captifs dans les cultures du passé. Les captifs sont des personnes qui ont été arrachées à leur société et forcées à en intégrer une autre. Archéologue, j'en suis venue à étudier la prise de captifs parce que je m'intéresse particulièrement aux processus sociaux et démographiques dans les «sociétés de petite échelle», ce que les anthropologues

nomment des chefferies ou des tribus. Ces petites sociétés comprennent moins de 20 000 membres apparentés ou liés par le mariage; leurs dirigeants ne disposent que d'un pouvoir relativement limité. Que ce soit en Europe du Nord, au cap Horn ou dans le reste du monde, les captifs ont toujours été omniprésents dans ces sociétés. Tant les récits d'anciens voyageurs que les documents ethnohistoriques, les ethnographies, les récits de captifs et les résultats de fouilles en attestent. Mon analyse de l'ensemble de ces témoignages anciens constitue une tentative d'étude transculturelle du phénomène du rapt et de ses conséquences sociales.

Les mondes décrits dans ces documents contrastent fortement avec la vision idéalisée de petits groupes où chacun traite l'autre en égal. La plupart des sociétés de petite échelle comprenaient des individus n'ayant accès ni aux mêmes ressources ni aux mêmes avantages que les autres. Certaines de ces personnes désavantagées l'étaient parce qu'il s'agissait d'orphelins, d'inaptes ou de criminels, mais la plupart étaient des captifs. Ces



➤ derniers pouvaient constituer jusqu'à 25 % de la population. Sans parents au sein du groupe qui les avait intégrés de force, ils étaient automatiquement marginalisés. Du reste, souvent, les natifs du groupe ne les considéraient même pas comme humains.

Les captifs constituaient la couche sociale la plus basse, mais ils influençaient néanmoins les sociétés qu'ils intégraient. Ils introduisaient de nouvelles idées et de nouvelles croyances provenant de leur groupe d'origine, ce qui favorisait la diffusion de techniques et d'idéologies. Ils jouaient aussi un rôle clé dans l'évolution des statuts sociaux, des inégalités et de la richesse au sein des groupes ravisseurs. Ces facteurs ont sans doute posé les bases de l'émergence de structures sociales beaucoup plus complexes, les sociétés étatiques : des structures qui rassemblent plus de 20 000 membres, sur lesquels un individu (ou quelques-uns) détient un pouvoir et une autorité considérables, et où l'appartenance au groupe ne repose pas sur la parenté, mais sur la classe sociale ou sur la résidence dans le territoire. En dépit des immenses souffrances qu'ils ont endurées, les captifs ont changé le monde en contribuant à faire naître ces sociétés.



ENLEVÉS LORS D'UNE GUERRE OU D'UN RAID

D'ordinaire, on devenait captif à la suite d'une guerre ou d'un rapt. Au cours de son premier voyage vers les Amériques en 1492, Christophe Colomb entendit parler des raids des féroces Kalinagos, un peuple des petites Antilles. Selon des documents datant des ^{xv}^e et ^{xvi}^e siècles, les Kalinagos étaient capables de parcourir des centaines de milles marins dans leurs canots de guerre pour attaquer d'autres îles de l'archipel et s'emparer d'habitants et de leurs biens. De retour chez eux, ces pirates tuaient rituellement les hommes adultes capturés. Les jeunes garçons étaient émasculés et servaient d'esclaves jusqu'à ce qu'ils atteignent l'âge adulte, moment où ils étaient sacrifiés. Quant aux jeunes femmes, elles entraient dans la société kalinago en tant que concubines de leurs ravisseurs ou servantes des épouses.

De même, les chasseurs-cueilleurs de la côte nord-ouest de l'Amérique du Nord transformaient leurs prisonniers en esclaves ou les échangeaient contre des biens. Des récits du ^{xix}^e siècle décrivent des flottes de canots pleins de guerriers en route pour attaquer des groupes voisins ou pour mener des raids à distance. Ils enlevaient surtout des femmes et des enfants, mais aussi les hommes qui n'avaient pas été tués lors des combats.

Un autre cas est celui des Vikings, qui ont écumé l'Atlantique Nord et la Méditerranée

entre le ^{viii}^e et le ^{xi}^e siècles. Ils faisaient de nombreux prisonniers, qu'ils asservissaient ou vendaient. De même, les chefferies du littoral philippin des ^{xii}^e au ^{xvi}^e siècles envoyaient des flottes capturer des esclaves dans toute la région, en attaquant des groupes plus petits. Selon l'archéologue Laura Junker, de l'université de l'Illinois à Chicago, ces pillards ramenaient des femmes qu'ils asservissaient ou épousaient. Celles-ci travaillaient dans les champs ou confectionnaient des poteries et des textiles que leurs maîtres revendaient.

Les captifs d'une société atteignaient rarement le même statut que les natifs. Lorsque les guerriers revenaient chez eux, les personnes capturées et destinées à être asservies subissaient presque toujours un processus que le sociologue Orlando Patterson, de l'université Harvard, a appelé la « mort sociale ». Elles étaient dépouillées de leur identité d'origine et « renaissaient » en tant qu'esclaves. Au cours de ce processus, les captifs étaient souvent obligés d'adopter une marque visible de leur servitude et recevaient un nouveau nom. Le peuple conibo, en Amazonie péruvienne, par exemple, coupait les cheveux des femmes capturées et leur imposait une frange très courte symbolisant leur servitude. Ils remplaçaient aussi les vêtements traditionnels des captifs, qu'ils considéraient comme impudiques et barbares. Les Kalinagos frappaient

Helena Valero, enlevée par les Yanomamis dans les années 1930, fait partie des nombreuses captives qui sont devenues des épouses au sein du groupe de leurs ravisseurs.

et insultaient les nouveaux captifs, leur coupaient les cheveux et les appelaient « esclave femelle » ou « esclave mâle ». Destinés à être tués et consommés, les jeunes garçons étaient aussi appelés « ma grillade ».

Des récits du début du XIX^e siècle décrivent le traumatisme constitué par la destruction de l'identité sociale et culturelle des captifs en Asie du Sud-Est. C'est ce qu'endura un capi-

idéologiques, ce dont leurs ravisseurs profitaient pleinement.

Plusieurs récits suggèrent qu'au moins certains captifs ont été choisis en raison de leur savoir-faire technique. Fait prisonnier au début du XIX^e siècle par la tribu mowachaht sur la côte nord-ouest de l'Amérique du Nord (aujourd'hui en Colombie-Britannique), John Jewitt, l'armurier d'un bateau anglais, raconta ses épreuves dans un récit publié en 1815. Il avait été épargné lors de l'attaque surprise du navire parce que le chef voulait des armes en métal que savait fabriquer Jewitt. Ce dernier apprit aussi à ses ravisseurs à laver les vêtements salis plutôt que de les jeter, même s'il fut obligé de faire lui-même la lessive.

Un autre exemple est celui d'Helena Valero, qui, dans les années 1930, avait été enlevée enfant par un groupe amazonien, des Yanomamis. Elle raconta la colère de ses ravisseurs quand elle leur apprit ne pas savoir fabriquer d'outils de métal. Dans le livre de 1965 où elle narra ses années de captivité, elle rapporta que les femmes disaient : « C'est une femme blanche, elle doit savoir ; pourtant, elle ne veut pas nous confectionner de vêtements, de machettes ou de casseroles. Frappez-la ! » Mais le chef et l'une des coépouses d'Helena la défendirent, et elle survécut.

De même, il semble que quand les tribus germaniques du nord de l'Europe capturaient des forgerons romains, elles les mettaient au travail. Les archéologues ont en effet découvert dans le nord de l'Europe des statuettes, des cornes à boire, des armes et d'autres objets métalliques de style romain.

Il arrivait aussi que les captifs modifient les pratiques religieuses de leurs ravisseurs. Ainsi, les tribus germaniques qui ont attaqué l'Empire romain pendant son déclin ont adopté la religion chrétienne de leurs captifs. Le peuple amérindien des Haïdas, sur la côte nord-ouest de l'Amérique du Nord, a par exemple appris de ses captifs Bella Bella comment organiser un potlatch, c'est-à-dire l'une de ces cérémonies d'échange de dons que l'on organisait pour construire ou réparer une maison. Les gens de Juda (aujourd'hui Ouidah, au Bénin), l'un des principaux centres d'embarquement d'esclaves africains dans le cadre de la traite occidentale, pratiquaient au XIX^e siècle une variété de cultes vaudous, dont certains furent introduits par les femmes capturées dans les populations africaines de l'intérieur.

Les ravisseurs méprisaient en général leurs captifs, mais ils les croyaient souvent investis du pouvoir de guérir. L'Espagnol Álvaro Núñez Cabeza de Vaca explorait le golfe du Mexique quelques décennies après le voyage de Christophe Colomb quand ses compagnons et lui, après avoir fait naufrage, >

Les captifs représentaient des occasions de progrès sociaux, économiques et idéologiques

taine de la marine hollandaise capturé par des Iranuns, un peuple de l'île de Mindanao, aux Philippines. Les pirates le dépouillèrent de ses vêtements et le jetèrent pieds et poings liés au fond d'un bateau. Selon l'ethnohistorien James Warren, de l'université Murdoch, en Australie, ils frappaient aussi violemment les coudes et les genoux de leurs captifs afin qu'ils ne puissent ni courir ni nager. Attachés pendant des mois, mal nourris et constamment maltraités, les captifs finissaient par perdre tout espoir de délivrance.

Dans les sociétés de la côte nord-ouest de l'Amérique, les captifs étaient non seulement asservis sans espoir aucun d'intégrer un jour la société de leurs ravisseurs, mais leurs enfants avaient aussi à endurer le même destin, comme cela a été le cas pour les esclaves africains du sud des États-Unis et de leur descendance.

AGENTS DE CHANGEMENT

On pourrait donc penser que les captifs maltraités et prisonniers d'un nouveau groupe n'y aient que peu d'occasions de transmettre leurs connaissances ou leurs compétences. Mon étude transculturelle brosse cependant un tableau très différent. On a tendance aujourd'hui à penser que les sociétés de petite dimension étaient stables et intemporelles ; en réalité, elles étaient souvent avides d'apprendre. Les captifs représentaient des occasions de progrès sociaux, économiques et

☒ furent emmenés par des groupes autochtones vers ce qui est aujourd'hui le Texas. Leurs ravisseurs étaient certains que ces étrangers savaient guérir les maladies, et Álvarez Cabeza de Vaca et son groupe devinrent très célèbres grâce aux cérémonies de guérison qu'ils inventèrent. Lorsque les Espagnols s'échappèrent et réussirent à gagner le Mexique, les nombreux peuples autochtones qu'ils rencontrèrent en chemin leur réclamèrent d'exercer sur eux leurs talents de guérisseurs. De même, au milieu du XIX^e siècle, un chef sioux oglala de l'Ouest américain, qui avait été blessé, demanda à sa captive, une jeune pionnière nommée Fanny Kelly, de le soigner parce qu'il croyait que le contact d'une femme blanche le guérirait. Et on pense que dans le nord-est de l'Amérique du Nord, ce sont les captifs hurons qui ont introduit chez leurs ravisseurs iroquois la société des Faux Visages, une association de guérisseurs organisant des rituels curatifs pendant lesquels des masques de bois sont utilisés (*photographie ci-contre*).

SYMBOLES DE STATUT

La découverte peut-être la plus surprenante que j'aie faite pendant mes recherches est que les captifs étaient pour leurs ravisseurs une source importante de pouvoir politique. Dans une petite société, le pouvoir découle du nombre de partisans contrôlés par un meneur. En général, la plupart sont ses parents. Involontairement, les captifs augmentaient significativement le nombre des partisans non apparentés de certains personnages dominants qui les avaient capturés, améliorant ainsi leur statut social. Les femmes captives en âge de procréer permettaient par ailleurs aux chefs ou aux hommes désirant s'élever socialement d'accroître la taille de leur famille ou le nombre de leurs partisans, sans pour autant être contraints à un mariage traditionnel avec dot à verser à la belle-famille. Et par leur simple présence, les captifs créaient instantanément de l'inégalité au sein de la société : en tant que membres les plus méprisés et marginalisés du groupe, ils élevaient *de facto* la position sociale de tous ses autres membres.

Dans la plupart des petites sociétés que j'ai examinées, les hommes gagnaient du prestige par leurs succès guerriers. Les captifs étaient la meilleure preuve de succès. Chez les Kalinagos, par exemple, un homme ne pouvait faire un mariage dans une famille de haut rang que s'il triomphait à la guerre, ce qui impliquait de prendre des captifs. De même, les jeunes Iroquois ne pouvaient espérer devenir chef ou faire un bon mariage s'ils n'étaient pas de bons guerriers, ce qui, de nouveau, signifiait prendre des captifs. Dans ces anciennes sociétés du nord-est de l'Amérique, les



hommes profitaient de la cérémonie du calumet, un rituel destiné à nouer des alliances, afin de vanter leurs exploits en tant que guerriers et ravisseurs. Chacun racontait les batailles auxquelles il avait participé et les captifs réduits en esclavage. De même, dans les chefferies philippines du XII^e au XVI^e siècles, les guerriers qui capturaient le plus de prisonniers lors des raids et rapportaient le plus gros butin obtenaient le statut le plus élevé. Ils aspiraient aux succès des guerriers mythiques, dont les pouvoirs surnaturels leur permettaient de vaincre leurs ennemis et de faire fuir leurs peuples.

Les maîtres augmentaient aussi leur statut social par la démonstration publique de leur pouvoir sur leurs esclaves. Les disparités frappantes entre captifs et maîtres renforçaient constamment le rang de ces derniers dans la vie quotidienne. En ce sens, être d'un statut social élevé impliquait non seulement d'être un maître et de disposer d'un serviteur, mais aussi d'un public témoin de cette domination. Orlando Patterson a ainsi souligné que le culte de la chevalerie du sud des États-Unis, dans lequel on mettait en exergue l'« honneur » des hommes du Sud, n'a été possible que grâce au contraste existant entre les puissants individus blancs (propriétaires d'esclaves ou pas) et les esclaves noirs dénués de pouvoir et à leurs yeux « sans honneur ».

On retrouve des dynamiques comparables dans les sociétés de faibles effectifs. Dans les

L'usage de masques de bois (ci-dessus l'un d'entre eux) lors de rituels curatifs aurait été introduit dans la société iroquoise par les captifs pris chez les Hurons, un peuple rival. Il constitue donc un exemple d'influence culturelle des captifs sur leur société d'adoption. Les captifs étaient cependant avant tout asservis et mis au travail, comme l'illustre cette statuette (ci-contre) provenant d'une société de la côte nord-ouest de l'Amérique du Nord.



sociétés amérindiennes de la côte du nord-ouest par exemple, les «titulaires», c'est-à-dire les hommes éminents, affichaient leur prestige à travers leurs relations quotidiennes avec leurs esclaves. Ne travaillant pratiquement jamais, ils ne faisaient qu'administrer, organisant par exemple les cérémonies. Leurs femmes et filles ne travaillaient pas non plus; elles étaient suivies partout par des esclaves, qui allaient chercher du bois et de l'eau, cuisinaient, portaient tout fardeau et surveillaient les enfants.

Chez les Conibos, les captifs pouvaient aussi devenir des serviteurs – c'est-à-dire les domestiques d'individus ou de familles de haut rang – dont ils élevaient encore plus le statut social. De même, les Makús captifs des

Tukanos orientaux installés dans le bassin du Río Vaupés, en Amazonie (un affluent du Río Negro de Colombie et du Brésil), s'occupaient des besoins personnels de leur maître et de son épouse. Ils tenaient le grand cigare rituel quand leur maître fumait et, selon Fernando Santos Granero, anthropologue à l'Institut smithsonien de recherche tropicale au Panamá, certaines captives allaitaient même les bébés de leur maîtresse. Pour autant, les Tukanos n'avaient que mépris pour les Makús. Les hommes prenaient les femmes makúes comme concubines, mais n'auraient jamais envisagé d'en épouser une.

BÂTISSEURS DE FORTUNE

Des chercheurs ont avancé que dans les petites sociétés, les esclaves n'étaient que des symboles de prestige sans véritable rôle économique. Ils ont mis en évidence un fort contraste entre ce type d'esclavage et l'esclavage à grande échelle, dont l'impact économique est évident dans l'histoire récente: ce sont par exemple les esclaves africains qui ont produit la richesse du sud des États-Unis, moteur du développement économique américain au XIX^e siècle. Toutefois, les groupes que j'ai étudiés suggèrent au contraire que dans les petites sociétés, ce sont bien les captifs qui enclenchèrent le processus de création de la richesse, du rang social et des inégalités, qui préfigurait les retombées économiques des systèmes esclavagistes à grande échelle instaurés dans la Rome antique, dans les États du sud des États-Unis ou ailleurs.

Pour qu'ils leur restent loyaux, les dirigeants devaient récompenser leurs partisans. Leur pouvoir était donc lié à leur capacité de contrôler et de fournir de la nourriture ou des biens pour commercer. Dans les petites sociétés, pour obtenir les excédents dont il avait besoin pour conquérir des partisans et les retenir, un chef aspirant se tournait en général vers les membres de sa famille, mais ces derniers pouvaient refuser de l'aider... Impuissants, les captifs, eux, ne refusaient pas.

Les exemples précoloniaux de l'impact économique des captifs abondent dans la littérature. Prenons l'exemple des chefferies du XVI^e siècle dans le Valle del Cauca, en Colombie, qui étaient constamment en guerre. Les premiers Espagnols venus sur place – des soldats et des prêtres – rapportèrent que les vainqueurs faisaient des centaines de captifs. Ils en sacrifiaient quelques-uns mais en gardaient bien plus comme esclaves, ce qui permettait à leurs maîtres d'augmenter considérablement leur production agricole. En Amérique du Nord, sur la côte nord-ouest, le saumon était l'aliment de base de nombreux groupes. Comme il n'était disponible dans la nature qu'à

certains moments de l'année, il fallait le conserver et le stocker. Les tribus considéraient que le travail de préparation du saumon en vue de sa conservation incombait aux femmes. Toutefois, elles confiaient aussi cette tâche à des esclaves des deux sexes, créant ainsi des excédents de saumon séché. Autre exemple: au cours du siècle précédant l'arrivée des Européens, nombre d'Amérindiens des Grandes Plaines se sont enrichis par la production et le commerce de vêtements et de peaux de bison richement travaillées. Leur fabrication requérait une abondante main-d'œuvre féminine. L'archéologue Judith Habicht-Mauche, de l'université de Californie à Santa Cruz, a découvert que les Indiens des plaines capturaient des femmes issues des cultures villageoises pueblo afin d'augmenter le nombre de leurs épouses. Des restes de poterie fabriquée dans les plaines par des techniques associées à la culture pueblo permettent de suivre à la trace ces femmes capturées. La coopération entre de nombreuses épouses pouvait doubler la production de peaux de bisons et accroître considérablement la richesse et le statut d'un homme, a souligné Judith Habicht-Mauche.

Les ressources produites par les captifs permettaient aux chefs et à ceux qui aspiraient à le devenir de contourner leurs obligations à l'égard de leurs parents de façon à consolider leur pouvoir social et économique. Aux Philippines, les femmes captives produisaient de la nourriture, des textiles ou de la poterie. Les chefs utilisaient les biens excédentaires pour organiser des fêtes et convaincre ainsi les guerriers de les suivre, de se battre pour eux, ce qui faisait grossir leurs armées, pendant que les chefs aspirants bâtissaient leur fortune en faisant commerce de biens à travers toute l'Asie du Sud-Est.

Les Conibos du Pérou avaient une façon similaire de convertir les biens excédentaires résultant du travail des captifs en pouvoir et en statut: ils rivalisaient dans l'organisation de fêtes. Selon l'archéologue Warren DeBoer, du Queens College, à New York, spécialiste du peuple conibo, il était important pour les Conibos ambitieux d'avoir de nombreuses femmes au travail pendant la fête. Tant les épouses traditionnelles que les captives concubines cultivaient le manioc et le brasaient pour obtenir l'aliment central de ces agapes: la bière. Plus un homme avait de femmes – et les raids sur les petits villages de la haute vallée en assuraient un apport régulier – plus la production familiale de bière augmentait. Plus un homme offrait de bière, plus ses festins étaient grands et plus son prestige augmentait. Il semble que cette dynamique était profondément enracinée: la découverte de céramiques du premier

millénaire servant au brassage, au stockage et à la consommation de bière suggère que ce type de fêtes et les captives qui les rendaient possibles étaient déjà un phénomène répandu chez les ancêtres préhistoriques des Conibos et dans d'autres sociétés anciennes.

LES CAPTIFS INCARNAIENT LA RICHESSE

Les captifs ne produisaient pas seulement de la richesse, mais l'incarnaient directement. Presque toutes les petites sociétés que j'ai étudiées ont donné, échangé ou vendu des personnes capturées. Comme c'était le cas dans le système esclavagiste mis en place dans le sud des États-Unis, ces personnes de bas statut social étaient des biens de prestige, souvent les plus précieux de ce que possédaient les hommes. Sur la côte nord-est de l'Amérique du Nord, les groupes amérindiens

ESCLAVES, DÉPENDANTS ET NAISSANCE DES PREMIERS ÉTATS

Catherine Cameron veut montrer dans son article que les captifs ont joué un rôle dans la naissance de sociétés étatiques. Elle souligne pour cela leur contribution à l'émergence des inégalités sociales au sein des petites sociétés. Pour autant, on peut penser que dans ces tribus, des chefs rivaux se surveillaient les uns les autres et que, de façon générale, le tissu social avait une résistance naturelle à l'appropriation de l'essentiel du pouvoir par un seul individu. Dès lors, comment certains chefs sont-ils parvenus à obtenir un pouvoir personnel exorbitant ?

En 2001, dans *L'esclave, la dette et le pouvoir*, l'anthropologue français Alain Testart, disparu en 2013, choisit une définition juridique de l'esclavage. « Ce n'est jamais le fait qui définit l'esclave, c'est le droit »,

écrit-il. Cela l'amène à distinguer entre les « sociétés esclavagistes », où le statut d'esclave tend à être définitif, et les « sociétés à esclavage », où il varie.

Dans deux livres publiés en 2004, *Les Morts d'accompagnement* et *L'Origine de l'État*, il propose une explication de la prise de tout le pouvoir par un individu dans une société à esclavage. À l'aide de nombreuses données ethnographiques, il montre que « les fidélités personnelles qui assurent le pouvoir sont aussi susceptibles d'y conduire ». Un futur despote doit en effet imposer son pouvoir (grâce à des guerriers fidèles), l'organiser (grâce à des clients fiables) et l'étendre (grâce à des clients nombreux). Il n'y parvient que s'il a multiplié les fidélités personnelles en créant de nombreux « dépendants ». L'esclavage de guerre est la première source de tels dépendants à laquelle on pense. Toutefois, bien d'autres mécanismes permettaient d'en produire: esclavage pour dette, pour racheter des membres de sa famille que l'on avait été contraint de vendre, voire « pacte de sang » et autres formes d'assermentation, etc., ce que Testart résume par la notion d'« esclavage interne ». Par définition, la vie même de ces dépendants était engagée jusqu'à la mort par la fidélité due à leur maître. Les obligations incontournables qui en résultaient sur le champ de bataille ou dans le service du maître auraient été la source du pouvoir nécessaire pour s'imposer au corps social. Testart a identifié trois strates concentriques de dépendants. C'est dans le « premier cercle », rassemblant les « amis jurés » et les « esclaves de la couronne », qu'il identifie les fidélités qui étaient sans doute cruciales dans la prise de pouvoir.

FRANÇOIS SAVATIER
Pour la Science

des ^{xvii}e et ^{xviii}e siècles s'offraient des captifs en cadeau afin de créer des alliances ou de régler des différends. Sur la côte nord-ouest, des esclaves étaient échangés ou vendus de groupe à groupe, le long de routes commerciales bien établies. Dans le Valle del Cauca, en Colombie, les récits européens du milieu du ^{xvi}e siècle, les plus anciens connus à ce jour, décrivent des marchés aux esclaves, une institution très probablement antérieure à l'arrivée des Européens. Dans certaines par-

Les esclaves ont servi (et servent encore) à renforcer le statut d'hommes ambitieux

ties du monde, on utilisait même les esclaves comme monnaie. Dans l'Irlande du haut Moyen Âge, la femme esclave représentait par exemple la plus haute unité de valeur dont on pouvait se servir comme moyen de paiement au cours d'un échange.

DE LA TRIBU À L'ÉTAT

Étant donné l'impact qu'ont eu les captifs sur les cultures dans lesquelles ils ont été introduits, je soupçonne qu'ils ont joué un grand rôle dans l'une des transitions sociales fondamentales de l'histoire humaine : la formation de sociétés étatiques complexes. L'archéologue Norman Yoffee, de l'université du Michigan, a soutenu que les sociétés étatiques sont apparues seulement après que le rang social et le pouvoir économique ont cessé d'être liés à la parenté. La plupart des archéologues et des spécialistes des sciences sociales sont d'accord sur le fait que les États sont, au moins en partie, issus des actions de quelques personnes créant et contrôlant des biens excédentaires. La prise de captifs a aidé les groupes humains anciens à réaliser les conditions nécessaires à la formation des États. Les captifs n'étaient pas le seul facteur à l'origine de cette évolution, puisqu'ils étaient présents dans de nombreuses petites sociétés qui ne sont pas devenues des États. Toutefois, ils ont servi (et servent encore) à renforcer le statut des hommes ambitieux.

Pour moi, il est clair qu'ils ont fourni à certains de ces hommes la possibilité d'accumuler les richesses et le pouvoir personnels à l'origine des premiers États.

Si la prise de captifs a joué un rôle dans la formation des sociétés étatiques, alors on peut s'attendre à trouver des indices de leur présence dans les traces des premiers États. De tels indices se trouvaient par exemple dans l'un des sites du Chaco Canyon, au Nouveau-Mexique (États-Unis), que j'ai étudiés. La culture chaco, qui couvre deux millénaires entre environ 800 avant notre ère et 1250, est considérée comme la seule du sud-ouest américain ayant atteint le stade de société étatique. L'examen des restes humains laissés par cette culture a révélé une surreprésentation des femmes pendant la période d'existence de la cité de Chaco. Les tombes de Chaco Canyon contenaient en effet de nombreuses dépouilles de femmes âgées de 15 à 25 ans, une tranche d'âge à laquelle appartiennent souvent les captives. L'étude des restes de défunts découverts dans une grande maison de la culture chaco non loin de Chaco Canyon a mis en évidence la présence de femmes portant des blessures cicatrisées à la tête et d'autres pathologies typiques de personnes maltraitées, comme le sont souvent les captifs. Ces indices de violence et la tradition orale des descendants actuels de Chaco vont tous dans le sens de la présence de captifs.

Chaco n'est pas le seul exemple. L'archéologue Peter Robertshaw, de l'université de Californie à San Bernardino, a étudié le développement, au cours de la seconde moitié du ^{xv}e siècle, de deux États d'Afrique de l'Est, le Bunyoro et le Bouganda, dans ce qui est aujourd'hui l'Ouest de l'Ouganda. Il a découvert que beaucoup de femmes qui travaillaient dans les champs de banane ou de mil avaient été capturées et étaient traitées comme des biens. Il suggère que la demande en main-d'œuvre féminine pour le travail agricole a été le moteur de l'évolution sociopolitique de ces sociétés.

Que des personnes capturées aient joué un rôle sociopolitique important dans l'évolution vers des formes de sociétés étatiques ne justifie en rien la maltraitance subie dans le passé et aujourd'hui encore par les captifs. Trois ans après que Daech a ravagé leur patrie, de nombreux femmes et enfants yézidis capturés qui ont survécu sont rentrés chez eux. J'espère ardemment que ceux qui n'ont pu encore le faire retrouveront bientôt les leurs. Au cours des millénaires, les femmes et les enfants qui, par millions, ont subi le même sort n'ont presque jamais pu rentrer chez eux. Les archéologues peuvent du moins raconter leur histoire et, ainsi, faire reconnaître l'injustice et le malheur qu'ils ont endurés. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. M. Cameron, **Captives : How Stolen People Changed the World**, University of Nebraska Press, 2016.

K. Flannery et J. Marcus, **The Creation of Inequality**, Harvard University Press, 2014.

A. Testart et al., **Les esclaves des tombes néolithiques**, Pour la Science n° 396, octobre 2010.

A. Testart, **L'Origine de l'État**, Errance, 2004.

A. Testart, **L'Institution de l'esclavage** (réédition de *L'Esclave, la dette et le pouvoir*), Gallimard, à paraître, 2018.

L'ESSENTIEL

> Dans la première moitié du XIX^e siècle, certains ont proposé de compter les articles publiés par les scientifiques pour estimer la valeur de leurs recherches.

> En 1867 est paru le premier index de ce type, le *Catalogue of Scientific Papers* publié par la Royal Society de Londres.

> Dès le début, ces recensements ont eu leurs partisans et leurs détracteurs, mais ils se sont généralisés. D'autres outils bibliométriques ont aussi été conçus.

> Cette bibliométrie a modifié les pratiques de publication des scientifiques, mais aussi d'autres aspects de la science.

Article publié initialement par *Nature* le 9/11/2017 sous le titre *The catalogue that made metrics, and changed science* (<http://go.nature.com/2gqxykn>). Traduction et édition réalisées par *Pour la Science*, avec l'autorisation de *Nature*.



L'AUTEUR



ALEX CSISZAR
maître de conférences
en histoire des sciences
à l'université Harvard,
aux États-Unis

La naissance de l'évaluation des savants

C'est au XIX^e siècle que, pour évaluer la productivité des scientifiques, on a commencé à dénombrer les articles publiés par chacun d'eux. Cette bibliométrie a eu un impact important sur le fonctionnement de la science.

En 1830, Charles Babbage eut une idée originale. Exaspéré par le peu de reconnaissance dont jouissait la science en Angleterre, ce précurseur des ordinateurs, aux idées souvent provocatrices, suggéra que compter le nombre de publications scientifiques faites par chaque auteur serait une façon de jauger la qualité scientifique de ce dernier. Comme beaucoup d'idées radicales de Charles Babbage, celle-ci ne convainquit pas grand monde, mais elle s'est finalement révélée prophétique. À la fin du XIX^e siècle, répertorier les publications et comparer leurs nombres était devenu une pratique courante au sein de la communauté scientifique et de ses observateurs. En l'espace de quelques décennies, les chercheurs et les universitaires se sont néanmoins mis à redouter le diktat du *publish or perish* («publier ou périr») (voir la chronologie page 76).

Cette évolution éclaire les débats actuels sur la pertinence des algorithmes qui évaluent quantitativement et qualitativement la production scientifique. L'histoire montre que les outils bibliométriques permettant de localiser et d'évaluer plus facilement les travaux scientifiques ne sont pas neutres. Ces outils transforment l'objet même de leurs mesures. En

changeant les critères de récompense, ils modifient le comportement des chercheurs non seulement dans leur façon de communiquer leurs résultats, mais aussi dans leur façon de choisir leurs sujets, certains retenant plus l'attention que d'autres.

Il est une autre conséquence, plus subtile, à laquelle nous devons prêter attention. Les processus permettant de juger la valeur scientifique d'une publication ont toujours joué un rôle essentiel dans la perception de l'autorité scientifique par le grand public. À mesure que ces processus évoluent, il est donc nécessaire de prendre en compte la façon dont se transforment les attitudes culturelles vis-à-vis de l'expertise scientifique.

L'idée de Babbage de dénombrer les articles par auteur suscita diverses critiques. Une personne fit le calcul pour chacun des membres de la Royal Society de Londres et montra qu'il s'agissait là d'un très mauvais indicateur de l'éminence scientifique. Une autre souligna que, plutôt que le nombre, il aurait mieux valu prendre pour critère «la valeur de ces documents».

À l'époque, la renommée scientifique ne se bâtissait pas à partir des publications périodiques, mais à partir des livres et sur la base d'autres critères attestant de la maîtrise du

➤ sujet. Babbage lui-même avait peu d'estime pour la plupart des revues scientifiques, et il limitait sa proposition de compter les articles à ceux parus dans les vénérables *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. En 1867, le physiologiste britannique Michael Foster, dans un écrit rétrospectif portant sur la vie de Karl von Baer, fit l'éloge de l'œuvre monumentale de cet embryologiste, *Über Entwicklungsgeschichte der Tiere* («Sur le développement des animaux»), publiée en plusieurs volumes, en ignorant ses publications dans des périodiques. Celles-ci, prétendait Foster, n'étaient que «des spécimens des éléments fragmentaires que tout scientifique lance au monde en espérant qu'à un moment ou à un autre quelque vérité fasse son chemin».

Mais les choses commençaient à bouger. Un jeune ingénieur travaillant pour l'US Coast and Geodetic Survey (Centre d'études littorales et géodésiques des États-Unis, aujourd'hui nommé National Geodetic Survey) suggéra qu'il serait utile de créer un catalogue afin de suivre les publications des sociétés savantes européennes. Cette idée traversa l'Atlantique et parvint à la Royal Society où elle prit la forme plus large d'une liste de tous les articles de périodiques faisant état de recherches scientifiques originales et publiés depuis 1800. Certains mirent en question la nécessité de conserver tant de textes insignifiants. Quant au physicien William Thomson (futur Lord Kelvin), il prévint que le projet risquait de conduire la Royal Society à la ruine financière.

Le principal argument en faveur de ce qui allait devenir le *Catalogue of Scientific Papers* était que la publication dans les périodiques était un fatras. Bien que de nombreux auteurs publiaient dans les revues des sociétés savantes, quantité d'informations précieuses paraissaient aussi dans des magazines de vulgarisation, des encyclopédies et des hebdomadaires d'intérêt général. De plus, les auteurs distribuaient un grand nombre de tirés à part dont on ne savait pas très bien de quelle revue ils provenaient.

Lorsque les indexeurs de la Royal Society se mirent au travail en 1867, ils se rendirent compte que la situation était encore pire qu'ils ne l'avaient imaginé. Il y avait des milliers d'articles dont ils ne pouvaient pas déterminer l'auteur. Parmi les scientifiques qui choisissaient de publier dans des périodiques, beaucoup restaient anonymes ou ne signaient que de leurs initiales. Parfois, il était difficile de savoir dans quelle mesure l'auteur d'un article était responsable de son contenu ou si celui-ci devait être mis au crédit d'une autre personne. De plus, un grand nombre d'articles paraissaient sous diverses formes dans différentes revues, et il n'était pas aisé de dire s'il s'agissait ou non de la même publication. Aujourd'hui, de telles habitudes de publication seraient

UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA BIBLIOMÉTRIE

1800

Un bibliothécaire ambitieux de l'université de Göttingen, en Allemagne, commence à publier le *Repertorium Commentationum a Societatibus Litteris Editarum*, un catalogue recensant les mémoires publiés par des sociétés savantes.

1830

Charles Babbage préconise de compter les articles publiés dans la revue *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*

afin de mesurer l'expertise des scientifiques anglais. Il convainc très peu de monde.

1842

Un comité de l'Association britannique pour le progrès des sciences proclame la Loi de Priorité, qui stipule que le nom (latin) valide d'une espèce zoologique doit être le premier à avoir été publié, accordant ainsi une toute nouvelle importance aux publications périodiques.

1868

Les premiers volumes du *Catalogue of Scientific Papers* de la Royal Society, un index de tous les articles scientifiques publiés au XIX^e siècle, sont mis en vente. Le décompte des publications des scientifiques se répand.

VERS 1927

L'expression *publish or perish* (« publier ou périr ») s'installe dans le vocabulaire académique aux États-Unis.

1963

L'Institute for Scientific Information (ISI), créé par Eugene Garfield, achève le *Genetics Citation Index*, qui offre pour la première fois un décompte du nombre de fois qu'est cité un article scientifique par les autres.

1974

Le *Journal Citation Reports* devient une publication régulière de l'ISI, ce qui ouvre un large accès aux facteurs d'impact des revues et à leur comparaison.

2005

Le physicien californien Jorge Hirsch conçoit l'« indice h » (*h-index*), l'un des premiers outils bibliométriques reconnus comme offrant une alternative au facteur d'impact de l'ISI.

considérées comme de mauvaises conduites et probablement dénoncées. Il n'y a pas si longtemps, ces pratiques étaient routinières.

COMPTER CE QUI COMPTE

Les catalogueurs de la Royal Society firent ce qu'ils purent. Ils contactèrent les éditeurs et les auteurs pour associer des noms aux articles. Ils transformèrent une partie notable de la bibliothèque de la Royal Society en salle de travail bibliographique, et se simplifièrent la tâche en excluant de leurs recherches tous les périodiques d'intérêt général, ainsi que tout ce qui pouvait être lu par des non-spécialistes. Ils dressèrent la liste des revues dont les articles pouvaient figurer dans le catalogue et la firent circuler auprès d'autres experts et académies afin de recueillir leur avis. Parfois, la décision d'indexer ou non certains titres douteux fut soumise au vote du conseil de la Royal Society.

À mesure que leur travail progressait, les responsables du projet se sont rendu compte que dresser la liste de tous les «articles scientifiques» publiés depuis 1800 pourrait influencer les pratiques futures en matière de publication. Ils espéraient ainsi que les auteurs seraient plus attentifs au support sur lequel ils publieraient, ou au moins qu'ils signeraient leurs contributions. Mais ils n'ont sans doute pas anticipé toutes les conséquences de ce qu'ils s'approprièrent à déclencher.

Lorsque les premiers volumes du *Catalogue of Scientific Papers* parurent à la fin de 1867, les

réactions en Europe et aux États-Unis furent vives et nombreuses. Un observateur plein d'admiration écrivit que, grâce au catalogue, la science ressemblait à une île corallienne, à un majestueux édifice qui croît imperceptiblement à chaque fois qu'un nouveau fait est incorporé dans une publication.

D'autres étaient beaucoup moins enthousiastes. Un membre de la Royal Society se plaignit que les éditeurs avaient distordu « les progrès et l'histoire des découvertes dans les sciences tant physiques que naturelles » en excluant de nombreuses contributions de valeur émanant de « revues non ouvertement scientifiques », de comptes rendus de voyages, de traités publiés indépendamment, d'articles d'encyclopédie (qui à l'époque incluaient souvent des travaux de recherche originaux), et bien plus encore.

Mais de nombreux observateurs étaient heureux de disposer d'un catalogue leur permettant de trouver des informations et ont commencé à comparer la productivité des chercheurs. En quantifiant les contributions de chaque auteur, le catalogue semblait avoir été conçu sur mesure pour afficher des scores. Un rédacteur de la revue *Nature* (page 86 du volume 1, en 1869) se mit à l'ouvrage : « Le Dr. Hooker a rédigé 58 articles ; son défunt père, 72 ; et le regretté W. Hopkins, qui a tant œuvré pour la géologie mathématique, 33 ; [...] l'infatigable Isaac Lea, de Philadelphie, 106, la plupart sur les coquillages [...] ». Et ainsi de suite.

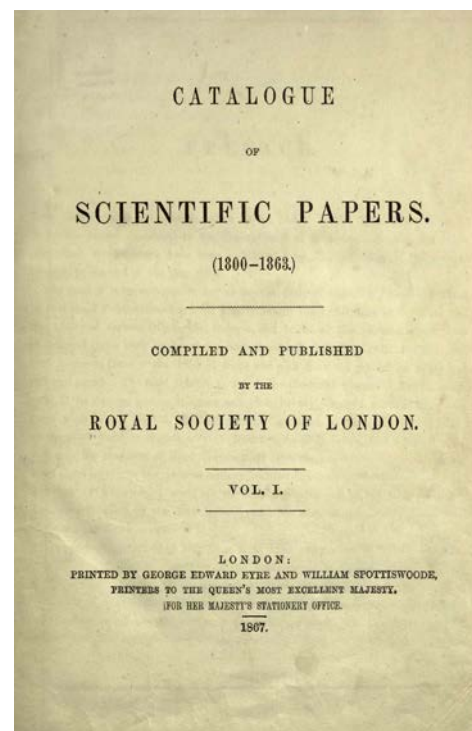
Dans une analyse détaillée parue en 1868 dans un journal viennois, le minéralogiste

Wilhelm von Haidinger invita à la prudence. Selon lui, la simple comparaison des chiffres ne permettait pas d'émettre de jugements de valeur. Il admettait néanmoins que les chiffres avaient, d'une manière ou d'une autre, un caractère irrésistible. En l'espace de deux ans, von Haidinger poussa plus loin son analyse numérique. Il publia une étude fondée sur le catalogue incluant un tableau comparatif du nombre d'auteurs scientifiques les plus productifs dans chaque région d'Europe, tout en déplorant, dans ce classement, le faible score de l'Autriche.

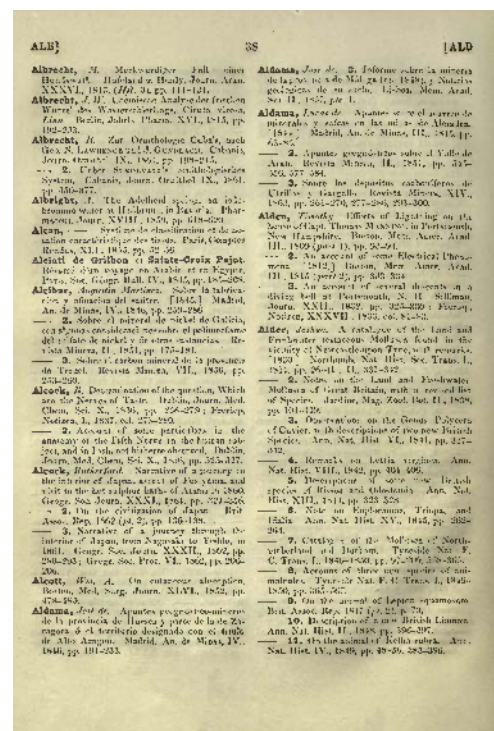
DES CONSÉQUENCES TANGIBLES

L'enthousiasme soulevé par le décompte des articles eut aussi des conséquences pratiques. Dans la décennie qui suivit la parution des premiers volumes du catalogue, les formulaires soumis par les candidats en vue de leur admission à la Royal Society prirent la forme de longues listes de documents. Au début des années 1870, les rubriques nécrologiques et les bibliographies dans les encyclopédies recensaient régulièrement le nombre d'articles rédigés par le scientifique en question, la chronologie de leur parution servant même à retracer sa carrière.

Dès 1900, même le physiologiste Foster, naguère si sceptique à l'égard des revues scientifiques, avait changé d'avis. La vraie science se trouve dans les périodiques, écrivait-il en 1903. Publier de nouvelles découvertes dans des livres – comme l'avait fait Charles Darwin – était selon lui « dépassé et même dangereux ». Être un expert sur des sujets scientifiques impliquait de rédiger des articles scientifiques.



La page de titre et l'une des pages intérieures du premier volume du *Catalogue of Scientific Papers* publié par la Royal Society en 1867.



Il existe un lien direct entre ces évolutions et les craintes qui ont vu le jour au xx^e siècle de voir dérailler les processus de publication scientifique. Une lettre d'un certain Norman Campbell paru dans la revue *Nature* du 5 mars 1932 déplorait que de plus en plus de candidats à la Royal Society soumettent une « liste de publications strictement techniques », avec pour conséquence que « nos revues sont pleines d'inepties illisibles » publiées par des chercheurs ambitieux dans l'espoir de renforcer leur candidature.

PUBLISH OR PERISH

Ce fut à peu près à ce moment-là que l'expression *publish or perish* commença à circuler au sein des milieux académiques. Elle apparut d'abord aux États-Unis, où la multiplication des universités de recherche était en train de professionnaliser la science. Le slogan devint également une sorte de raccourci pour décrire l'influence corruptrice de mesures, bureaucratiques et étroites d'esprit, de la performance des recherches.

Dans les années 1960, l'Américain Eugene Garfield lança un outil radicalement différent, connu sous le nom de *Science Citation Index*. Il espérait ainsi mettre un terme à cette culture néfaste du *publish or perish* en montrant que certains articles étaient davantage cités – et avaient donc plus de valeur – que d'autres.

Immédiatement, certains commentateurs avertirent que de nouvelles méthodes de mesure fondées sur les citations ne feraient qu'aggraver les choses, et conduiraient à une « classification fortement injuste » des revues qui pourrait fausser la science. Le « facteur d'impact » d'une revue fit ses premières apparitions publiques en 1972, peu après que le Congrès américain demanda à la NSF (la National Science Foundation) de mieux rendre compte précisément des bénéfices apportés par le financement public de la science. Il ne fait aucun doute que l'indice de citation a modifié les pratiques de la publication scientifique, tout comme, auparavant, l'introduction du catalogue avait provoqué l'essor du décompte des articles.

Aujourd'hui, les partisans des mesures d'impact alternatives soutiennent que des algorithmes bien conçus peuvent imiter et agréger les actes quotidiens de discernement que les chercheurs accomplissent quand ils lisent, citent, soutiennent des publications de recherche ou établissent des liens entre elles. Ces algorithmes, affirment-ils, se révéleront aussi performants, voire meilleurs, que les procédures établies – telles que l'examen des articles par les pairs – censées identifier les travaux de recherche importants et dignes de confiance.

Que ces affirmations se révèlent vraies ou non, elles occultent la question de savoir dans quelle mesure nous estimons que les procédures

DEUX CRITÈRES PARMIS D'AUTRES

FACTEUR D'IMPACT

Le facteur d'impact d'une revue est le nombre moyen de fois qu'est cité, au cours des deux dernières années, chaque article qu'elle publie (il s'agit de citations dans des articles publiés par cette revue et par

utilisées par les experts pour évaluer les idées sont intrinsèquement valables, c'est-à-dire indépendantes du contenu de ces jugements.

Le jugement porté sur des travaux scientifiques n'intervient pas dans un vide culturel. Avec la montée en puissance de procédures telles que l'examen par les pairs, destinées à organiser et à évaluer la recherche, il ne s'agissait pas simplement d'avoir une appréciation scientifique juste. Il s'agissait de trouver un équilibre entre la culture d'expertise des scientifiques et les demandes du public en termes de responsabilité. Le *Catalogue of Scientific Papers* s'inscrivait lui-même dans une époque où les index et les catalogues étaient plébiscités pour leur capacité à diffuser librement les connaissances et même à favoriser la paix dans le monde. L'intérêt pour les mesures d'impact alternatives s'est développé parallèlement à l'engouement pour les plateformes de publications en ligne, qui permettent potentiellement à la fois d'ouvrir davantage la communication scientifique et de la rendre plus démocratique.

À l'heure où le statut public de l'expert scientifique devient de plus en plus incertain, ces questions n'ont jamais été aussi cruciales. Dans une démocratie, les procédures permettant de décider ce qui constitue un savoir scientifique de valeur dépendent foncièrement de la conception publique des objectifs de l'entreprise scientifique.

La question de savoir si de nouvelles métriques pourraient un jour reproduire les résultats de l'examen par les pairs (quand celui-ci fonctionne correctement) est un faux débat. La façon dont nous choisissons de juger ce qui constitue des travaux scientifiques de qualité est tout aussi importante que le résultat final de ces jugements. Même les algorithmes ont une politique. ■

les autres). Les facteurs d'impact sont publiés chaque année dans *Journal Citation Reports*, édité aujourd'hui par Clarivate Analytics. Cette analyse couvre plus de 11 000 revues dans près de 250 disciplines. Les facteurs d'impact de revues appartenant à des disciplines différentes ne sont pas comparables, car les habitudes de publication varient d'une discipline à l'autre.

INDICE H

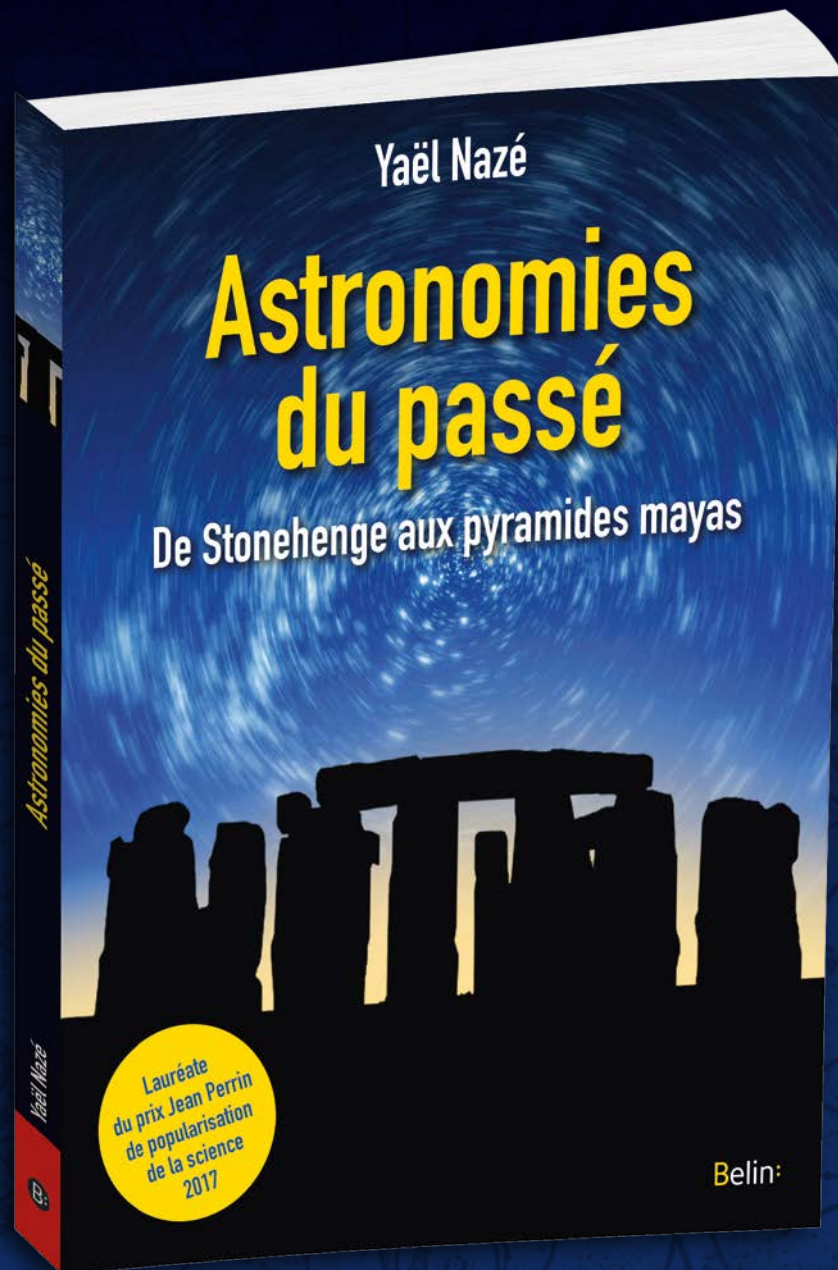
L'indice *h*, ou indice de Hirsch (*h-index* en anglais), est un outil proposé en 2005 par le physicien Jorge Hirsch pour mesurer la productivité et l'impact d'un chercheur. Par définition, l'indice *h* d'un auteur a pour valeur *n* s'il a publié *n* articles dont chacun a été cité au moins *n* fois par d'autres articles. Cet indice fournit une meilleure évaluation de la production d'un chercheur que le nombre de ses publications ou le nombre d'articles où il est cité. Mais, comme les autres outils bibliométriques, il n'est pas à l'abri de biais.

BIBLIOGRAPHIE

A. Csaszar, *The Scientific Journal : Authorship and the Politics of Knowledge in the Nineteenth Century*, University of Chicago Press, 2018.

A. Csaszar, *How lives became lists and scientific papers became data : Cataloguing authorship during the nineteenth century*, *British Journal for the History of Science*, vol. 50, pp. 23-60, 2017.

Un voyage à travers les âges



Belin:

www.belin-editeur.com



R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

LA FOLIE ÉLECTRIQUE DU BITCOIN

Les cryptomonnaies telles que le bitcoin se substitueront-elles un jour au dollar et à l'euro? Rien n'est moins sûr, si l'on considère l'effrayante consommation d'électricité liée au fonctionnement de ces monnaies numériques.

L'AUTEUR



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

Dans le numéro de *Pour la Science* de décembre 2013, cette rubrique présentait la cryptomonnaie nommée bitcoin et en expliquait le fonctionnement général (voir l'encadré 1 pour un résumé). La valeur d'un bitcoin était alors de 100 euros; le 1^{er} janvier 2018, date à laquelle correspondront les chiffres et calculs indiqués ici, le bitcoin valait 11500 euros!

S'agit-il d'une bulle spéculative ou d'une valorisation ayant un fondement réel? Deux camps s'opposent. D'un côté, des économistes et des spécialistes des monnaies jugent qu'il s'agit d'une «fraude» (terme employé par Jamie Dimon, directeur de la banque JP Morgan Chase) et que tout va s'effondrer, c'est-à-dire que le cours chutera brusquement, voire deviendra nul. Ils sont presque aussi nombreux qu'en 2013.

Dans l'autre camp, les défenseurs des monnaies cryptographiques avancent divers arguments pour justifier la valeur du bitcoin et de ses sœurs. Pour eux, les caractéristiques des monnaies cryptographiques – anonymat, irréversibilité, décentralisation, ouverture à tous, émission fixée à l'avance et rapidité des transactions – en font des monnaies nouvelles sans équivalent, utiles pour une fluidité plus grande des déplacements d'argent sur le réseau et pour un meilleur fonctionnement général de l'économie.

Il faut attendre pour déterminer quel camp a raison. Un point cependant soulève l'inquiétude: le réseau informatique qui assure le fonctionnement des échanges de bitcoins et leur

sécurisation a une importante consommation d'énergie électrique. Toujours à la date du 1^{er} janvier 2018, le site internet spécialisé *Digiconomist* l'a évaluée à 36 térawattheures par an, ce qui correspond à la dépense électrique annuelle de plus de 3,4 millions de foyers américains, ou encore à 0,16 % de la production électrique mondiale.

Cette quantité d'énergie brûlée par le réseau est appelée à croître. Un raisonnement économique que nous détaillerons plus loin montre que la dépense électrique du réseau est proportionnelle au cours du bitcoin, avec un délai d'ajustement de plusieurs mois pour que les investissements de rattrapage se mettent en place quand le cours augmente (une sorte d'inertie). Comme le cours du bitcoin a été multiplié par plus de 14 en un an, l'ajustement de la consommation lié au cours actuel n'a pas totalement eu lieu et se fera en multipliant au moins par 2 ou 3 dans les prochains mois la consommation électrique du réseau actuel. C'est une certitude... sauf si le cours du bitcoin s'écroule.

ENTRE 70 ET 100 TÉRAWATTHEURES D'ÉLECTRICITÉ DÉPENSÉS PAR AN!

On aboutira alors à une consommation électrique du réseau informatique du bitcoin comprise entre 70 et 100 TWh par an, équivalente à celle d'un pays tel que la Belgique.

Les évaluations mentionnées sont approximatives, car il est impossible de savoir dans le détail qui dépense de l'électricité et combien pour l'extraction de nouveaux bitcoins.



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

LES PRINCIPES DE BASE DU BITCOIN

1

La monnaie cryptographique bitcoin a été conçue par Satoshi Nakamoto (c'est un pseudonyme) en 2008 et mis en fonctionnement en janvier 2009. En voici les principes.

Un réseau d'ordinateurs auquel tout le monde peut participer gère un registre de comptes (la blockchain) qui indique combien de bitcoins sont détenus par les comptes. Tout le monde peut créer un compte sur ce registre. Le réseau est composé de nœuds principaux, chacun détenant le registre complet des comptes et enregistrant les transactions en bitcoins entre détenteurs de comptes. Tous ces nœuds ont les mêmes droits ; on parle de **réseau décentralisé pair à pair**.

Le registre et les transactions sont protégés par cryptographie. On aboutit ainsi à un accord unanime sur le contenu de chaque compte, et de cet accord naît la confiance à l'origine de la montée des cours du bitcoin. Depuis neuf ans que le réseau fonctionne, personne n'a pu en empêcher le fonctionnement ou le pirater, à l'exception d'un incident vite contrôlé et réparé en août 2010.

Le fonctionnement du réseau exige qu'il y ait des nœuds volontaires opérant les contrôles et gardant le registre de comptes. Un système de rémunération est prévu pour inciter à être l'un de ces nœuds : de nouveaux bitcoins sont émis et attribués aux nœuds

volontaires. Tous les bitcoins en circulation ont été créés dans cet objectif par un concours répété toutes les 10 minutes.



UNITÉS D'ÉNERGIE

Le térawattheure (TWh) est l'énergie dépensée au bout de 1 heure par un dispositif ayant une puissance de 1 térawatt (TW). Le térawattheure est égal à 1 000 gigawattheures (GWh), c'est-à-dire 1 milliard de kilowattheures (kWh). En 1 heure, un radiateur ayant une puissance de 1 000 watts consomme 1 kWh d'électricité ; dans la même durée, un réacteur électronucléaire de 1 gigawatt, ou 1 000 mégawatts, produit 1 GWh, ou 1 milliard de kWh, d'électricité.

A nouveau, deux camps s'affrontent pour cette évaluation. Il y a ceux, peut-être un peu pessimistes, qui arrivent aux chiffres élevés mentionnés. Le site *Digiconomist*, créé par le Néerlandais Alex de Vries, est le plus sérieux représentant de ce camp qui exprime une inquiétude et finalement de la méfiance vis-à-vis des cryptomonnaies, dont l'empreinte écologique semble déraisonnable.

Un autre camp, plus optimiste, arrive à des chiffres en gros deux fois plus faibles. Son représentant le plus précis est Marc Bevand, un Français vivant aux États-Unis, qui s'exprime aussi sur Internet (*voir la bibliographie*).

L'ÉQUIVALENT D'AU MOINS 10% DE LA CONSOMMATION FRANÇAISE D'ÉLECTRICITÉ

Même pour les optimistes, la dépense électrique est importante et atteint 5% de la consommation électrique française. Elle ira en croissant si l'intérêt pour les cryptomonnaies se confirme et que leurs cours montent. En prenant en compte les autres monnaies cryptographiques analogues au bitcoin, il faut doubler l'évaluation optimiste ; c'est donc au moins l'équivalent de 10 % de la consommation française d'électricité que les monnaies cryptographiques représenteraient... et bien plus dans le futur.

Pour inciter les acteurs (les nœuds) à participer à la gestion et à la surveillance du réseau bitcoin (ce qui permet son fonctionnement sans autorité centrale de contrôle), un système de rémunération a été prévu dès la conception du bitcoin en 2008 par le mystérieux Satoshi

Nakamoto. Les nœuds du réseau qui le font fonctionner sont rémunérés en nouveaux bitcoins créés périodiquement selon un programme fixé une fois pour toutes : 12,5 bitcoins sont émis toutes les 10 minutes. Ces nouveaux bitcoins, ainsi que des commissions liées aux transactions qui s'ajoutent aux 12,5 bitcoins, sont attribués à un seul nœud du réseau à la suite d'une compétition.

Ce concours consiste à résoudre un problème de nature mathématique. On a d'autant plus de chances de le résoudre en premier, donc de gagner les 12,5 bitcoins émis et les commissions liées aux transactions, qu'on est capable de calculer rapidement une fonction notée SHA256. Ceux qui participent à ce concours, les « mineurs », ainsi nommés par analogie avec les mineurs dans une mine d'or, sont pris dans une course, chacun essayant d'avoir la capacité maximale à calculer la fonction SHA256.

Au début, on effectuait les calculs de la compétition avec des machines courantes ou même sur des ordinateurs de bureau ou portables. Certains participants ont rapidement compris que les cartes graphiques étaient plus efficaces, donc dépensaient moins d'électricité, pour calculer la fonction SHA256. Ils les ont donc utilisés massivement. Rapidement encore, un second pas a été franchi en concevant et en fabriquant des puces spécialisées Asic (*Application-specific integrated circuit*) qui calculent la fonction SHA256 et ne font rien d'autre. Aujourd'hui, ceux qui participent à la course au calcul du SHA256 ne restent

8

2

UN TABLEAU DES DÉPENSES ÉNERGÉTIQUES

compétitifs qu'en utilisant de telles puces, que l'on fabrique par millions et que l'on perfectionne d'année en année. Le minage de bitcoins est devenu une industrie, dont 70% sont localisés en Chine.

La puissance totale du réseau, mesurée par sa capacité à calculer des fonctions SHA256, est devenue colossale. Environ 14 milliards de milliards de calculs de SHA256 sont effectués chaque seconde. Le coût électrique de cette activité est bien sûr important et, à moyen terme, c'est-à-dire en quelques mois, il devient égal à un certain pourcentage de la valeur des bitcoins émis et des commissions associées aux transactions.

Le raisonnement justifiant cette affirmation est simple. Lorsque les coûts des

systèmes de minage sont supérieurs à ce qu'ils rapportent, on cesse de les utiliser; lorsqu'ils sont inférieurs à ce qu'ils font gagner, de nouvelles «mines à bitcoins» sont créées. La logique de ce système est comparable à l'exploitation des mines d'or: quand le cours de l'or baisse, certaines mines d'or ne sont plus rentables et sont fermées; quand le cours monte, des gisements inexploités deviennent intéressants, de nouvelles mines s'ouvrent et certaines mines qui avaient été fermées sont remises en exploitation. En quelques mois, par l'implacable logique de la recherche du profit, se produit un nouvel équilibre entre le coût d'extraction et les gains qu'on en tire.

UNE DÉPENSE DE L'ORDRE DE 50%
DU GAIN APPORTÉ PAR LES BITCOINS

Le coût en électricité n'est pas le seul prix de la course aux calculs de la fonction SHA256, car il faut acheter les puces spécialisées et mettre en place les mines à bitcoins – aujourd'hui de véritables usines composées de plusieurs bâtiments et employant des dizaines d'ouvriers et techniciens. La consommation électrique représente un pourcentage assez stable du coût de fonctionnement et d'amortissement de ces mines numériques: après égalisation entre le coût et le gain, l'électricité dépensée est de l'ordre de 50% de ce que rapportent les bitcoins créés et les commissions.

C'est principalement sur ce pourcentage difficile à évaluer que se disputent les optimistes et les pessimistes. Le désaccord sur sa valeur explique pour l'essentiel les chiffres contradictoires avancés par les deux partis: les optimistes emploient la valeur 30% ou moins, les pessimistes utilisent 60%, parfois plus. Mais, quelle que soit la valeur retenue, il résulte de cette implacable logique économique que plus le cours du bitcoin est élevé, plus il y a d'électricité dépensée par ceux qui veulent s'approprier les bitcoins émis et les commissions associées aux transactions.

Ce raisonnement n'est valable que pendant les périodes où l'émission de nouveaux bitcoins est stable. Or le protocole d'émission des bitcoins, fixé en 2008, a prévu une division par deux de l'émission tous les quatre ans. L'émission a été divisée par deux en 2016 (passage de 25 bitcoins à 12,5); elle le sera de nouveau en 2020 et passera de 12,5 à 6,25 bitcoins par tranche de 10 minutes. Il faudrait donc intégrer dans les prévisions à long terme de la dépense électrique du réseau une division par deux de la dépense électrique une fois tous les quatre ans. Mais il faudrait aussi intégrer dans ce calcul les commissions associées aux transactions, qui viennent s'ajouter aux bitcoins émis par le protocole et contribuent à la

DÉPENSE ANNUELLE D'ÉLECTRICITÉ DUE À LA GESTION
DU RÉSEAU BITCOIN

Les chiffres suivants, exprimés en térawattheures (TWh), ont été calculés à la date du 1^{er} janvier 2018.

Dépense actuelle : 18 TWh (hypothèse optimiste) ou 36 TWh (hypothèse pessimiste).

Dépense après ajustement des coûts du minage aux gains obtenus par le minage : 35 à 50 TWh (hypothèse optimiste) ou 70 à 100 TWh (hypothèse pessimiste).

Dépense quand la capitalisation des bitcoins aura atteint celle des billets de dollars (M0) : 175 à 250 TWh (hypothèse optimiste) ou 350 à 500 TWh (hypothèse pessimiste).

Dépense quand la capitalisation des bitcoins aura atteint M1 (M0 + dépôts à vue) : 500 à 750 TWh (hypothèse optimiste) ou 1 000 à 1 500 TWh (hypothèse pessimiste).

CONSOMMATION ANNUELLE D'ÉLECTRICITÉ DE QUELQUES PAYS
(EN 2015, D'APRÈS L'AIEA)

Luxembourg	8 TWh	Espagne	254 TWh
Tunisie	16 TWh	Royaume-Uni	330 TWh
Danemark	33 TWh	France	468 TWh
Portugal	50 TWh	Allemagne	573 TWh
Suisse	62 TWh	Russie	949 TWh
Belgique	87 TWh	États-Unis	4 128 TWh
Turquie	229 TWh	Monde	22 234 TWh

L'intérieur d'une usine de minage de bitcoins de la compagnie Genesis Mining, en Islande.

© Marco Krohn CC BY-SA 4.0

rémunération des mineurs. Ces commissions évoluent de façon complexe, mais en gros elles augmentent en même temps que la valeur du bitcoin. Elles ont d'ailleurs été introduites par Satoshi Nakamoto pour compenser la division par deux tous les quatre ans et faire qu'il y ait toujours des gens intéressés pour surveiller et faire fonctionner le réseau. On peut faire l'hypothèse que, en première approximation, ce qu'a prévu le créateur du bitcoin se produira; cela signifie que dans les prévisions des futures dépenses électriques, on peut ne pas prendre en compte la division par deux tous les quatre ans, qui est compensée par le système des commissions.

Qu'advierait-il si la valeur des bitcoins égalait celle des dollars ou des euros?

Au 1^{er} janvier 2018, la valeur de tous les bitcoins en circulation était d'environ 230 milliards de dollars. La valeur de tous les billets en dollars en circulation est, d'après la FED (la Réserve fédérale des États-Unis), de 1500 milliards de dollars (chiffres de décembre 2016). Pour l'euro, on a des chiffres du même ordre de grandeur. Il y a donc 6 fois plus de dollars sous forme de billets en circulation que de dollars sous forme de bitcoins. Si le volume des bitcoins en circulation devenait, en valeur, équivalent aux dollars circulant sous forme de billets, cela signifierait que le cours du bitcoin a été multiplié par 6. En effet, les bitcoins émis représentent 80% des 21 millions de bitcoins prévus par Satoshi Nakamoto.

L'HORIZON DU BITCOIN BOUCHÉ PAR LE MUR DE LA DÉPENSE EN ÉLECTRICITÉ

Seule l'augmentation de la valeur unitaire du bitcoin peut amener à ce que leur total s'approche, en valeur, du total des billets de dollars en circulation. Cette multiplication par 6 de la valeur des bitcoins (ou par 5 si l'on veut prendre en compte les 20% de bitcoins non émis) ne semble pas impossible au vu de ce qui s'est passé depuis deux ans.

Une telle multiplication par 5 conduirait la dépense électrique du réseau bitcoin à une valeur comprise entre 350 et 500 TWh par an pour les pessimistes, et entre 175 et 250 TWh par an pour les optimistes. Ce serait alors, en ordre de grandeur, comparable à la consommation électrique française annuelle.

Rien ne pourra arrêter cette croissance sans une volonté déterminée, soit de la communauté qui en a collectivement le pouvoir mais dont ce n'est pas l'intérêt, soit des États en imposant un contrôle ou en interdisant ce type de mécanisme numérique et économique diabolique.

Les chiffres cités correspondent à des évaluations assez imprécises, mais les ordres de grandeur sont corrects et bien sûr donnent le

3

L'OR ET LE BITCOIN

On a souvent comparé le bitcoin et l'or. Certes, un point commun est que la quantité d'or disponible sur Terre, comme la quantité de bitcoins, ne résulte pas de la volonté d'un État ou d'une banque émettrice, mais est fixée par des contraintes impossibles à manipuler : les réserves terrestres dans le cas de l'or, et le protocole de Satoshi Nakamoto défini en 2008 qui fait qu'il n'y aura jamais plus de 21 millions de bitcoins.

Mais, en valeur, il y a beaucoup plus d'or que de bitcoins. On estime la valeur de tout l'or terrestre à 8 000 milliards de dollars, alors qu'il n'y a actuellement que quelque 230 milliards de dollars en bitcoins (au 1/1/2018). Le bitcoin ne peut donc pas aujourd'hui se substituer à l'or, contrairement à ce que certains prétendent.

Chaque année, on extrait environ 2 500 tonnes d'or. À raison de 41 000 dollars le kilogramme, cela fait environ 100 milliards de dollars. C'est, en ordre de grandeur, la valeur de la moitié des bitcoins existants et 10 fois plus que la valeur des bitcoins émis chaque année. Là encore, on voit que l'or domine par rapport au bitcoin.

Les défenseurs des monnaies cryptographiques

font remarquer qu'on dépense donc beaucoup plus par an en moyens pour extraire de l'or (sans doute à peu près sa valeur, soit environ 100 milliards de dollars) que pour extraire des bitcoins (ce sera environ 10 milliards de dollars quand le coût de production se sera ajusté au cours du bitcoin le 1/1/2018). La dépense pour extraire de l'or a aussi, comme pour les bitcoins, un important coût écologique, aujourd'hui bien supérieur à celui de l'extraction des bitcoins.

Ce dernier ne devrait donc pas nous effrayer, selon les partisans du bitcoin.

La réponse de ceux qui considèrent le bitcoin dangereux est que l'or est utile (par exemple en électronique) alors que les bitcoins produits ne servent à rien d'autre qu'à opérer des échanges. De plus, pour que les bitcoins émis puissent vraiment rivaliser avec une monnaie internationale, il faudrait que le cours du bitcoin soit multiplié par 15 pour atteindre la valeur des dollars en billets et sur les comptes à vue, ce qui conduirait alors à une dépense du réseau bitcoin supérieure au coût annuel de l'extraction de l'or : extraire les bitcoins sera alors plus cher qu'extraire l'or !



vertige... Ils montrent simplement qu'il n'est guère envisageable que les bitcoins en circulation ou plus généralement les monnaies cryptographiques fonctionnant sur son modèle se substituent un jour aux monnaies internationales d'échange que sont le dollar et l'euro.

Notons aussi que nous avons seulement envisagé une augmentation du cours du bitcoin pour que leur total égale en valeur les billets en dollars, ce que les économistes nomment la « base monétaire » et notent M_0 . Si nous avions pris en compte la valeur de la masse monétaire M_1 , qui inclut en plus l'argent présent sur les comptes à vue des particuliers et des entreprises (M_1 vaut environ le triple de M_0), nous serions arrivés à une dépense électrique trois fois plus importante. Les chiffres seraient alors compris entre 1 000 et 1 500 TWh par an pour les pessimistes, et entre 500 et 750 TWh pour les optimistes. Dans le meilleur des cas, on atteindrait des chiffres comparables au huitième de la consommation électrique des États-Unis (4128 TWh en 2015) et, dans le pire des cas, au tiers.

LE SYSTÈME D'INCITATION EST EN CAUSE

Peut-on changer le mode de fonctionnement des monnaies cryptographiques pour éviter cette folle dépense électrique ?

La consommation d'électricité liée au bitcoin n'est pas due aux coûts de la surveillance des transactions et à la gestion de son registre de comptes (la blockchain). Elle est due au mode de distribution des bitcoins émis toutes les 10 minutes, plus précisément au concours entre les nœuds du réseau qui désigne toutes les 10 minutes le gagnant des bitcoins émis et des commissions associées aux transactions. D'autres mécanismes fondés sur l'idée des blockchains n'utilisent pas ce système d'incitation et encore moins de concours entre les nœuds des réseaux associés, car ils n'en ont pas besoin.

Ainsi, les « blockchains privées », qui servent par exemple à gérer des échanges entre un consortium de banques en nombre fixé, ne sont pas du tout sujettes aux énormes dépenses électriques du bitcoin : elles n'ont pas besoin de systèmes d'incitation, puisque chaque acteur du réseau est intéressé par avance au bon fonctionnement du réseau. Seule la volonté de faire reposer le fonctionnement du bitcoin sur un réseau pair à pair, anonyme, décentralisé, ouvert et extensible oblige à mettre en place un système d'incitation assurant l'existence des volontaires s'occupant de gérer et surveiller le réseau, ainsi qu'un concours entre nœuds pour attribuer l'incitation. La véritable question est celle du

concours pour l'attribution de la prime d'incitation.

Peut-on concevoir un autre type de concours qui n'entraînerait pas l'aberration électrique du bitcoin ? La question n'est pas nouvelle et de nombreuses idées ont été proposées pour opérer autrement la distribution de l'incitation. Hélas, aucun système de remplacement n'a encore réussi à convaincre pleinement.

L'explication pourrait être liée à la notion de contenu en calcul, que nous avons traitée plusieurs fois dans cette rubrique (voir « Qu'est-ce qu'un objet complexe ? », Pour la Science, mai 2013). En effectuant leurs calculs pour remporter le concours toutes les 10 minutes, les nœuds du réseau consomment de l'électricité ; le calcul produit la solution à un problème (peu intéressant, mais difficile) qui est mis dans le registre des comptes du bitcoin. Ce dépôt a pour conséquence que le registre est difficile à falsifier. Pour le falsifier et créer un registre pouvant se substituer au registre courant (et permettant de détourner des bitcoins d'un compte vers un autre), il faudrait calculer autant que ce qui a été calculé par tout le réseau, et donc dépenser autant d'énergie électrique que ce qui a été consommé par le réseau en entier, au moins sur la période qu'on souhaite falsifier. C'est donc impossible ou extrêmement coûteux. La robustesse du bitcoin semble essentiellement liée à cette impossibilité presque absolue de fabriquer un faux registre, impossibilité qui disparaît probablement quand on change la méthode de distribution par concours de calcul.

À EN VOULOIR TROP, ON RISQUE DE TOUT PERDRE

C'est la volonté d'avoir un système protégé par le placement d'une quantité colossale de calculs (et donc d'électricité) dans le registre des comptes pour le rendre infalsifiable qui est à l'origine du problème. Malheureusement, cette solidité presque parfaite a un prix : l'impossibilité que le cours du bitcoin augmente au point de devenir un jour un véritable concurrent du dollar ou de l'euro.

Entre les systèmes à blockchains privées, simples et électriquement viables, et les systèmes à blockchains publiques, totalement décentralisés, ouverts, anonymes et disposant d'une configuration extensible des nœuds – des systèmes qui, eux, semblent absurdes et finalement condamnés par avance –, il faut choisir ou inventer des systèmes intermédiaires. Pour donner naissance à une nouvelle monnaie internationale, il sera nécessaire de renoncer à certaines propriétés de la monnaie mise en route par le génial Satoshi Nakamoto. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Favier et A. Takkal Bataille, **Bitcoin, la monnaie acéphale**, CNRS Éditions, 2017.

M. Bevand, **Electricity consumption of bitcoin : A market-based and technical analysis**, <http://blog.zorinaq.com/bitcoin-electricity-consumption/>, 10 mars 2017.

Bitcoin energy consumption index, *Digiconomist*, consulté le 1/1/2018 (<https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>).

J.-P. Delahaye, **Mathématiques et mystères**, Belin/Pour la Science, 2016 (trois chapitres consacrés au bitcoin, aux preuves de travail et aux blockchains).

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**



FORMULE
PASSION
-27%



FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%

FORMULE
INTÉGRALE
-41%



99€



79€



59€

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN, JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de *Pour la Science* + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

1A99€

99€
Au lieu de 148,45€*

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de *Pour la Science*
+ 4 Hors-Séries

1A79€

79€
Au lieu de 108,45€*

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de *Pour la Science*

1A59€

59€
Au lieu de 78,45€*

J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Téléphone : _____

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule)

@ _____

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

• Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration : _____ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre (B)) : _____

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/06/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*. Photos non contractuelles.



Que faire des plantes enrichies en métaux lourds qui ont poussé sur des sites contaminés ? Par exemple des émaux de vases ou de carrelage...

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à Pour la Science

DES VASES POUR FLEURS CALCINÉES

Un projet, lauréat du prix Coal Art et Environnement 2017, associe des plantes accumulatrices de métaux lourds, utilisées pour dépolluer des sols, à l'art de la poterie.

L'

hiver bat son plein. Dans les jardins, beaucoup de plantes sont enveloppées d'un voile blanc antigel. D'autres sont mieux loties et ont été mises à l'abri des assauts du froid dans des orangeries. C'est possible parce qu'elles sont en pots. Ces contenants sont souvent d'un type particulier très reconnaissable: circulaires, au pied mouluré et ornés de guirlandes décoratives pendant à partir de médaillons, ces vases parfois très grands sont également vernissés, c'est-à-dire recouverts d'un émail coloré à l'aspect vitreux.

L'histoire raconte qu'ils auraient été inventés au début du XVII^e siècle, au temps d'Henri IV, par un potier de la ville d'Anduze, dans le Gard. L'artisan se serait inspiré de vases italiens de type Médicis, à décor de fruits et de guirlandes. Difficile de démêler le vrai du faux, mais toujours est-il que l'on parle de vases d'Anduze et qu'ils ont connu un franc succès aux XVIII^e et XIX^e siècles. On les retrouve dans la plupart des grands jardins parisiens sous l'Empire.

Ces vases sont aussi au cœur du travail d'Anne Fischer, récompensée en 2017 du prix Coal Art et environnement, qui

promeut les réponses des artistes aux problématiques écologiques.

L'histoire de son projet *Rising from its ashes* («renaître de ses cendres») commence dans les Cévennes, sur le site de la mine des Avinières, à Saint-Laurent-le-Minier. Là, un million de tonnes de métaux, essentiellement du zinc, ont été extraites jusqu'en 1995, quand l'exploitation a cessé. Il en reste des terrains de plus de 7000 mètres carrés, pollués par des métaux lourds: du zinc, mais aussi du cadmium, du plomb... Les teneurs atteignent jusqu'à 800 fois les seuils admis par l'Europe. Ces conditions semblent peu compatibles avec la vie. Et pourtant...

DEUX SURVIVANTES

Un œil attentif repère vite sur le sol contaminé des petites fleurs qui semblent se satisfaire des importantes concentrations en polluants. Ce sont des *Anthyllis vulneraria* et *Noccaea caerulea*. Ces deux espèces nettoient le sol en accumulant les métaux lourds dans leurs cellules: elles sont dites hyperaccumulatrices. D'ailleurs, le CNRS a mis en place un programme de phytoremédiation, fondé sur ces deux plantes, afin de dépolluer le site. On estime qu'un demi-siècle sera nécessaire pour faire le ménage correctement.

Mais le problème ne sera pas résolu pour autant. Certes, les deux espèces favorisent la croissance ultérieure d'autres végétaux moins tolérants en leur offrant un meilleur terrain. Mais que faire de la biomasse de ces plantes enrichies en

métaux lourds, que l'on considère également comme des déchets contaminés?

En collaboration avec Claude Grison, du laboratoire ChimEco du CNRS de Montpellier, Anne Fischer propose de valoriser ces végétaux grâce... aux vases d'Anduze, qui font la fierté de la région depuis longtemps.

En effet, *Anthyllis vulneraria* et *Noccaea caerulea*, lorsqu'elles sont calcinées à basse température, permettent de produire des émaux aux nuances particulières. De la sorte, les métaux lourds se retrouvent piégés dans une mince couche vitrifiée à la surface de poteries, ou bien de carrelages. Ainsi, l'histoire industrielle et celle de l'artisanat se retrouvent liées dans une démarche écologique, économique et sociale propre à revitaliser une région et son patrimoine.

Rising from its ashes s'inscrit dans une démarche plus ambitieuse menée par Anne Fischer à l'échelle nationale: le projet *Blooming ground* («Terre florissante»). Il s'agit d'une structure interactive, en cours de développement, qui recense les sites pollués en France et compile les valorisations possibles (outre l'émail, citons le verre, le papier, les fibres textiles, les pigments naturels...) des plantes pouvant aider à les décontaminer. ■

Le site d'Anne Fischer:
<http://www.annefischer.fr/>



Retrouvez la rubrique
Art & science sur
www.pourlascience.fr

LES AUTEURS



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

DES SITUATIONS DÉCHIRANTES

Une feuille de papier, qu'elle soit libre ou collée sur un support, ne se déchire pas n'importe comment : la géométrie de la déchirure a ses règles.

Déchirure en colimaçon à partir d'une entaille au milieu de la feuille

Enfin ! Après plusieurs minutes d'efforts, vous parvenez à décoller avec votre ongle l'extrémité du ruban adhésif collé sur son rouleau. Mais patatras, la languette ainsi formée se rétrécit au fur et à mesure que vous la tirez : elle se déchire en formant une pointe et tout est à recommencer ! La même mésaventure se produit avec la peau d'une tomate ou d'une pêche, ou avec du papier peint collé au mur. Dans d'autres conditions cependant, les déchirures prennent des formes étrangement régulières. Comment expliquer ces comportements étonnants ?

DÉCHIRER DU PAPIER SOUPLE ET INEXTENSIBLE

A priori, une déchirure met en œuvre de multiples ingrédients de la physique des matériaux, associés chacun à la libération ou l'absorption d'énergie.

Quand un matériau se fracture, il se crée en son sein deux nouvelles surfaces en vis-à-vis, au prix d'une énergie proportionnelle à l'aire créée.

Le matériau peut aussi se déformer réversiblement sous l'action des forces extérieures et s'allonger comme un ressort, se plier ou se tordre, auquel cas il stocke ou libère de l'énergie élastique.

Et lorsque le matériau se décolle d'un support auquel il adhère, une autre énergie caractéristique est mise en jeu.

À cela s'ajoute une complication au niveau de la ligne de fracture : les contraintes mécaniques y sont si concentrées que le matériau subit à cet endroit des déformations plastiques, irréversibles.

Comment démêler les parts respectives de ces différents ingrédients ? On peut d'abord s'appuyer sur le modèle élaboré dès 1920 par Alan Arnold Griffith. Cet ingénieur aéronautique anglais donna le critère suivant : une fracture se propage si l'énergie



libérée par le relâchement des contraintes lors de la progression de la ligne de fracture ou fournie sous forme de travail par les forces exercées par un opérateur compense l'énergie que nécessiterait sa création.

Dans le cas d'une feuille de papier ordinaire, on parle de déchirure plutôt que de fracture, l'objet étant quasi bidimensionnel. Sous l'action de forces extérieures, la feuille peut se déformer considérablement. Mais si l'on ne froisse pas le papier, ces déformations laisseront inchangées les propriétés topologiques de la feuille, qu'on pourra donc toujours remettre à plat.

DÉCHIRURE HYPERBOLIQUE

Tenons avec les doigts, en des points notés A et B, une feuille de papier entaillée sur son bord, et écartons peu à peu les mains. La feuille se déchire selon une branche d'hyperbole. Voici le raisonnement qui explique pourquoi. À chaque instant, les points A et B sont alignés avec l'extrémité C de la déchirure (schéma a). Si la distance entre les doigts est d à l'instant considéré, on a donc $d = AC + BC$. En remettant à plat la feuille, cela signifie que C est un point de l'ellipse ayant pour foyers A et B et caractérisée par le paramètre d . Un instant plus tard, la distance entre les doigts a augmenté et est devenue d' : la pointe C de la déchirure appartient alors à une ellipse plus grande (de paramètre d'), mais de mêmes foyers A et B (schéma b). Pour que, conformément au critère de Griffith, C passe d'une ellipse à l'autre en parcourant une longueur minimale, le déplacement doit être perpendiculaire aux deux ellipses. Il s'ensuit que C décrit une courbe orthogonale aux ellipses de foyers A et B, ce qui correspond à une branche d'hyperbole.

Déchirures en pointe dont l'angle est constant



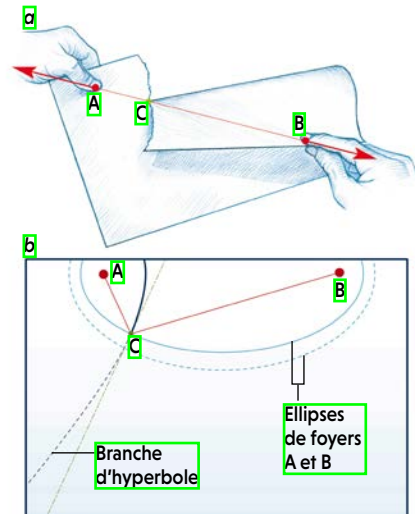
Déchirure de forme hyperbolique à partir d'une entaille sur le bord de la feuille

On peut en outre beaucoup simplifier, comme l'ont montré il y a quelques années Benoît Roman, physicien à l'ESPCI, à Paris, et ses collègues. Sous l'effet de forces modérées, le papier est en effet inextensible et souple. Les énergies élastiques sont ici négligeables et seuls restent à considérer le travail de l'opérateur et l'énergie nécessaire à la déchirure.

Que devient dans ces conditions le critère de Griffith? Le travail fourni par l'opérateur étant fixé, il faut, pour relâcher le plus d'énergie possible, que la déchirure soit de longueur minimale,

compte tenu des contraintes exercées par l'opérateur. Le critère de Griffith devient alors purement géométrique et permet de déterminer la direction de la propagation de la déchirure dans le plan de la feuille.

Pour illustrer cette idée, déchirons à la main une feuille dont le bord a été entaillé, mais de telle sorte que les deux endroits A et B où nous saisissons la feuille avec les doigts ne soient pas à égales distances de l'entaille (voir la figure en haut à droite). Tirons doucement. La feuille se plie dans l'espace, la déchirure se propage; nos doigts s'écartent, mais



restent en permanence alignés avec le point extrême C de la déchirure, de façon que les forces de traction n'engendrent aucun couple.

La distance entre nos doigts est la somme des segments AC et BC. Remettons la feuille à plat. Pour une distance (dans l'espace) donnée, le point C est donc sur une ellipse ayant pour foyers les points A et B (rappelons que les points P d'une ellipse de foyers A et B vérifient $AP + BP = \text{constante}$). Lorsque la distance entre nos doigts augmente légèrement, C se retrouvera sur une autre ellipse, toujours de foyers A et B, mais plus grande. Pour aller d'une ellipse à

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



l'autre selon un chemin de longueur minimale, il faut choisir un déplacement perpendiculaire aux deux. Cela correspond à suivre la direction de la bissectrice aux segments AC et BC et, de façon plus globale, à suivre les courbes orthogonales aux ellipses de foyers A et B, c'est-à-dire des hyperboles.

LA DÉCHIRURE SE PROPAGE PERPENDICULAIREMENT AU PLI, SAUF SI...

La même approche permet d'expliquer ce qui se passe en présence d'un pli, tel celui que présente une feuille dont on détache un ruban. Plus concrètement, faisons deux entailles rectilignes perpendiculaires au bord de la feuille et tirons sur la languette ainsi formée, en maintenant le reste de la feuille à plat. En l'absence de toute élasticité, la languette reste plane et rejoint la feuille le long du pli qui relie les extrémités des deux déchirures.

Ici, d'après le critère d'extension minimale, les déchirures doivent se propager perpendiculairement au pli. Autrement dit, dans ce cas précis, les deux déchirures restent parallèles et forment un ruban de largeur constante.

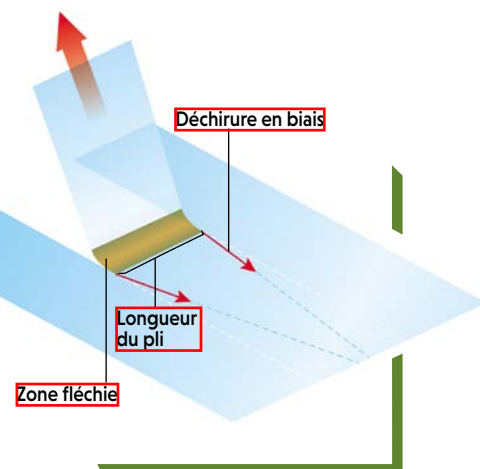
Cette propriété de perpendicularité est de nature purement géométrique et permet d'interpréter des formes de déchirure beaucoup moins simples. L'une de celles-ci s'obtient avec une feuille maintenue à plat et dont le milieu a été légèrement entaillé : quand on tire perpendiculairement au plan de la feuille l'une des lèvres de l'entaille, on obtient, au fur et à mesure que la déchirure se propage, un ruban de plus en plus large qui s'enroule autour de l'axe de traction, comme une hélice sur un cône.

Dans le plan de la feuille, l'extrémité de la déchirure décrit une spirale ; on montre que cette forme résulte du fait que la déchirure se propage perpendiculairement au pli rectiligne reliant les points où le ruban sort du plan de la feuille. Il s'agit d'une spirale logarithmique (la distance au centre croît exponentiellement avec l'angle polaire).

Les déchirures décrites jusqu'ici ne présentent pas de pointe. Pourquoi ? Sans doute parce que nous n'avons pas envisagé le cas d'une feuille collée sur un support. L'adhésion aurait-elle donc un rôle essentiel ? Pas en soi : pour en revenir à la languette sur laquelle on tire, il faut certes tirer plus fort pour que le travail fourni par l'opérateur compense l'énergie d'adhésion, mais le critère de Griffith persiste à prédire une propagation de la

DÉCHIRURE EN POINTE

Lorsqu'on tire sur une languette rectangulaire découpée dans une feuille collée sur un support plan, la feuille adhésive se déchire de biais : la languette détachée finit par former une pointe. La flexion du matériau est ici un facteur crucial. De l'énergie élastique non négligeable est stockée dans l'étroite zone qui subit la flexion (en brun), et cette énergie est proportionnelle à la longueur du pli formé. L'énergie élastique emmagasinée par le système diminue donc si ce pli se réduit, c'est-à-dire si la déchirure s'effectue en biais. Le système adopte cette configuration si l'énergie supplémentaire requise pour déchirer le matériau (la longueur d'une telle déchirure étant supérieure à une déchirure à angle droit) est inférieure à l'énergie élastique libérée.



déchirure perpendiculaire au pli, donc un ruban à bords parallèles.

L'ingrédient qui change tout, c'est la flexion du matériau, lorsque celle-ci emmagasine une énergie élastique non négligeable par rapport aux autres. Plus précisément, si la languette a une courbure bien localisée au niveau du pli, ce qui est le cas en présence d'adhésion, l'énergie élastique stockée est proportionnelle à la longueur du pli (voir la figure ci-dessus). Par conséquent, si l'on tire sur la languette en maintenant constant son angle avec la feuille, le pli conserve sa forme, mais l'énergie élastique stockée peut diminuer si la longueur du pli se réduit.

Il y a donc compétition entre cet effet, qui tend à réduire la longueur du pli, et le coût énergétique supplémentaire d'une déchirure en biais qui s'ensuivrait, la longueur d'une telle déchirure étant supérieure à celle d'une déchirure à angle droit. Ce coût supplémentaire est d'autant plus élevé que l'angle de propagation de la déchirure est important.

Ainsi, lorsque l'adhésion est forte, comme pour un rouleau de bande adhésive, du papier peint collé sur le mur ou la peau d'un fruit, le critère de Griffith prédit que la déchirure se propage en biais par rapport à la traction, avec un angle déterminé par une combinaison de toutes les énergies mentionnées. En deux mots, notre languette rétrécit et se décolle sous la forme d'une pointe. Un beau résultat de physique, mais le désespoir des rénovateurs d'appartements ! ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Roman, **Fracture path in brittle thin sheets : A unifying review on tearing**, *International Journal of Fracture*, vol. 182(2), pp. 209-237, 2013.

Livre
conseillé par
POUR LA
SCIENCE

Agir, penser, désirer, aimer
ne sont pas réductibles
à un codage binaire...

la singularité

DEPUIS LES DOMAINES DU DIGITAL ET DE LA BIOLOGIE MOLÉCULAIRE, ON NOUS

du vivant

ANNONCE QUE TOUS LES MÉCANISMES BIOLOGIQUES VONT ENFIN

miguel

ÊTRE RÉVÉLÉS, MODÉLISÉS, DÉPASSÉS.

benasayag

ON SE PASSERA DU MONDE RÉEL ET DU VIVANT LUI-MÊME.



224 pages, 17 €

Contre la mécanisation
du vivant que prônent
les démiurges
du transhumanisme,
Miguel Benasayag
ose réaffirmer
les singularités propres
au monde du vivant
et de la culture.

Un ouvrage salutaire !

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr



L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

COMMENT LES TORTUES GÉANTES ONT CONQUIS LES GALÁPAGOS

Les Galápagos, l'«archipel des tortues» en espagnol, portent bien leur nom. Mais comment ces animaux terrestres s'y sont-ils installés? Un mystère résolu récemment.

Océan Pacifique, le 17 septembre 1835. Charles Darwin, à bord du *Beagle*, débarque sur l'île de San Cristóbal, la plus orientale de l'archipel des Galápagos (à l'époque île Chatham). Son œil est attiré par de profondes allées dans le sol aride, menant à des points d'eau. Il en a vite l'explication après sa rencontre avec deux tortues géantes.

Le 23, il explore l'île Floreana (alors île Charles), la plus méridionale de l'archipel. Sur sa partie basse, il trouve encore des tortues; l'un des (récents) autochtones lui explique que leur morphologie lui enseigne leur provenance dans l'archipel.

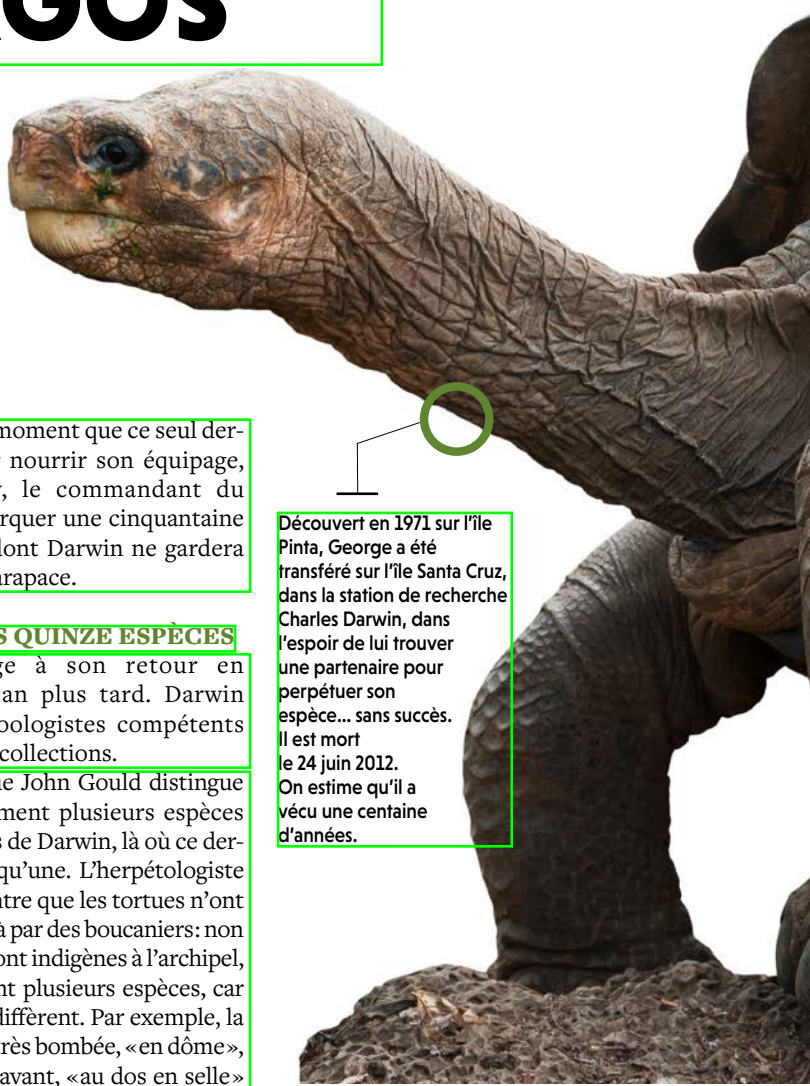
Le 8 octobre, Darwin se trouve sur l'île Santiago (alors île James), l'une des grandes îles centrales de l'archipel. Il y rencontre des boucaniers espagnols qui salent des tortues et, *o tempora, o mores*,

ne retient sur le moment que ce seul dernier point. Pour nourrir son équipage, Robert FitzRoy, le commandant du *Beagle*, fait embarquer une cinquantaine de ces tortues, dont Darwin ne gardera pas même une carapace.

PAS UNE, MAIS QUINZE ESPÈCES

Tout change à son retour en Angleterre, un an plus tard. Darwin approche des zoologistes compétents pour étudier ses collections.

L'ornithologue John Gould distingue ainsi immédiatement plusieurs espèces parmi les pinsons de Darwin, là où ce dernier n'en voyait qu'une. L'herpétologiste Thomas Bell montre que les tortues n'ont pas été amenées là par des boucaniers: non seulement elles sont indigènes à l'archipel, mais elles forment plusieurs espèces, car leurs anatomies diffèrent. Par exemple, la carapace est soit très bombée, «en dôme», soit relevée sur l'avant, «au dos en selle»



Découvert en 1971 sur l'île Pinta, George a été transféré sur l'île Santa Cruz, dans la station de recherche Charles Darwin, dans l'espoir de lui trouver une partenaire pour perpétuer son espèce... sans succès. Il est mort le 24 juin 2012. On estime qu'il a vécu une centaine d'années.

EN CHIFFRES

417

kilogrammes, c'est le poids de Goliath, la plus grande tortue connue. De l'espèce *Chelonoidis porteri*, endémique de l'île de Santa Cruz, dans l'archipel des Galápagos, cette tortue mesure 135,8 cm de long, 102 cm de large et 68,5 cm de haut.

Sa carapace, relevée à l'avant, est dite au dos en selle.

Si l'on n'a pas encore trouvé d'autres spécimens de son espèce, on a découvert sur les flancs du volcan Wolf, dans le nord de l'île Isabela, plusieurs tortues qui lui sont apparentées.

19

îles et 29 îlots forment l'archipel des Galápagos. Le point chaud responsable de leur apparition se situe actuellement sous l'île Fernandina, la plus occidentale et la plus jeune de l'archipel.

43

La plus grande tortue *Chelonoidis chilensis* connue, l'espèce sœur des tortues des Galápagos, mesure 43 centimètres. Cela reste inférieur à la taille des tortues de l'archipel. Il est probable que leur ancêtre commun ait certes été géant, mais moins grand que les spécimens des Galápagos, et qu'un phénomène de gigantisme insulaire se soit produit dans l'archipel.



George le solitaire
(*Chelonoidis abingdonii*)
Taille (longueur de carapace): 102 cm
Poids: 88 kg

(voir les photos ci-contre et page 95), avec également des formes intermédiaires.

En 1914, sur des critères anatomiques précis, l'herpétologiste californien John Van Denburgh reconnaît quatorze espèces, dont treize nommées, qu'il classe dans le genre *Testudo*. Plus tard, on les rétrograde un temps en sous-espèces, dans le genre *Geochelone* et le sous-genre *Chelonoidis*. Mais en 1980, Roger Bour, zoologiste au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, propose un statut de genre pour *Chelonoidis*, les sous-espèces redevenant espèces.

Aujourd'hui, la phylogénie moléculaire confirme l'hypothèse de Roger Bour: on compte maintenant quinze espèces de tortues aux Galápagos. Mieux, l'histoire évolutive de ces animaux, retracée grâce à la phylogénie moléculaire, coïncide avec l'histoire géologique de l'archipel. Ces deux histoires sont si liées qu'elles fournissent une piste pour restaurer certaines espèces de tortues disparues.



Reconstruire l'histoire évolutive des tortues des Galápagos est une entreprise très délicate : certaines espèces sont éteintes et de nombreuses tortues ont été déplacées d'une île à l'autre, autrefois par des boucaniers, récemment sous des prétextes de conservation. Mais l'approche moléculaire a des avantages ; on peut rechercher l'ADN ancien sur les squelettes des espèces éteintes et identifier ainsi relativement facilement les animaux déplacés et leurs descendants. Depuis une vingtaine d'années, Adalgisa Caccone, de l'université Yale, aux États-Unis, s'est lancée dans cette aventure et, peu à peu, les travaux de son équipe ont révélé l'origine des tortues géantes des Galápagos.

UNE SŒUR SUR LE CONTINENT

Ces tortues forment un groupe monophylétique du genre *Chelonoidis* : elles ont un même ancêtre commun et représentent à elles seules tous les descendants de cet ancêtre. Or il existe trois autres espèces de tortues du genre *Chelonoidis* sur le continent sud-américain : *C. denticulatus*, *C. carbonarius* et *C. chilensis*. En comparant leurs séquences d'ADN avec celles des tortues des Galápagos, les biologistes ont montré que, sans conteste, l'espèce *C. chilensis* est le groupe frère de celui des tortues de l'archipel, et que leur ancêtre commun le plus récent a vécu il y a 3,2 millions d'années.

Les tortues des Galápagos ont commencé à se diversifier il y a environ 1,74 million d'années. Trois groupes distincts ont ainsi divergé il y a environ 1,3 million d'années : un groupe centre-sud-ouest, rassemblant les espèces des îles Isabela, Rabida, Pinzón, Fernandina, Floreana et de l'ouest de Santa Cruz ; un groupe nord-est, constitué des espèces de Pinta, San Cristóbal, Santa Fé, Española et de l'est de Santa Cruz, et un groupe nord-ouest comportant les espèces de Santiago et du nord d'Isabela.

Au sein de ces trois clades, les diversifications se sont produites pendant la seconde moitié du Pléistocène, respectivement il y a 1,28, 0,82 et 0,4 million d'années. On distingue en tout quinze espèces (dont celles éteintes) – généralement une par île, avec cependant deux exceptions : Isabela présente plusieurs espèces endémiques associées à ses différents volcans, et Santa Cruz deux espèces, dont une décrite récemment, en 2015.

Si l'histoire évolutive des tortues des Galápagos s'est ainsi éclaircie ces dernières années, il restait à comprendre comment ces diversifications se sont produites et, surtout, comment ces tortues

UN ARCHIPEL VOLCANIQUE MOUVANT

Situées sur la plaque tectonique de Nazca, les îles des Galápagos résultent du fonctionnement d'un point chaud – un endroit où la montée d'un panache de magma se traduit par une activité volcanique. Ce dernier se trouve non loin de la jonction triple, dite des Galápagos, entre les plaques Pacifique, de Cocos et de Nazca (auxquelles s'ajoutent les microplaques des Galápagos et nord-Galápagos), ce qui crée une situation géologique complexe.

La plaque de Nazca se déplace vers l'est à une vitesse de près de 4 centimètres par an par rapport au point chaud et plonge sous le continent sud-américain. Au fur et à mesure qu'elle avance sur le point chaud, celui-ci y fait croître des îles. Les îles orientales de l'archipel sont donc les plus âgées. À l'est, San Cristóbal date de 3,2 millions d'années (Ma) ; à l'ouest, Isabela a moins de 0,7 Ma.

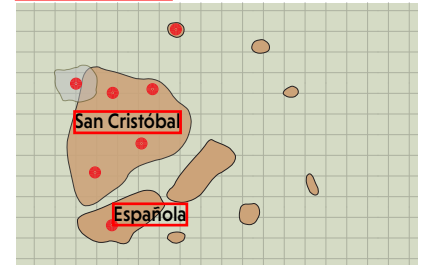
En se fondant sur les changements du niveau de la mer et sur l'érosion, des géologues ont aussi montré que l'archipel était différent dans le passé. Ainsi, il y a 3 Ma, San Cristóbal et Española étaient reliées – de même que Santa Cruz et Floreana il y a 2 Ma. Et il y a 1 Ma, Floreana, Santa Cruz, Santiago et Pinzón constituaient un seul bloc... ce qui simplifiait le déplacement des tortues terrestres.

géantes – et terrestres – étaient arrivées sur l'archipel. Leur ancêtre savait-il nager ? La réponse est venue... d'Afrique.

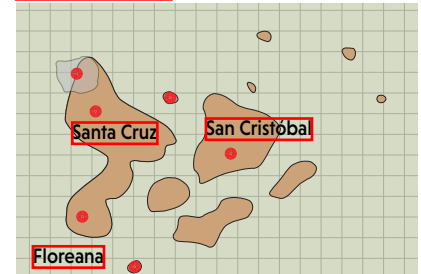
Le 14 décembre 2004, on observait une tortue géante terrestre sortant de l'eau à la pointe de Kimbiji, en Tanzanie, au sud de Zanzibar. Une étude rapide révéla qu'elle était originaire d'Aldabra, une île des Seychelles, au nord de Madagascar, à 800 kilomètres de là. Seule explication : le courant sud-équatorial, qui coule d'est en ouest à une vitesse de 1 à 3 nœuds, l'avait portée. La preuve ? Ses pattes antérieures et la base de sa carapace étaient couvertes d'anatifes, des animaux exclusivement marins qui s'accrochent aux corps flottants ou animés. Connaissant leur vitesse de croissance, on estime que la tortue est restée dans l'eau pendant 6 à 7 semaines. Nourrie convenablement, elle s'est remise de son voyage en trois mois.

Difficile à croire, mais les tortues terrestres peuvent donc flotter ; de fait, leurs poumons sont hauts dans la carapace et leur long cou peut faire office de tuba. Les

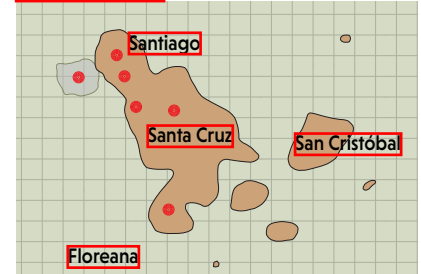
3 millions d'années



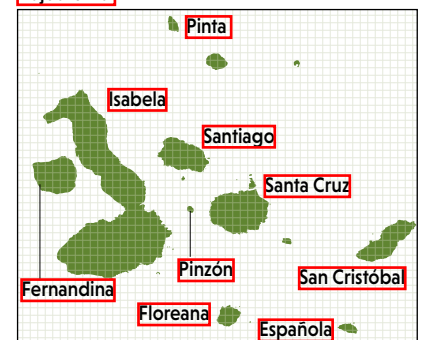
2 millions d'années



1 million d'années



Aujourd'hui





tortues sont des animaux à métabolisme bas, capables de jeûner longtemps; plus elles sont grandes, plus leurs réserves de graisse sont importantes, et plus leur jeûne peut être long. De plus, en brûlant leur graisse, elles produisent de l'eau, ce qui compense la déshydratation. C'est donc probablement par ce moyen que les premières tortues sont arrivées aux Galápagos, distantes d'environ 1000 kilomètres du continent – portées par le courant de Humboldt, qui remonte le long de la côte ouest de l'Amérique du Sud et s'incurve vers le large à la hauteur du Pérou pour former le courant sud-équatorial.

PAS SI SOLITAIRE, GEORGE?

Vraisemblablement, la première colonisation a eu lieu sur San Cristóbal, l'île la plus ancienne et la plus proche du continent. Pour reconstituer la suite de l'histoire, il faut réfléchir non pas avec la géographie actuelle de l'archipel, mais avec les projections proposées par les géologues (voir l'encadré page ci-contre).

Il y a un million d'années, les îles centrales de Santa Cruz, Floreana et Pinzón n'en formaient qu'une. Plus tard, lors de l'élévation du niveau de la mer, la population des tortues de l'unique île originelle s'est trouvée scindée en trois; ainsi, ce ne sont pas les tortues qui ont migré, mais l'environnement qui a changé et séparé ces groupes, lesquels ont ensuite évolué indépendamment. On nomme vicariance ce phénomène. Ainsi, la diversification des tortues de l'archipel s'est faite de deux manières, par vicariance et par migration.

L'analyse moléculaire menée par l'équipe d'Adalgisa Caccone a eu des effets collatéraux positifs. En effet, la tortue endémique de Floreana (*Chelonoidis*

elephantopus) est aujourd'hui disparue. Or trente-cinq tortues vivant sur les pentes du volcan Wolf, dans le nord de l'île Isabela, présentent un ADN mitochondrial et des marqueurs nucléaires identiques à ceux des animaux éteints de Floreana. Ce sont donc des descendants de l'espèce éteinte, sans doute le résultat de transports de tortues réalisés il y a deux siècles par les boucaniers. Les parentés génétiques sont si fortes qu'un programme de restauration de l'espèce disparue est envisagé. Il en est de même avec l'espèce endémique de l'île Pinta, *C. abingdonii*. Longtemps, on a considéré que George le solitaire, mort il y a cinq ans, en était le dernier représentant. Or huit individus apparentés ont été trouvés sur le volcan Wolf.

Si une tortue a pu arriver aux Galápagos, d'autres se sont-elles installées ailleurs de façon similaire? Très probablement, car on connaît deux lignées analogues dans l'océan Indien.

Sur l'archipel des Mascareignes, formé par le point chaud de La Réunion et dont les îles principales sont La Réunion, Maurice et Rodrigues, une diversification rapide de tortues géantes à partir d'un ancêtre commun a donné cinq espèces du genre *Cylindraspis*, toutes disparues. Et sur l'archipel des Seychelles et les îles proches, même si l'analyse moléculaire a montré que tous les spécimens anciens appartenaient à une seule espèce (du genre *Aldabrachelys*), ils présentent une grande diversité de traits: la colonisation a sans doute été trop récente pour qu'il y ait spéciation. Les premières tortues auraient posé la patte sur l'île d'Aldabra. D'où venaient-elles? Mystère... Une chose est sûre: elles venaient de la mer et étaient déjà géantes. ■

Dans l'archipel, la forme de la carapace varie selon les espèces, allant du dôme (ici *Chelonoidis elephantopus*, endémique de l'île Floreana, à gauche) au dos en selle (à droite).

BIBLIOGRAPHIE

J. M. Miller et al., **Identification of genetically important individuals of the rediscovered Floreana Galapagos giant tortoise (*Chelonoidis elephantopus*) provide founders for species restoration program**, *Scientific Reports*, vol. 7, article 11471, 2017.

N. Poulakakis et al., **Unravelling the peculiarities of island life : vicariance, dispersal and the diversification of the extinct and extant giant Galapagos tortoises**, *Molecular Ecology*, vol. 21, pp. 160-173, 2012.

N. Poulakakis et al., **Historical DNA analysis reveals living descendants of an extinct species of Galapagos tortoise**, *PNAS*, vol. 105, pp. 15464-15469, 2008.

L'AUTEUR



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

FEUILLETÉS SANS PÂTE NI BEURRE

Les gerhardts sont des systèmes feuilletés où s'intercalent des couches d'émulsions réalisées avec d'autres produits que le beurre: fromage, chocolat, foie gras...

Le froid de l'hiver nous invite à consommer des matières grasses (avec modération). J'ai baptisé du nom du chimiste alsacien Charles Gerhardt une généralisation du beurre feuilleté introduit dans le numéro de mars 2016.

Partons de la pâte feuilletée. On superpose un disque de pâte et un autre de beurre, on replie la pâte sur le beurre et on étend l'ensemble en une bande trois fois plus longue que large; on plie celle-ci en trois et on répète six fois l'opération d'allongement et de pliage, afin d'obtenir 729 minces couches de beurre entre 730 minces couches de pâte. À la cuisson, la pâte sèche et devient croustillante.

Le beurre feuilleté? On utilise cette fois deux disques faits d'émulsions de beurre et l'on procède comme précédemment, mais avec moins de tours, et sans cuisson bien entendu. La première émulsion est à base de beurre dans une solution aqueuse (café, jus de fruit, vin, bouillon...) et la seconde est une émulsion d'un liquide dans du beurre. Mon ami le chef Pierre Gagnaire, par exemple, produit un beurre feuilleté de cresson et genièvre, ou de pistache et café.

Les gerhardts, eux, sont produits avec une autre matière grasse que le beurre. Par exemple du beurre noisette, obtenu en chauffant du beurre jusqu'à ce que l'évaporation du petit-lait permette un échauffement qui fait réagir chimiquement les protéines, d'où la couleur blonde et la merveilleuse odeur. Il y a aussi le chocolat (fait de 50% de beurre de cacao), le fromage, le foie gras...

Pour un gerhardt au foie gras, on procède comme pour le beurre feuilleté. On prépare d'abord une émulsion de foie gras dans un liquide (vin blanc réduit, fond

Le chocolat, trop dur à température ambiante, peut servir d'ingrédient à un gerhardt si on l'assouplit en lui ajoutant des matières grasses.



d'oie ou de canard), et, par ailleurs, on confectionne une émulsion d'un liquide dans du foie gras (en battant comme pour le beurre feuilleté). Puis, après passage au froid, on utilise les deux matières comme pour une pâte feuilletée inversée, en posant un disque sur l'autre et en tournant deux ou trois fois.

Cette préparation n'est pas cuite, mais on peut aussi faire un feuilletage cuit au foie gras. Il faudrait alors malaxer du foie gras (cru ou cuit), avec un peu de farine pour faire un premier pâton, que l'on place au réfrigérateur, puis disperser un peu de foie gras dans de la farine, comme l'on procède avec le beurre et la farine dans une pâte sablée, et enfin procéder avec les deux matières comme pour une pâte feuilletée classique, cuisson incluse.

Pour mettre en œuvre le procédé avec du chocolat, il y a une difficulté: si la matière grasse laitière commence à fondre à -10°C et finit de fondre à 55°C, le beurre de cacao est trop dur aux températures inférieures à 34°C, et fondu à plus de 37°C. Comment lui conférer la souplesse indispensable au tournage?

Un corps pur fond à une température précise et un mélange fait d'un grand nombre de composés a un comportement de fusion progressif, chaque composé du mélange fondant à une température particulière. Le beurre est fait d'environ 60 millions de triglycérides différents,

mais le chocolat de seulement une centaine, de sorte que sa fusion est plus brusque. La solution? Puisque le goût du chocolat n'est pas dû à la matière grasse, jouons avec cette dernière: fondons-le préalablement et ajoutons-lui du beurre ou de l'huile, qui diversifieront les triglycérides. Puis, avec ce chocolat à la fusion plus progressive, procédons comme avec le foie gras, le beurre ou le fromage. ■



LA RECETTE

- 1 Préparer une émulsion de foie gras en passant du foie gras cru ou cuit au tamis, puis en le chauffant dans du gewurztraminer réduit, jusqu'à la confection d'une crème.
- 2 Faire une émulsion d'un liquide dans du foie gras en battant cet autre liquide (fond de canard) dans du foie gras écrasé.
- 3 Mettre au froid les deux émulsions pendant une heure environ.
- 4 Puis faire un disque avec chaque émulsion, et les déposer l'un sur l'autre.
- 5 Replier la couche inférieure sur la couche supérieure, puis, au rouleau, allonger de façon à obtenir une bande trois fois plus longue que large. Plier en trois, tourner d'un quart de tour, et répéter l'opération d'allongement et de pliage.
- 6 Couper des tranches que l'on entoure d'une gelée faite avec l'un des deux liquides utilisés pour l'émulsion et de la gélatine (5 % en masse).

Dans l'**inter**êt de la science

**mathieu
vidard**

**la tête au carré
14:05-15:00**



**france
inter**venez
franceinter.fr

A

PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.80

70 À 100 TWH

C'est la consommation électrique annuelle que devrait atteindre le réseau informatique de la cryptomonnaie nommée bitcoin dans quelques mois. Soit celle d'un pays comme la Belgique.

P.58

HIRSCHSPRUNG

La maladie de Hirschsprung, qui provoque une constipation chronique parfois létale, touche 1 nouveau-né sur 5 000 dans le monde – principalement des garçons. Aujourd'hui, seul un traitement chirurgical est efficace contre cette maladie.

P.24

« Pour les millénaristes, Dieu est censé avoir décidé de toute éternité la date de l'apocalypse, mais attendre ses signes annonciateurs n'est pas tout à fait la même chose que les provoquer soi-même »

GÉRALD BRONNER, université Paris-Diderot

P.66

25 %

Dans les tribus du passé, les captifs, ces personnes enlevées à d'autres groupes, constituaient jusqu'à 25 % de la population.

P.74

PUBLISH OR PERISH

Ce slogan – « Publier ou périr » – est apparu vers 1927 dans le vocabulaire académique aux États-Unis pour critiquer l'émergence d'un système d'évaluation des chercheurs fondé sur le nombre de publications. Mais la machine était déjà en route...

P.17

HALSZKARAPTOR

Imaginez un dinosaure de la taille d'un canard, ressemblant à un pingouin muni d'un long cou de cygne et d'un museau de crocodile. Vous aurez alors une petite idée d'*Halszkaraptor escuilliei*, une nouvelle espèce de dinosaure découverte dans des roches sédimentaires de Mongolie vieilles de 71 à 75 millions d'années.

P.92

417 KG

C'est le poids de Goliath, la plus grande tortue connue. De l'espèce *Chelonoidis porteri*, endémique de l'île de Santa Cruz, dans l'archipel des Galápagos, cette tortue mesure 135,8 cm de long, 102 cm de large et 68,5 cm de haut.

Santé, science, doit-on tout gober ?

FLORIAN GOUTHIERE



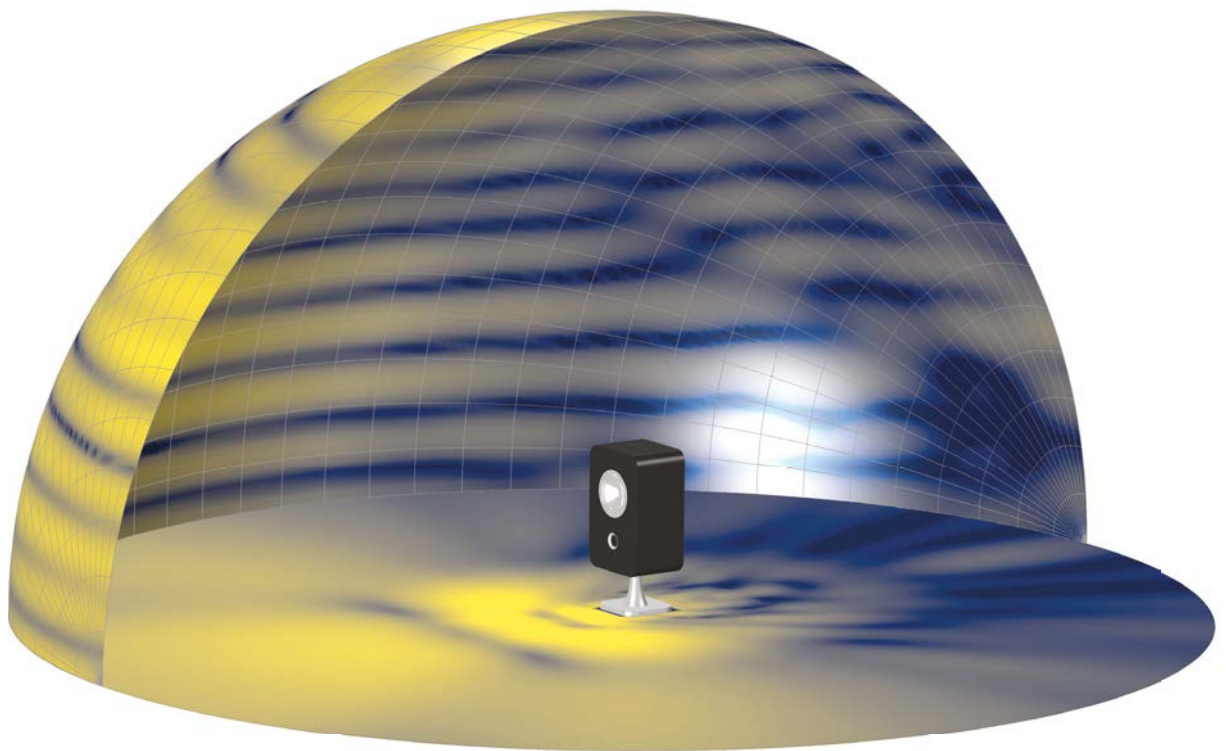
Comment distinguer le faux de l'info ?

belin-editeur.com



Belin:
ÉDITEUR

Pourquoi cette palette de couleurs si spéciale?



Visualisation du niveau de pression acoustique émis par la membrane d'un haut parleur dans une enceinte basse réflexe.

8% des hommes et 0,4% des femmes connaissent la réponse à la question. Cette palette de couleurs a été créée pour que les personnes atteintes de déficiences visuelles des couleurs puissent interpréter précisément les résultats de simulation.

La palette de couleurs Cividis, propriété du Pacific Northwest National Laboratory, est désormais disponible dans le logiciel COMSOL Multiphysics® pour simuler les designs, dispositifs et procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la production et de la recherche.

comsol.com/release/5.3a