

SCIENCE

LOGIQUE
**DES INDÉCIDABLES
ABSOLUS POUR
L'ESPRIT HUMAIN**

MICROBIOLOGIE
**COMMENT
VAINCRE
LES BIOFILMS**

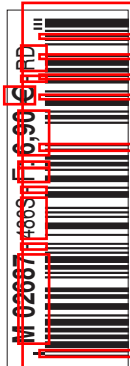
ASTROPHYSIQUE
**TESS ET CHEOPS
À LA RECHERCHE
D'EXOPLANÈTES**

AVRIL 2018
N° 486

LE PARADOXE DE LA TERRE BOULE DE NEIGE

**Comment la vie a profité
d'une ère glaciaire extrême**

ARCHÉOLOGIE
**COMBIEN A COÛTÉ
LA CONSTRUCTION
DE LA TOUR DE BABEL ?**





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

FROID EXTRÊME POUR UN NOUVEAU DÉPART

Notre planète n'a pas toujours joui d'un climat clément. On sait par exemple qu'elle subit, pour des raisons de nature astronomique, des cycles de périodes glaciaires et interglaciaires de quelques dizaines de milliers d'années. Mais dans un passé fort reculé, deux ou trois épisodes beaucoup plus extrêmes se sont produits. Ainsi, comme l'expliquent dans ce numéro les géophysiciens Pierre Sansjofre et Guillaume Le Hir, il y a environ 650 millions d'années, la planète a vraisemblablement été recouverte de glace pendant plusieurs dizaines de millions d'années (voir pages 26 à 35).

À cet épisode dit de la Terre boule de neige sont associées deux grandes questions. La première porte sur le déroulement de cette ère de froid extrême – de l'ordre de -60°C ! – et sur les mécanismes qui l'ont fait survenir, puis disparaître. Le récit que font nos deux auteurs de l'élaboration de la théorie de la Terre boule de neige montre à quel point nos connaissances sur cette question ont progressé depuis 1950, année où l'hypothèse d'un englacement global a été avancée pour la première fois.

Ce récit a une autre vertu, celle d'illustrer que le savoir scientifique se construit par de constants allers et retours entre théorie et observations ou expérimentations. C'est une banalité, mais elle est utile à rappeler à l'ère des *fake news* et des théories complotistes (voir page 7): comprendre comment fonctionne la science aide à distinguer entre ce qui relève de la croyance et ce qui relève de la connaissance.

La seconde grande question liée à l'épisode de la Terre boule de neige est celle de la vie: comment les organismes de l'époque, essentiellement unicellulaires, ont-ils survécu? Et pourquoi, à l'issue de cette ère glaciaire extrême, la vie a-t-elle connu un essor spectaculaire? Ce paradoxe est encore mal élucidé. Mais nos deux auteurs offrent quelques premières réponses...

SOMMAIRE

N° 486 /
Avril 2018

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- Il n'y a plus de chevaux sauvages
- Débattre pour lutter contre les «fake news»
- La topologie inspire un nouveau type de lasers
- Langue poilue, piège à nectar
- Le motif floral d'une goutte qui pulse
- Les plus anciens bijoux sont néandertaliens
- De nouvelles stratégies contre la dépression
- La cage et la corde solaires
- Centipède géant: du venin à l'antidote

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Des hôtels à géométrie variable
Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Les boulets du passé ont de l'avenir
Gérald Bronner



En couverture :
Montage Pour la Science avec deux images © Shutterstock expert/Anton Balazh

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot

GRANDS FORMATS



P. 36

ASSYRIOLOGIE

COMBIEN A COÛTÉ LA TOUR DE BABEL?

Hagan Brunke
et Eva Cancik-Kirschbaum

La ziggourat de Babylone, une grande pyramide à terrasses surmontée d'un temple, a inspiré le mythe de la tour de Babel. Mais tous les rois de Mésopotamie ont construit ce type de monument. À quel coût? La réponse est dans les textes cunéiformes.



P. 54

MICROBIOLOGIE

VAINCRE LES BIOFILMS

Karin Sauer

Dans la nature, les films bactériens, ou biofilms, peuvent constituer un joli spectacle. Mais à l'hôpital, ces communautés bactériennes résistent aux antibiotiques et font de nombreuses victimes. Pour les combattre, les biologistes commencent à retourner leurs propres armes contre elles...



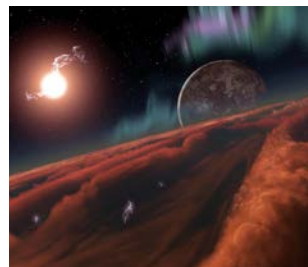
P. 44

SCIENCES SOCIALES

LA DURE RÉALITÉ DU TRAVAIL AU FÉMININ

Ana L. Revenga
et Ana María Muñoz Boudet

Dans tous les pays, y compris les plus avancés, la route vers l'égalité femmes-hommes dans le monde du travail est difficile. Comment surmonter les obstacles?



P. 60

ASTROPHYSIQUE

TESS ET CHEOPS: TRAQUER L'OMBRE DES EXOPLANÈTES

Joshua N. Winn

Près de 4000 planètes extrasolaires ont été détectées à ce jour, dont une bonne partie grâce au télescope spatial *Kepler*. Cette riche moisson de mondes étranges va s'accélérer avec le lancement, cette année, des satellites *Tess* et *Cheops*.



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



P.70
BIOLOGIE

« ÉVOLUTION : DES RÉSEAUX PLUTÔT QUE DES ARBRES »

Entretien avec Éric Baptiste

Molécules, cellules, organismes, sociétés, aucun élément biologique n'agit seul, tous interagissent. L'affirmation paraît banale, mais, développée, elle invite à élargir notre vision de l'évolution. Telle est la thèse qu'Éric Baptiste défend dans son dernier livre, *Tous entrelacés!*.



P.74
HISTOIRE DES SCIENCES

INDIANA JONES AU BUREAU DES LONGITUDES

Colette Le Lay

Les caves renferment parfois des trésors. Découvertes récemment dans celles de l'Institut de France par des chercheurs aventureux, les archives anciennes du Bureau des longitudes révèlent la vie de cette institution depuis 1795 et le quotidien de ses petites mains.



P.26
GÉOSCIENCES

LE PARADOXE DE LA TERRE BOULE DE NEIGE

Pierre Sansjofre et Guillaume Le Hir

Il y a plus de 635 millions d'années, la Terre a connu une période si froide qu'elle a très probablement été recouverte de glace pendant plusieurs dizaines de millions d'années. Or non seulement la vie a persisté, mais les organismes pluricellulaires ont pris leur essor juste après. On commence à comprendre comment...

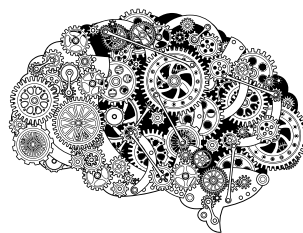
RENDEZ-VOUS

P.80
LOGIQUE & CALCUL

LES INDÉCIDABLES ABSOLUS EXISTENT-ILS?

Jean-Paul Delahaye

En 1951, Kurt Gödel énonça que soit l'esprit humain n'est pas une machine, soit il existe des énoncés qui lui sont indécidables à jamais, soit les deux à la fois. Le débat ouvert sur cette question est toujours d'actualité.



P.86
ART & SCIENCE
Le Pantone de Darwin
Loïc Mangin

P.88
IDÉES DE PHYSIQUE
Comment cuire
un œuf d'autruche?
Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

P.92
**CHRONIQUES
DE L'ÉVOLUTION**
Un paresseux géant
au fond des mers
Hervé Le Guyader

P.96
SCIENCE & GASTRONOMIE
Des quenelles
qui gonflent bien
Hervé This

P.98
À PICORER

A

CTUALITÉS

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

PALÉOGÉNÉTIQUE

IL N'Y A PLUS DE CHEVAUX SAUVAGES



Des chevaux de Przewalski en train de brouter dans la steppe mongole. On considérait ces animaux comme sauvages. En fait, ils descendent d'anciens chevaux domestiqués.

Des génomes anciens révèlent que nos chevaux ne sont pas issus des premiers chevaux domestiqués. Lesquels sont les ancêtres des seuls chevaux que l'on pensait sauvages...

Le cheval de Przewalski, un cheval archaïque découvert en Mongolie en 1879, passait pour sauvage. Les travaux d'une équipe dirigée par Ludovic Orlando, du CNRS et de l'université Paul-Sabatier, à Toulouse, viennent de révéler que ce n'est pas le cas – c'est un animal retourné à la vie sauvage –, et que nos chevaux d'aujourd'hui ne descendent pas de la première population chevaline domestiquée connue.

La domestication du cheval s'est produite au Chalcolithique, en d'autres termes à l'âge du Cuivre (en Asie cen-

trale, approximativement du IV^e au III^e millénaire avant notre ère). Les plus anciens indices proviennent de la culture de Botai, qui était présente dans le nord du Kazakhstan actuel, il y a quelque 5500 ans.

Les porteurs de cette culture, des chasseurs de chevaux, nous ont laissé comme vestiges plusieurs campements mêlant empreintes de huttes à moitié enterrées, enclos et poteries dont les pores ont encore des résidus de lait de jument fermenté. Des litiers d'ossements contenant des centaines de milliers d'os de chevaux parsèment ces campements.

Les archéologues ont observé que 10% des dents de cheval retrouvées portent des traces d'usure, vraisemblablement dues à une sorte de mors.

Ces constatations invitaient à penser que les Botaïs étaient à l'origine de nos chevaux. Toutefois, une précédente étude de Ludovic Orlando avait montré que les ancêtres des chevaux d'aujourd'hui ont été tellement transformés par les éleveurs qu'il apparaît impossible d'établir une filiation entre nos montures et celles des Botaïs. C'est pourquoi ce généticien archéologue a constitué une vaste équipe internationale afin de comparer les génomes de chevaux de la culture de Botai à ceux d'autres chevaux anciens provenant d'Eurasie.

Cette équipe a séquencé les génomes de 20 chevaux de Botai et de 22 chevaux

provenant d'une grande partie de l'Eurasie des 5000 dernières années, auxquels s'ajoutaient les génomes déjà publiés de 18 chevaux anciens et de 28 chevaux modernes. Les chercheurs ont ainsi pu comparer les génomes de 3 chevaux archaïques (d'il y a 42800 à 5100 ans), 7 chevaux de Przewalski (six modernes et un datant du XIX^e siècle) et 78 chevaux domestiques: 25 datant du Chalcolithique (incluant 5 chevaux botais vieux de 5500 ans), 7 datant de l'âge du Bronze (d'il y a entre 4100 et 3000 ans), 18 datant de l'âge du Fer (d'il y a entre 2800 et 2200 ans), 1 cheval parthe et 2 romains, 3 médiévaux et 22 chevaux modernes de 18 races différentes.

Qu'en ressort-il? Deux résultats inattendus. Pour commencer, il s'avère que les chevaux de Botaï sont les ancêtres directs des chevaux de Przewalski. Ainsi, ces animaux sont en fait des équidés féraux, c'est-à-dire des équidés domestiqués retournés à la vie sauvage.

Les généticiens de l'équipe ont mis en évidence certaines évolutions associées à ce retour à l'état sauvage. Citons, parmi elles, la perte de la robe tachetée de certains chevaux de Botaï. Les chercheurs supputent que le variant génétique à l'origine de cette curieuse robe aurait été éliminé par sélection naturelle chez les chevaux de Przewalski parce qu'il entraînait par ailleurs une très mauvaise vision nocturne, un fait établi chez d'autres types de chevaux, comme les Appaloosas (une race de chevaux de selle tachetés créée par les Indiens Nez Percés, en Amérique du Nord).

Le deuxième résultat inattendu est qu'il va falloir rechercher l'origine de nos chevaux domestiques ailleurs que dans la culture de Botaï. En effet, aucun des 22 génomes de chevaux eurasiatiques séquencés par l'équipe de Ludovic Orlando ne s'est révélé apparenté aux chevaux de Botaï. Au moins un autre foyer de domestication a donc existé. Il reste à le trouver. Les chercheurs ont déjà entrepris de le rechercher en Anatolie, en Asie centrale, mais aussi dans les steppes pontiques, de vastes régions de l'est de l'Ukraine et de la Russie méridionale, où les cultures cavalières des Scythes et des Sarmates ont prospéré au cours de l'Antiquité. ■

FRANÇOIS SAVATIER

C. Gaunitz et al., *Science*, en ligne le 22 février 2018

Débattre pour lutter contre les « fake news »

Théories conspirationnistes, faits « alternatifs » et autres détournements de résultats scientifiques : le phénomène des fake news a pris une ampleur considérable. Comment lutter ? Rencontre avec la physicienne tunisienne Faouzia Charfi, marraine de la plateforme Atelier médiation critique tout récemment mise en ligne.



Propos recueillis par CÉCILE LESTIENNE

FAOUIZIA CHARFI
physicienne,
professeure émérite
à l'université de Tunis

Pourquoi soutenez-vous la plateforme Atelier médiation critique que vient de lancer l'AMCSTI (Association des musées et centres pour le développement de la culture scientifique, technique et industrielle), et qui se veut un soutien aux passeurs de science ?

J'ai tout de suite adhéré à ce projet parce que le détournement de la science est pour moi une grave question à laquelle je m'intéresse depuis les années 1980. Au départ, c'est en tant qu'enseignante à l'université de Tunis et non pas en tant que chercheuse que je me suis sentie concernée. À l'époque, je donnais un cours sur la relativité restreinte et certains de mes étudiants ont remis en cause cette théorie au prétexte qu'il n'était pas envisageable que la vitesse de la lumière soit finie. Pourquoi ? Parce que la Lumière étant une manifestation de la puissance de Dieu, elle ne pouvait être limitée. Et du coup, Einstein s'était forcément trompé, comme cela était écrit dans des articles qui circulaient parmi eux. Cela m'avait énormément troublé : comment comprendre que ces jeunes, déjà en deuxième année de physique à l'université, rejettent une théorie scientifique établie et se laissent séduire par des publications qui n'avaient rien de scientifique ? Le phénomène n'a cessé depuis d'augmenter et la séduction des pseudosciences est aujourd'hui démesurément amplifiée par le Web et ses réseaux sociaux. Le problème est sérieux et on ne peut pas rester les bras croisés.

Comment expliquez-vous le succès de ces théories pseudoscientifiques ?

D'abord, il y a certainement une faille dans nos systèmes éducatifs qui ne parviennent pas à bien faire comprendre les différences entre croyances et connaissances. Mais ce n'est pas la seule raison. Dans le monde musulman

d'où je parle, on a vu apparaître, avec la montée de l'extrémisme, une approche de la science qui accorde tout le crédit nécessaire aux technologies, mais laisse de côté les fondements de la science. Autrement dit, une approche qui accepte sans problème les smartphones et les ordinateurs, mais rejette ce qui pourrait heurter une vision du monde prétendument dictée par la foi : la vitesse finie de la lumière, la théorie de l'évolution, etc. Cette collusion délétère s'observe également dans le monde occidental : il s'est ainsi développé aux États-Unis un mouvement chrétien qui interprète les découvertes les plus récentes comme la preuve que la Terre est fixe. Enfin, je pense que ces théories plaisent parce qu'elles sont simples. Pour ne pas dire simplistes.

Comment, selon vous, combattre les fake news ?

Tout d'abord, les scientifiques devraient s'impliquer davantage pour expliquer ce qu'ils font. Ils ne ressentent pas toujours comme une nécessité ce travail de communication de ce que sont les sciences et leurs interrogations. Évidemment, nous, chercheurs, n'avons pas forcément l'habitude d'être contredits sur les fondements de la science. Mais nous devons oser le débat. C'est l'un des intérêts de la plateforme de rassembler à la fois des documents sur des questions scientifiques souvent sujettes à désinformation – théorie de l'évolution, changement climatique, vaccins, etc. – et des outils de médiation pour les chercheurs, professeurs, animateurs... Lesquels sont souvent démunis pour entamer un dialogue constructif avec les jeunes et les moins jeunes séduits par le complotisme ambiant. On voit bien sur Internet que les deux sphères, scientifique et antirationnelle, ne se rencontrent pas. Et pourtant il faut que le débat se fasse et devienne plus visible si l'on veut que le savoir scientifique, en tant que patrimoine universel, soit partagé par nos enfants, où qu'ils vivent. ■

www.atelier-mediation-critique.com

PHYSIQUE

LA TOPOLOGIE INSPIRE UN NOUVEAU TYPE DE LASERS

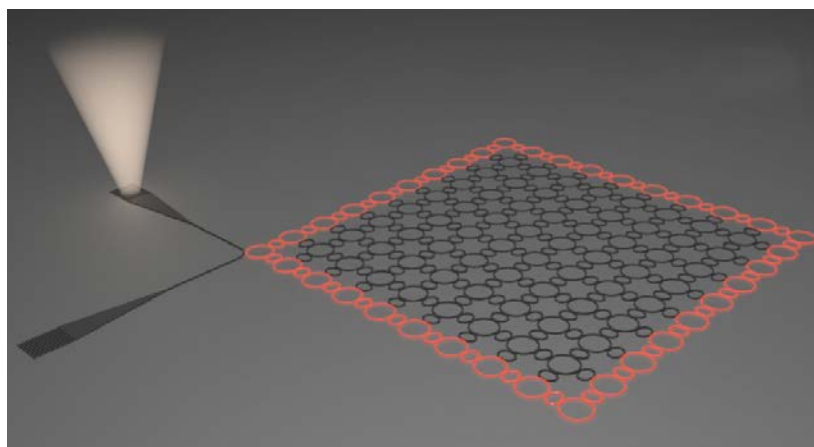
En transposant à la photonique les propriétés électroniques de matériaux qualifiés d'isolants topologiques, des chercheurs ont conçu des lasers particulièrement peu sensibles aux défauts.

Transformer des tasses en beignets, ou inversement, a longtemps été l'apanage de la topologie, partie des mathématiques qui s'intéresse aux propriétés conservées lorsqu'on déforme de façon continue un objet. À partir des années 1970, les physiciens ont remarqué que la topologie leur permettait de comprendre certains phénomènes exotiques en science des matériaux. L'idée d'utiliser la topologie a depuis fait son chemin également en photonique, domaine où l'on étudie les dispositifs manipulant les signaux optiques. Mordechai Segev, du Technion, en Israël, et ses collègues ont utilisé des «isolants topologiques photoniques» pour concevoir un nouveau genre de lasers, qui promettent d'être plus performants et plus simples à utiliser que les lasers existants.

C'est en 2005 que Charles Kane et Eugene Mele, de l'université de Pennsylvanie, ont découvert les «isolants topologiques». Dans un matériau isolant classique, le courant électrique ne peut pas circuler. Les isolants topologiques se comportent comme des isolants, sauf à leur surface, qui est conductrice. L'un de leurs grands avantages est que leurs propriétés concernent l'ensemble du matériau et ne sont pas définies par l'organisation locale des atomes. Ainsi, la présence d'un défaut local n'affecte pas les propriétés topologiques du matériau. Grâce à cette «protection topologique», le courant d'électrons à la surface des isolants topologiques circule sans perturbations.

On comprend donc l'intérêt qu'il y a à développer des dispositifs exploitant de telles propriétés. C'est en particulier le cas pour les systèmes photoniques intégrés, où des lasers émettent leur lumière vers des fibres optiques ou d'autres composants. En raison des réflexions au sein du système, une partie de la lumière revient dans le laser et en perturbe le fonctionnement. Or les dispositifs conçus pour éviter ces effets sont volumineux et ne se prêtent pas à la miniaturisation.

D'où l'idée de développer des lasers topologiques où la lumière réfléchie ne pourrait pas pénétrer dans le dispositif, grâce à des propriétés



Dans ce réseau bidimensionnel de résonateurs optiques circulaires, la lumière ne se propage que sur le bord (en rouge) du système, du fait des propriétés topologiques de ce dernier, et s'y accumule. La lumière laser engendrée dans cette «cavité» constituée par le bord est de grande qualité et peut être extraite (à gauche).

topologiques interdisant cette direction de propagation. En 2017, d'après une idée proposée par le groupe de Guillaume Malpuech, de l'Institut Pascal, à Clermont-Ferrand, l'équipe d'Alberto Amo et Jacqueline Bloch, du C2N, à Marcoussis, a réalisé le premier laser topologique à une dimension. Et la même année, l'équipe de Boubacar Kanté, de l'université de Californie à San Diego, a conçu un dispositif bidimensionnel où le comportement d'isolant topologique vis-à-vis des photons est mis en place grâce à un champ magnétique.

Le laser mis au point par l'équipe de Mordechai Segev se passe de champ magnétique. Il est fondé sur un cristal photonique: un arrangement périodique de résonateurs optiques circulaires (des guides d'onde circulaires où l'énergie s'accumule par interférences constructives). Cet arrangement périodique permet de reproduire pour les photons le même ordre topologique que pour les systèmes électroniques: la lumière circule à la surface du cristal photonique suivant des modes unidirectionnels protégés topologiquement. Cette région constitue l'analogue d'une cavité optique, où la lumière laser s'accumule. Le faisceau laser extrait de ce dispositif est alors de très haute qualité, et il est insensible aux défauts éventuels du système. ■

SEAN BAILLY

G. Harari *et al.*, *Science*, en ligne le 1^{er} février 2018; M. A. Bandres *et al.*, *ibid.*

TELETHROMBOSE

Une étude menée depuis 1987 auprès de 15 158 Américains illustre les dangers de thrombose en lien avec des activités sédentaires, notamment le fait de regarder beaucoup la télévision. Yasuhiko Kubota, de l'université du Minnesota, a montré que le risque de faire une thrombose veineuse, ou phlébite, était multiplié par 1,7 pour les personnes qui passent beaucoup de temps devant la télévision, par rapport à ceux qui ne la regardent pas ou très rarement. Et le risque reste assez élevé même si ces personnes exercent une activité physique par ailleurs.

LANGUE DE PARTAGE

Joanne Yager et Niclas Burenhult, de l'université de Lund, en Suède, ont découvert en Malaisie une nouvelle langue parlée par seulement 280 personnes. Ces chasseurs-cueilleurs sédentarisés étaient connus, mais leur langue, le jede, était passée inaperçue. Son vocabulaire reflète certains aspects de la vie de ce groupe : il n'y a pas de mots pour définir la propriété ou les actions d'acheter et de vendre. En revanche, de nombreux mots expriment le partage et l'échange.

L'EXIL DES MANCHOTS

Grâce à une analyse génétique, Céline Le Bohec, de l'université de Strasbourg, et ses collègues signalent que le réchauffement climatique est probablement une mauvaise nouvelle pour les manchots royaux qui vivent sur les îles de Crozet, Kerguelen, Marion et du Prince-Édouard. L'analyse montre que leurs populations ont été très affectées par les changements climatiques lors des 50 000 dernières années. L'un des risques est que leurs sources de nourriture, les bancs de poissons à proximité, migrent vers le sud, hors de leur portée...

LANGUE POILUE, PIÈGE À NECTAR

Le glossophage de Pallas (*Glossophaga soricina*) est une chauve-souris d'Amérique du Sud qui, comme les colibris, se nourrit de nectar en se positionnant en vol stationnaire face à de grandes fleurs. Il y plonge sa langue qui s'étire de façon spectaculaire pour capter le liquide. Cette technique nécessite une importante dépense d'énergie pour l'animal. Il faut donc que la prise alimentaire soit efficace. Si le colibri forme un tube avec sa langue pour aspirer le nectar, la chauve-souris utiliserait les poils dont l'extrémité de sa langue est munie. Pour évaluer leur efficacité, Alice Nasto, Pierre-Thomas Brun et Anette Hosoi, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis, ont conçu un matériau qui reproduit la structure de cette langue.

Lorsque la langue est au repos, les poils sont à plat sur la surface. Mais quand la langue atteint son extension maximale, les poils se dressent perpendiculairement à la surface grâce à un afflux de sang dans la langue. Pour imiter ce système, Alice Nasto et ses collègues ont fabriqué des bandes de caoutchouc munies de poils verticaux de 2,7 millimètres. En trempant ces « langues » dans de l'huile de silicone, les chercheurs ont mesuré le volume de liquide



Le glossophage de Pallas utilise sa langue extensible pour s'abreuver du nectar au fond des fleurs.

pris dans le matériau. Une densité de poils trop faible piège une petite quantité de liquide, tandis qu'un réseau de poils trop dense empêche la pénétration du liquide, donc son extraction. Pour déterminer la densité optimale permettant de piéger un maximum de fluide, les chercheurs ont modélisé la langue poilue comme un matériau poreux. Ils ont ainsi montré que la chauve-souris, mais aussi l'abeille et la souris à miel (un marsupial nectarivore d'Australie) ont, sur la langue, une densité de poils quasi optimale. Ce qui confirme l'avantage adaptatif conféré à ces espèces par leurs poils. ■

S. B.

A. Nasto et al., *Physical Review Fluids*, vol. 3, article 024002, 2018

MOBILITÉ POUR POINT CHAUD

Les points chauds correspondent à des remontées de roche chaude depuis les profondeurs du manteau terrestre, qui transpercent la croûte à leur aplomb. On supposait que la source profonde d'un point chaud est immobile. Ainsi, comme les plaques tectoniques se déplacent, les points chauds dessinent à la surface des plaques des chaînes de montagnes (sous-marines), des volcans ou des îles bien alignées, à l'image de l'archipel de Hawaï. Cependant, le tracé du point chaud de Hawaï présente des anomalies. La source aurait-elle bougé ?

Kevin Konrad, de l'université d'État de l'Oregon, et ses collègues ont répondu en comparant la trace de ce point chaud avec deux autres traces de même nature présentes sur la plaque Pacifique. Ils ont étudié comment les écarts, en surface, entre les trois points chauds ont varié au



L'archipel de Hawaï, aux îles quasi alignées, est né de l'activité d'un point chaud.

cours du temps. La distance entre ceux de Louisville et Rurutu est restée la même. En revanche, entre 60 et 48 millions d'années, le point chaud de Hawaï s'est déplacé d'environ 640 kilomètres par rapport à chacun des deux autres. La source du point chaud de Hawaï aurait donc bien eu un mouvement propre. ■

S. B.

K. Konrad et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 854, 2018

EN IMAGE

LE MOTIF FLORAL D'UNE GOUTTE QUI PULSE

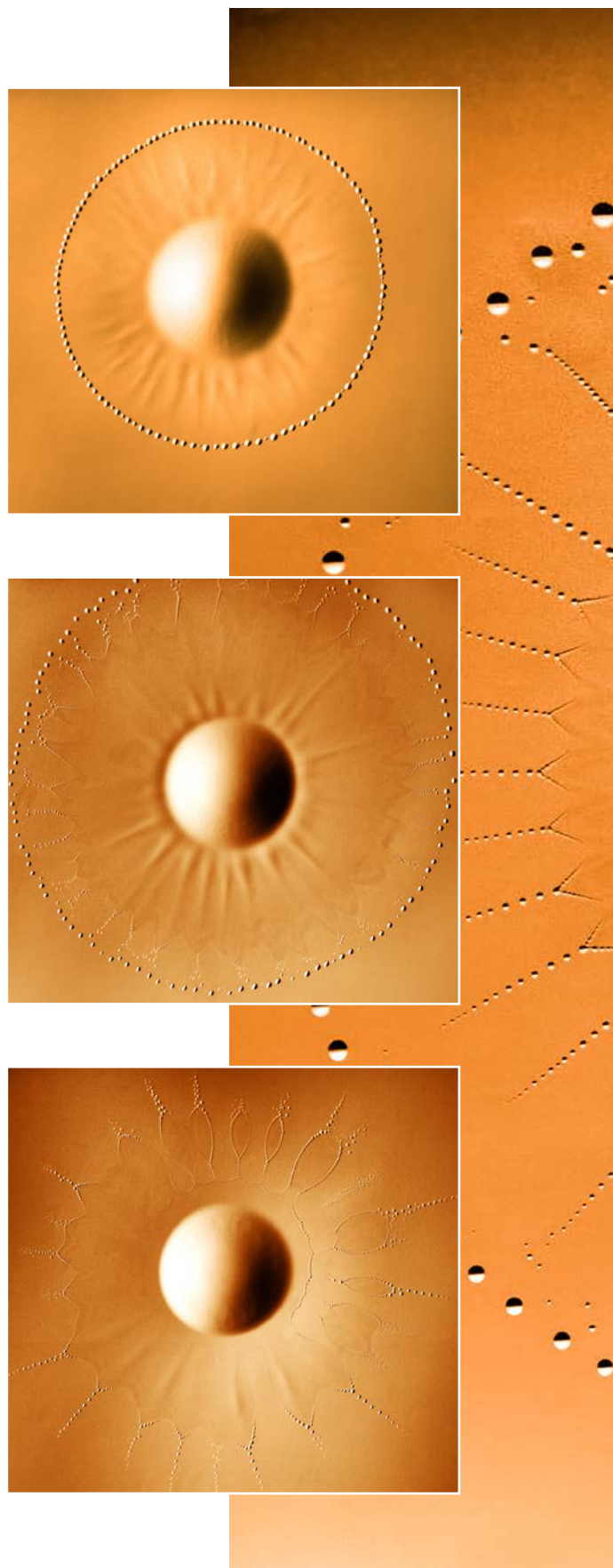
Ces dernières années, la microfluidique a connu un développement important. Ses nombreuses applications reposent sur la manipulation de liquides à des échelles micro-métriques, voire nanométriques. Or, à ces dimensions, le comportement des liquides est dominé par la tension de surface et bien d'autres phénomènes dont la compréhension reste à affiner. Par exemple, une configuration *a priori* simple, une goutte posée sur un substrat aqueux, présente en réalité une diversité de comportements, déterminés par la composition des liquides et leur façon d'interagir. On observe ainsi des gouttes qui se déplacent par aut propulsion, qui explosent en gouttelettes, etc. Véronique Pimienta, du laboratoire IMRCP à l'université de Toulouse, Jacques Magnaudet, de l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse, et leurs collègues ont étudié le cas d'une goutte qui émet des gouttelettes suivant des pulsations régulières.

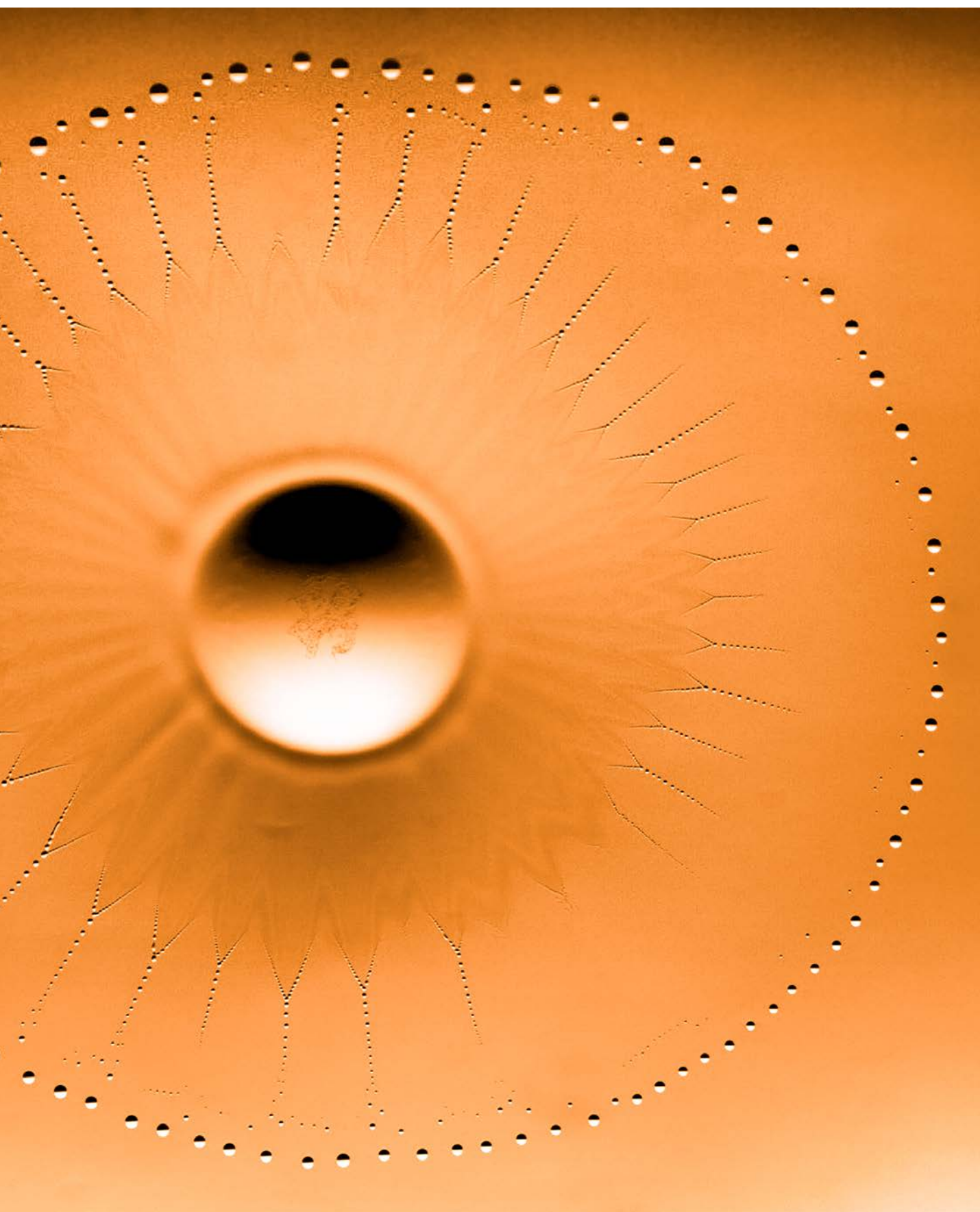
Les chercheurs ont déposé une goutte de dichlorométhane (un solvant souvent utilisé en chimie) à la surface d'un volume d'eau. Les deux liquides contiennent également un composé tensioactif, qui modifie la tension superficielle. Si les tensions de surface entre le fluide de la goutte, l'eau et l'air satisfont une certaine condition, une partie de la goutte s'étale en un film à la surface de l'eau. Sous l'effet de l'évaporation et des conditions régnant sur la ligne de contact des trois fluides, un bourrelet se forme à la périphérie du film. Mais, en raison d'instabilités, le bourrelet se fragmente et les gouttelettes formées sont éjectées vers l'extérieur. Cette fragmentation en gouttelettes a pour effet d'abaisser la tension de surface eau-air, ce qui entraîne la rétraction du film vers la goutte. Puis le système retrouve les conditions initiales et l'expansion du film reprend : la goutte pulse.

Après quelques pulsations, le film devient très mince (moins de un micromètre d'épaisseur). Une autre instabilité conduit à la formation de rides radiales sur le film. Comme pour le bourrelet, les bords des rides se fragmentent en gouttelettes. L'impression d'ensemble est celle d'une fleur et de ses pétales (*voir la grande image ci-contre, en fausses couleurs*). La séquence verticale illustre trois étapes d'une même pulsation en présence des rides sur le film. ■

S. B.

F. Wodlei et al.,
Nature Communications, vol. 9, article 820, 2018





BIOLOGIE ANIMALE

L'ORIGINE D'UN CLONE INVASIF

La première apparition connue de l'écrevisse marbrée (*Procambarus virginalis*) remonte à 1995, en Allemagne. En 2003, des chercheurs ont montré que l'animal se reproduit par parthénogenèse: les gamètes femelles, non fécondés, se développent en des individus tous femelles. Si l'on observe la parthénogenèse chez d'autres animaux aquatiques, il s'agit là du seul cas connu chez un crustacé décapode. Comment l'écrevisse marbrée a-t-elle acquis cette capacité? Cela reste encore un mystère... En revanche, l'équipe menée par Frank Lyko, du centre allemand de recherche contre le cancer, à Heidelberg, a séquencé le génome de l'écrevisse pour expliquer l'apparition de cette espèce et sa nature triploïde – le fait que ses cellules contiennent trois copies de chacun de ses 92 chromosomes.

Deux des copies de chromosomes sont quasiment identiques et la troisième diffère légèrement. Elles sont par ailleurs très proches du génome de *Procambarus fallax*, une espèce d'écrevisse dite des marécages. Cela conforte l'hypothèse selon laquelle l'écrevisse marbrée serait un hybride issu d'un accouplement entre deux écrevisses des marécages provenant de deux régions différentes. Chez l'un des deux partenaires, le génome d'un gamète se serait



Interdite en Europe, l'écrevisse marbrée prolifère ailleurs, comme à Madagascar, où elle menace les espèces locales.

dupliqué, donnant deux copies des chromosomes. La fusion avec la cellule reproductrice de l'autre partenaire a alors apporté la troisième copie.

La parthénogenèse offre un avantage qui constitue une menace pour les autres espèces: celui de pouvoir établir une population de descendants féconds à partir d'un seul individu. L'équipe de Frank Lyko a analysé le génome de différents spécimens d'écrevisse marbrée de par le monde et a confirmé qu'il s'agissait bien de clones identiques à presque 100%. ■

ALINE GERSTNER

J. Gutekunst et al., *Nature Ecology & Evolution*, vol. 2, pp. 567-573, 2018

ASTROPHYSIQUE

LA NAISSANCE DE TCHOURI

En 2014, la sonde Rosetta s'est mise en orbite autour de la comète Tchouri. Elle a révélé une structure en deux lobes que l'on retrouve dans le noyau de nombreuses autres comètes. Les astrophysiciens ont longtemps pensé que cette forme résultait de la fusion de deux comètes faisant suite à un rapprochement en douceur. Mais une telle dynamique est supposée possible uniquement dans les premiers temps du Système solaire en formation. Or, vu la fragilité d'une telle structure, comment a-t-elle pu subsister jusqu'à aujourd'hui?

Patrick Michel, du laboratoire Lagrange, à Nice, et ses collègues ont simulé différents scénarios de formation, dont celui d'une collision à grande vitesse provoquant la destruction des deux comètes initiales. Les chercheurs ont



montré qu'une part des débris est éjectée à des vitesses assez faibles pour se réaccumuler et former deux lobes. Le processus est rapide, quelques jours au plus. Patrick Michel et ses collègues expliquent ainsi la forme, mais aussi la faible densité, la structure et la composition riche en éléments volatils de Tchouri. ■

S. B.

S. R. Schwartz et al., *Nature Astronomy*, en ligne le 5 mars 2018

EN BREF

LES « FAKE NEWS » VONT VITE ET LOIN

Gâce aux réseaux sociaux sur Internet, l'information circule facilement et touche une large audience. Mais ces réseaux diffusent aussi de fausses informations, les fake news. Soroush Vosoughi, du MIT, et ses collègues ont analysé 126 000 histoires diffusées par près de 3 millions de personnes sur Twitter entre 2006 et 2017. Les fausses informations avaient 70 % de chances en plus d'être rediffusées que les bonnes. Et si une information authentique touche en moyenne 1 000 personnes, les fake news atteignent jusqu'à 100 fois plus de monde...

LUPUS : LA CAUSE DANS L'INTESTIN ?

Lorsque la paroi intestinale n'est pas parfaitement étanche, la bactérie *Enterococcus gallinarum* en profite pour s'échapper et s'établir dans d'autres organes, comme le foie. D'après les observations de l'équipe menée par Martin Kriegel, de la faculté de médecine de Yale, la bactérie provoquerait chez la souris une réaction auto-immune semblable à un lupus. Les chercheurs ont ensuite observé chez l'homme la présence de cette même bactérie dans le foie de patients souffrant d'un lupus.

LA COLÈRE DE PROXIMA

Le 24 mars 2017, l'étoile Proxima du Centaure est devenue près de mille fois plus brillante qu'à l'ordinaire pendant une dizaine de secondes. Meredith MacGregor, de l'institut Carnegie, à Washington, et ses collègues invoquent une puissante éruption stellaire pour expliquer ce phénomène. En effet, cette étoile appartient à la famille des naines rouges, sujettes à de telles éruptions massives. C'est une mauvaise nouvelle pour l'exoplanète Proxima b, très proche de l'astre, qui a ainsi été « grillée sur place ».

UN NOUVEL ANTIBIOTIQUE

Certaines bactéries ont, au cours des dernières années, développé une résistance aux antibiotiques, favorisée par l'utilisation extensive et parfois inappropriée de ces médicaments. C'est l'une des plus graves menaces sur la santé dans le monde. Pour tenter de trouver de nouveaux antibiotiques, l'équipe de Sean Brady, de l'université Rockefeller, à New York, a analysé le métagénome (l'ensemble des génomes) contenu dans près de deux mille échantillons de sols récoltés à travers les États-Unis.

Les chercheurs ont ainsi identifié une classe de molécules antibiotiques encore non répertoriées et abondantes, qu'ils ont nommées malacidines. Ils les ont testées sur des rats infectés par le redoutable staphylocoque doré résistant à la méticilline. Le traitement a été efficace et le staphylocoque n'a en outre développé aucune résistance lors des expériences. ■

A.G.

B. Hoyer et al., *Nature Microbiology*, en ligne le 12 février 2018

NEUROSCIENCES

LES ABEILLES KAMIKAZES

Quand des abeilles repèrent un intrus menaçant près de leur ruche, elles préviennent leur colonie en libérant un message chimique dans l'air : une phéromone d'alerte. Elles deviennent alors plus agressives et piquent l'intrus, quitte à en mourir si leur dard se détache de leur corps. Morgane Nouvian, de l'université de Toulouse, et ses collègues ont étudié comment cette phéromone agit sur le cerveau des abeilles. En exposant ces dernières à la phéromone d'alerte, les chercheurs ont montré qu'elles produisaient un surplus de dopamine et de sérotonine dans certaines parties de leur cerveau et devenaient plus agressives. Ils ont ensuite augmenté la concentration de dopamine et de sérotonine dans le cerveau de plusieurs abeilles ou, à l'inverse, bloqué leur action. Comme ils s'y attendaient, les abeilles ayant reçu plus de dopamine et de sérotonine étaient plus agressives, tandis que celles dont l'action de ces molécules était bloquée piquaient moins souvent l'intrus. ■

LINO SUIRE

M. Nouvian et al., *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 285, 20172653, 2018

LES PLUS ANCIENS BIJOUX SONT NÉANDERTALIENS



Les coquillages perforés de la grotte de Los Aviones sont aujourd'hui les plus anciens indices de pensée symbolique. Ils ont été trouvés en association avec d'autres portant des traces d'ocre.

Un bijou est un symbole, qui signale la beauté d'une personne en la rehaussant. Encore récemment, les plus anciennes parures connues de l'humanité étaient des coquillages percés datés de 75 000 ans et provenant d'Afrique du Sud. Mais avec des collègues italiens et espagnols, Dirk Hoffmann, de l'institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste, à Leipzig, vient de dater à 115 000 ans des objets de parure similaires provenant d'Espagne.

Les coquillages perforés d'Afrique du Sud proviennent de la grotte de Blombos, non loin du Cap. Ils ont été découverts dans une strate du Paléolithique moyen africain (de 200 000 à 30 000 ans), qui, outre des pierres taillées, a livré des plaquettes d'ocre gravées de motifs abstraits, de nombreux outils d'os et une quarantaine de coquillages perforés.

Ceux d'Espagne proviennent d'une strate de la grotte de Los Aviones, en Murcie, qui se trouve aujourd'hui face à la mer au ras des flots. Les chercheurs ont daté par l'horloge radiométrique uranium-thorium quatre échantillons prélevés dans le plancher stalagmitique qui couvre cette strate. Leurs résultats convergent vers 115 000 ans avant le présent, bien avant l'arrivée d'*Homo sapiens* en Europe. Les fabricants de ces parures ne pouvaient donc être que des Néandertaliens.

Or on sait que les Néandertaliens étaient dotés de tout l'appareil phonatoire nécessaire pour parler et que, quand ils ont côtoyé les *H. sapiens* au Proche-Orient, ils avaient apparemment les mêmes habiletés qu'eux. Bref, le plus plausible est que la pensée symbolique d'*H. neanderthalensis* et, partant, sa cognition, étaient comparables à celles d'*H. sapiens*. Pour les chercheurs, c'est clair : s'il en est ainsi, c'est qu'il y a plus d'un demi-million d'années, pensée et langage étaient déjà bien développés chez leur ancêtre commun, *Homo heidelbergensis*. ■

F. S.

D. Hoffmann et al., *Science Advances*, en ligne le 22 février 2018

NEUROSCIENCES

DE NOUVELLES STRATÉGIES CONTRE LA DÉPRESSION

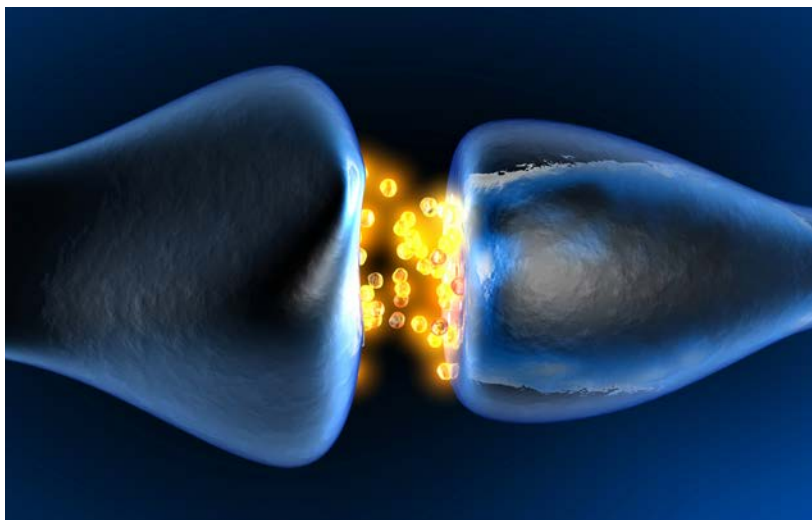
Des polyphénols du raisin diminuent les symptômes dépressifs chez des souris, en modifiant deux mécanismes physiologiques responsables des effets du stress.

Boire du jus de raisin serait bénéfique pour le cerveau. Jun Wang, de l'école de médecine Mount Sinai, à New York, et ses collègues ont montré que certaines molécules contenues dans cette boisson (ainsi que dans le vin), les polyphénols, diminueraient le stress et lutteraient contre la dépression. De plus, les chercheurs ont identifié, chez la souris, les mécanismes en jeu.

Stress et dépression sont associés à une multitude de changements physiologiques ainsi qu'à des modifications de la communication entre certains neurones dans quelques régions cérébrales. Par ailleurs, les antidépresseurs, qui ciblent en général les systèmes de la dopamine, de la sérotonine ou d'autres neurotransmetteurs apparentés, guérissent moins de la moitié des patients, et de façon souvent temporaire. Il apparaît donc urgent de trouver de nouvelles molécules efficaces.

Les recherches s'orientent actuellement vers les molécules inflammatoires qui circulent dans le sang et les anomalies des synapses, les zones de communication et de jonction entre neurones. Ces deux phénomènes provoquent des dysfonctionnements du cerveau responsables de la dépression. En effet, chez les personnes dépressives, le volume de certaines régions cérébrales diminue, en lien avec une communication amoindrie entre les neurones, et on a identifié chez elles des perturbations de l'expression de gènes importants pour l'activité synaptique. Chez les animaux, le stress provoque aussi des remodelages des synapses. Et l'inflammation s'accompagne de la sécrétion de facteurs inflammatoires comme les cytokines, telle l'interleukine 6 (IL-6) que l'on retrouve en plus grande quantité chez les patients dépressifs. Cette molécule entrerait dans le cerveau et perturberait aussi la plasticité synaptique.

Les polyphénols sont connus pour leurs activités antioxydante, anti-inflammatoire, antimicrobienne et anticancéreuse. Et les neuroscientifiques savaient déjà qu'un mélange de trois polyphénols (dont le resvératrol) issus des raisins diminuait divers troubles cognitifs chez l'animal. Mais ils ignoraient son effet dans la dépression et les



Chez les personnes dépressives, l'activité synaptique de certains neurones est altérée. Des molécules présentes dans le raisin limiteraient ces perturbations.

6

UNE CONSOMMATION DE 6 VERRES D'ALCOOL PAR JOUR, OU PLUS, POUR LES HOMMES ET 4 POUR LES FEMMES EST CORRÉLÉE À UN DOUBLEMENT DU RISQUE DE DÉVELOPPER LA MALADIE D'ALZHEIMER.

Source : étude de Carole Dufouil (Inserm-Université de Bordeaux) et al. (M. Schwarzer et al., *Lancet Public Health*, en ligne le 20 février 2018)

mécanismes en jeu. Cette fois, Jun Wang et ses collègues ont identifié les deux molécules issues de la digestion de ces polyphénols : le DHCA et le Mal-gluc. Puis ils ont développé un modèle de souris qui présentaient des symptômes proches de la dépression en provoquant chez elles une inflammation. Les résultats ont montré que ces deux dérivés de polyphénols réduisaient leurs symptômes de dépression (les souris traitées étaient moins stressées en présence de congénères inconnus que les animaux non traités).

Par quel mécanisme ? Le DHCA diminue les quantités d'IL-6 circulant dans l'organisme des souris en bloquant l'expression du gène de l'IL-6. Et Mal-gluc favorise l'expression d'un autre gène, Rac1, qui à son tour permet la production de molécules impliquées dans la plasticité synaptique.

L'inflammation et la plasticité des synapses sont donc de nouvelles cibles thérapeutiques dans la lutte contre la dépression. Et quelques composés des raisins pourraient être à la base de traitements potentiels, au moins chez les personnes qui ne réagissent pas aux antidépresseurs classiques. ■

BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE

J. Wang et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 477, 2018

NEANDERTALIENS FOUSSEURS

A Pogetto Vecchi, en Italie centrale, des travaux ont mis au jour une station de plein air néandertalienne vieille de quelque 171 000 ans. Outre des os et des outils lithiques, Biancamaria Aranguren et ses collègues ont découvert une quarantaine de restes de bâtons. L'une des deux extrémités de ces objets était arrondie pour mieux l'empoigner et l'autre était appointée et durcie. Ces bâtons façonnés au feu dans du buis, un bois très dur et difficile à travailler, servaient probablement à creuser le sol : les Néandertaliens ne négligeaient pas les racines et les autres ressources enfouies !

SUPRACONDUCTEURS MÉTÉORITIQUES

L'équipe d'Ivan Schuller, de l'université de Californie à San Diego, avait décidé de rechercher des supraconducteurs dans la nature, et elle en a trouvé dans une météorite. Les chercheurs ont soumis un échantillon à un très fort champ magnétique et constaté qu'à une très basse température, il se met à absorber très fortement les ondes micrométriques. Ce qui, pour les physiciens, signe la présence dans l'échantillon d'éléments de matière supraconductrice.

LA MONTEE DES OcéANS S'ACCÉLÈRE

L'altimétrie satellitaire prouve que le niveau moyen de l'océan mondial augmente de 3 millimètres par an depuis 1993. Par cette technique, Robert Nerem, de l'université du Colorado, vient en outre d'établir que cette hausse accélère de 0,084 millimètre par an carré, ce qui concorde avec les projections. Si le niveau de la mer continue de monter à ce rythme et avec cette accélération, il se sera élevé en 2100 de plus de 60 centimètres, soit de plus du double de la valeur prévue si le taux restait constant.

IMPRESSION 3D SANS ÉCROULEMENT

De l'aéronautique à l'industrie alimentaire, en passant par la médecine ou l'architecture, les applications de l'impression 3D se multiplient. Akke Suiker, de l'université de technologie d'Eindhoven, aux Pays-Bas, a résolu un problème technique important qui permet d'éviter l'écroulement de la structure imprimée.

En effet, lors d'une impression 3D, les couches supérieures sont rapidement déposées sur les couches inférieures. Le temps de durcissement est donc limité et il est très difficile de savoir s'il est possible de rajouter de la matière sans que la structure ne s'affaisse. Ainsi, au cours d'une impression, deux phénomènes sont à l'origine d'un potentiel écroulement de la structure : le flambage élastique et l'effondrement plastique. Le flambage élastique correspond à la flexion du mur sous la contrainte des couches supérieures qui s'ajoutent, comme une règle à la verticale qui se tord si l'on appuie dessus. L'effondrement plastique correspond aux déformations irréversibles que peut subir la structure sous le poids des couches.

Akke Suiker a modélisé ces deux phénomènes indépendamment l'un de l'autre, pour une paroi verticale construite par impression 3D. Afin de les mettre en équations, il a



Cette structure, imprimée en 3D, est un empilement de couches successives. À quel moment ses parois risquent-elles de s'effondrer ? C'est l'objet de la modélisation réalisée.

converti les nombreux ingrédients physiques du problème (géométrie de la structure, matériau utilisé, vitesse d'impression...) en quelques paramètres adimensionnels.

Le chercheur a vérifié sa modélisation sur des impressions 3D de béton. Il a pu prédire avec une très bonne précision, en fonction des paramètres, les hauteurs critiques auxquelles apparaissent le flambage et la déformation plastique. D'autres validations seront nécessaires, mais le modèle du chercheur néerlandais pourrait simplifier la vie de bon nombre d'utilisateurs de cette technique de fabrication. ■

DONOVAN THIEBAUD

A. S. J. Suiker, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 137, pp. 145-170, 2018

L'HORLOGE DU BABOUIN

Certaines fonctions d'un organisme vivant évoluent selon un rythme imprimé par l'alternance du jour et de la nuit. Cela se traduit par une activité cyclique de l'expression de gènes. Cette horlogerie biologique a été étudiée chez la drosophile, la souris et le poisson zèbre, mais aucune analyse de grande échelle n'avait été menée jusqu'ici chez un primate non humain. Howard Cooper, de l'université de Lyon, et ses collègues ont réalisé un atlas spatiotemporel de l'expression, au cours d'une journée, de plus de 25 000 gènes dans 64 organes et tissus du babouin.

Ils ont constaté avec surprise que bien plus de gènes présentent une expression cyclique chez le primate que chez la souris. La plupart sont concernés, avec de grandes différences entre organes. Les deux tiers du transcriptome



Une bonne partie des gènes ont une activité cyclique rythmée par l'alternance du jour et de la nuit.

– l'ensemble des ARN présents – apparaissent cycliques, dont plus de 80% des ARN qui codent des protéines. L'étude révèle aussi que 82% des cibles de médicaments sont des gènes d'expression cyclique. Une piste pour améliorer leur efficacité. ■

NOËLLE GUILLON

L. S. Mure et al., *Science*, en ligne, 8 février 2018

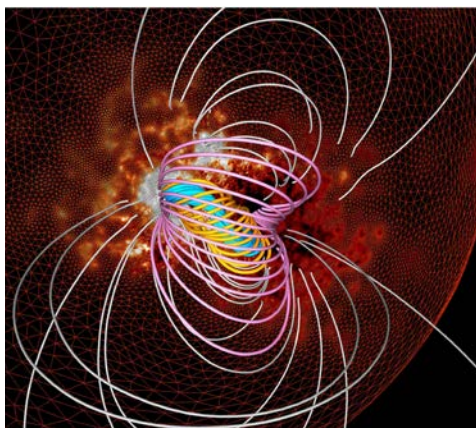
ASTROPHYSIQUE

LA CAGE ET LA CORDE SOLAIRES

Lors de brutales reconfigurations de son champ magnétique, le Soleil est le siège d'éruptions qui libèrent de grandes quantités d'énergie. Les astrophysiciens étudient la dynamique de l'étoile afin de pouvoir, à terme, anticiper ces événements qui perturbent parfois les réseaux de télécommunications terrestres. En 2014, Tahar Amari, à l'École polytechnique, et ses collègues avaient analysé une éruption ayant engendré une bulle de plasma – le type d'éruption le plus puissant. Ils avaient montré qu'une corde magnétique, un gigantesque enroulement torsadé de lignes de champ magnétique, s'était formée le jour avant l'éruption et n'avait cessé de grandir que quelques heures avant le déclenchement de la tempête solaire.

Forts de ce résultat, ces chercheurs ont ensuite examiné d'autres types d'éruptions, notamment une éruption particulière n'ayant pas expulsé de bulle de plasma. Grâce au satellite japonais *Hinode*, ils ont reconstitué le champ magnétique à la surface du Soleil le jour de l'éruption ainsi que les jours qui l'ont précédée. Ils ont ensuite modélisé le champ magnétique dans toute la couronne solaire durant cette même période.

Grâce à cette reconstitution du champ magnétique, Tahar Amari et ses collègues ont



Simulation de la cage magnétique (en orange et rose) dans laquelle se développe la corde magnétique (en bleu) juste avant l'éruption.

mis en évidence la présence d'une sorte de « cage magnétique » qui emprisonnait la corde magnétique. Lors de cette éruption, la corde n'avait pas assez d'énergie pour briser complètement la cage: il n'y a donc pas eu d'éjection de plasma. En revanche, la torsion très importante de la corde a permis à celle-ci de la briser partiellement. C'est cette instabilité qui a provoqué l'éruption sous la forme d'un intense rayonnement. Ainsi, la nature d'une éruption serait définie par l'affrontement énergétique entre la cage et la corde, et l'instabilité de cette dernière. ■

D. T.

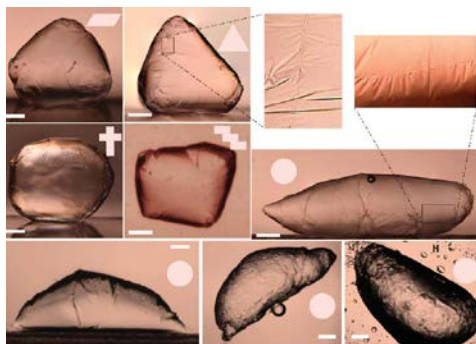
T. Amari et al., *Nature*, vol. 554, pp. 211-215, 2018

PHYSIQUE

ENCAPSULATION DE GOUTTES

Comment mettre sous film à toute vitesse des gouttelettes de liquide? Deepak Kumar, de l'université du Massachusetts, et ses collègues viennent d'expérimenter une possibilité: faire chuter des gouttelettes d'huile sur une surface d'eau recouverte d'un film de polymère ultramine. Ce procédé pourrait servir dans l'industrie agroalimentaire ou pharmaceutique, par exemple.

Les chercheurs ont utilisé des disques de polystyrène de quelques millimètres de rayon et d'épaisseur inframillimétrique, qu'ils ont déposés à la surface de l'eau. Ils ont ensuite lâché au-dessus de ces disques des gouttelettes d'huile (0,6 à 1,2 millimètre de rayon) depuis des hauteurs de 10 à 30 centimètres. À l'impact, le film de polystyrène se creuse puis se referme au-dessus de la gouttelette, constituant une sorte de sac formé et scellé spontanément.



Quelques-unes des gouttes d'huile encapsulées produites par la méthode de l'équipe de Deepak Kumar.

Malgré la dynamique chaotique du choc de la gouttelette, la capsule pleine ainsi obtenue enveloppe l'huile au plus près et présente des joints parfaits. Ces tout petits sacs d'huile ressemblent souvent à un chausson fourré, mais les chercheurs ont découvert qu'ils pouvaient en faire varier les formes en jouant sur le profil du film posé sur l'eau. ■

F. S.

D. Kumar et al., *Science*, vol. 359, pp. 775-778, 2018

EN BREF

NAISSANCE D'UNE SUPERNOVA

Les premières heures de l'explosion d'une étoile en supernova n'avaient jamais été observées. C'est chose faite grâce à l'astronome amateur argentin Víctor Buso. En 2016, il a enregistré, par hasard, les premières heures de la supernova SN 2016gkg, distante de 65 millions d'années-lumière. Melina Bersten, de l'institut d'astrophysique de La Plata, en Argentine, et ses collègues ont montré que ces mesures confirment les modèles qui décrivent le début d'une supernova: une onde de choc émerge à la surface de l'étoile et libère un flash de lumière intense.

LA PERSISTANCE DES TATOUAGES

Pourquoi les tatouages ne disparaissent-ils pas lorsque les cellules qui contiennent le pigment meurent? Récemment, des chercheurs ont montré que les macrophages de la peau englobaient le pigment, le considérant comme un corps étranger. L'équipe de Sandrine Henri et Bernard Malissen, du centre d'immunologie de Marseille-Luminy, ont montré chez des souris que lorsque les macrophages meurent, d'autres absorbent sur place le pigment, ce qui laisse le tatouage intact.

PROSPÈRES MALGRÉ UNE ÉRUPTION

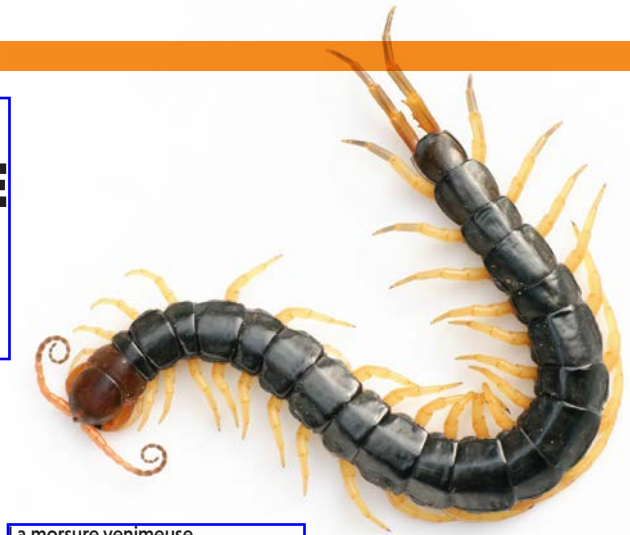
Dans quelle mesure l'éruption puissante du volcan Toba, à Sumatra, il y a 74 000 ans, a-t-elle perturbé le climat (avec un hiver volcanique) et le développement des hommes modernes? Curtis Marean, de l'université Nelson-Mandela, au Cap, et ses collègues ont retrouvé des fragments microscopiques et vitrifiés associés à cette éruption sur deux sites préhistoriques en Afrique du Sud. Le nombre d'os et d'outils exhumés montre que l'activité humaine était prospère, donc pas ou peu affectée par le volcan.

CENTIPÈDE GÉANT: DU VENIN À L'ANTIDOTE

Gâce à leur morsure venimeuse, certains centipèdes géants sont capables de chasser de petits rongeurs dix fois plus lourds qu'eux et de les neutraliser en quelques dizaines de secondes. Lei Luo, de l'institut de zoologie de Kunming, en Chine, et ses collègues ont découvert et élucidé le mode d'action de SsTx, l'agent toxique de leur venin.

Les chercheurs ont constaté que la toxine peptidique SsTx présente une séquence d'acides aminés unique parmi les toxines animales connues. Ils ont établi qu'elle perturbe le fonctionnement de toute la famille des canaux potassiques de type KCNQ, impliqués non seulement dans le système nerveux central, mais aussi dans les muscles squelettiques et dans le système cardiovasculaire. Cela provoque une hyperpolarisation des membranes cellulaires, conduisant à des spasmes des vaisseaux sanguins, à l'origine de nécroses, mais aussi des perturbations plus générales du système cardiovasculaire telles que de l'hypertension aiguë et des accidents cardiaques. Le système respiratoire est également touché.

Dans des régions comme l'État de Hawaïi, 11% des admissions aux urgences sont liées à des morsures de ces centipèdes. Mais en l'absence d'antidote, la prise en charge est exclusivement symptomatique. La découverte du mode d'action de la toxine SsTx a conduit à l'identification d'une éventuelle parade: la rétigabine,



La morsure venimeuse de certaines grandes scolopendres (ou centipèdes) est redoutable.

parfois prescrite pour lutter contre l'épilepsie. Elle provoque l'action opposée à celle de la toxine SsTx et force l'ouverture des canaux de type KCNQ. Les chercheurs ont montré, chez la souris et le macaque, qu'après une injection de venin ou de toxine SsTx seule, l'administration de rétigabine en supprime les effets délétères et rétablit un fonctionnement normal de l'organisme. ■

MARTIN TIANO

L. Luo *et al.*, *PNAS*, vol. 115(7), pp. 1646-1651, 2018

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

COURS PUBLICS

L'ADN dans l'environnement

Lundi 9 avril - 18h : Empreintes du vivant : l'ADN de l'environnement

Avec D. Joly, directrice de recherche, CNRS,
L. Le Gall, maître de conférences, Muséum
et D. Faure, directeur de recherche, CNRS

Lundi 16 avril - 18h : Les goûts et les odeurs, des histoires de familles... de gènes

Avec E. Jacquin-Joly, directrice de recherche, INRA et M. Harry, professeur à l'Université Paris-Sud, directrice adjointe d'unité (CNRS, IRD, Paris-Sud)

Lundi 23 avril - 18h : Comment les champignons se sont-ils adaptés au fromage ?

Avec J. Ropars, chargée de recherche CNRS à l'université Paris-Sud et J. Dupont, professeur au Muséum, mycologue et responsable de la collection de moisissures

MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 22 avril - 15h : Psychologue de l'environnement, avec A.-C. Prévot

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

FILMS

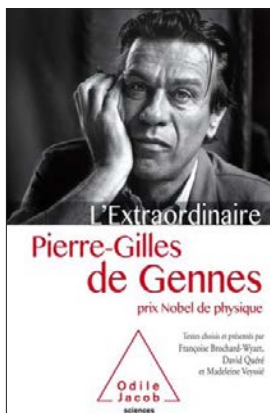
Saison biodiversité

Samedi 28 avril - 15h : Roger Heim et les champignons hallucinogènes

Réal : P. Thévenard - France - 1963 - 113 min. Produit par la fondation Singer-Polignac et jamais diffusé en salle.

En présence de V. Verroust, Centre Alexandre Koyré (EHESS), chercheur associé à l'Institut universitaire d'histoire de la médecine et de la santé publique (Centre hospitalier universitaire vaudois, Lausanne)





HISTOIRE DE LA PHYSIQUE

**L'EXTRAORDINAIRE
PIERRE-GILLES DE GENNES**

Françoise Brochard-Wyart,
David Quéré et Madeleine Veyssié

Odile Jacob, 2017
224 pages, 23,90 euros

Cet ouvrage rassemble des textes écrits par Pierre-Gilles de Gennes

au fil de son brillant parcours universitaire et académique. Ce sont, pour la plupart, des discours ou des textes introductifs associés à des événements de sa carrière. Les textes choisis permettent de découvrir les multiples aspects de ce grand scientifique, qui fut aussi un excellent pédagogue, un très actif diffuseur de la science et un homme très ouvert au contact entre la recherche et le monde. Les différents domaines qu'il a abordés au cours de sa carrière de chercheur ne constituent pas le sujet de cet ouvrage. Il est centré principalement sur la personnalité multiple et chaleureuse d'un homme pour qui le rôle de la science dans le monde humain importait plus que la découverte pour elle-même de nouvelles propriétés de la matière. Je pense que c'est ce message que les auteurs de ce livre ont souhaité faire passer, plus que la dimension purement scientifique de ses travaux, largement reconnus tant en France, avec son titre d'académicien des sciences et son poste de professeur au Collège de France, que dans le monde, avec son prix Nobel de physique. Les textes choisis nous emmènent vers de multiples publics, souvent jeunes. Les conseils que leur donne Pierre-Gilles de Gennes sur le rôle et la place de la science dans notre monde ne peuvent que les convaincre que la science est belle, quels que soient les préjugés qui se répandent sur elle. Seul petit regret, le titre de ce très riche ouvrage tend à faire de cet homme un être exceptionnel, alors que celui que j'ai bien connu était, tout au contraire, un être profondément chaleureux, humain et simple.

JEAN MATRICON / PROFESSEUR EMERITE
DE PHYSIQUE À L'UNIVERSITÉ PARIS-DIDEROT

MATHÉMATIQUES

**L'ART DE NE PAS DIRE
N'IMPORTE QUOI**

Jordan Ellenberg

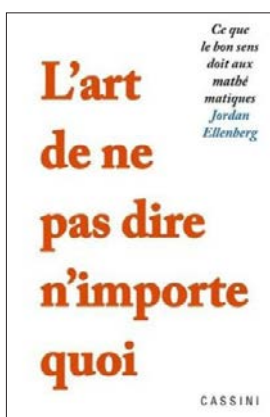
Cassini, 2017
544 pages, 20 euros

Ce qui est profond n'est généralement pas facile d'accès, comme le clamait le physicien américain Richard Feynman, à qui un journaliste reprochait de ne pas pouvoir expliquer simplement les travaux lui ayant valu le prix Nobel. Ce livre, sous-titré *Ce que le bon sens doit aux mathématiques*, réalise l'exploit de prouver le contraire : à partir d'exemples simples, il montre l'intérêt d'un sujet puis explique la percée des mathématiques qui en extraient l'idée pertinente. Prenons l'exemple du début de l'ouvrage sur les blindages d'avion qui alourdissent les appareils. Le premier réflexe était de les placer là où les impacts de balles étaient les plus nombreux sur les avions qui revenaient du combat. Heureusement, le statisticien Abraham Wald expliqua qu'il fallait mettre un blindage là où il n'y avait pas d'impact de balle, autour du cockpit du pilote et du moteur. Pourquoi ? Parce que les avions qui avaient subi ces impacts avaient été abattus et ne faisaient plus partie de l'échantillon !

Simple bon sens, me direz-vous.

Les mathématiques ne sont pas mystérieuses, elles lèvent le voile sur certains mystères du monde et, en cela, prolongent le bon sens... jusqu'à la stratosphère. Pour ce faire, l'art du mathématicien, explicité dans de nombreux exemples du livre, est aussi de définir des objets nouveaux qui permettent de calculer. Les mathématiques sont autant des idées que des calculs. Ce sont ces concepts qui, transposés d'une discipline mathématique à l'autre, autorisent les progrès. Un exemple de l'ouvrage explique ainsi la relation de parenté étroite (une fois qu'elle est discernée...) entre la géométrie projective et les codes correcteurs d'erreur utilisés partout dans les communications modernes. Ce livre est une merveille, un des meilleurs livres de vulgarisation des mathématiques. Je ne trouve pas de mots assez forts pour exprimer ma reconnaissance à l'auteur.

PHILIPPE BOULANGER



GÉOLOGIE-ASTROPHYSIQUE

UNE BELLE HISTOIRE DES MÉTÉORITES

Matthieu Gounelle

Flammarion/MNHN, 2017

112 pages, 20 euros

Les météorites sont des phénomènes naturels qui ont la particularité d'être connus de tous, mais de continuer à être entourés, au moins pour le grand public, d'un certain mystère. Toute chute de météorite suscite l'attention des médias, même si la science sait fort bien de quoi il s'agit. Elle ne le sait cependant pas depuis si longtemps : jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, beaucoup de savants, y compris le grand Lavoisier, refusèrent de croire que des pierres pussent tomber du ciel. L'auteur de ce livre fait le point sur les météorites dans une optique résolument historique, relatant aussi bien des chutes célèbres que des découvertes de « pierres » déjà tombées et de cratères d'impact. Il présente les croyances qui s'y sont attachées depuis des temps lointains, et cela un peu partout dans le monde, jusqu'à ce que des scientifiques tels qu'Ernst Chladni et Jean-Baptiste Biot parviennent à démontrer la vraie nature de ces objets mystérieux. Ce faisant, il fournit au lecteur une foule d'informations sur ce que sont les météorites, les différents types que l'on peut distinguer, leurs origines et les conséquences de leurs collisions avec la Terre, sous forme de cratères, bien sûr, mais aussi, si le bolide est d'une taille suffisante, d'extinctions massives d'espèces. Comme le dit très justement l'auteur : « N'en déplaise à ceux qui voudraient que la Terre évolue en vase clos, sous l'influence de forces purement internes, le ciel nous tombe parfois sur la tête. » Il n'est pas nécessaire pour s'en convaincre de remonter au destin tragique des dinosaures : les habitants de la ville russe de Tcheliabinsk, ravagée en 2013 par l'explosion dans l'atmosphère d'une météorite d'environ 13 000 tonnes, peuvent en témoigner. Clarté du style, choix judicieux des épisodes relatés et précision de l'information scientifique caractérisent cet ouvrage, rendu plus attrayant encore par des illustrations abondantes et de grande qualité.

ERIC BUFFETAUT / CNRS-LABORATOIRE DE GÉOLOGIE DE L'ENS

HISTOIRE DES TECHNIQUES

L'INVENTION DE LA MÉMOIRE

Michel Laguës, Denis Beaudouin et Georges Chapouthier

CNRS Éditions, 2017

384 pages, 25 euros

Le propre de l'homme ne semble pas être d'avoir quelque aptitude inconnue des autres espèces, mais de pousser ses aptitudes plus loin. Ainsi, mémoriser ne lui est pas propre. Les animaux le font, sont capables d'apprentissages. Mais l'homme, fidèle donc à ce qui fait son propre, invente des techniques d'enregistrement prodigieuses. Ce livre, consacré à leur histoire, ne discute pas les directions choisies, mais décrit les procédés. Il s'adresse à qui aime aller voir dans les appareils pour savoir « comment ça marche ». Très diverses sont les techniques relevant de la notion, extensive, de mémorisation. L'imprimerie, la photographie, l'enregistrement automatique de paramètres météorologiques, l'enregistrement du son, le cinéma sont quelques étapes d'une entreprise de mémorisation entamée avec les peintures rupestres, poursuivie avec les écritures, nées en plusieurs foyers, puis avec le support privilégié de celles-ci – le papier, inventé en Chine au III^e siècle avant notre ère, importé en Occident par les Arabes, fabriqué en France à partir du XIV^e siècle seulement. Dès l'Antiquité, des mécanismes ont aidé à mémoriser : les Grecs en ont construit dotés d'engrenages complexes reproduisant des mouvements d'astres, preuve qu'ils disposaient de relevés astronomiques portant sur une période longue. Depuis la fin du XX^e siècle, le progrès fulgurant des techniques de mémorisation s'exprime dans l'explosion numérique qui fait notre quotidien.

DIDIER NORDON

ET AUSSI



LA CHIMIE ET LES SENS Minh-Thu Dinh-Audouin, Danièle Olivier et Paul Rigny (dir.)

EDP Sciences, 2018

256 pages, 25 euros

A l'initiative de la maison de la Chimie, les progrès de la compréhension des mécanismes biologiques et chimiques sous-tendant les sens sont ici l'objet de douze chapitres d'experts. Ainsi, un chercheur de l'Inra explique comment se construit le goût à partir des molécules ; une chercheuse comment l'olfaction peut servir au diagnostic médical ; un parfumeur, quelles visions son industrie réalise... Le tout est illustré de nombreuses images et schémas.

MANGROVE, UNE FORÊT DANS LA MER François Fromard, Emma Michaud et Martine Hossaert-McKey (dir.)

CNRS/Cherche Midi, 2018

168 pages, 24,90 euros

Les « forêts dans la mer » que sont les mangroves couvrent 75 % du domaine côtier intertropical. Ce très beau petit livre nous livre l'essentiel sur les mangroves du monde, à la fois en images et par des textes d'auteurs scientifiques qui expliquent leurs particularités (structure de forêt tropicale humide simplifiée, faune à la fois marine et terrestre, etc.) et leur utilité (ressources en bois et poissons, protection contre les tempêtes, puits de carbone, etc.). Et, ce qui ne gâche rien, ce scientifique et intéressant discours s'accompagne de belles images de mangroves.

L'HOMME GLIAL Yves Agid et Pierre Magistretti

Odile Jacob, 2018

208 pages, 23 euros

Comment parler du cerveau si l'on en oublie la moitié, constituée par les cellules gliales ? Ces dernières forment la matière blanche, l'environnement des neurones. Or, expliquent les auteurs, elles ont certaines de leurs propriétés et sont réceptives à des signaux provenant de l'environnement. Yves Agid et Pierre Magistretti, des neuroscientifiques, expliquent pourquoi elles pourraient se révéler importantes dans les stratégies de lutte contre les pathologies du cerveau, et aussi pourquoi il est impossible de les négliger dans l'étude de l'origine et de la genèse de la pensée.

POITIERS

JUSQU'AU 7 JUILLET 2018
Espace Mendès-France
<https://emf.fr>

Milieux extrêmes



Vous voulez vous échapper du paysage urbain ou de la campagne de type européen? Faites donc un tour à l'Espace Mendès France, qui vous fera voyager dans quatre environnements exotiques: les grands fonds océaniques, le continent antarctique, les forêts tropicales humides et... la planète Mars! Le voyage est bien sûr virtuel, ce qui est préférable: les forêts tropicales mises à part, les milieux en question sont d'une grande hostilité...

L'exposition vous le fera comprendre à l'aide de trois panneaux explicatifs et illustrés pour chaque environnement, de panoramas photographiques (par exemple, la plateforme glaciaire Larsen C pour l'Antarctique), de petites expériences (par exemple, pour les grands fonds, sur la pression hydrostatique et sur la bioluminescence), d'objets (un morceau de cheminée hydrothermale, une maquette du rover *Curiosity*...) et d'applications multimédias. ■

DAINVILLE (HAUTS-DE-FRANCE)

JUSQU'AU 17 JUIN 2018
Maison de l'Archéologie
<http://archeologie.pasdecals.fr>

Ça ne manque pas de sel!



Le sel, indispensable à l'organisme, a occupé une place notable dans l'histoire des sociétés humaines. Origine du sel, modes de production, usages: tels sont les grands axes de cette exposition qui fait notamment appel à de récentes découvertes archéologiques dans le nord de la France, relatives à la période gauloise. ■

MONTPELLIER

JUSQU'AU 6 MAI 2018
La Panacée, MoCo (Montpellier contemporain)
www.lapanacee.org

Crash test



Cette exposition réunit des œuvres de 25 jeunes artistes, de divers pays. Sans rapport avec les essais menés par les constructeurs automobiles, malgré son titre, elle propose d'explorer une production artistique centrée sur la matière, « qui travaille le réel [et] annule la division traditionnelle entre les notions de culture et nature ». ■

ET AUSSI

Mardi 3 avril, 20 h 30
Espace des sciences
Rennes
www.espace-sciences.org
LES NOIRCEURS DE L'UNIVERS
Daniel Kunth, astronome au CNRS et à l'Institut d'astrophysique de Paris, présente plusieurs énigmes liées au noir cosmique: la noirceur du ciel nocturne, les trous noirs, la matière noire, l'énergie sombre (ou noire)...

Mercredi 4 avril, 18 h 30
BNF - Paris
www.bnf.fr
LA ET THÉORIE DE VAPNIK
Dans le cadre des conférences « Un texte, un mathématicien », Yann LeCun, un pionnier de l'apprentissage profond, parle d'un livre du mathématicien russe Vladimir Vapnik sur l'apprentissage statistique.

Mercredi 4 avril, 18 h 30
Espace Mendès-France
Poitiers
<https://emf.fr>
IMAGERIE RÉTINIENNE
Observer la rétine d'un patient est aujourd'hui banal pour suivre ou détecter une pathologie oculaire. Nicolas Leveziel, professeur au service d'ophtalmologie du CHU de Poitiers, retrace l'histoire de cette imagerie, jusqu'à nos jours.

Jeudi 5 avril, 18 h
Campus Joseph-Aiguier
Marseille
provenance-corse.cnrs.fr
PERTURBATEURS ENDOCRINIENS
Conférence de Vanessa Delfosse, chercheuse au CNRS, qui abordera notamment l'« effet cocktail » des perturbateurs hormonaux.

Samedi 21 avril, 23 h 30
Sur la chaîne Arte
FUSION NUCLÉAIRE : LA QUÊTE DU GRAAL
Un documentaire sur le travail des scientifiques du projet international Iter, dans le sud de la France, et sur des inventeurs indépendants qui cherchent (probablement en vain) à libérer le même type d'énergie avec des dispositifs peu coûteux.

VALENCIENNES

DU 19 AVRIL AU 22 JUILLET 2018
Musée des Beaux-Arts de Valenciennes
<http://valenciennesmusee.valenciennes.fr>

Une histoire du monde en 100 objets



Avec 100 pièces issues des collections du British Museum, cette exposition, réalisée en collaboration avec le musée londonien, évoque deux millions d'années d'histoire de l'humanité. Les visiteurs pourront notamment y voir une pierre taillée trouvée en Tanzanie et datant d'au moins 1,8 million d'années, une tablette d'argile du ^{vi} siècle avant notre ère racontant, en cunéiforme, une légende similaire à celle du déluge biblique, des pièces de jeu d'échecs découvertes en Écosse et datant de 1150 environ (*ci-dessus*), un chronomètre dont était équipé le *Beagle*, le navire qui a emmené Charles Darwin autour du monde... ■

PARIS

JUSQU'AU 19 AOÛT 2018
Palais de la Découverte
palais-decouverte.fr

Pasteur, l'expérimentateur

Illustre figure de la science française du ^{xix} siècle, Louis Pasteur est l'auteur de travaux qui ont été d'une importance capitale pour la biologie et la médecine: mise en évidence du lien entre microbes et maladies infectieuses, invention de la pasteurisation, réfutation de la théorie de la génération spontanée, introduction de la vaccination...

L'histoire de l'homme et de ses travaux scientifiques est racontée ici à travers des films, des éléments interactifs, des reconstitutions de scènes de l'époque, des maquettes animées, un théâtre optique. La scénographie vient faire



écho au souci de la mise en scène que manifestait Pasteur lorsqu'il communiquait ses résultats ou réalisait des démonstrations scientifiques publiques. L'exposition se déroule d'ailleurs en un prologue, sept actes (cristaux et dissymétrie, fermentations, génération spontanée, maladies des vers à soie, etc.) qui suivent l'ordre chronologique des recherches de Pasteur, et un épilogue ouvrant sur aujourd'hui. ■

FRANCE

À PARTIR DU 28 MARS 2018
En salles de cinéma



Madame Hyde

Dans un établissement de banlieue, Madame

Jequit, une professeure de physique timorée (Isabelle Huppert), est malmenée par ses élèves. Un jour, elle est foudroyée dans son laboratoire. Elle subit une étrange transformation, qui lui donne de l'énergie pour enseigner, mais qui la rend aussi dangereuse... Un film de Serge Bozon où il est notamment question de la transmission du savoir, du plaisir de comprendre, d'électricité...

SORTIES DE TERRAIN

Dimanche 8 avril, 10 h
Parking de l'Escalet, Ramatuelle (83)
Tél. 04 42 20 03 83

LE PALMIER NAIN

Une journée de promenade sur les sentiers du cap Taillat à la rencontre du palmier nain, la seule espèce de palmier autochtone en France, et des insectes, oiseaux et mammifères qui assurent sa reproduction.

Samedi 14 avril, 9 h 30
Antibes

Tél. 04 42 20 03 83

PRAIRIES HUMIDES

Excursion d'une matinée pour découvrir la flore et la faune des prairies humides d'Antibes, ainsi que pour comprendre l'hydrologie de ce milieu et ses services rendus.

Samedi 28 avril, 10 h
Parking de la centrale de Marckolsheim (67)
Tél. 06 47 29 16 20

LE VOLCAN

DU KAISERSTUHL
Escapade à la journée en Allemagne voisine, où les participants apprendront l'histoire de ce massif volcanique du Tertiaire et pourront voir une rareté géologique, la carbonatite.

Jeudi 26 avril, 7 h 30
Sainte-Gemme (Indre)
Tél. 02 54 28 12 13

INITIATION AUX CHANTS D'OISEAUX

Se lever de bon matin pour aller écouter les chants printaniers des dinosaures ailés, et tenter d'identifier leurs émetteurs : tel est le programme de cette sortie de trois heures, sans marcher beaucoup.

Jeudi 5, 12, 19 et 26 avril
Fouesnant (29)
Tél. 02 98 51 18 88

NARCISSES DES GLÉNAN

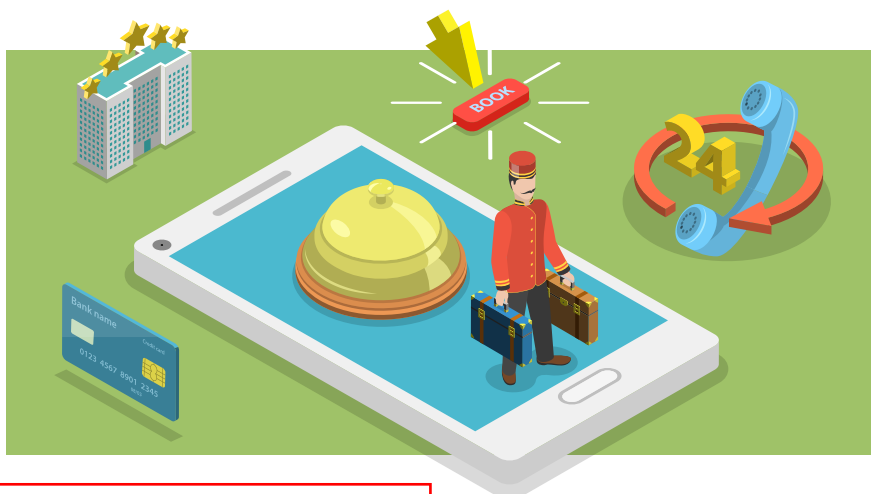
Après une heure de traversée en mer, on débarque afin de passer la journée sur les îles des Glénan et de découvrir, en compagnie d'un guide, la floraison de *Narcissus triandrus capax* : une sous-espèce de narcisse endémique de ce petit archipel et qui a failli disparaître.



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWECK

DES HÔTELS À GÉOMÉTRIE VARIABLE

Parce qu'une part importante de l'activité hôtelière est gérée par des services en ligne, un hôtel peut désormais être réparti sur plusieurs sites. Bienvenue dans la non-localité !



Il y a quelques années, après avoir réservé en ligne une chambre d'hôtel, j'ai reçu un courrier électronique qui me communiquait deux digicodes, l'un permettant d'accéder à cet hôtel, l'autre à ma chambre. Arrivé sur place, mon hôtel ressemblait à un immeuble ordinaire, dans lequel le premier code permettait effectivement d'entrer. Quant au second, il servait à ouvrir la serrure électronique d'un studio : ma «chambre».

Plusieurs appartements de cet immeuble étaient des «chambres d'hôtel», alors que les autres étaient des logements ordinaires. À l'inverse, les chambres de cet hôtel étaient peut-être réparties dans plusieurs immeubles de la ville. La géométrie des hôtels avait changé : la localité avait fait place à la non-localité.

En quoi cet hôtel non local diffère-t-il des hôtels classiques, disons du xx^e siècle ? À l'époque, une enseigne sur leur devanture indiquait que ces immeubles étaient des hôtels. On trouve maintenant cette information en cherchant sur divers sites de réservation en ligne. Par ailleurs, dans

ces hôtels du xx^e siècle, un réceptionniste était chargé de répondre au téléphone aux clients souhaitant réserver une chambre. Il accueillait les voyageurs, leur indiquait le numéro de leur chambre, comment accéder au réseau, etc. Il leur donnait la clé de leur chambre et procédait au règlement en collectant l'argent – sous forme de billets de banque, de chèques, etc.

Le réceptionniste, qui ne pouvait être qu'à un seul endroit à la fois, conférait à l'hôtel sa localité

Toutes ces activités du réceptionniste consistent en réalité à échanger de l'information. Il est donc possible de transmettre ces informations autrement : on réserve et paye sa chambre sur les sites en ligne, les diverses informations concernant l'accès à l'hôtel, le numéro de la chambre, etc.

sont communiquées à l'avance par courrier électronique. La clé, elle-même, n'est qu'un support d'information, parmi d'autres possibles, indiquant quel client peut utiliser quelle chambre. Cette information est désormais représentée par un code à quatre chiffres.

La comparaison montre qu'une part importante du métier des hôteliers consiste à échanger de l'information. Ils le faisaient au xx^e siècle par l'intermédiaire de lumière, de son, de clés, de billets de banque, etc. Ces protocoles déterminaient la géométrie des hôtels : le réceptionniste, qui gérait les chambres et qui ne pouvait être qu'à un seul endroit à la fois, conférait à l'hôtel son caractère local. Quand ces protocoles ont changé, il en a été de même de la géométrie hôtelière, devenue non locale. Ce changement en a entraîné un autre : il n'est désormais plus nécessaire d'être propriétaire d'un immeuble entier pour ouvrir un hôtel, un appartement suffit.

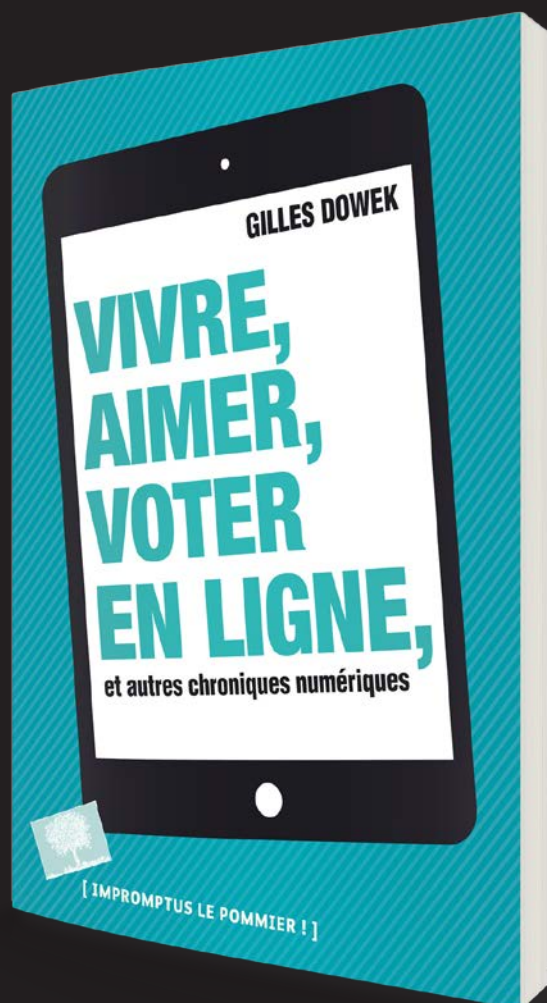
Certes, le travail dans un hôtel ne se résume pas à de l'échange d'information. Divers services exigent une présence physique. Au xx^e siècle, du personnel changeait les draps, remplaçait les ampoules défectueuses, réparait les fenêtres cassées, préparait le petit-déjeuner, etc. Ces services perdurent : dans l'hôtel non local, une personne passe de temps en temps nettoyer les chambres, un numéro de téléphone peut être appelé en cas d'urgence et le café, au coin de la rue, sert des petits-déjeuners aux voyageurs qui ne le préparent pas eux-mêmes. Reste que cette part matérielle n'est sans doute pas l'essentiel dans l'organisation d'un hôtel : ce n'est pas elle qui en détermine la géométrie, mais les protocoles de communication.

Une chose, en revanche, était possible dans les hôtels au xx^e siècle et ne l'est plus aujourd'hui. Dans certains au moins de ces hôtels, on pouvait commander une bouteille de champagne au milieu de la nuit. Ce luxe a tendance à disparaître. ■

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

Livre
conseillé par
POUR LA
SCIENCE

Qu'est-ce que vivre à l'ère numérique ?



Un livre en forme
de kaléidoscope
pour se construire
sa propre vision de
la révolution digitale.

Gilles Dowek, 176 pages, 12 €

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr

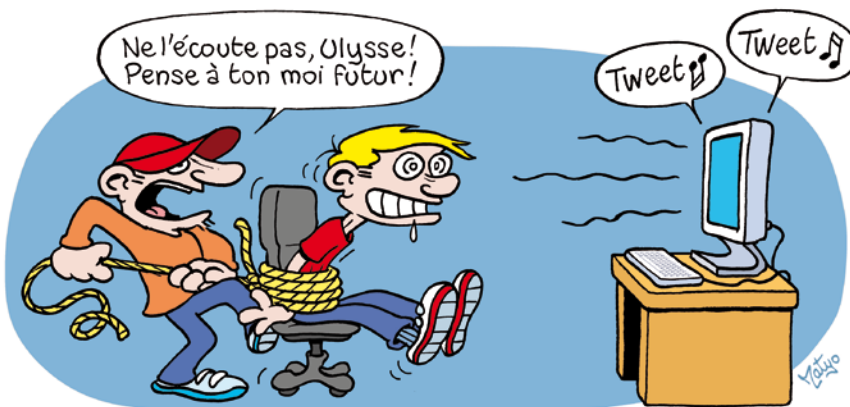

Éditions
Le Pommier



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

LES BOULETS DU PASSÉ ONT DE L'AVENIR

Les personnes en quête de notoriété sous-estiment souvent le risque pris : celui que l'hypermnésie d'Internet fasse remonter leurs errements passés.



La polémique qui a éclaté récemment à propos d'une candidate de l'émission *The Voice*, sur la chaîne TF1, est de celles qui semblent anecdotiques, mais qui traduisent en réalité des questions essentielles. Rappelons les faits: lors de cette émission, Mennel Ibtissem, 22 ans, réalise une prestation remarquée en interprétant *Hallelujah*, de Leonard Cohen. Son interprétation est saluée par le jury, mais bientôt le scandale éclate: la chanteuse bisontine a écrit quelques mois auparavant des *tweets* aux accents franchement complotistes à propos des attentats de Nice ou de Saint-Étienne-de-Rouvray. Sous la pression, la jeune femme décide finalement de quitter l'émission.

Cette histoire a comme un goût de déjà-vu: elle ressemble à s'y méprendre à la polémique ayant accompagné, par exemple, la découverte de messages insultants de Rayan Nezzar à l'endroit de personnalités politiques comme Valérie Pécresse ou Alain Juppé. Celui qui était le porte-parole du parti En Marche dut démissionner quatre jours après avoir été

nommé. De même, Gérard Darmanin, devenu ministre, dut faire face à l'embarras causé par certains messages hostiles à Emmanuel Macron qu'il avait écrits sur la Toile lorsque ce dernier n'était pas encore président de la République.

Le cas de Mehdi Meklat, un jeune chroniqueur et animateur de radio bien connu, confronté lui aussi à d'immenses messages laissés imprudemment sur les

**Le passé devient
un éternel présent
pour celui qui accède
à la renommée**

réseaux sociaux, n'est pas moins intéressant. Il a suscité une série d'explications discutables. L'auteur de ces messages lui-même a ainsi cherché à rendre compte de ses infamies passées en les considérant comme l'expression d'un double diabolique qui le possédait. On peut moquer de

tels systèmes de défense, mais la question demeure: pourquoi les individus obèrent-ils leur avenir en se comportant de façon si inconséquente?

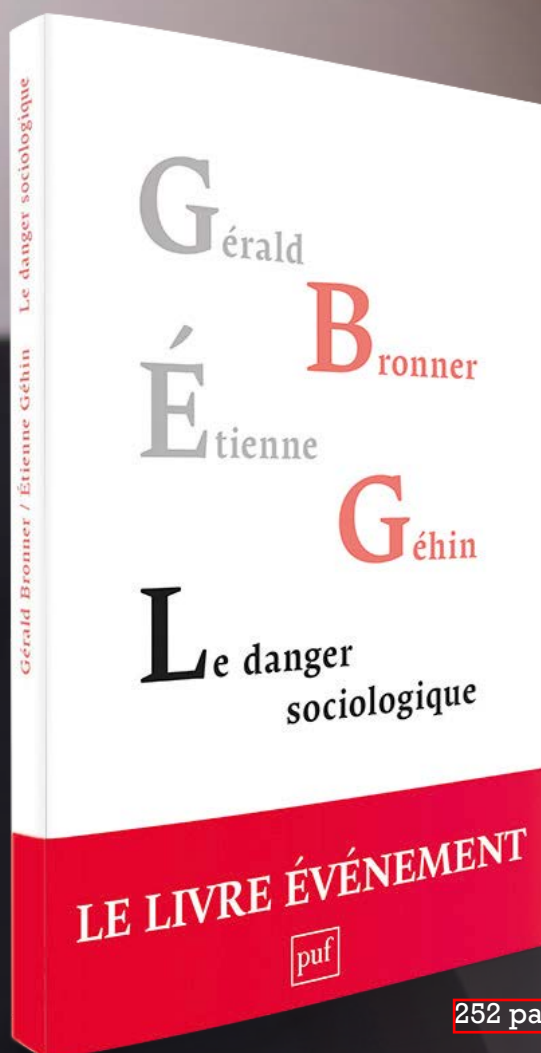
Tous ces individus ne peuvent tout à fait ignorer qu'Internet est un espace social où rien ne s'oublie. On peut comprendre la jouissance mauvaise qu'il y a à éructer sur les réseaux sociaux, mais ce maigre bénéfice est sans commune mesure avec les risques pris. Cette curiosité peut sans doute être éclairée en partie par ce que Paul Samuelson a identifié comme étant la dépréciation temporelle de la valeur.

La valeur d'une dette, expliquait cet éminent économiste américain, est psychologiquement d'autant plus faible que le futur où elle doit être honorée est lointain. Ainsi, le fumeur ne peut ignorer les risques qu'il prend pour sa santé, mais souvent le coût à payer lui paraît si éloigné qu'il ne trouve pas dans cette crainte les ressources suffisantes pour se priver de son plaisir. De même, les tweeteurs compulsifs ne paraissent pas mettre les bénéfices qu'ils retirent de leur activité en regard avec les coûts dont ils devront peut-être s'acquitter.

Le plus intéressant est que cette dépréciation ne devient calamiteuse que parce que les individus commettent justement l'imprudence de vouloir accéder à une certaine visibilité sociale. La notoriété est désirée, mais elle comporte un risque: celui du prix de nos erreurs de jugement liées à la dépréciation temporelle de la valeur.

Ce risque s'est considérablement accru depuis qu'Internet a fait valoir les règles d'hypermnésie qui le caractérisent: tout ressurgit dès que votre notoriété devient grande. Le passé devient un éternel présent pour celui qui accède à la renommée. Il conviendrait dans cette situation de s'inspirer d'Ulysse, qui, voulant écouter le chant des sirènes sans craindre de les rejoindre par le fond, se fit enchaîner sur son mât. Le héros grec, dans sa grande sagesse, savait qu'il faut parfois enchaîner son moi présent pour ne pas condamner son moi futur. ■

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



252 pages • 17€

**Gérald Bronner et Étienne Gehin
remettent la science au cœur
de la sociologie**

Suivez notre actualité
www.puf.com

puf

Le paradoxe de la

Il y a plus de 635 millions d'années, la Terre a connu une période si froide qu'elle a très probablement été recouverte de glace pendant plusieurs dizaines de millions d'années. Or non seulement la vie a persisté, mais les organismes pluricellulaires ont pris leur essor juste après. On commence à comprendre comment...

Décembre 2016. Nous sommes un groupe de six scientifiques – des Allemands, un Américain et des Français – partant en mission au Grand Canyon, dans le Colorado, puis dans les montagnes arides de la vallée de la Mort. Aussi étrange que cela puisse paraître, c'est dans cette région, parmi les plus chaudes de la Terre, que nous cherchons à percer les mystères d'une de ses périodes géologiques les plus froides, survenue il y a plus de 635 millions d'années. Cette période a probablement été si glaciale que, vue de l'espace, la Terre devait ressembler à une boule de neige géante. Nous ne sommes pas les seuls lancés sur la piste de la Terre boule de neige. Depuis une vingtaine d'années, elle est >

Terre boule de neige

L'ESSENTIEL

> Des sédiments glaciaires trouvés sur tous les continents suggèrent fortement que deux glaciations extrêmes ont recouvert la Terre de glace il y a entre 760 et 635 millions d'années.

> La vie consistait alors principalement en organismes unicellulaires et algues filamenteuses, mais la vie

pluricellulaire a explosé juste après la déglaciation.

> Les glaciations ont créé une forte pression de sélection qui a stimulé le développement d'algues vertes.

> L'oxygénation massive qui a débuté durant ces glaciations a sans doute aussi contribué à l'essor d'organismes complexes.

LES AUTEURS



PIERRE SANSJOFRE
maître de conférences
à l'université de Bretagne
occidentale et membre
du laboratoire Géosciences
Océan, à Plouzané



GUILLAUME LE HIR
maître de conférences
à l'université Paris-Diderot
et chercheur à l'institut
de physique du Globe
de Paris

Voici à quoi ressemblerait la Terre si une glaciation de type Terre boule de neige survenait aujourd'hui. Lorsque de telles glaciations se sont produites, il y a plusieurs centaines de millions d'années, les continents étaient tous rassemblés dans la région de l'équateur.

► devenue un sujet majeur de recherche en géologie. Au fil des ans, le récit de cette glaciation se précise. Peu à peu, nombre des difficultés qu'il soulevait ont été élucidées. Aujourd'hui se dessinent non seulement les mécanismes qui ont conduit à l'entrée et à la sortie de cette période, mais aussi des pistes sérieuses pour résoudre une de ses plus grandes énigmes: à l'époque, les organismes les plus évolués étaient des algues filamenteuses et des organismes mobiles unicellulaires (des protozoaires). Les premiers eucaryotes – des organismes formés d'une cellule comportant un noyau, et dont sont issus tous les animaux et les plantes – sont apparus plus d'un milliard d'années plus tôt, mais la vie pluricellulaire ne s'est pas encore imposée. Or non seulement les organismes photosynthétiques ont survécu à cette glaciation extrême, mais la vie pluricellulaire a connu une extraordinaire explosion juste après. Comment? Ce sont ces pistes que nous suivons dans le désert américain.

DE LA GLACE AUX TROPIQUES ?

Mais d'abord, pourquoi cet engouement pour la Terre boule de neige? Il n'est pas certain que la Terre ait subi une glaciation complète par le passé. Néanmoins, depuis une trentaine d'années, les arguments en faveur de cette hypothèse s'accumulent. L'idée est apparue une première fois en 1950. Le géologue australien Douglas Mawson montra que, sur la plupart des continents, les roches de cette époque contenaient des dépôts glaciaires – des débris et poussières caractéristiques de ceux que la glace libère en fondant. Il postula qu'une grande glaciation était survenue à la fin du Précambrien, durant l'ère néoproterozoïque, il y a entre 1 milliard et 500 millions d'années, juste avant une explosion rapide de la vie pluricellulaire.

En 1964, un second argument vint renforcer cette idée. Le géologue Brian Harland s'était alors intéressé à l'aimantation magnétique de petits grains minéraux enchâssés dans les roches glaciaires. Ces grains, déjà magnétisés, sont supposés se déposer en s'orientant selon le champ magnétique ambiant durant leur sédimentation, puis garder cette orientation. Or la mesure de cette orientation (mesure dite paléomagnétique) a révélé que les grains s'étaient déposés près de l'équateur à l'époque (leur inclinaison était horizontale – près des pôles, elle aurait été verticale). En s'appuyant sur ces résultats, Brian Harland démontra que les glaciers continentaux s'étaient probablement étendus jusqu'à l'équateur. Cependant, en 1966, un nouvel argument rendit ses conclusions inaudibles.

Mikhail Budyko, climatologue soviétique, travaillait sur les conséquences climatiques d'un conflit nucléaire généralisé entre les blocs de l'Est et de l'Ouest. À l'aide d'un des premiers modèles numériques de climat, il montra qu'un refroidissement assez intense (un hiver nucléaire, par

exemple) qui entraînerait l'extension de la banquise (ou de la neige) au-dessous de 30° de latitude devait, dès ce seuil franchi, enclencher un refroidissement irréversible de la Terre et conduire à un englacement total de sa surface. Le principe est simple. Les surfaces blanches réfléchissent plus de 60% des rayons solaires incidents, effet nommé albédo. Si l'albédo des zones recevant le plus d'énergie augmente, dès lors, tout réchauffement devient impossible. La Terre entre dans une spirale de refroidissement qui aboutit à un englacement total de sa surface.

Comme ni Harland ni aucun de ses confrères ne purent proposer un mécanisme mettant fin à un tel englacement, l'idée de Harland fut abandonnée. L'hypothèse d'une glaciation globale ne refit surface qu'en 1992, quand le paléomagnéticien américain Joseph Kirschvink la proposa pour expliquer une nouvelle énigme soulevée entre-temps par deux Australiens, Brian Embleton et George Williams. Cette fois, cependant, le scénario envisagé expliquait non seulement l'entrée, mais la sortie de l'état glaciaire.

En 1986, Brian Embleton et George Williams avaient identifié, dans la formation précambrienne d'Elatina, au Sud de l'Australie, des dépôts glaciaires tropicaux similaires à ceux recensés par Harland. Toutefois, leur agencement était tel qu'il témoignait d'une forte saisonnalité, avec des phases de gel et dégel des sols. Les basses latitudes actuelles montrant une très faible saisonnalité, les deux Australiens étaient convaincus de détenir un argument démontrant que la Terre n'avait pu geler des pôles à l'équateur: pour eux, ces dépôts glaciaires tropicaux n'étaient pas liés à un englacement généralisé de la Terre, mais étaient plutôt la conséquence d'une très forte obliquité de la Terre (l'inclinaison de son plan équatorial par rapport à celui de son orbite), supérieure à 54°, soit bien supérieure à la valeur actuelle (23,5°). Cette solution élégante permettait de placer les tropiques actuels aux hautes latitudes, zone caractérisée par une forte saisonnalité et soumise à l'influence des calottes polaires.

La Terre entre alors dans une spirale de refroidissement qui la recouvre de glace

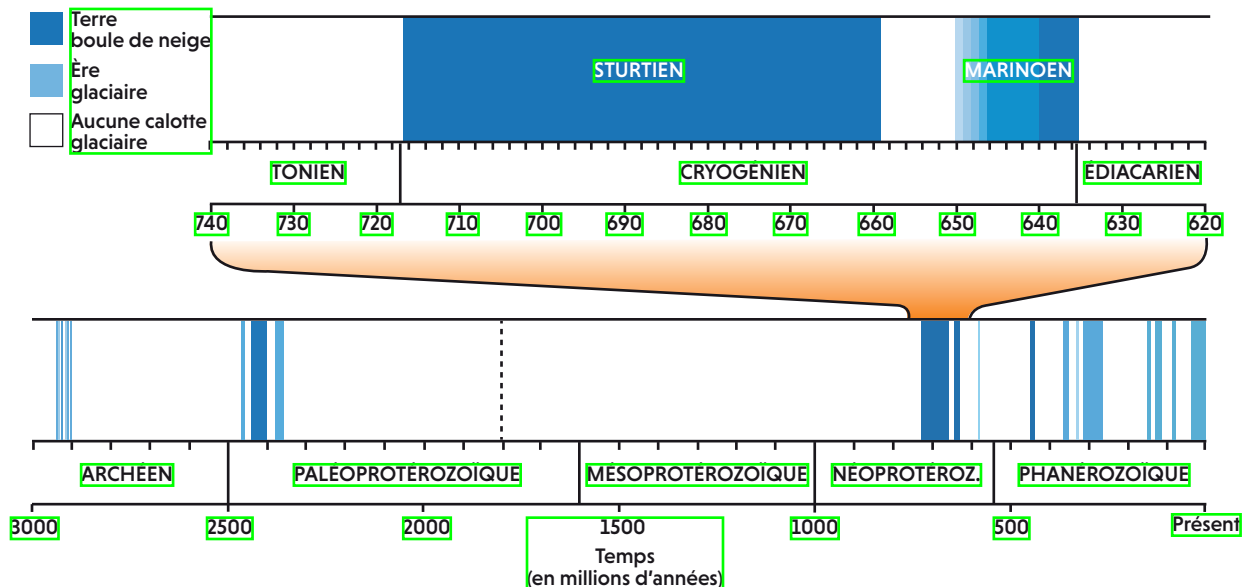
LES ÂGES DE GLACE DE LA TERRE

En 4,56 milliards d'années, la Terre a été recouverte presque entièrement de glace à trois reprises, ce qui a changé de manière radicale la chimie et la biodiversité présentes à sa surface. Une première série de glaciations, dites huroniennes (car découvertes dans des sédiments à proximité du lac Huron, en Amérique du Nord), datée à 2,5 milliards d'années, est

contemporaine d'une modification chimique majeure de la surface de la planète : l'apparition d'oxygène libre dans l'atmosphère, probablement due à une intense activité photosynthétique. Cet événement se caractérise, dans les dépôts sédimentaires, par la disparition de sédiments très riches en fer, mais aussi par celle d'un signal géochimique témoin d'un rayonnement ultraviolet très intense, signe que l'oxygène et l'ozone de l'atmosphère ont fortement réduit ce rayonnement.

Les deux autres glaciations extrêmes sont datées respectivement à 717 et 649 millions d'années et font partie

d'une période géologique nommée le Cryogénien. Cette période au climat froid, dominée par d'abondantes calottes de glaces continentales, se divise en deux phases glaciaires de durée inégale, les glaciations sturtienne (60 millions d'années) et marinoenne (10 millions d'années), ces deux épisodes n'étant espacés que de 20 millions d'années. Longtemps débattus, ces deux âges glaciaires sont désormais reconnus comme des glaciations exceptionnelles, sans équivalents depuis. On suppose que la banquise s'étendait des pôles à l'équateur et que la température moyenne de la Terre avoisinait les -60°C , d'où leur nom de Terre boule de neige. Pire, les températures polaires généralisées auraient induit la formation d'une épaisse couche de glace de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur isolant partiellement l'océan de l'atmosphère et inhibant toute activité photosynthétique. Plus surprenant encore, les sédiments glaciaires correspondants sont recouverts d'une épaisse couche de carbonates contenant, à sa base, des stromatolithes – des tapis microbiens photosynthétiques fossilisés. Ces stromatolithes témoignent de la recolonisation massive des océans durant la déglaciation de la Terre boule de neige. La présence de ces carbonates révèle aussi un passage rapide d'un environnement extrêmement froid à un environnement relativement chaud.



Intrigué par ces résultats, Joseph Kirschvink étudia la position de l'Australie à la fin du Précambrien et confirma la position équatoriale de la formation d'Elatina (à une latitude de 10°). De plus, l'ensemble des mesures paléomagnétiques réalisées sur les divers continents s'accordaient sur un point : les blocs continentaux se trouvaient tous dans des zones de basse latitude (jusqu'à 30°), rarement aux moyennes ($30-60^{\circ}$) et jamais aux hautes (au-delà de 60°). L'hypothèse des Australiens était donc démentie et celle de la glaciation revenait en force.

Joseph Kirschvink commença par expliquer l'englacement de la Terre au moyen d'un scénario inédit. La faible latitude des blocs continentaux aurait induit le refroidissement initial à cause de la différence d'albédo qu'ils produisaient. En effet, dépourvus de végétation, ils avaient un albédo plus élevé que les océans.

Leur présence aux basses latitudes, là où l'insolation est maximale, aurait entraîné un refroidissement global et permis l'installation de glaces jusqu'aux Tropiques – la fameuse latitude limite de 30° à partir de laquelle l'englacement s'emballe, selon le modèle de Mikhail Budyko.

Restait à expliquer la sortie de la glaciation. Joseph Kirschvink s'appuya sur la modulation du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique par le cycle long du carbone. Sur des échelles de temps supérieures au million d'années, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère fluctue en fonction du volcanisme, qui libère ce gaz, et de l'altération des roches, principalement celles contenant des silicates. Au cours de cette dégradation, le CO_2 est transformé en ions hydrogénocarbonate (HCO_3^-) qui sont entraînés dans les océans, où ils se combinent avec des ions calcium, formant des sédiments

carbonatés qui stockent d'importantes quantités de carbone (voir l'illustration ci-dessous).

LA PISTE DU CO₂

Dans ce cycle long, la source de carbone (le volcanisme) est indépendante du climat. Ce n'est pas le cas des processus qui piègent le carbone : l'altération des roches dépend de la température et du ruissellement des eaux. C'est cette propriété qu'utilisa Joseph Kirschvink dans son scénario : lorsque la glaciation s'est généralisée, les températures extrêmement froides et l'absence d'eau liquide ont stoppé l'altération des roches, mais les volcans ont continué à émettre du CO₂. Le gaz s'est accumulé dans l'atmosphère et a intensifié l'effet de serre jusqu'à ce que ce dernier contrebalance l'effet d'albédo, provoquant une fonte rapide et brutale des glaces. La glace disparaissant, l'effet refroidissant causé par le fort albédo des glaces s'est atténué, ce qui a accéléré la fonte. Libérée de sa glace, mais avec une atmosphère encore très riche en CO₂, la Terre a alors brutalement quitté son climat glacial pour un climat tropical généralisé.

Ce scénario restait cependant très fragile, car seule la formation d'Elatina témoignait de la présence de glaces aux basses latitudes. Séduit par cette hypothèse, Paul Hoffman, géologue à l'université Harvard, aux États-Unis, partit alors à la recherche de vestiges de ces événements passés afin de vérifier sa vraisemblance. Accompagné de son étudiant en thèse, Galen Halverson, il élabora, au terme de six années d'une exploration minutieuse, la théorie de la Terre boule de neige, qu'il présenta en 1998 (voir l'entretien page 32).

Depuis, cette théorie est devenue un sujet scientifique majeur. Nombre de problèmes concernant la Terre boule de neige ont été élucidés la décennie suivante. De nombreuses séries de dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque ont

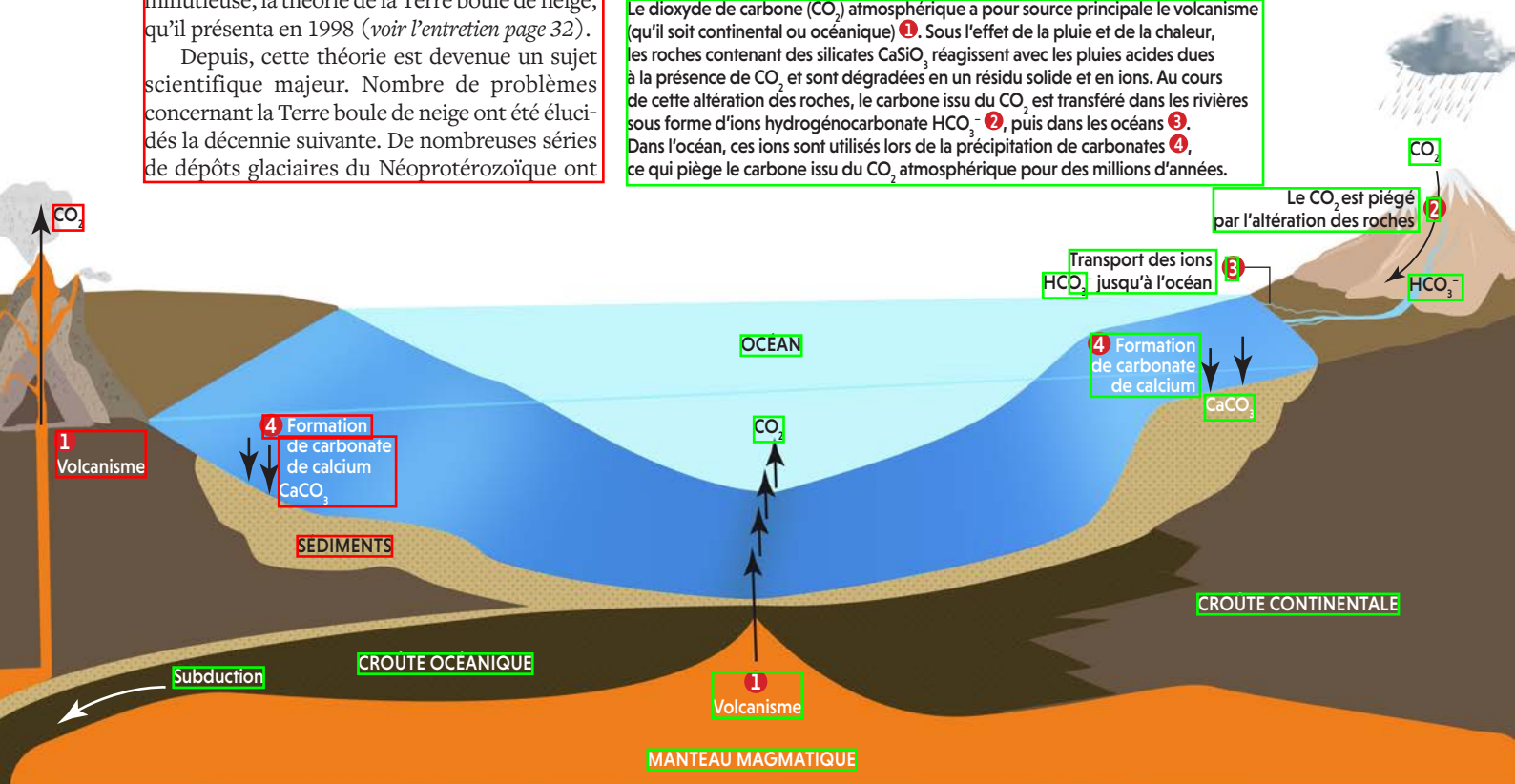
été découvertes sur tous les continents, et l'amélioration des techniques de datation a permis notamment de montrer leur synchronicité. On a ainsi mis en évidence deux épisodes glaciaires extrêmes de plusieurs millions d'années, datés respectivement de 717 et 649 millions d'années, qui semblent bien avoir été généralisés (et un autre épisode plus ancien, voir l'encadré page 29), et des mécanismes conduisant à l'entrée et à la sortie de chacun ont été proposés à partir de ces données. Cependant, il restait à comprendre comment les organismes photosynthétiques avaient survécu, et comment la vie pluricellulaire avait même profité de ces glaciations extrêmes.

On sait depuis longtemps, grâce à l'exploration des environnements polaires, que nombre d'organismes, surtout microscopiques, survivent au froid et à l'absence saisonnière de lumière. Dès le début des années 2000, les scientifiques se sont donc demandé quelles contraintes supplémentaires, par rapport à ces conditions déjà extrêmes, une Terre entièrement gelée aurait imposées aux organismes. Deux contraintes majeures sont apparues.

La première concerne l'épaisseur de la glace de mer et le blocage du rayonnement solaire. La banquise polaire actuelle est peu épaisse, et son extension limitée par sa fonte saisonnière. Sur une Terre entièrement gelée, c'est différent. Les températures extrêmement basses des pôles

LE CYCLE LONG DU CO₂

Le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique a pour source principale le volcanisme (qu'il soit continental ou océanique) ①. Sous l'effet de la pluie et de la chaleur, les roches contenant des silicates CaSiO₃ réagissent avec les pluies acides dues à la présence de CO₂ et sont dégradées en un résidu solide et en ions. Au cours de cette altération des roches, le carbone issu du CO₂ est transféré dans les rivières sous forme d'ions hydrogénocarbonate HCO₃⁻ ②, puis dans les océans ③. Dans l'océan, ces ions sont utilisés lors de la précipitation de carbonates ④, ce qui piège le carbone issu du CO₂ atmosphérique pour des millions d'années.



(simulées par les modèles du climat) conduisent à la formation d'une épaisse banquise qui ne fond pas durant l'été. La modélisation numérique indique que cette banquise, d'épaisseur supérieure à un kilomètre aux pôles, flue rapidement vers l'équateur à raison de plusieurs mètres par an. À l'équateur, elle est légèrement moins

«allégée» du modèle, où une bande d'océan équatorial libre de glace aurait subsisté. Cependant les modèles numériques ont montré que ces scénarios n'étaient pas stables sur des longues durées. Les chercheurs se sont donc orientés vers une autre piste: puisque la Terre boule de neige semblait bien avoir existé, il fallait trouver un mécanisme qui aurait pu autoriser la formation d'eau libre durant une glaciation totale. Une solution consistait à rechercher un mécanisme capable d'abaisser l'albédo de la glace: cela aurait augmenté sa température et ainsi limité son épaisseur, par sublimation. Et, à terme, dans les zones de forte insolation, de l'eau libre se serait formée.

Le monde vivant de l'époque était dominé par les algues unicellulaires

épaisse, car sublimée par la forte insolation durant la journée, c'est-à-dire directement convertie en vapeur. Mais même amincie, la banquise demeure trop épaisse (plus de 700 mètres) pour qu'une fraction du rayonnement lumineux incident parvienne à l'océan liquide. Or en l'absence de lumière, la photosynthèse ne peut se dérouler. Par conséquent, aucune forme de vie fondée sur cette forme de métabolisme ne peut survivre en milieu marin. Pourtant, le monde vivant de cette époque, essentiellement microscopique, est dominé par les algues unicellulaires et autres cyanobactéries, c'est-à-dire des organismes photosynthétiques...

Seconde contrainte: l'absence d'apport de nutriments à l'océan. Aujourd'hui, une part importante des nutriments nécessaires à la survie des organismes marins provient de l'altération des continents, les rivières et les vents charriant jusqu'à l'océan les éléments minéraux nécessaires à tout organisme (notamment le phosphore). Sur une Terre entièrement gelée, l'érosion est stoppée, ou du moins très fortement diminuée du fait de la quasi-absence d'eau liquide sur les continents. Or en 2009, Gordon Love, de l'université de Californie à Riverside, et ses collègues ont proposé, à partir de traces de biomarqueurs repérées dans des sédiments d'Oman, que des animaux aquatiques – les cnidaires et les démosponges – soient apparus entre les deux glaciations extrêmes du Néoprotérozoïque. Comment se seraient nourris ces organismes marins sans les apports liés à l'érosion?

D'autres théories que la Terre boule de neige ont alors été proposées pour expliquer la survie des organismes, par exemple une version

LE POUVOIR DE LA POUSSIÈRE

Les raisons d'une baisse de l'albédo de la glace sont peu nombreuses. Plusieurs conditions doivent être réunies: une source de poussière, un processus d'accumulation des poussières au sein de la banquise et l'absence d'une couverture neigeuse. Sur des durées très longues de plusieurs millions d'années, une source de poussière continue, même très faible, modifie les propriétés optiques de la banquise. On pense aujourd'hui que les fines poussières issues du volcanisme et de l'érosion glaciaire ont lentement sali la glace de manière irréversible. Ces poussières, dérivant avec la glace de mer, se seraient accumulées aux basses latitudes, là où la sublimation est la plus forte.

L'ensemble des simulations climatiques intégrant ces conditions proposent une glace de mer dépourvue de couvert neigeux sous 20° de latitude. Et les dernières modélisations numériques, notamment celles réalisées en 2013 par Jason Goodman, du collège Wheaton, dans le Massachusetts, et Dana Strom, du Laboratoire de développement météorologique, dans le Maryland, suggèrent que l'épaisseur d'une banquise équatoriale «salie» pourrait être réduite à 100 mètres.

Malheureusement, la transmission du rayonnement solaire incident reste impossible si l'épaisseur de la banquise dépasse quelques dizaines de mètres. D'autres mécanismes ont dû agir, peut-être conjointement. Parmi les hypothèses avancées pour résoudre cette difficulté, la plus intéressante est celle des cryoconites, proposée en 2000 par Warwick Vincent, de l'université Laval, à Québec, et reprise en 2016 par Paul Hoffman (*voir l'entretien page 32*). Les cryoconites sont des trous qui se creusent dans la glace à la suite de la lente accumulation de fines poussières, plus sombres et donc plus chaudes que la glace ou la neige (*voir la photo page 35*). Ces trous et les zones d'eau liquide qui se forment à proximité, à la surface de la banquise, sont des habitats potentiels pour les organismes photosynthétiques. Les cryoconites permettent aussi un transfert de

À LA RECHERCHE DE LA TERRE BOULE DE NEIGE EN NAMIBIE



PAUL HOFFMAN
est chercheur émérite
de l'université Harvard

Propos recueillis par PIERRE SANSJOFRE

Quand et comment avez-vous connu la théorie de la Terre boule de neige ?

Joseph Kirschvink m'en a parlé en 1989 lors d'une conférence à Washington. Nous attendions un bus sous une forte canicule. Il en parlait aux gens de façon informelle parce que l'idée lui était venue trop tard pour être incluse dans le programme officiel. Je n'avais jamais travaillé sur le Néoprotérozoïque à cette époque et je n'avais donc pas d'idée préconçue sur cette théorie.

Pourquoi avez-vous choisi de rechercher des traces de la Terre boule de neige en Namibie ?

Cette glaciation a été globale, donc on peut en rechercher des traces dans de nombreuses régions, partout où des roches de l'époque correspondante sont conservées près de la surface de la Terre. Lorsque j'ai décidé d'étudier la géologie du Néoprotérozoïque, en 1993, j'ai choisi de travailler en Namibie pour trois raisons : politique, géographique et géologique.

D'abord, il me fallait un pays en paix et stable. J'étais un nouveau venu dans le domaine et mon premier projet durerait nécessairement plusieurs années. Après son indépendance en 1990, la Namibie apparaissait comme une démocratie représentative multiraciale, gouvernée par un parti doté d'un mandat populaire fort. Mes attentes n'ont pas été déçues.

Ensuite, lorsque l'on étudie des dépôts sédimentaires dans les affleurements (par opposition aux carrières ou aux carottes de forage profond), il est essentiel que la végétation n'obscurcisse pas les roches et que l'on puisse

distinguer les couches tendres et dures. On privilégie donc les déserts et les pentes abruptes de collines. Dans la région de la Namibie que j'étudie, les précipitations annuelles sont inférieures à 20 centimètres et les pentes abruptes abondent sur l'escarpement côtier.

Enfin, en Namibie, il n'y a aucun doute possible sur le fait que si les surfaces les plus chaudes étaient glacées, les plus froides l'étaient aussi : les dépôts glaciaires néoprotérozoïques s'y trouvent dans les sédiments de plate-formes carbonatées marines situées au

Attirer l'attention de
brillants scientifiques
sur la Terre boule
de neige a été ma
principale réussite

niveau de la mer, comme celles du Grand Banc des Bahamas ou du plateau continental du nord-ouest de l'Australie. Or pour des raisons chimiques simples de saturation de l'eau en carbone, les sédiments carbonatés se forment surtout dans les parties les plus chaudes de l'océan de surface, là où l'évaporation est la plus forte. C'est toujours vrai, que le climat mondial soit plus chaud ou plus froid. Aucun sédiment glaciaire ne peut donc avoir glissé d'une montagne, comme au Chili.

Mais il a quand même fallu cinq ans de travail sur le terrain en Namibie pour me convaincre que nos observations étaient inattaquables, que la Terre boule de neige était leur meilleure interprétation et que de nouvelles preuves de la théorie de Joseph Kirschvink existaient, indépendantes de celles qui l'avaient motivé.

Quelle a été votre plus grande découverte sur la théorie de la Terre boule de neige ?

Celle du lien entre l'origine des *cap carbonates* et la théorie climatique qui explique la sortie d'un épisode de Terre boule de neige. Les *cap carbonates* sont des couches spécifiques de carbonates de plusieurs mètres d'épaisseur qui recouvrent directement les dépôts glaciaires du Néoprotérozoïque. Nous avons montré qu'ils sont associés à la fin des épisodes de Terre boule de neige et non à des époques glaciaires plus jeunes. Joseph Kirschvink ne connaissait pas les *cap carbonates*, qui ne figuraient donc pas dans sa théorie.

En fait, c'est mon collègue Dan Schrag, un océanographe géochimiste, qui le premier a compris pourquoi les *cap carbonates* sont une conséquence prévisible de la Terre boule de neige. Mon rôle a été de l'intéresser au problème. Attirer l'attention de personnes brillantes sur la Terre boule de neige a d'ailleurs été ma principale réussite. Cela signifiait généralement les convaincre que le phénomène avait pu se produire.

Vous avez récemment proposé une nouvelle explication de la présence de vie lors d'un épisode de Terre boule de neige. Pourriez-vous l'expliquer ?

Les déserts d'une Terre boule de neige sont situés dans les régions tropicales. Dans ces déserts, la glace se retire des terres à basse altitude par sublimation – conversion directe de la glace en vapeur d'eau. En revanche, l'océan tropical reste couvert de glace parce qu'il gèle par en dessous. Les vents violents de ces régions dégagent de la poussière des terres nues. En tombant, la neige piège la poussière contenue dans l'air, ainsi que les cendres volcaniques, et les dépose notamment dans les zones non désertiques, recouvertes de glace. Le mouvement de la glace transporte la poussière emprisonnée vers l'océan tropical, où elle s'accumule en surface sur la glace, elle-même soumise à



En Namibie, les pentes abruptes et désertiques des collines (*en haut*) recèlent des traces de la glaciation marinoenne, la seconde glaciation totale du Néoprotérozoïque, il y a plus de 635 millions d'années. Au centre, Paul Hoffman se situe sous une large couche de carbonates, au milieu des sédiments glaciaires de cette période, caractérisés notamment par des blocs de roche (*dropstones*) qui sont tombés lors de la fonte des glaces et ont déformé la couche sédimentaire (*en bas*).



la sublimation. La poussière accumulée assombrit la surface de la glace, qui se met à absorber la lumière du Soleil, ce qui permet la formation de flaques d'eau liquide. Les cyanobactéries et les algues vertes colonisent ces flaques, fournissant de la nourriture pour les champignons, les protozoaires unicellulaires et certains animaux multicellulaires.

Ces écosystèmes sont bien étudiés dans les environnements polaires et alpins modernes. En 2000, Warwick Vincent, de l'université Laval, au Canada, qui a étudié ces écosystèmes aux pôles, a proposé que des organismes variés se soient développés et aient évolué dans de tels écosystèmes lors des épisodes de Terre boule de neige. J'ai récemment attiré l'attention sur son idée, qui semble de plus en plus crédible à la lumière des résultats des modèles climatiques sur les mouvements de glace et de vapeur d'eau lors d'une glaciation totale.

Quels sont les prochains objectifs des explorateurs de la Terre boule de neige?

Déterminer la cause immédiate de chaque épisode, expliquer pourquoi les deux épisodes néoprotérozoïques sont loin d'être identiques, comprendre comment les voies métaboliques et les cycles biogéochimiques se sont modifiés durant ces épisodes, et comment ces épisodes ont changé le cours de l'évolution de la vie par rapport à ce qui se serait produit en l'absence de glaciation totale.

Qu'auriez-vous aimé faire si vous n'étiez pas devenu géologue?

J'aurais pu être un bon chasseur-cueilleur si j'étais né plus tôt.



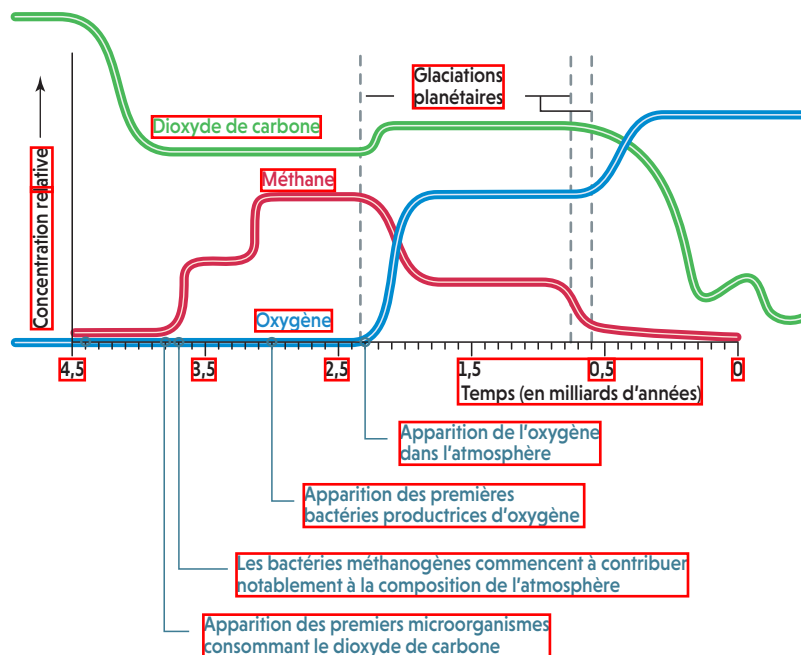
> matière de la surface vers l'océan en traversant de part en part la banquise.

Bien sûr, aucun vestige, même indirect, de ces structures n'a été conservé. Seule l'analogie avec les phénomènes observés sur l'actuelle cryosphère peut nous éclairer. Ainsi, la présence de suie sur la banquise et la fonte accélérée des glaces continentales donnent une idée des phénomènes et de leur potentielle importance. Ces observations suggèrent que les environnements formés grâce aux cryoconites ont pu héberger la vie durant les glaciations de type Terre boule de neige, mais pas à leur tout début: la formation de ces trous n'est possible que si le climat est suffisamment chaud. Dans les régions les plus froides actuellement comme le mont Howe, en Antarctique, culminant à 2350 mètres d'altitude, les poussières sont balayées par les vents et les particules sombres restent trop froides pour creuser des cryoconites. Ainsi, dans les premiers millions d'années de la glaciation, lorsque l'accumulation de CO₂ restait trop limitée, ni la formation de cryoconites ni la présence de glace salie et plus sombre à l'équateur ne semblent possibles. Comment les organismes photosynthétiques ont-ils survécu à ces premiers millions d'années? La question reste entière...

LE RÈGNE DES ALGUES MARINES

Notre équipe et d'autres se concentrent sur la seconde grande question sur le vivant que soulève la Terre boule de neige. Le Cryogénien – la période qui comprend les deux glaciations de type Terre boule de neige du Néoprotérozoïque et leur interlude – constitue une transition biologique majeure: le passage d'un monde unicellulaire microscopique à un monde constitué d'organismes pluricellulaires macroscopiques, les métazoaires. Il est incontestable qu'une telle période glaciaire a représenté une pression de sélection majeure pour les organismes biologiques. Nombre de lignées eucaryotes ont dû disparaître. Et pourtant, plusieurs études ont montré qu'au lendemain de la seconde glaciation, dite marinoenne, la vie a repris son cours de manière rapide et spectaculaire. Par exemple, en 2007, Marcel Elie, de l'université Henri-Poincaré, à Nancy, et ses collègues ont mis en évidence la prolifération d'algues rouges, un organisme pouvant être pluricellulaire, à partir de sédiments recouvrant directement les roches glaciaires. Par quels mécanismes le Cryogénien a-t-il pu favoriser la vie pluricellulaire?

Diverses études ont révélé la présence de fragments de microfossiles dans les sédiments glaciaires, suggérant que la biodiversité n'était pas nulle durant les épisodes de Terre boule de neige et après. Mais cet enregistrement reste trop fragmentaire pour qu'on en déduise l'impact de ces épisodes sur l'évolution de la vie. De plus, seule la comparaison des sédiments avant et après ces glaciations permettra réellement de



caractériser cet impact. C'est pour cette raison que nous explorons le Grand Canyon et la vallée de la Mort. Notre groupe tente de comprendre ce qui s'est passé en entrée et en sortie de la glaciation marinoenne en étudiant le contenu chimique de roches datant de cette période. Les données recueillies apporteront des contraintes sur l'environnement où les sédiments glaciaires se sont déposés, que nous utiliserons dans nos modèles numériques du climat en laboratoire.

L'arrivée sur le site de la vallée de la Mort est spectaculaire. Les sédiments contiennent des *dropstones*, des blocs de roche libérés lors de la fonte d'un iceberg et qui, en tombant, ont déformé la matrice sédimentaire marine. Ces galets striés et facettés, anciennement interprétés comme des témoins du déluge, témoignent d'une activité glaciaire importante. Leur datation (635 millions d'années) et leur paléogéographie tropicale en font des témoins de la glaciation marinoenne. Les sédiments glaciaires qui les contiennent, nommés tillites, ont une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres.

Nous prélevons des roches que nous comparerons avec d'autres échantillonnées sur le même site, mais antérieures à la glaciation. Elles rejoignent les sédiments pré et postglaciaires de cette même période que nous avons trouvés au Grand Canyon. Leur état de préservation exceptionnelle en fait de parfaits candidats pour y observer des traces de vie ancienne.

L'échantillonnage n'était cependant que la première partie du projet. Depuis, nous sommes revenus au laboratoire avec plus de 60 kilogrammes de roches et nous essayons, avec d'autres équipes, d'y détecter des traces physiques et chimiques de vie. Notamment, en 2017, avec Yosuke Hoshino, de l'institut

La Terre a connu deux grandes oxygénations depuis sa naissance, il y a 4,5 milliards d'années. La première, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, liée à l'activité des premiers microorganismes photosynthétiques, est contemporaine de la première glaciation extrême. La seconde, il y a entre 1 milliard et 540 millions d'années, durant les glaciations extrêmes du Cryogénien, est contemporaine de l'apparition et de la diversification des métazoaires et autres organismes complexes.

Max-Planck de biogéochimie de Iéna, en Allemagne, et d'autres collègues, nous avons utilisé les sédiments échantillonnés au Grand Canyon et d'autres pour extraire des fossiles moléculaires nommés biomarqueurs.

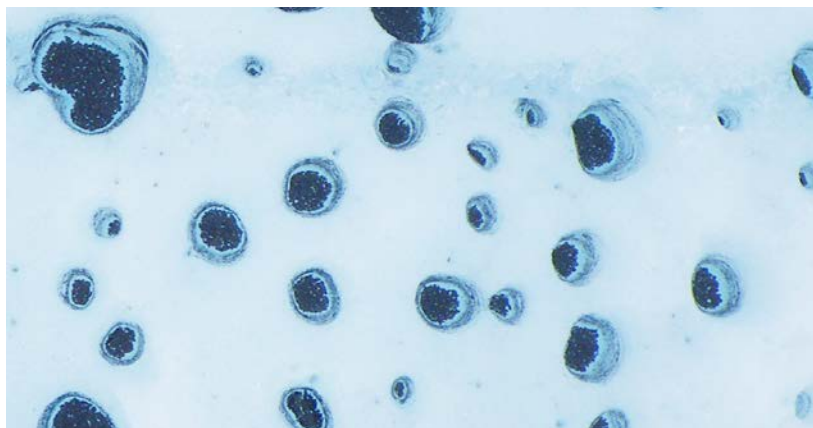
Cette technique repose sur le fait que différentes espèces synthétisent des molécules organiques qui leur sont propres et qui peuvent être préservées dans les sédiments pendant plusieurs millions d'années. Les molécules organiques extraites des divers sédiments ont permis de montrer que différents groupes d'algues existaient avant, pendant et après le Cryogénien. La technique a aussi révélé que la capacité des organismes à produire une molécule particulière, le 24-éthyl-stérol, est apparue durant cette période. Cette molécule est importante, car elle rend la membrane cellulaire plus résistante aux variations de température. Cette innovation biologique aurait donné aux algues vertes un avantage considérable, leur permettant de proliférer et de coloniser la surface de la planète.

En effet, la même année, dans une étude complémentaire fondée cette fois sur l'exploration de la diversité d'un groupe de lipides – les stéroïdes – dans les sédiments cryogénien, Jochen Brocks, de l'université nationale d'Australie, Yosuke Hoshino et leurs collègues ont montré que juste avant le Cryogénien, le monde était dominé par des producteurs de stéroïdes primaires de type cyanobactéries, puis que les algues marines planctoniques les avaient « vite » supplantés durant l'interlude entre les deux glaciations. La pression de sélection que ces glaciations ont imposée au monde vivant se révèle ainsi avoir été un véritable stimulus évolutif qui a mené à l'émergence de la famille des algues vertes.

COUP DE POUCE DE BACTÉRIES

Un autre stimulus a pu jouer un grand rôle dans l'émergence de la vie pluricellulaire: une oxygénation massive de l'atmosphère, qui lui aurait permis d'atteindre une concentration proche de l'actuelle. Ce sont cette fois des échantillons de la fin de la glaciation marinoenne prélevés en 2010 au Mato Grosso, au Brésil, qui nous ont permis, en 2016, d'apporter cette seconde brique dans l'histoire de la vie. Nous avons mis en évidence le rôle de bactéries exploitant le soufre dans cette oxygénation massive.

L'oxygénation de l'atmosphère s'est déroulée sur deux périodes: la première, il y a entre 2,4 et 2,2 milliards d'années, est attribuée (en partie) à la photosynthèse. La seconde, comprise entre 1 milliard et 540 millions d'années, restait inexpliquée. En analysant les composés soufrés dans les sédiments, nous nous sommes aperçus qu'ils étaient très abondants, ce qui suggérait une activité intense de bactéries qui utilisent ces composés comme oxydant dans une respiration anaérobie (sans oxygène). Nous avons estimé que ces bactéries auraient été responsables d'une



Des cryoconites, des trous de quelques dizaines de centimètres que l'on observe dans la banquise arctique et antarctique, comme ici au Groenland, ont pu héberger la vie durant les glaciations du Cryogénien.

baisse de 50% des sulfates dissous dans l'océan. Ces bactéries auraient ainsi « épargné » l'oxygène produit par les organismes photosynthétiques. Ce mécanisme, couplé à l'essor des algues, aurait permis d'accumuler une quantité suffisante d'oxygène libre pour soutenir énergétiquement des formes de vie multicellulaires.

Bon nombre de mystères restent à résoudre concernant ces épisodes de Terre boule de neige. Notamment, peu de modèles numériques expliquent une sortie de glaciation sans invoquer une accumulation extrême de CO₂ dans l'atmosphère, en désaccord avec les données géochimiques obtenues. Certains chercheurs s'orientent donc vers d'autres explications, comme la libération du méthane piégé sous la glace des continents lors de ses fracturations.

Notre équipe poursuit sa quête d'échantillons. Nous revenons récemment de Suède où des sédiments cryogénien très bien préservés affleurent. Nous espérons y identifier la biomasse produite durant la glaciation et comparer son signal chimique à celui des cryoconites antarctiques actuelles, mais aussi estimer l'impact de la colonisation post-Terre boule de neige sur le cycle global du carbone.

On nous demande souvent si la Terre subira une autre glaciation globale. La conjonction des facteurs qui l'ont permise au Néoprotérozoïque était assez exceptionnelle: des continents tous en position tropicale, ce qui favorisait leur altération, et donc le piégeage du CO₂. Aujourd'hui, ces conditions ne sont pas réunies, mais même réunies, elles ne permettraient sans doute plus l'entrée en glaciation. En effet, le Soleil est plus vieux de 700 millions d'années et sa puissance a augmenté. La principale conséquence est qu'il faudrait une concentration quasi nulle en CO₂ dans l'atmosphère pour que la Terre se couvre de nouveau de glace. Plus le Soleil vieillira, plus il sera donc difficile d'enclencher le processus. On note toutefois que dans les années 1960, les travaux de Mikhaïl Budyko se fondaient sur un scénario anthropique, celui d'un hiver nucléaire lié à un affrontement ouvert entre les blocs de l'Est et de l'Ouest. Ce scénario reste d'actualité... ■

BIBLIOGRAPHIE

P. F. Hoffman et al., **Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology**, *Science Advances*, vol. 3(11), e1600983, 2017.

Y. Hoshino et al., **Cryogenian evolution of stigmastereoid biosynthesis**, *Science Advances*, vol. 3(9), e1700887, 2017.

J. J. Brocks et al., **The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals**, *Nature*, vol. 548, pp. 578-581, 2017.

P. F. Hoffman, **Cryoconite pans on Snowball Earth: Supraglacial oases for Cryogenian eukaryotes?**, *Geobiology*, vol. 14(6), pp. 531-542, 2016.

P. Sansjofre et al., **Multiple sulfur isotope evidence for massive oceanic sulfate depletion in the aftermath of Snowball Earth**, *Nature Communications*, vol. 7, 12192, 2016.

P. Hoffman, **Quand la Terre était gelée**, *Pour la Science*, n° 268, pp. 30-37, fév. 2000.

Combien a coûté la tour de Babel?



Restitution d'artiste de la ziggourat de l'ancienne ville d'Ur.

L'ESSENTIEL

> Pour gagner en prestige, les rois mésopotamiens érigeaient des ziggourats, des pyramides en gradins surmontées d'un temple.

> Les ouvriers participant à la construction étaient rémunérés suivant un système qui ramenait tout à des quantités d'orge.

> Des informations sur la construction des ziggourats ont été trouvées dans les textes cunéiformes inscrits sur des tablettes d'argile.

> Les auteurs s'en sont servis pour estimer les coûts de construction de ces imposants bâtiments.

LES AUTEURS



HAGAN BRUNKE
mathématicien
et assyriologue
à l'université
libre de Berlin



**EVA CANKIK-
KIRSCHBAUM**
assyriologue
à l'université
libre de Berlin



La ziggourat de Babylone, une grande pyramide à terrasses surmontée d'un temple, a inspiré le mythe de la tour de Babel. Mais tous les rois de Mésopotamie ont construit ce type de monument. À quel coût ? La réponse est dans les textes cunéiformes.

Les hommes voulurent faire de Babylone une ville grandiose grâce à une tour touchant le ciel. Dieu, rapporte la Bible, s'offusqua de cet orgueil humain et fit échouer le projet. Une décision divine dont Athanase Kircher, savant jésuite du XVII^e siècle, donna une sorte d'explication scientifique : la construction de la tour aurait épuisé les ressources de la Terre et son ombre l'aurait rendue en grande partie inhabitable. Cet échec babylonien aurait ainsi été une grande chance pour l'humanité. Mais toutes les cultures de l'Antiquité ne portaient pas sur la métropole de l'Euphrate un regard aussi négatif. Avec ses puissants remparts, ses ponts, ses portes, ses palais, ses sanctuaires, Babylone était vue par les Grecs comme une ville magnifique. Ses jardins suspendus ont même été considérés comme l'une des sept merveilles du monde, bien qu'il semble que les Anciens aient confondu à ce propos Babylone et Ninive (voir le blog de Cécile Michel, www.scilogs.fr/breves-mesopotamiennes/jardins-suspendus-babylone/).

BABYLONE ET SA ZIGGOURAT

Des populations humaines se sont sédentarisées depuis le V^e millénaire avant notre ère dans les plaines alluviales de l'Euphrate et du Tigre (d'où le nom grec de la région : *Mesopotamia*, le «pays d'entre les fleuves»). Elles ont fondé les premières cités, construit des systèmes d'irrigation et, vers 3300 avant notre ère, développé l'écriture cunéiforme afin de mieux gérer

l'économie de leurs cités-États. De ces débuts sont issues les premières grandes civilisations mésopotamiennes, à savoir les cultures sumériennes et akkadiennes, qui ont édifié d'importantes villes dotées d'imposants bâtiments.

Toutefois, c'est la Babylone du roi Nabuchodonosor II (604-562 avant notre ère) qui s'est inscrite dans la postérité, car ce monarque fit rénover cette ville d'environ 900 hectares et l'équipa avec une ostentation démesurée. Il fit en particulier construire au centre de la ville une tour d'environ 90 mètres de haut constituée de sept terrasses empilées : une ziggourat, c'est-à-dire un édifice à degrés au sommet duquel trône un temple. Les Babyloniens la nommaient *Etemenanki*, c'est-à-dire « celle qui relie le ciel et la terre ». D'après les fouilles, sa base couvrait plus de 8100 mètres carrés, et elle a été construite avec environ 350000 mètres cubes de briques de terre crue séchées au soleil.

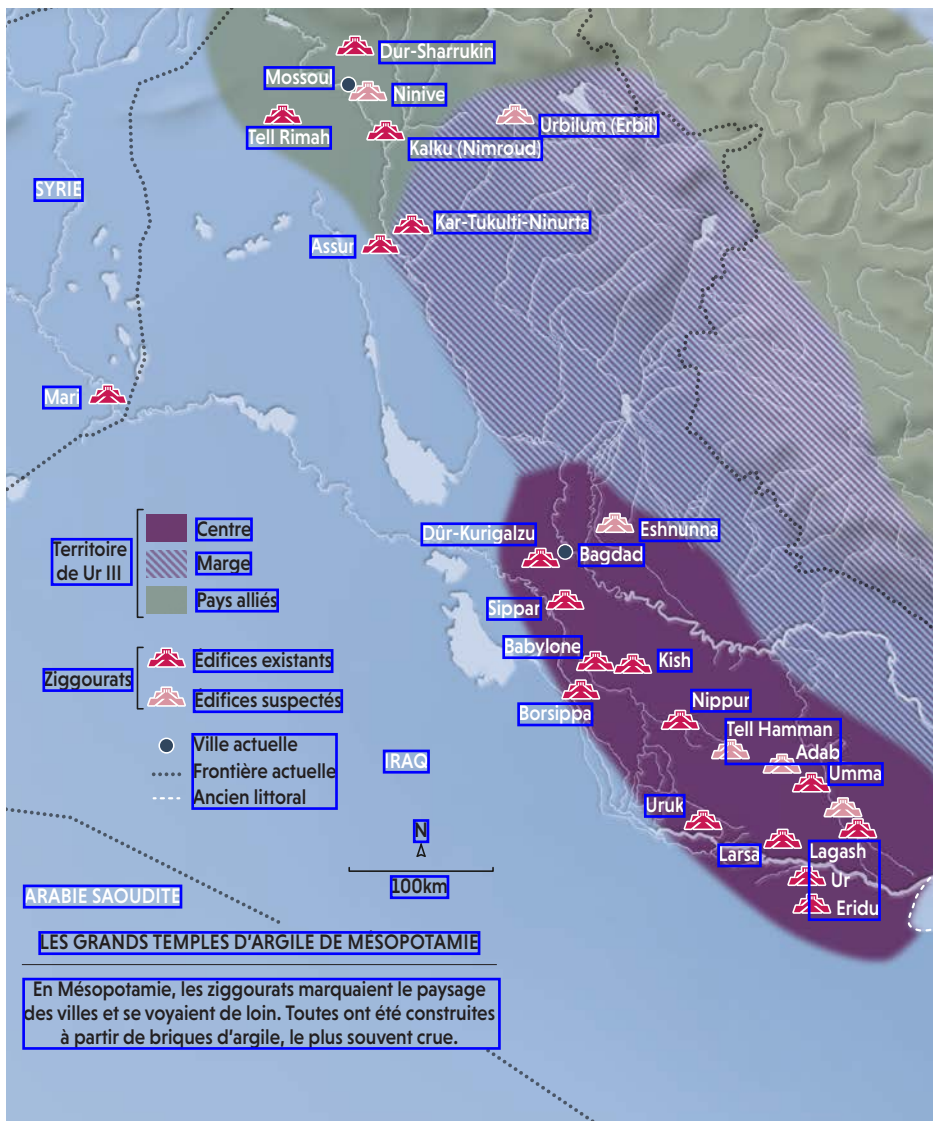
Si cette massive ziggourat était probablement la plus grande de Mésopotamie, elle n'était en aucun cas la seule. Depuis le III^e millénaire avant notre ère, d'imposants édifices à terrasses empilées façonnaient le paysage de nombreuses villes mésopotamiennes (*voir la carte ci-contre*). Visibles de loin depuis les prairies fluviales et les steppes ouvertes de la Mésopotamie, ces sanctuaires manifestaient aussi le pouvoir des communautés urbaines.

Les fouilles et les descriptions des textes cunéiformes nous donnent une idée de l'aspect de ces monuments et de leurs usages. Elles nous apprennent aussi que leur érection relevait de la responsabilité de l'État et de son représentant, le roi. Celui-ci profitait toujours de la construction d'une ziggourat pour se mettre en avant et en scène en tant qu'architecte et maître d'ouvrage.

DES INVESTISSEMENTS CONSIDÉRABLES

Les textes contiennent beaucoup d'informations et de trésors encore inexploités. Nous les avons explorés afin d'étudier un aspect méconnu des monuments anciens: leurs coûts de construction. Comme ceux d'aujourd'hui, les grands projets de l'Antiquité nécessitaient des investissements considérables en matières premières et main-d'œuvre. Ainsi, une multitude d'ouvriers, d'artisans, d'architectes expérimentés et d'administrateurs y concouraient; leur envergure signifiait des exigences élevées en termes de planification, de coordination et d'exécution de chaque étape de la construction. Et tout cela impliquait des risques.

Les maîtres d'ouvrage institutionnels actuels connaissent bien l'une des difficultés que rencontraient aussi leurs prédécesseurs mésopotamiens: la dérive des coûts. Celle-ci devient un problème grave lorsque la dépense



nécessaire consomme une part considérable des ressources de l'État. Afin d'échafauder un modèle de la structure des coûts d'une ziggourat – depuis l'érection de la colline artificielle en gradins portant le temple jusqu'à l'enduit des murs extérieurs de l'édifice –, nous avons commencé par analyser les documents administratifs du ^{xxi}e siècle avant notre ère, époque de la III^e dynastie d'Ur (2112-2004 avant notre ère). Des dizaines de milliers de tablettes d'argile portant des inscriptions et provenant de différents secteurs de l'administration permettent, par exemple, d'établir le budget de la construction d'un palais et d'un temple. Les salaires des ouvriers bâtisseurs et le coût de leur nourriture en constituaient une part importante, car, même si la plupart de ces travailleurs n'étaient pas de statut social élevé, il ne s'agissait pas non plus d'esclaves.

Malgré la richesse de ces détails, les sources de cette époque ne disent pas tout. Quel était par exemple le coût de la production des



briques d'argile nécessaires pour édifier un mur? Combien de jours-homme représentait un bâtiment? Pour répondre, ce sont les textes pédagogiques destinés à la formation des fonctionnaires aux mathématiques et aux méthodes de mesure qui sont utiles. Ils contiennent en effet de nombreux ordres de grandeur, tout particulièrement s'agissant des temps nécessaires pour accomplir les tâches.

Ces tablettes sont postérieures de deux à cinq siècles aux sources du xx^{e} siècle avant notre ère que nous mentionnions plus haut. Pour autant, il nous semble peu probable que la quantité de travail qu'effectuait un ouvrier en un jour ait beaucoup changé en ces quelques siècles. Si l'on s'en tient aux connaissances actuelles, aucune innovation technique n'est intervenue qui aurait entraîné une utilisation plus efficace de la main-d'œuvre. Il existe en outre de nombreuses indications que les problèmes mathématiques traités dans les manuels d'apprentissage, où figurent les ordres de grandeur en question, ont été mis au point très tôt; ils auraient même été déjà pertinents bien avant le xx^{e} siècle.

En 1999, Eleanor Robson, assyriologue à l'université de Cambridge, a utilisé ces textes pédagogiques pour déterminer le temps nécessaire à la production des briques de terre crue. La matière première, un mélange de loess et de sable, était disponible en abondance en Mésopotamie. Tandis que le loess lie les grains de sable, ces derniers supportent la charge. Quand la terre contenait trop de loess, on y ajoutait plus de sable, ainsi que des roseaux ou de la paille hachés.

Dans les textes d'apprentissage, on lit que le quota d'un ouvrier travaillant dans la fosse d'argile était de 20. Étant donné le système sexagésimal employé à l'époque babylonienne, cette spécification doit s'interpréter comme 20/60, c'est-à-dire $1/3$. Aucune unité de mesure n'est mentionnée, mais les experts s'accordent à dire que ce tiers se rapporte à l'unité usuelle de volume, à savoir le *sar*. Un *sar* serait égal à 12 coudées $\times$ 12 coudées $\times$ 1 coudée.

Sachant qu'une coudée mésopotamienne mesurait environ 0,5 mètre, un *sar* représentait donc à peu près $6 \times 6 \times 0,5 = 18$ mètres cubes. Un ouvrier travaillant dans la fosse à argile devait donc, d'après son quota, excaver $18/3$, soit de l'ordre de 6 mètres cubes de matière première par jour. Sans doute accomplissait-il ce labeur aux heures fraîches du matin et du soir, comme c'est toujours le cas aujourd'hui dans cette région.

La réalisation du mélange d'eau, de paille hachée et de sable prenait deux fois plus de temps, donc deux jours; enfin, l'ouvrier en question passait une autre journée à façonner les briques et à les mettre à sécher. Il est possible que d'autres personnes que les ouvriers terrassiers aient été chargées de disposer les briques au soleil, puis de les retourner encore et encore afin qu'elles sèchent uniformément. Bien que ce poste ne soit nulle part mentionné explicitement, il était probablement inclus dans le total des coûts de production. On estime donc que la production de briques représentait un travail de $4/6 = 2/3$ jour-homme par mètre cube de briques.

UNE MATIÈRE PREMIÈRE PRESQUE GRATUITE

Comme la terre argileuse était présente et disponible presque partout en Mésopotamie, la matière première ne coûtait pratiquement rien. Il en va très différemment de la nourriture et des salaires. Les registres salariaux des grands chantiers de construction énumèrent ces dépenses salariales en détail, qui reflètent des hiérarchies et des compétences diverses. Les producteurs de briques – toujours des hommes – touchaient un salaire quotidien de 5 à 6 kilogrammes d'orge ou plutôt de 5 à 6 litres, puisqu'à l'époque on mesurait les céréales plutôt en volume. Cela correspond à la rémunération quotidienne typique de journaliers et d'autres travailleurs embauchés à durée déterminée. On employait aussi des femmes pour certaines tâches, mais elles ne recevaient généralement que 3 litres de grain. Les employés permanents, qui devaient donc être entretenus à l'année, avaient des salaires journaliers inférieurs.

Compte tenu des durées estimées plus haut, nous estimons que le mètre cube de briques coûtait un salaire d'au moins 4 litres d'orge. Notons que la production des végétaux hachés et leur mélange à la terre avaient aussi un coût, mais les textes n'indiquent rien à ce propos. Les chercheurs partent du principe que la valeur de cette partie du travail de production de briques équivaut à 1 litre d'orge environ.

Les tablettes d'apprentissage des scribes ne livrent aucune information sur la sustentation des travailleurs du chantier de construction. Heureusement, les textes dits de Garshana comportent de tels renseignements. Les tablettes correspondantes ont été probablement mises au

Produire des briques demandait environ $2/3$ jour-homme par mètre cube

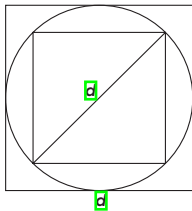
ALGÈBRE ET GÉOMÉTRIE SUR TABLETTES D'ARGILE

On attribue la formule reliant l'hypoténuse aux deux autres côtés d'un triangle rectangle à Pythagore, au ^{vi}^e siècle avant notre ère. Mais les mathématiciens babyloniens, 1300 ans auparavant, avaient déjà utilisé une version de ce théorème.

Ces derniers savaient aussi calculer de façon approchée une racine carrée, suivant une méthode que nous attribuons à Héron d'Alexandrie (ⁱ^{er} siècle de notre ère). Ainsi, on peut lire sur la tablette d'un apprenti que l'approximation à 5 décimales de $\sqrt{2}$ vaut 1,24.51.10 en système sexagésimal (le système de numération de base 60), c'est-à-dire :

$1 + 24 \times 60^{-1} + 51 \times 60^{-2} + 10 \times 60^{-3}$,
ce qui fait bien, dans le système décimal, 1,41421...

Devant une telle précision, on s'étonne que l'aire d'un cercle (πr^2 où r est le rayon du cercle) ait été calculée par les Mésopotamiens par la formule $3r^2$ plutôt qu'à l'aide d'une valeur approchée de π comme 3,1415. Cela suggère que les mathématiciens mésopotamiens considéraient que cette aire était égale à la valeur moyenne des aires des carrés circonscrit et inscrit.



En effet, tandis que l'aire du carré circonscrit est d^2 , où d est le diamètre du cercle, le carré inscrit a pour aire $d^2/2$; la moyenne de ces deux quantités,



Cette tablette inscrite en cunéiforme, conservée au British Museum, traite de la construction de certaines figures géométriques.

c'est-à-dire $(d^2 + d^2/2)/2$, vaut bien $3d^2/4$, soit $3(d/2)^2$ ou encore $3r^2$.

Les scribes mésopotamiens étaient aussi capables de calculer les aires de figures compliquées. Un exemple impressionnant de ce savoir-faire est fourni par une tablette conservée au British Museum (*ci-dessus*). Son texte décrit la construction de certaines figures sans indiquer comment les calculer, mais il n'y

soit $1/3$, comme l'approximation babylonienne de $1/\pi$, et par ailleurs 5 , c'est-à-dire $5/60 = 1/12$, comme l'approximation babylonienne de $1/(4\pi)$. Or ces facteurs permettent de calculer, à partir de la circonférence C du cercle, son diamètre $d = C/\pi$ et son aire $S = C^2/(4\pi)$.

On trouve aussi mentionnés sur la tablette les charges de travail représentées par certaines tâches, tout à fait comparables aux ordres de grandeur qui nous aident aujourd'hui à estimer des coûts de construction.

Les plus anciennes traces de mathématiques mésopotamiennes sont inscrites en protocunéiforme sur des tablettes de la ville d'Uruk datant du ^{iv}^e millénaire avant notre ère. Un scribe y calcula la superficie de champs à partir de rectangles et de quadrilatères irréguliers. Les Mésopotamiens calculaient leurs aires de façon approchée par des produits des valeurs moyennes des longueurs de côtés opposés, exactement comme procéderont les Romains quelque 3000 ans plus tard.

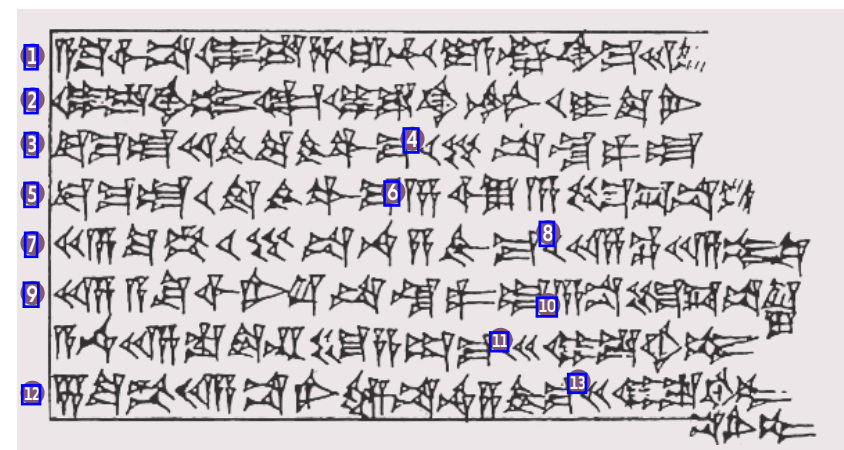
Même les abstractions n'étaient pas étrangères aux mathématiciens de Babylone. Ainsi, sur la tablette reproduite ci-dessus, l'un d'eux s'est servi d'étapes de pensée pour résoudre un système à deux inconnues composé d'une équation du deuxième degré et d'une équation du premier degré. Elle contient la solution complète du système d'équations ($x^2 + y^2 = a$; $y = x + b$) dans le cas concret où

Les plus anciennes traces de mathématiques mésopotamiennes sont sur des tablettes du IV^e millénaire

Il n'y a aucun doute sur le fait que l'exercice correspondant a bien été résolu.

Dans la pratique quotidienne, les érudits employaient des listes qui avaient à peu près la fonction de nos tables numériques modernes. Ils contenaient toutes sortes de nombres utiles à la géométrie, aux techniques et à l'administration.

On y trouve par exemple des mentions du genre «20: diamètre du cercle» et «5: paramètre du cercle». Il faut ici entendre le chiffre sexagésimal 20/60,



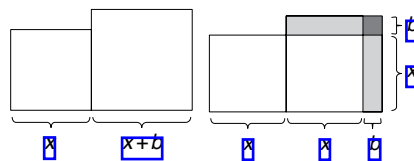
Une série de 13 étapes aboutissant à la résolution du système d'équations ($x^2 + y^2 = 1300$; $y = x + 10$) sont décrites sur une tablette babylonienne conservée au British Museum (en haut, rectangle blanc). Ces étapes sont indiquées sur la reproduction à grande échelle du contenu de ce passage (ci-dessus).

$a = 1300$ et $b = 10$. Dans la traduction qui suit, j'ai un peu complété le texte original et traduit en écriture décimale les nombres.

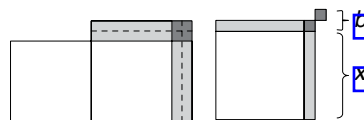
- 1 J'ai ajouté les aires de deux carrés et le résultat est 1300.
- 2 Le côté de l'un des carrés dépasse celui de l'autre de 10.
- 3 Tu prends la moitié de 1300 (mentionné à l'étape 1).
- 4 Tu écris 650 (le résultat).
- 5 Tu formes les moitiés de 10 (mentionné à l'étape 2).
- 6 Tu multiplies les (résultats) 5 entre eux.
- 7 Tu déduis (le résultat) 25 de 650.
- 8 La racine carrée (du résultat) 625 est 25.
- 9 Tu écris deux fois ces 25.
- 10 Tu ajoutes le 5, que tu as mis au carré (à l'étape 6) à l'un des 25 (mentionné à l'étape 9).
- 11 (Le résultat) 30 est le côté du plus grand carré.
- 12 Tu retires le 5 (que tu as élevé au carré à l'étape 6) du deuxième 25 (mentionné à l'étape 9).

13 (Le résultat) 20 est le côté du plus petit carré.

Cette suite d'étapes conduisant à la solution peut être interprétée ainsi. On a deux carrés, l'un de côté x et l'autre de côté $y = x + b$. Le plus grand carré peut être vu comme le premier que l'on a augmenté d'un «supplément» :

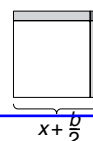


Ce supplément correspond aux deux rectangles gris clair ci-dessus (de largeur b et de hauteur x) et au carré gris foncé de côté b . À l'étape 3, on retire la moitié de l'aire totale (à savoir ici a , c'est-à-dire 1300). Cela peut être réalisé géométriquement en enlevant à l'un des deux carrés blancs (de même taille) la moitié de l'une des bandes gris clair et deux quarts du petit carré gris foncé :



La figure qui en résulte a pour aire $a/2$, c'est-à-dire 650. Chacun des carrés gris foncé qui restent a pour côté $b/2$ (soit, ici, 5) et donc pour aire $(b/2)^2$ (soit, ici, 25).

À l'étape 7, un tel carré est retiré de la nouvelle figure («Tu déduis (le résultat) 25 de 650»), par exemple le carré se trouvant à l'extérieur. Il reste donc un carré de longueur $x + b/2$.



Son aire est égale à $650 - 25$, soit 625. À l'étape 8, on en prend la racine carrée. Le résultat (25) est le côté du carré, donc $x + b/2$. Ce résultat intermédiaire doit être écrit deux fois (étape 9), puis subir deux opérations différentes : l'addition de $b/2$ (étape 10) donne $x + b$, donc le côté du grand carré d'origine (étape 11) ; la soustraction de $b/2$ donne le côté du petit carré d'origine (étape 13).

Cet algorithme fonctionne aussi quand on utilise d'autres valeurs que 1300 pour a et 10 pour b . Il est aujourd'hui indiscutable que les mathématiciens babyloniens le savaient. Comme l'avait déjà constaté dans les années 1930 Otto Neugebauer, le pionnier de l'étude des mathématiques décrites sur les tablettes mésopotamiennes, les Mésopotamiens employaient des chiffres concrets pratiquement comme des variables.

Ils ont même résolu des généralisations du problème évoqué ici, où l'on ne cherche pas seulement les côtés de deux carrés, mais ceux de n carrés, dont le côté de chacun est toujours augmenté de b par rapport à celui de son prédécesseur, tandis que l'aire totale de cette série de carrés est prescrite.

HAGAN BRUNKE

H. Brunke, *Überlegungen zu Raumerfassung und Flächenrechnung in Mesopotamien*, eTopoi Journal for Ancient Studies, vol. 4, pp. 1-17, 2015.

J. Høyrup, *L'Algèbre au temps de Babylone. Quand les mathématiques s'écrivaient sur de l'argile*, Vuibert/Adapt-Snes, 2010.

> jour illégalement par des voleurs après la première guerre du Golfe en 1990-1991, puis vendues hors du pays. Elles ont fini par atterrir dans la collection de l'université Cornell, à Ithaca. Au début des années 2000, Rudolf Mayr et David Owen, assyriologues de cette université, ont identifié qu'elles constituaient un corpus, puis les ont publiées en 2007. Nous ignorons où précisément se trouvait le site de Garshana mentionné sur ces tablettes (peut-être près d'Umma) ; il ne s'agissait probablement pas d'une ville, mais d'une localité de plus petite taille, sans doute dépourvue d'un domaine agricole propre.

BASE COMPTABLE : L'ORGE

D'après ces textes, les travailleurs et les scribes participant à la construction recevaient de la bière, du pain et une sorte de gruau à base de farine de céréales bouillie, qui était enrichie de haricots et de pois chiches. La quantité perçue dépendait du statut et de l'âge de l'employé. Ainsi, les maçons percevaient 1 litre de bière, 1/2 litre de gruau et 1 litre de pain (le pain aussi était mesuré en volume) par jour, tout comme les scribes qui administraient le chantier. Les manœuvres non qualifiés recevaient 1 litre de bière, mais devaient se contenter de 1/2 litre de pain et 1/3 litre de gruau par jour. Le même texte mentionne aussi des aides des deux sexes, probablement des enfants, qui recevaient encore moins : 1/3 litre de bière, de pain et de gruau chacun.

La conversion de tous les coûts en quantités alimentaires afin de pouvoir établir des bilans atteste l'efficacité avec laquelle les scribes géraient le temps de travail. On utilisait en général l'orge comme base comptable. Toutes les entrées et sorties de marchandises étaient traduites en valeurs mesurées dans cette « monnaie unique ». Deux litres d'orge correspondaient ainsi à un litre de blé ; selon la qualité et le type de farine, 1 litre de pain équivalait à 1 ou 2 litres d'orge ; 1 litre de bière équivalait, selon sa teneur, à 1 à 3 litres d'orge.

En 2011, l'un d'entre nous (Hagan Brunke) a découvert que ces conversions prenaient en compte non seulement le coût des matières premières, mais aussi les coûts de production, par exemple les salaires des boulangers et des brasseurs. Le fait que les facteurs de conversion soient restés constants, alors que les prix du marché fluctuaient forcément, permet de s'appuyer sur des textes provenant d'époques très éloignées les unes des autres. Si le pain et la bière utilisés dans les briqueteries et sur les chantiers étaient équivalents en valeur à la même quantité d'orge, il semble que les ouvriers ne recevaient que la qualité la plus simple. La farine d'orge précuite qui servait de base aux gruaux, quant à elle, avait, à volume égal, la valeur de une fois et demie celle d'un même

volume de grain non travaillé, ce qui montre que l'on tenait compte du travail associé au séchage et à la précuisson.

Au total, les rations journalières d'un maçon ou d'un scribe coûtaient l'équivalent d'environ 2,4 litres d'orge, tandis que le travailleur non qualifié coûtait environ 1,75 litre. Nous n'avons pas encore d'informations comparables quant à l'offre alimentaire dans la briqueterie ; mais si les hommes qui y travaillaient recevaient autant que les maçons, ce qui est plausible, il faut ajouter environ 1,6 litre d'orge par mètre cube de briques aux coûts salariaux susmentionnés.

Des considérations similaires s'appliquent aux autres étapes du travail. De nombreux textes sur l'arpentage mentionnent des carrières d'argile à la lisière des vastes terres agricoles. C'est là, sans doute, que l'on produisait les briques. Pour les transporter jusqu'au chantier de construction, on les chargeait probablement sur des barges circulant sur le vaste réseau de chenaux dont était parcourue la Mésopotamie. Des porteurs acheminaient les matériaux de construction jusqu'à des embarcadères, ou des débarcadères jusqu'aux chantiers.

En 2009, l'orientaliste allemand Wolfgang Heimpel a déterminé l'efficacité de ces travailleurs de force à partir des textes de Garshana. Selon ses calculs, un porteur acheminait en moyenne 20 kilogrammes par jour sur une distance cumulée de 25 kilomètres. Malheureusement, il n'est guère possible de calculer plus précisément le coût de transport, car les distances à parcourir variaient d'un chantier à l'autre. Or elles n'ont jamais été notées. Quoi qu'il en soit, les estimations du coût global mettent en évidence que chaque kilomètre supplémentaire à parcourir avait un impact notable. C'est probablement pourquoi, au début de certains grands projets de construction, on prenait la peine de creuser de nouveaux canaux, que l'on rebouchait ultérieurement. Le coût du terrassement nécessaire valait l'investissement, car les grands projets s'étendaient sur de nombreuses années.

S'agissant de la construction proprement dite, les tablettes cunéiformes fournissent la valeur moyenne de 3 mètres cubes de mur par personne et par jour. Il est peu probable que les maçons effectuaient eux-mêmes les



LE ROI CONSTRUIT UN TEMPLE

Qui est ce porteur glabre et au crâne rasé, un panier de terre sur la tête ? L'inscription en cunéiforme nous apprend que cette figurine de fonte représente le roi Ur-Nammu construisant la « maison des dieux », c'est-à-dire le temple Éanna dans la ville d'Uruk. De tels « clous de fondation » étaient placés dans les fondements des nouveaux temples lors de la cérémonie marquant le début du chantier.

Coût de la construction de 1 mètre cube de mur: environ 25 litres d'orge

nombreux travaux préparatoires et d'accompagnement, tels que le brassage et le transport du mortier, la manutention des pierres et enfin le crépissage.

Certaines des tablettes de Garshana suggèrent qu'un groupe de maçons se composait d'un maître maçon, de 7 maçons qualifiés et de 80 à 120 manœuvres masculins ou féminins. Il est difficile de rendre compte ici de la structure salariale d'une telle équipe compte tenu des hiérarchies entre maçons et manœuvres ou entre hommes et femmes. Nous avons fait les calculs en considérant que les maçons atteignaient leurs quotas de 3 mètres cubes par jour et en prenant en compte les très divers frais de bouche et de salaires perçus par les travailleurs, qualifiés ou non, hommes ou femmes. Nous sommes ainsi parvenus à la conclusion que le coût en salaire et nourriture de la construction de 1 mètre cube de mur s'élevait à environ 25 litres d'orge.

Des raisonnements similaires s'appliquent aux équipes de terrassiers et de porteurs. En tenant compte du résultat concernant les maçons que nous venons de présenter, nous avons trouvé que 1 mètre cube de mur coûtait ainsi, de la production des briques nécessaires jusqu'à son achèvement, de l'ordre de 54+18D litres d'orge, où D est la distance en kilomètres que les porteurs devaient parcourir. Cette formule ne tient pas compte des coûts supplémentaires dus aux déchets de production, aux bris de briques durant le transport ou aux absences pour maladie des travailleurs. Mais il est peu probable que ces imprévus changeaient l'ordre de grandeur du coût total.

3 MILLIONS DE LITRES D'ORGE POUR LA ZIGGOURAT D'URUK

Prenons l'exemple de la ziggourat du sanctuaire d'Eanna (en sumérien *é-an-na*, soit la « maison du ciel ») de la ville d'Uruk, l'un des sanctuaires les plus importants de Mésopotamie. Grâce aux fouilles effectuées par l'Institut archéologique allemand sous la direction de Margarete van Ess, nous disposons de nombreuses données. D'après elle, le roi Ur-Nammu (2112-2095 avant notre ère)

fit entièrement remanier le temple. Nous ignorons si l'ancien bâtiment a été complètement ou partiellement démoli et nous n'en connaissons pas les coûts. Cependant, la refonte était tellement importante qu'elle équivalait à la construction d'un bâtiment neuf. La terrasse inférieure occupait à elle seule près de 2700 mètres carrés et mesurait 11,2 mètres de haut; la hauteur totale de la nouvelle ziggourat était probablement de 28 mètres. Il en résulte un volume total de plus de 41500 mètres cubes. En faisant l'hypothèse optimiste que les porteurs parcouraient une distance de 1 kilomètre seulement, on parvient à un coût total de construction qui dépasse les 3 millions de litres d'orge.

Pour mettre en perspective ce chiffre, on peut tirer profit des calculs relatifs à la productivité de l'agriculture mésopotamienne; ces calculs se fondent eux aussi sur les bilans établis par les scribes. Grâce à la fertilité des zones alluviales et à l'ingénieuse irrigation, la production céréalière atteignait entre 900 et 1350 litres par hectare de terre arable. On effectuait deux récoltes par an. Si l'on suppose une durée de construction de dix ans – le roi Ur-Nammu a régné pendant seize ans, mais il a dû commander les travaux et les voir achevés –, on parvient à la conclusion qu'une surface de 134 hectares de champs d'orge a été nécessaire pour financer le chantier.

Compte tenu de l'importance des superficies cultivées telles que les documentent les textes administratifs, le produit total de l'agriculture excédait plusieurs fois cette dépense. Même si les calculs ne prennent pas en compte l'utilisation d'autres matériaux de construction tels que le bois, les roseaux ou le bitume et les éléments décoratifs, on constate ainsi que certains au moins des grands projets ne pesaient pas trop lourdement sur l'État.

La situation sera bien différente avec la rénovation de Babylone par Nabuchodonosor II, quelque 1500 ans plus tard. D'une part, la ziggourat de cette cité, la fameuse « tour de Babel », était 8 fois plus grande en volume que celle d'Eanna et n'était que l'un des nombreux chantiers de construction. D'autre part, la hausse du niveau de la nappe phréatique a rendu nécessaire, pour assurer l'étanchéité, l'utilisation de briques cuites et de bitume comme agrégat de mortier. Les villes et les temples de l'Empire babylonien ont ainsi dû ployer sous le travail et les impôts nécessaires. Nous n'avons pour l'heure aucune idée du coût, sûrement très élevé, de la rénovation de Babylone. Comment les habitants de la Mésopotamie ont-ils supporté la charge d'une telle entreprise? L'Empire était-il alors en déséquilibre économique? Tenter de répondre à ces questions à l'aide des méthodes que nous avons développées promet d'être passionnant. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Brunke, « **Großbaustellen in Sumer. Aufwand und Kosten** », in *Groß Bauen*, Birkhäuser, pp. 27-36, 2017.

H. Brunke, « **Feasts for the living, the dead, and the Gods** », in *The Oxford Handbook of Cuneiform Culture*, Oxford University Press, pp. 166-182, 2011.

E. Cancik-Kirschbaum et al. (éd.), « **Babylon. Wissenskultur in Orient und Okzident** », in *Topoi Studies of the Ancient World*, vol 1., De Gruyter, 2011.

K. Kleber, ***Tempel und Palast. Die Beziehungen zwischen dem König und dem Eanna-Tempel im spätbabylonischen Uruk***, Ugarit-Verlag, 2008.

L'ESSENTIEL

> En facilitant l'accès des femmes au marché de l'emploi, à l'éducation et à la contraception, on améliore le bien-être de tous.

> Malgré de notables progrès dans la lutte contre les inégalités entre les hommes et les femmes dans le monde, en particulier dans les pays

en développement, certaines disparités, notamment économiques, restent difficiles à éliminer.

> Les politiques et les initiatives qui s'attaquent aux normes sociales profondément enracinées constituent les solutions les plus prometteuses. Elles sont à intensifier et à étendre.

LES AUTEURES



ANA L. REVENGA
économiste en chef
adjointe
au Groupe de la
Banque mondiale



ANA MARIA
MUÑOZ BOUDET
chercheuse
en sciences sociales
au Groupe de la
Banque mondiale

La dure réalité du travail au féminin

Dans tous les pays, y compris les plus avancés, la route vers l'égalité femmes-hommes dans le monde du travail est difficile. Comment surmonter les obstacles ?

Ces cinquante dernières années, les femmes et les jeunes filles vivant dans les pays en développement ont bénéficié de nombreuses avancées. Plusieurs chiffres l'illustrent. Prenons par exemple l'espérance de vie à la naissance: elle est passée de 54 ans en 1960 à 72 ans en 2008. Durant cette même période, nous avons assisté à la baisse de fécondité la plus rapide qu'on ait connue. Ces changements traduisent les grands progrès de la condition des femmes dans bien des domaines, de l'éducation à l'emploi en passant par la contraception et le pouvoir de décision. Et tout cela s'est passé bien plus vite que dans les pays développés. Il n'a fallu à l'Inde que 44 ans et à l'Iran seulement 10 ans pour que le nombre d'enfants par femme passe de 6 à 3; aux États-Unis, cela avait pris 123 ans.

Deux tiers des pays du monde ont atteint la parité filles-garçons dans l'accès à l'éducation primaire, et dans plus d'un tiers des cas, l'école est fréquentée par plus de filles que de garçons. On a un renversement frappant des tendances

historiques: les femmes représentent désormais la majorité des diplômés d'université, et plus de 500 millions de femmes ont intégré le marché du travail ces 30 dernières années. Si bien que, aujourd'hui dans le monde, 40% des personnes ayant un emploi sont des femmes.

Pourtant, malgré tous ces progrès, les différences qui subsistent entre hommes et femmes résistent obstinément. Même si les femmes vivent en moyenne plus longtemps que les hommes, dans certains endroits du monde tels que l'Afrique subsaharienne, une femme a autant de risque de mourir en couches qu'une Européenne du Nord en avait au XIX^e siècle, avant l'apparition des antibiotiques. Encore aujourd'hui, les femmes occupent moins de postes à responsabilité en politique et dans le monde des affaires que les hommes. Et même si beaucoup travaillent en échange d'un salaire, leurs capacités et leur niveau d'instruction ne sont pas pris en compte de la même façon que pour leurs homologues masculins.

Ces inégalités sont révoltantes et tenter de les éliminer est à la fois une question de droit et un objectif majeur du progrès



Éliminer les inégalités
entre les femmes et les hommes
en matière d'emploi augmenterait
la productivité de 12 %
en Afrique subsaharienne.

économique et social. De la même façon que le développement se traduit par une réduction de la pauvreté et un meilleur accès de tous aux services, nous devons aussi le voir comme un processus d'élargissement des libertés: le développement doit favoriser la capacité de chacun à saisir des occasions et à décider de son chemin dans la vie. Selon nous, aller vers l'égalité des sexes, en particulier pour ce qui est des situations génératrices de revenus, est une démarche qui mène à une amélioration, et non l'inverse.

Supprimer complètement les inégalités de bien-être entre les deux sexes nécessite des actions précises, venant à point nommé et volontaires. Il existe plusieurs grandes voies d'action. D'abord, abolir les barrières qui empêchent les femmes d'avoir les mêmes perspectives économiques que les hommes; cela est à même d'augmenter la productivité, et donc les revenus, de tout le monde. Ensuite, faciliter l'accès des femmes à l'éducation, à la santé et aux services en général, ce qui améliorerait les perspectives d'avenir des mères et de leurs enfants. Enfin, placer davantage de femmes à des postes à responsabilité: leur donner plus de poids influencerait sur la législation et orienterait les dépenses vers des domaines cruciaux tels que la santé et l'éducation. Si seulement ces transformations étaient aussi faciles à faire qu'à identifier...

UNE INÉGALITÉ D'ACCÈS AU MARCHÉ DE L'EMPLOI

L'inégalité d'accès aux opportunités économiques est un problème que connaissent tous les pays, riches comme pauvres, et tous les secteurs, de l'agriculture à l'entrepreneuriat.

Le premier barrage se fait dès l'entrée dans la sphère économique: les femmes doivent y avoir accès pour en être actrices. Même si le nombre de femmes sur le marché du travail a considérablement augmenté presque partout dans le monde, un déséquilibre notable subsiste entre les femmes et les hommes – de l'ordre de 53 points de pourcentage au Moyen-Orient et en Afrique du Nord.

Même lorsque les femmes arrivent à surmonter cet obstacle, elles font rarement jeu égal avec les hommes. Les agricultrices ont plus de difficulté à se procurer des engrais, des machines et des variétés améliorées de semences, d'où des rendements souvent inférieurs. De même, les dirigeantes d'entreprise ont souvent un moindre accès au capital et au crédit – parce qu'elles sont moins susceptibles de posséder des terres ou des biens servant de garantie, ou parce que les procédures de demande nécessitent un cosignataire masculin, ou parce que les banques considèrent que leur risque est plus élevé. Cela signifie que les entreprises gérées par des femmes sont souvent



moins rentables, d'où un cercle vicieux dont il est difficile de sortir.

Lorsque ces problèmes seront corrigés, la productivité globale devrait augmenter considérablement. D'après une étude publiée en 2016 par David Cuberes, de l'université Clark, aux États-Unis, et Marc Teignier, à l'université de Barcelone, en Espagne, supprimer ces inégalités dans l'entrepreneuriat augmenterait la productivité et les profits de 12% en Afrique subsaharienne et de 38% au Moyen-Orient et en Afrique du Nord.

Dans des secteurs très «féminins», comme l'agroalimentaire et l'enseignement, les salaires sont souvent moins élevés. Dans tous les secteurs, les hommes gagnent en moyenne plus que les femmes pour le même poste, même en prenant en compte le niveau d'instruction et l'âge.

Les dirigeantes d'entreprise ont souvent un moindre accès au capital et au crédit



Même dans des pays comme les États-Unis et le Canada, où la différence entre les nombres de femmes et d'hommes sur le marché du travail tombe à moins de 15 points de pourcentage, d'autres facteurs empêchent une stricte égalité. Les femmes et les hommes ont tendance à s'orienter vers des secteurs économiques différents. Ainsi, on constate aisément que les premières ont plus de chances de travailler dans le domaine de l'éducation ou dans les services sociaux, alors que les seconds travaillent davantage dans la construction et les transports.

En revanche, ce que l'on remarque moins, c'est que les femmes occupent souvent les postes les moins bien payés, quel que soit le secteur où elles travaillent. Par exemple, les femmes sont souvent institutrices, infirmières ou secrétaires plutôt que proviseuses, médecins ou directrices. Même si elles sont chefs d'entreprise, elles tendent à se concentrer dans des secteurs considérés comme traditionnellement féminins, comme l'alimentation ou le textile.

On pourrait débattre du fait que les femmes (ainsi que les hommes) ont des préférences pour certains secteurs et que le modèle de répartition n'est pas aléatoire. Cependant, le problème est que ces «préférences» reflètent des conceptions et préjugés selon lesquels certains métiers sont masculins et d'autres

féminins, ainsi que d'autres stéréotypes, comme l'idée que les femmes sont plus sensibles et que les hommes sont mieux taillés pour l'effort physique. Le point critique est que les secteurs considérés comme féminins ont en moyenne des salaires moins élevés.

La différence entre les revenus des femmes et ceux des hommes est bien connue: dans le monde, une femme gagne en moyenne 81 centimes quand un homme gagne 1 euro. En Jordanie et en Côte d'Ivoire, la différence de salaire entre les femmes et les hommes est de plus de 80%, et les pays riches n'y échappent pas: en Nouvelle-Zélande, la différence est de 5%, et elle atteint 36% en Corée du Sud.

Cet écart reflète les rôles économiques dépréciés tenus par les femmes. Mais l'écart subsiste même si l'on considère une femme et un homme du même âge, de même niveau de diplôme et travaillant dans le même secteur. Dans les milieux ruraux du Pakistan, par exemple, les enseignantes gagnent 30% de moins que leurs homologues masculins. Comprendre et prendre en compte les normes sociales à l'origine de ces différences persistantes est indispensable si l'on veut que ces dernières disparaissent.

DES NORMES SOCIALES DÉFAVORABLES ET PERSISTANTES

L'une des raisons majeures de ces écarts de revenu et de productivité est que l'emploi du temps des femmes est plus chargé. Les femmes s'occupent bien davantage que les hommes des enfants et du foyer; elles sont, partant, moins disponibles pour leur métier.

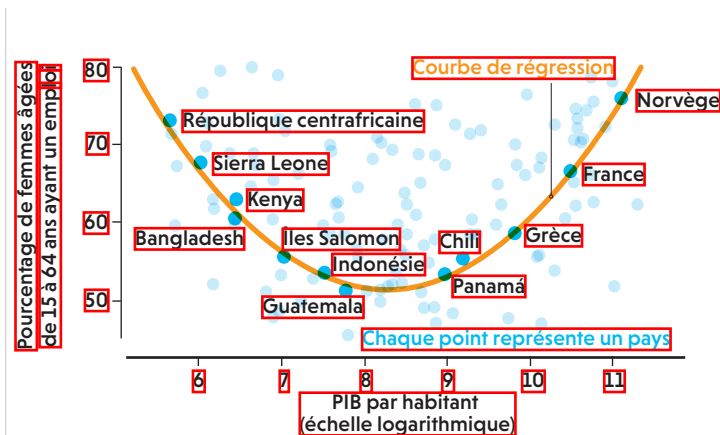
Des normes sociales profondément enracinées sont à l'origine de ces disparités dans la répartition des rôles au foyer. Le plus surprenant est que ces normes (et les comportements qui en découlent) ne changent pas, même lorsque la place des femmes sur le marché prend plus d'importance. Ainsi, au Ghana, une femme effectue en moyenne plus de 80% des tâches domestiques, même lorsqu'elle est seule à travailler.

Ce déséquilibre existe un peu partout ailleurs, y compris aux États-Unis. Même dans les milieux les plus progressistes, ces comportements traduisent des stéréotypes sur la répartition des tâches: on a tendance à considérer ces comportements comme naturels et innés, alors qu'ils sont culturels. On peut le constater partout dans la société, à domicile, sur les marchés... Il n'y a qu'à considérer les emplois du temps à l'école, incompatibles avec des journées de travail complètes des parents, ou bien ces lois qui, dans plusieurs pays, autorisent les mères – mais pas les pères – à prendre des congés pour s'occuper de leurs enfants lorsque ceux-ci sont malades.

Malheureusement, les politiques adoptées pour traiter ces problèmes de contrainte de

ÉVOLUTION EN U

La part des femmes dans le marché du travail tend à être élevée au début du développement économique, lorsque le pays est pauvre et que les foyers ne peuvent pas se permettre qu'un de ses membres ne travaille pas. Une grande partie du travail se fait dans les champs. Lorsqu'un pays passe d'une société rurale à une société industrialisée et urbanisée, et que les gens gagnent mieux leur vie, les métiers se transforment et moins de femmes travaillent. Lorsque les économies se modernisent et se tertiarisent, les femmes rejoignent à nouveau le marché du travail, mais dans des secteurs différents.



INÉGALITÉS DE GENRE

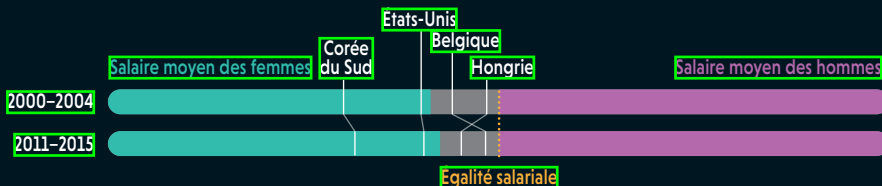
Des données collectées depuis quelques décennies montrent que, malgré les progrès réalisés pour supprimer les inégalités entre les femmes et les hommes, il reste de nombreux défis à relever. Ainsi, sur les plans social et économique, les femmes sont toujours désavantagées par rapport aux hommes.

AMANDA MONTAÑEZ

Certaines de ces inégalités, telles que la sous-représentation des femmes dans les gouvernements, découlent des attitudes générales de la société vis-à-vis du genre et du pouvoir. D'autres, comme l'accès à la contraception ou aux soins gynécologiques, sont directement liés à la condition féminine.

SALAIRES

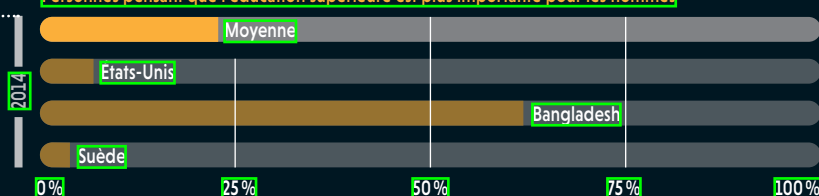
Partout dans le monde, les salariées gagnent en moyenne moins que leurs homologues masculins. Malgré des améliorations récentes, aucun des 31 pays représentés ici n'a éliminé les différences de salaires entre les femmes et les hommes.



EDUCATION

Dans certaines parties du monde, dont les États-Unis, les femmes représentent plus de la moitié des diplômés. Mais en général, presque un quart de la population pense que l'éducation supérieure est plus importante pour les hommes que pour les femmes. Ce graphique inclut des données provenant de 85 pays.

Personnes pensant que l'éducation supérieure est plus importante pour les hommes



AGE AU MARIAGE

Les femmes se marient en général plus tôt que les hommes. À partir des données de 104 pays et territoires, ce graphique représente la moyenne d'âge de ceux qui se marient avant 50 ans.

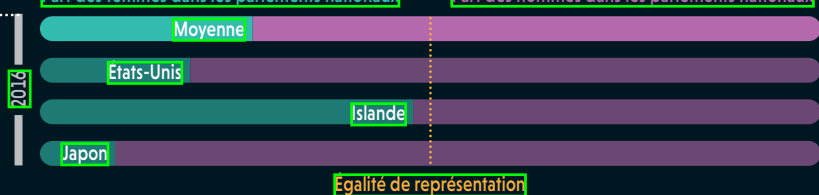
Age moyen des femmes au moment du mariage / Age moyen des hommes au moment du mariage



SIÈGES AU GOUVERNEMENT

Même si les femmes constituent environ 50 % de la population, les femmes sont très sous-représentées dans les gouvernements. À partir de données de 44 pays, ce graphique montre la proportion moyenne de sièges occupés par des femmes dans les parlements nationaux.

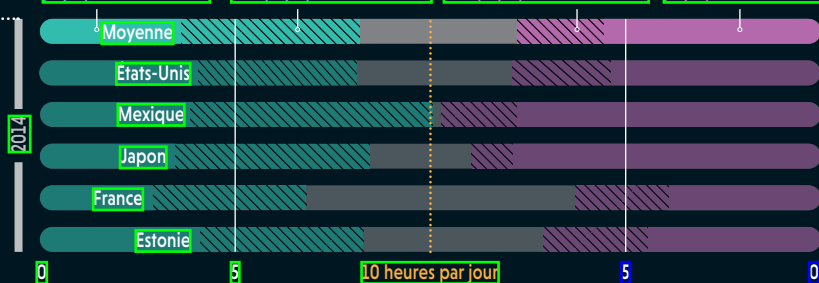
Part des femmes dans les parlements nationaux / Part des hommes dans les parlements nationaux



TRAVAIL NON RÉMUNÉRÉ

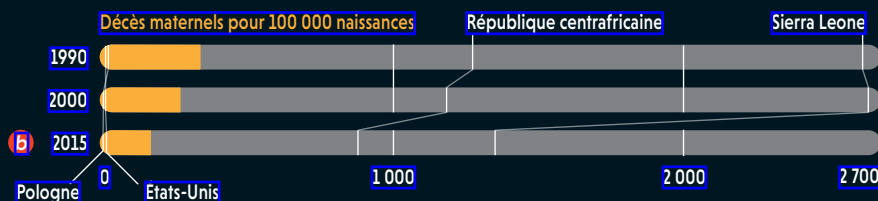
Les femmes travaillent quotidiennement plus longtemps que les hommes, mais une part importante de ce travail n'est pas rémunérée. Les tâches domestiques comme la garde des enfants ou la cuisine contribuent au déséquilibre visible sur ce graphique, qui s'appuie sur les données provenant de 29 pays.

Temps de travail payé pour les femmes / Temps de travail non payé pour les femmes / Temps de travail non payé pour les hommes / Temps de travail payé pour les hommes



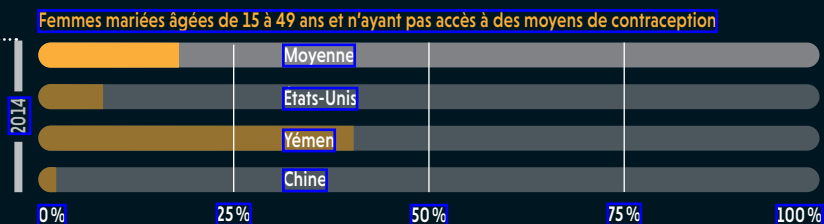
MORTALITÉ MATERNELLE

Des données venant de 181 pays et territoires montrent que, au total, le nombre de femmes mourant à la suite de complications lors de la grossesse ou de l'accouchement a régulièrement diminué au cours des dernières décennies. Ce nombre reste cependant assez élevé dans beaucoup de pays en développement.



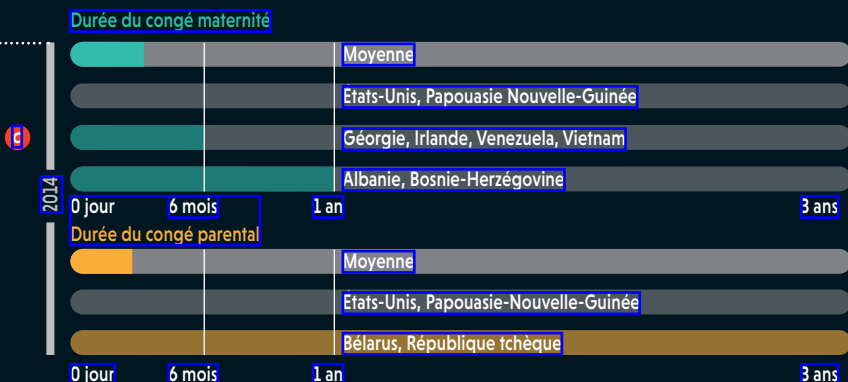
CONTRACEPTION

Des données issues de 120 pays montrent qu'environ 18 % des femmes mariées ayant entre 15 et 49 ans n'ont pas accès à des moyens de contraception.



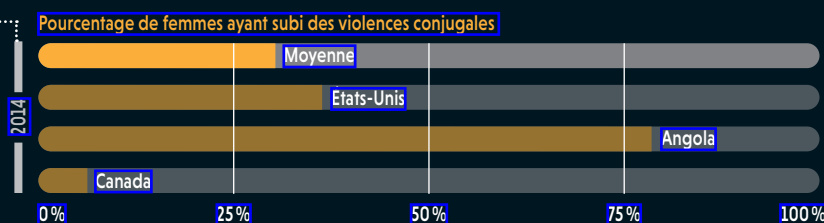
CONGES PARENTAUX

Les femmes assurent la plupart des tâches relatives aux enfants, particulièrement lorsque ceux-ci sont bébés. La plupart des gouvernements octroient une certaine quantité de congés payés aux jeunes parents, selon les chiffres provenant de 160 pays. Dans les pays qui ne répondent pas à cette règle (et dont les États-Unis font partie), les mères en payent le prix de façon disproportionnée.



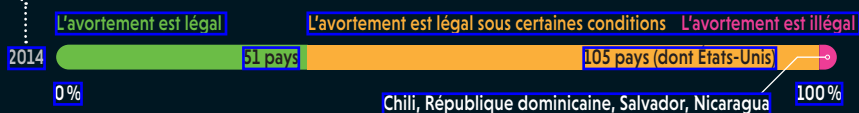
VIOLENCES CONJUGALES

Des données de 103 pays révèlent qu'un fort pourcentage de femmes subissent à un moment ou à un autre de leur vie des violences physiques ou sexuelles de la part de leur partenaire.



ACCES A L'AVORTEMENT

L'avortement reste illégal ou restreint dans la plupart des 160 pays représentés ici. Les restrictions vont de la durée de la gestation (par exemple, interdiction de l'avortement après 20 semaines de grossesse) à des lois qui autorisent l'avortement uniquement en cas de viol ou d'inceste, ou lorsque la vie de la mère est en danger.



Le petit territoire néo-zélandais des îles Tokelau est l'un des seuls endroits du monde où les mariées sont légèrement plus âgées que les mariés. L'âge moyen au mariage est de 28 ans pour les femmes et de 27 ans pour les hommes.

La mortalité des mères aux États-Unis est très inférieure à la moyenne mondiale. Elle est cependant plus élevée que celle des autres pays développés, et elle a récemment augmenté, passant de 12 décès pour 100 000 naissances en 2000 à 14 en 2015.

Les médecins recommandent généralement que les femmes venant d'accoucher allaitent leur bébé pendant les six premiers mois. Cette durée apparaît donc comme un minimum raisonnable pour le congé maternel.

▢ temps contournent généralement ces normes sociales au lieu de s'y opposer frontalement. Mais, même si elles ne constituent pas une solution parfaite, certains de leurs résultats sont prometteurs.

L'exemple le plus frappant est celui consistant à faciliter l'accès à la garde d'enfants et à améliorer le système des congés parentaux. Comme on pouvait s'y attendre, un accès plus aisé aux garderies et aux écoles maternelles permet aux femmes, partout dans le monde, d'être davantage présentes sur le marché du travail. Étendre l'accès aux garderies (emplacements, heures d'ouverture), les rendre plus abordables (coûts directs et indirects) et disponibles (suppression des listes d'attente, plusieurs tranches d'âges pour les enfants) a un effet positif sur l'implication des mères dans le marché de l'emploi.

DES PROBLÈMES D'EMPLOI DU TEMPS

Ainsi, au début des années 1990, l'Argentine s'est lancée dans un programme pour l'accès à la maternelle. Quelque 175 000 écoles maternelles ont ouvert en 7 ans. Des chercheurs, qui ont observé comment se modifiait le marché de l'emploi au cours du développement du programme, ont constaté une augmentation comprise entre 7 et 14 % du taux d'emploi des mères. Qui plus est, ces effets sont également bénéfiques lorsque l'école n'est qu'à temps partiel.

Malheureusement, les politiques consistant à allouer plus de congés maternité – et à introduire aussi des congés paternité pour inclure les pères – n'ont pas toujours rencontré le même succès. En Allemagne, l'extension des congés maternité a encouragé plus de femmes à retourner travailler dans la même entreprise après l'accouchement. Mais quand l'Autriche voisine a augmenté la durée des congés maternité de 1 à 2 ans, en 1990, le pourcentage de femmes reprenant leur emploi a notablement diminué.

On peut citer le cas des congés parentaux dans les pays scandinaves, où les pères sont encouragés à partager la prise en charge de leur enfant après la naissance. Au début, en Suède, les hommes utilisaient peu cette possibilité, jusqu'à ce que les congés qui leur étaient attribués deviennent non transférables. Cette politique a alors produit des résultats positifs, puisqu'elle a conduit ces hommes à passer plus de temps avec leurs enfants. Des études ont montré que ces pères restent au fil du temps très impliqués dans leur rôle de parent, mais qu'ils abandonnent peu à peu les autres tâches domestiques à mesure que l'effet du congé prend fin.

Deuxième moteur des inégalités femmes-hommes dans le monde du travail : les



différences de capital humain. À la base, le problème ne réside pas dans la différence de capacité entre les sexes, mais dans la façon dont on investit dans les femmes et dont on les valorise en tant que travailleuses. Dans les pays en développement, ces variations se mesurent à travers l'accès à l'éducation ; dans des pays plus développés, où le niveau d'instruction est plus élevé et où un grand nombre à la fois d'hommes et de femmes vont à l'université, la divergence entre les sexes apparaît dans le choix des matières étudiées. Par exemple, aux États-Unis, les femmes représentent moins de 35 % des diplômés dans les domaines scientifiques et techniques, alors qu'elles représentent plus de 60 % du nombre total de diplômés.

Pour réduire ces différences de capital humain entre femmes et hommes, les États doivent investir au-delà de l'éducation traditionnelle afin d'inclure stages, apprentissages et autres modalités de travail. Les jeunes à la recherche d'un emploi sont l'une des principales cibles de ces politiques. Un exemple notable est la série des programmes pour la jeunesse mis en œuvre un peu partout en Amérique latine au début des années 2000, et qui englobaient des stages, des formations et des incitations pour les employeurs afin que ces derniers dépassent leurs préjugés lors du recrutement de nouveaux et jeunes salariés. Globalement, les filles ont vu augmenter

Partout, dans les pays pauvres comme dans les pays riches, l'emploi du temps des femmes est soumis à de fortes contraintes.

leurs chances de trouver un emploi ainsi que leurs revenus.

Les efforts consentis pour adapter ces initiatives ciblées sur la jeunesse à d'autres pays n'ont pas toujours eu les résultats escomptés. L'évaluation d'un programme d'apprentissage similaire mené au Malawi a montré que les responsabilités familiales limitaient la participation féminine. En Jordanie, le projet «Nouvelles opportunités pour les femmes» a attiré un grand nombre de candidatures et impliqué plus de 1000 jeunes filles issues de lycées communautaires. Beaucoup de ces femmes ont réussi leur formation, et la moitié de celles-ci ont trouvé un emploi grâce à des sponsors qui se sont portés garants auprès des employeurs. Mais les effets se sont vite estompés, et on n'a constaté aucun changement dans le marché de l'emploi ou les salaires. Là encore, il semble que les normes sociales et les préjugés des employeurs vis-à-vis des femmes aient empêché que cette initiative se développe avec succès.

Enfin, le troisième moteur d'inégalités femmes-hommes en matière de perspectives économiques est ce qu'on nomme communément la discrimination: le traitement différent des femmes par les marchés et les institutions.

Inégalités de sièges

Environ

20

femmes seulement dans le monde sont à la tête d'un État ou d'un gouvernement.

A peine

23 %

des sièges parlementaires dans le monde sont occupés par des femmes.

Le Rwanda est le pays où le plus de femmes siègent à l'Assemblée :

61 %

des 80 places de la Chambre basse sont occupées par des femmes.

prédomine. Ainsi, lorsque peu de femmes occupent un type d'emploi, elles sont moins informées des opportunités dans ce domaine et peinent à trouver quelqu'un qui puisse les conseiller. Dans beaucoup de pays, les offres d'emploi ou les critères de sélection fondés sur le sexe de l'individu sont encore monnaie courante. Il est frappant de constater que dans 174 des 189 pays figurant dans la base de données *Women, business and the law* («Femmes, affaires et loi») de la Banque mondiale, les recruteurs ont le droit de poser aux candidats des questions portant sur leur statut marital et leurs projets familiaux.

Les institutions de l'État traitent aussi parfois les femmes et les hommes différemment, rarement au bénéfice des premières. Par exemple, dans deux tiers des pays, les femmes n'ont pas accès aux mêmes métiers que les hommes.

Sur ce plan, beaucoup de pays de l'ex-Union soviétique sont particulièrement restrictifs. En Russie, près de 460 métiers sont actuellement interdits aux femmes, tels ceux de sidérurgiste, de sapeur-pompier, de conducteur de métro ou de travailleur dans l'extraction de pétrole. Dans d'autres pays, les femmes ont besoin de l'accord d'un homme pour occuper un emploi, ouvrir un compte bancaire ou créer une entreprise. Au Chili, seuls les maris ont le droit de gérer les biens matrimoniaux, quelle que soit la provenance des fonds ayant servi à l'achat du bien en question. Au Pakistan, il est impossible pour une femme mariée de créer une entreprise. En Mongolie, il est interdit aux femmes de travailler de nuit. Au Yémen, un mari peut s'opposer à ce que son épouse occupe un emploi.

Ces trois classes de disparités entre femmes et hommes – concernant la répartition des rôles dans les tâches domestiques, les investissements en capital humain et le traitement par les marchés et les institutions – ne font pas seulement obstacle à des opportunités économiques équitables, mais se renforcent aussi les unes les autres.

Ainsi, en consacrant plus de temps aux enfants et aux tâches domestiques, les femmes tendent à sélectionner des métiers plus souples en termes d'emploi du temps, mais aussi moins bien payés. C'est particulièrement le cas si les offres d'emploi comportent des restrictions sur le travail à temps partiel, comme dans beaucoup de pays en développement.

Savoir à l'avance qu'il sera difficile de trouver un métier et de s'intégrer dans un domaine aussi masculin que l'ingénierie ou la construction décourage trop souvent une fille ou une jeune femme d'acquiescer les diplômes et compétences nécessaires pour y trouver des débouchés. De plus, une femme qui a connu plusieurs expériences de discrimination au recrutement

Dans deux tiers des pays, les femmes ne peuvent pas exercer les mêmes métiers que les hommes

Lorsque peu de femmes travaillent dans un secteur, les employeurs ont parfois des croyances erronées concernant leurs qualifications; ou se montrent rétifs à leur recrutement par crainte d'un surcoût, de type congé maternité; ou supposent que les candidates n'assurent pas les principaux revenus de leurs foyers, et donc qu'elles ne sont pas très motivées. Plusieurs études comparant les réactions d'employeurs vis-à-vis de CV identiques d'hommes et de femmes ont révélé une évidente discrimination lors du recrutement.

De plus, l'accès à certains emplois nécessite des réseaux où l'un des deux sexes

➤ risque de s'orienter vers le travail à domicile ou d'être complètement découragée de rejoindre le marché du travail, ce qui alimente davantage le cercle vicieux des inégalités.

Si nous avons réussi à identifier aussi clairement l'origine des inégalités des sexes vis-à-vis de l'émancipation économique, pourquoi le changement reste-t-il si difficile? Tout d'abord, les multiples facteurs à prendre en compte nécessitent de lancer plusieurs actions coordonnées dans un but commun. Et comme la nature, la structure et le fonctionnement des marchés, des institutions et des normes varient considérablement d'un pays à l'autre, une approche fondée sur une solution unique n'est pas possible: comme nous l'avons vu, des politiques ayant eu du succès dans un cadre donné peuvent échouer dans un autre.

Certaines conditions se sont tout de même révélées nécessaires pour réussir des réformes. Pour être efficaces, celles-ci doivent couvrir tous les facteurs sous-jacents aux inégalités des sexes face au marché du travail. Autrement dit, elles doivent prendre en compte les contraintes d'emploi du temps des femmes dues aux normes sociales concernant le travail domestique, plutôt que de les contourner. Pour augmenter la productivité des femmes, qu'elles soient salariées, agricultrices ou dirigeantes d'entreprise, il faut combler les manques dans leur information, leurs compétences et leur accès aux réseaux professionnels. Enfin, ces réformes doivent également gommer les différences au niveau des marchés et des institutions en luttant contre les préférences discriminatoires.

Un bon exemple d'une telle réforme, et qui atteint plusieurs des objectifs ci-dessus, est le programme ELA (*Empowerment and livelihood for adolescents*, «Émancipation et subsistance des adolescents»), expérimenté en Ouganda par l'organisation non gouvernementale Building Resources Across Communities (BRAC). Ce programme a augmenté les compétences de jeunes femmes âgées de 14 à 20 ans au moyen d'une formation dans des «clubs de filles» où un tuteur dirigeait les activités. Ces clubs constituaient un espace où les adolescentes avaient la possibilité de se rencontrer, de nouer des liens sociaux, de se divertir en toute tranquillité.

Un quart des filles provenant des 100 communautés choisies pour l'évaluation ont joué le jeu, avec des résultats impressionnants. Les participantes ont eu 72% de chances en plus de trouver un travail rémunéré dans les quatre années qui ont suivi. Plus important encore: le programme a modifié les attitudes et aspirations des filles concernées. Par exemple, elles étaient plus enclines à penser que les femmes elles aussi devaient gagner de l'argent pour leurs familles et elles



étaient moins stressées par l'idée de rechercher un bon emploi une fois adultes. Il a aussi été frappant de constater que ces changements de mentalité ont réduit la proportion d'adolescentes enceintes de 34% ainsi que le nombre de mariages ou concubinages précoces de 62%.

TROP D'INITIATIVES NE REPOSENT QUE SUR DE BONNES INTENTIONS ET DES INTUITIONS

Les décideurs politiques doivent aussi apprendre de leurs échecs et de leurs succès, ainsi que de ceux des autres. Pour ce faire, il leur faut bien articuler le contenu des réformes et les résultats attendus. Puis tester et correctement évaluer les projets avant de les mettre en œuvre à grande échelle. Trop d'initiatives en faveur de l'égalité des sexes ne reposent que sur de bonnes intentions et des intuitions.

Il faudrait étendre et intensifier les politiques qui présentent le plus de potentiel. Sans y mettre fin dès que l'objectif voulu semble atteint: en matière de changements sociaux et organisationnels, il est particulièrement important d'assurer un suivi à long terme. La réduction des inégalités nécessite des actions coordonnées, concertées et durables pour que les marchés, les institutions et les sociétés en général soient plus justes vis-à-vis des femmes.

Éliminer les vieux préjugés dont font l'objet les femmes et les hommes, que ce soit au foyer ou au travail, est un chantier colossal mais réalisable, à condition que la volonté politique s'allie à des stratégies ayant fait leurs preuves. ■

Un exemple d'évolution positive: l'Arabie saoudite a annoncé en février 2018 que les femmes peuvent désormais créer leur propre entreprise sans avoir besoin de l'accord d'un tuteur masculin.

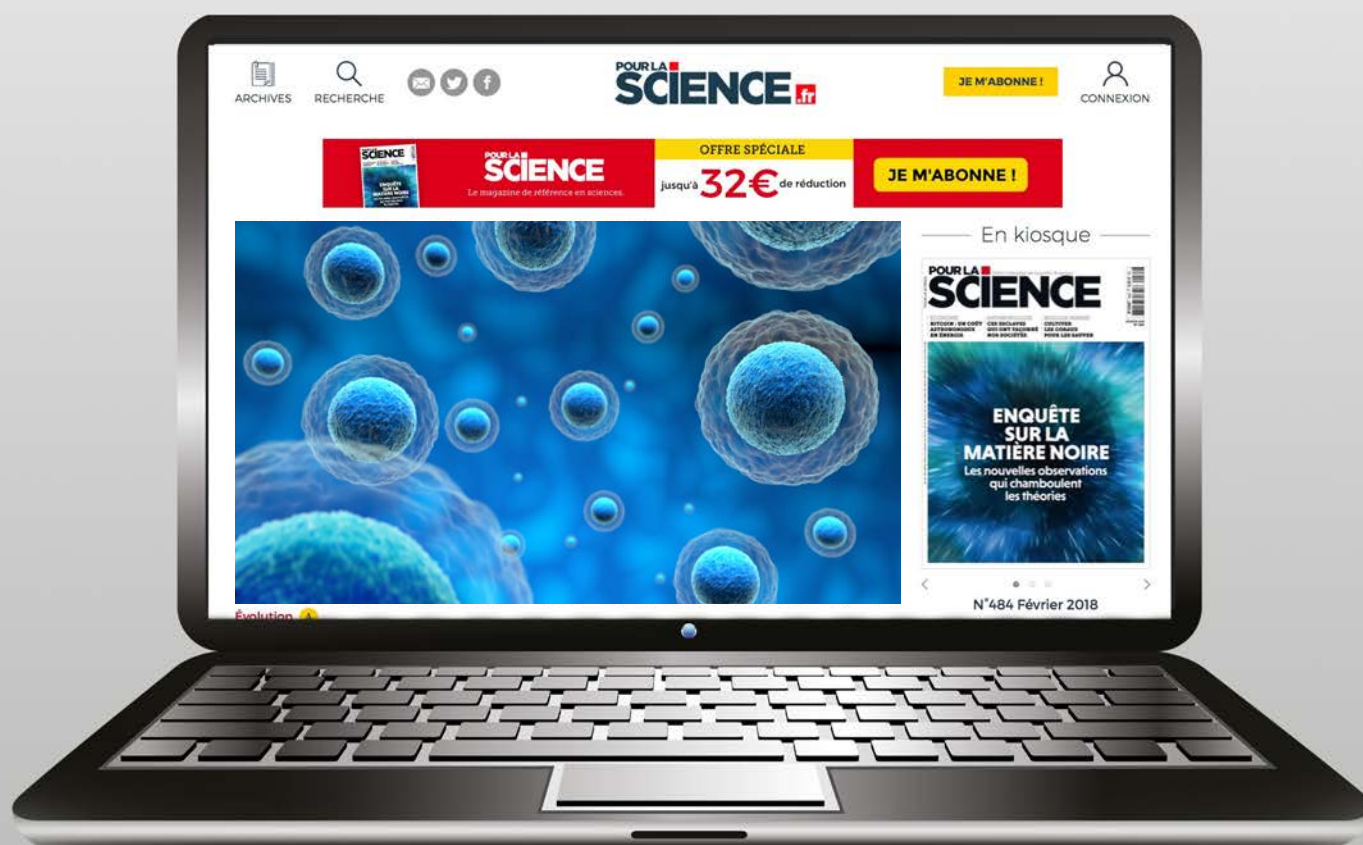
BIBLIOGRAPHIE

Emploi et questions sociales dans le monde. Tendances de l'emploi des femmes 2017, rapport de l'OIT, 2017, disponible (en anglais) sur www.ilo.org/global/research/global-reports/

D. Cuberes et M. Teignier, **Aggregate effects of gender gaps in the labor market: A quantitative estimate**, *Journal of Human Capital*, vol. 10(1), pp. 1-32, 2016.

World Development Report 2012: Gender Equality and Development, rapport de la Banque mondiale, 2012 (téléchargeable sur <http://go.worldbank.org/8ZDFYQ3LB0>).

Découvrez le nouveau site de **POUR LA** Édition française de Scientific American **SCIENCE**



- ◀ Un site plus lisible
- ◀ Un meilleur moteur de recherche
 - ◀ Un site plus rapide
 - ◀ Un site mieux sécurisé

Connectez-vous sur
www.pourlascience.fr

Vaincre les biofilms

Dans la nature, les films bactériens, ou biofilms, peuvent constituer un joli spectacle. Mais à l'hôpital, ces communautés bactériennes résistent aux antibiotiques et font de nombreuses victimes. Pour les combattre, les biologistes commencent à retourner leurs propres armes contre elles...



L'un des bassins d'eau chaude du parc de Yellowstone – le Grand Prismatic Spring –, aux États-Unis, est entouré de rivières colonisées par des biofilms géants composés d'algues et de bactéries.

L'ESSENTIEL

> Les biofilms se forment lorsque des groupes de bactéries s'enveloppent d'une matrice visqueuse qui bloque les antibiotiques et les toxines.

> Les biologistes ont identifié les signaux chimiques que les bactéries se lancent et qui déclenchent la dispersion du biofilm.

> On lutte déjà contre la fixation de biofilms sur une surface à l'aide de revêtements microstructurés réduisant l'adhérence bactérienne.

> En utilisant ces signaux, on rendrait les bactéries vulnérables aux antibiotiques et à d'autres moyens de lutte.

L'AUTEURE



KARIN SAUER
professeure de biologie à l'université de New York,
directrice associée du Centre de recherche
sur les biofilms de Binghamton

J'adore les couleurs du parc de Yellowstone, aux États-Unis, car elles m'envoûtent. Elles sont produites par des millions de millions de bactéries enveloppées dans une matrice gluante. Bien qu'invisibles à l'œil nu, ces bactéries forment au sein de cette matrice protectrice des communautés facilement repérables que l'on nomme des biofilms. Observés au microscope, ces films bactériens dévoilent une remarquable organisation tridimensionnelle, faite de microbes collés les uns aux autres formant plusieurs niveaux de filaments, des chemins sinueux et des structures ressemblant à de minuscules tours. À mes yeux, ils évoquent à petite échelle une sorte de métropole gluante avec ses quartiers, ses gratte-ciel et ses rues bondées.

Mais du point de vue médical, les biofilms n'ont rien de beau : ce sont plutôt de graves menaces pour notre santé. Quand un biofilm se forme dans un organisme, les bactéries qu'il contient peuvent devenir insensibles aux antibiotiques et engendrer des infections chroniques, ce qui se produit le plus souvent dans les poumons, les voies urinaires ou encore les lésions chirurgicales. Les biofilms colonisent aussi les dispositifs ou implants médicaux tels que les cathéters, les prothèses articulaires, les valves cardiaques artificielles... En France, environ 6% des patients subissent des infections bactériennes lors d'une hospitalisation. Ces infections contractées à l'hôpital – les infections nosocomiales – provoqueraient entre 3000 à 5000 décès par an. Bien que cette prévalence et cette mortalité semblent en lente régression, les biofilms, à l'origine de nombre de ces infections, représentent un important problème de santé publique.

Les armes dont la médecine dispose contre les infections sont efficaces sur les bactéries isolées, mais pas sur les biofilms. Ces derniers ont en effet une capacité extrême à résister à notre système immunitaire (donc aux vaccins), ainsi qu'aux traitements antibiotiques. Cette résilience des biofilms ne

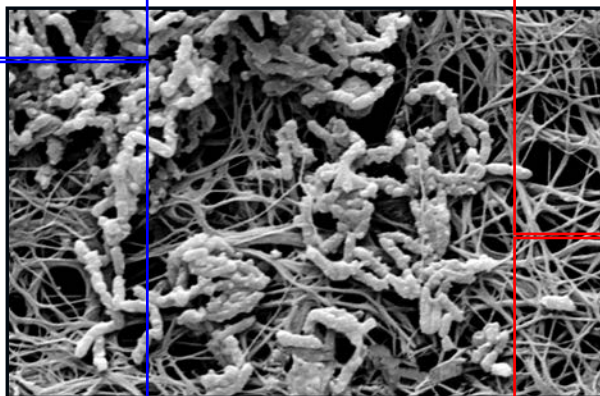
➤ résulte pas d'une résistance aux médicaments que les bactéries elles-mêmes auraient acquise, mais de la matrice tridimensionnelle au sein de laquelle elles sont enchâssées. Cette dernière constitue une gangue protectrice à travers laquelle les bactéries échangent notamment des signaux induisant la sécrétion des protéines et d'autres substances nécessaires à leur survie.

Aujourd'hui, mes collègues et moi-même savons faire irruption dans la matrice d'un biofilm pour y observer les signaux en circulation. Nous arrivons même parfois à les modifier afin de les utiliser contre les bactéries. Notre objectif est de les pousser hors de leur matrice protectrice, afin de les placer en situation de vulnérabilité face aux médicaments.

On sait depuis longtemps que les bactéries constituant un biofilm se comportent différemment de celles isolées. En 1998, George O'Toole et Roberto Kolter, de la faculté de médecine de Dartmouth, à Hanover, dans le New Hampshire, ont montré que la constitution d'un biofilm par la bactérie du sol *Pseudomonas fluorescens* nécessite la synthèse de nouvelles protéines et fait intervenir au moins vingt-quatre gènes.

Certains de ces gènes codent des adhésines, protéines qui jouent un rôle dans la fixation des bactéries sur une surface, mais la fonction de la plupart des autres gènes restait méconnue. Ces gènes au rôle énigmatique suggéraient néanmoins qu'une bactérie, une fois fixée sur une surface, changeait de physiologie. En 2002, mon équipe a montré que les bactéries se transformaient non seulement lorsqu'elles entraient en contact avec une surface, mais aussi tout au long du développement du biofilm, depuis le stade du simple amas de quelques cellules liées entre elles jusqu'à celui de la communauté bactérienne. Ces transformations successives sont liées à la sécrétion de diverses protéines qui aident le biofilm à passer d'un stade à un autre.

Ces observations suggèrent que les biofilms, exactement comme les villes, se construisent du bas vers le haut selon un plan directeur, une étape de construction après l'autre et quartier par quartier. Au laboratoire, nous parvenons à stopper le développement de biofilms à un stade donné en y introduisant des substances chimiques capables d'inhiber ou, au contraire, de stimuler l'action des protéines sécrétées. Nous savons même les influencer, afin de les faire régresser à un stade antérieur de développement. Cette



Prise au microscope électronique, cette photographie montre le biofilm tapissant l'intérieur d'un cathéter. Il pourrait entraîner une infection sanguine...

approche peut être combinée à d'autres stratégies de lutte, tel le dépôt sur la surface d'un revêtement nanostructuré qui empêche les bactéries de se développer.

Empêcher la fixation des bactéries sur les surfaces est d'ailleurs un bon point de départ. À cet égard, de nombreuses recherches visent à mettre au point des revêtements capables de tuer les bactéries par contact. Les chercheurs ont développé des revêtements de surface libérant localement de fortes concentrations d'agents antibactériens.

Aujourd'hui, certains sont couramment employés dans les hôpitaux. Citons par exemple les sutures préimprégnées d'antibiotiques, les ciments osseux contenant des billes imprégnées d'antibiotiques, mais aussi les cathéters, les pansements ou encore les sondes endotrachéales couvertes de particules d'argent. Dans ce dernier cas, les bactéries sont tuées par contact avec les ions d'argent. Comment? Le mécanisme reste à préciser, mais nous savons que la présence d'ions d'argent engendre un stress oxydatif (situation dans laquelle des atomes d'oxygène privent une biomolécule de certains de ses électrons), provoquant la mort de la cellule bactérienne. Outre l'argent, des sels d'oxydes métalliques ou de métaux – le fer, le mercure, le tellure, le zinc et le titane – sont testés actuellement à des fins cliniques.

Pour autant, les revêtements et surfaces imprégnées ont une faiblesse: les substances antibactériennes qu'ils contiennent finissent par disparaître. Par ailleurs, l'emploi excessif de composés antibactériens, dont l'argent, suscite des inquiétudes quant à l'émergence de bactéries résistantes. Cette préoccupation a entraîné le développement de nouveaux revêtements de surface contrôlant l'adhésion bactérienne de façon plus mécanique.

PEAU DE REQUIN ANTIBACTÉRIENNE

Les revêtements en question s'inspirent de la nature en imitant par exemple la texture de la peau de requin, la structure autonettoyante des feuilles de lotus ou encore des mécanismes que les moules utilisent pour repousser les bactéries. Ces surfaces bioinspirées n'empêchent pas directement la fixation des bactéries; elles interfèrent plutôt avec les protéines qui assurent leur ancrage. Le processus repose sur la modification à l'échelle microscopique de la rugosité de la surface. On ajoute par exemple des

nanostructures sur la surface: des brosse, des cristaux, des tubules de polymères hydrophiles comme le polyéthylène glycol (PEG, inspiré des moules) ou encore des polymères dits zwitterioniques, inspirés des propriétés antiadhésives des cellules sanguines.

Ces nanostructures peuvent être disposées sur la surface à des distances variables afin de réduire au maximum l'adhérence des bactéries. Certaines de ces surfaces bio-inspirées sont déjà largement utilisées à l'hôpital. D'autres en

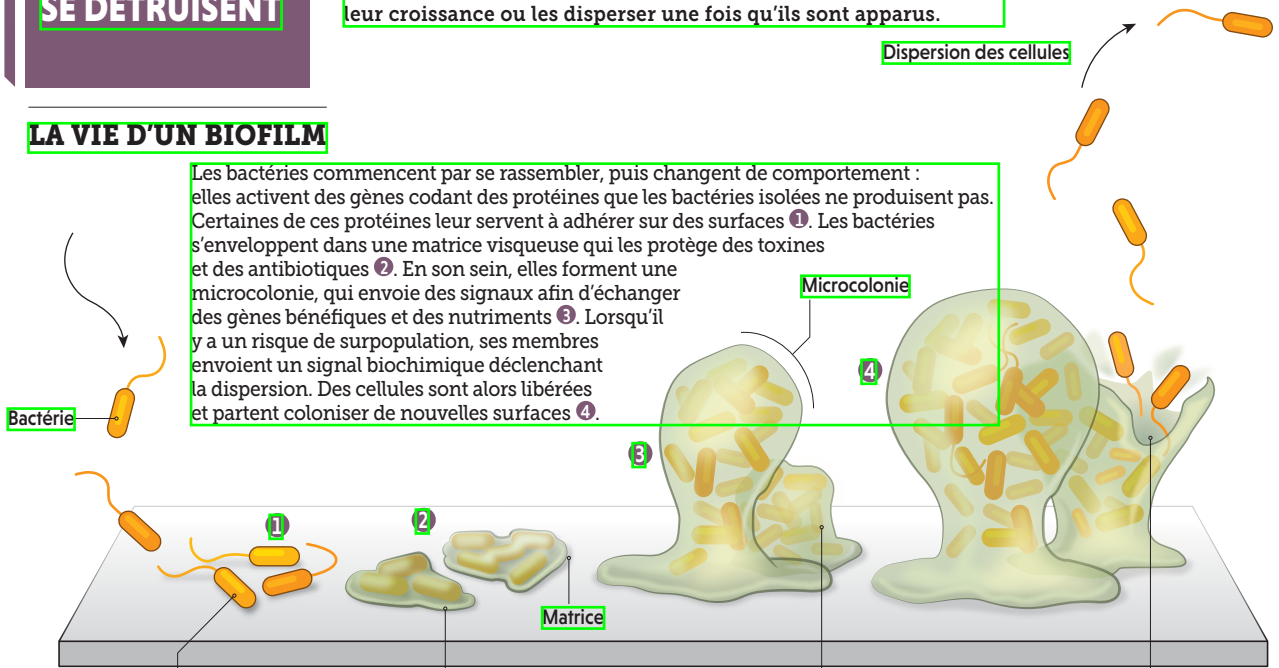
sont encore à l'étape de prototypes, encore limitées par des problèmes de fabrication et de toxicité. Une fois ces difficultés franchies, il restera à réaliser des essais cliniques afin de déterminer quelles surfaces seront utilisables dans la pratique.

Malgré toutes les promesses de ces surfaces antibiofilms, nous avons aussi besoin d'approches fondamentalement différentes pour éliminer les biofilms qui s'y développent malgré tout ou qui colonisent les implants

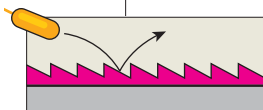
COMMENT LES BIOFILMS SE CRÉENT ET SE DÉTRUISENT

LA VIE D'UN BIOFILM

Les bactéries ne sont pas des solitaires. Pour la plupart, elles prospèrent seulement au sein de grandes populations constituant des communautés complexes où l'on s'entraide : les biofilms. Or ces couches bactériennes structurées sont très difficiles à éliminer. Une matrice protectrice entoure en effet les bactéries, abritant leurs échanges d'information et de nutriments. Les chercheurs commencent à saisir les secrets de la formation de ces biofilms et savent désormais comment limiter leur croissance ou les disperser une fois qu'ils sont apparus.



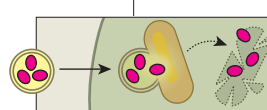
QUATRE APPROCHES ANTIBIOFILMS



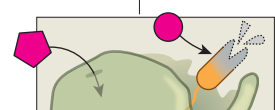
Employer des matériaux nanostructurés en surface afin de rendre difficile la fixation des biofilms. La rugosité nanométrique de surface de ces matériaux gêne les protéines que les bactéries utilisent comme agent de fixation.



Affaiblir la matrice pour entraîner l'effondrement du biofilm. La matrice contient notamment des molécules d'ADN que l'on sait dégrader avec une enzyme, la DNase I. On teste cette approche sur des biofilms à l'origine d'otites chroniques.



Injecter dans la matrice des vésicules lipidiques artificielles – des liposomes – remplies de composés antibactériens. Ces liposomes fusionnent avec les membranes des bactéries et libèrent leur charge toxique. On peut aussi injecter des virus de bactéries.



Déclencher la dispersion du biofilm en imitant le signal déclencheur que s'envoient les bactéries, car, une fois isolés, les microorganismes sont plus vulnérables. Le monoxyde d'azote, qui produit un effet similaire, peut aussi être utilisé.

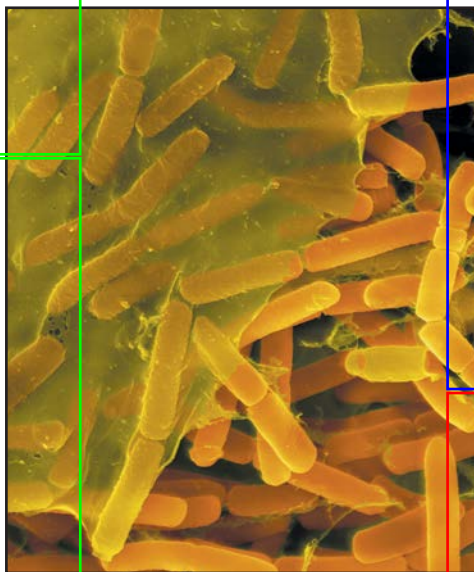
> médicaux, devenant alors à la fois dangereux et difficiles à traiter.

Dans ces approches, c'est la matrice visqueuse du biofilm qui devient la cible. Constituée de longs brins de polysaccharides (des macromolécules composées de plusieurs sucres), de protéines et d'ADN, cette matrice aide les bactéries de plusieurs manières. D'une part, elle les protège mécaniquement; d'autre part, elle bloque le passage de certains antibiotiques; enfin, elle empêche des marqueurs du système immunitaire – les anticorps – d'accéder aux bactéries du biofilm. Sa structure maintient aussi la cohésion de la colonie et aide à son ancrage sur la surface. La suppression de cette matrice fait donc perdre son intégrité à la colonie et entraîne son effondrement. Les populations de bactéries se divisent alors en petits groupes, voire en nuages de cellules individuelles, que les médicaments et le système immunitaire peuvent efficacement attaquer.

DES ENZYMES POUR DÉSINTÉGRER LA MATRICE

Des enzymes – des protéines accélérant certaines réactions biochimiques – ont déjà réussi à dégrader la matrice. Malheureusement, la composition de cette dernière, et plus particulièrement le type de protéines et de polysaccharides présents, varie grandement d'une espèce de bactérie à l'autre, et chacune requiert son enzyme de dégradation spécifique... C'est pourquoi les traitements visant à dégrader les protéines et les polysaccharides de la matrice doivent être adaptés au type de bactérie formant le biofilm.

En revanche, l'ADN, qui entre aussi dans la composition de la matrice, pourrait être plus facile à cibler. En effet, une seule et même enzyme – la DNase I – suffit pour le dégrader. Plusieurs essais cliniques en cours exploitent cette enzyme: on l'évalue actuellement en combinaison avec des antibiotiques dans le traitement d'otites chroniques et d'autres infections à biofilms. Des traitements employant la DNase I sont néanmoins d'ores et déjà utilisés pour traiter des patients atteints de mucoviscidose (une maladie, qui, entre autres, altère le mucus pulmonaire); on a montré qu'ils amélioreraient nettement la fonction pulmonaire (il semble que l'enzyme réduise la viscosité des expectorations, ce qui facilite le nettoyage pulmonaire et augmente l'efficacité des antibiotiques, mais qu'elle n'induit pas l'effondrement des biofilms).



La matrice gluante protectrice dont se recouvrent ces bactéries en forme de bâtonnets (des bacilles) est aisément visible au microscope.

En observant la formation des biofilms, les chercheurs ont imaginé une autre stratégie. En effet, une fois le biofilm constitué, il arrive que les bactéries se dissocient *via* un mécanisme dit de dispersion, qui entraîne une destruction partielle du biofilm. Ce mécanisme s'enclenche lorsque les ressources utiles à la survie du biofilm sont épuisées, lorsque la surpopulation bactérienne menace son équilibre ou quand les conditions extérieures changent. Il aide les bactéries du biofilm à survivre et favorise la colonisation de nouveaux sites.

Les cellules qui quittent les biofilms deviennent vulnérables aux armes que nous avons contre elles. Dès lors, comment déclencher la dispersion? Les chercheurs ont identifié plusieurs modes d'action possibles. D'une part, les bactéries semblent avoir leur propre manière de signaler aux autres membres de la communauté qu'il est temps d'activer le mécanisme de dispersion.

Les recherches menées dans le cas de *Pseudomonas aeruginosa* – une bactérie modèle responsable d'un grand nombre d'infections nosocomiales chroniques – ont montré qu'elle produit un petit acide gras (l'acide *cis*-2-décénoïque ou *cis*-DA) qui signale à la communauté qu'il est temps d'abandonner le biofilm. D'autres expériences ont révélé que *cis*-DA peut servir de signal de dispersion dans des biofilms formés par au moins cinq autres espèces de bactéries et de levures. Par ailleurs, on a observé que d'autres bactéries que *P. aeruginosa* produisent des versions différentes de cet acide gras, ce qui suggère que les bactéries composant des biofilms différents emploient des « dialectes » distincts quand elles lancent la dispersion. Même si elles en sont encore au stade du test en laboratoire, ces molécules de communication pourraient vraisemblablement être combinées avec des antibiotiques et conduire à des traitements contre les biofilms.

On découvre aussi des facteurs qui déclenchent la dispersion du biofilm en modifiant son environnement. Ces facteurs – augmentation de la quantité de métaux lourds dans l'environnement, diminution de l'oxygène et d'autres encore – sont variés. Mais ils ont un point commun: ils induisent tous la dispersion en diminuant la teneur en di-GMP cyclique, une molécule qui sert de messagère universelle au sein de la cellule.

La concentration de di-GMP cyclique conditionne notamment l'adhérence des bactéries sur les surfaces: une concentration élevée est associée à la croissance des biofilms et à la production de matrice, alors qu'une

Des essais ont révélé que le monoxyde d'azote réduit la taille des biofilms de 63% environ

concentration faible induit au contraire la multiplication des bactéries sous la forme de cellules individuelles. Les changements de concentration de di-GMP cyclique observés en réponse aux facteurs agissant sur l'environnement sont associés à des dégradations de 80% ou plus de la biomasse du biofilm. Toutefois, tous ne conviennent pas à un usage au sein des dispositifs médicaux.

LE MONOXYDE D'AZOTE INDUIT LA DISPERSION

Un autre candidat prometteur est le monoxyde d'azote. Notre système immunitaire repousse les invasions bactériennes à l'aide des molécules de ce gaz incolore, et il est aussi employé afin d'améliorer l'oxygénation chez des patients atteints de formes variées d'hypertension pulmonaire (par exemple la bronchopneumopathie chronique obstructive). Des essais en laboratoire ont révélé que le monoxyde d'azote induit la dispersion des biofilms produits par un large éventail de bactéries. Utilisé seul, il réduit la taille des biofilms de 63% en moyenne; en combinaison avec des antibiotiques tels que la colistine, il peut éradiquer complètement des biofilms.

Pourtant, malgré ces résultats prometteurs, le monoxyde d'azote pose plusieurs problèmes cliniques. En effet, s'il se répand dans d'autres parties du corps que le site spécifique de l'infection, il peut être toxique. Or un gaz est difficile à restreindre en un site précis. Diverses formulations et autres dispositifs prenant en compte ces difficultés ont été mis au point. La céphalosporine-3'-diazoniumdiolate, par exemple, est composée d'un antibiotique (la céphalosporine) combiné avec une substance productrice de monoxyde d'azote qui ne s'active qu'au contact de bactéries contenant l'enzyme β -lactamase. Les bactéries résistant à des antibiotiques tels que la

pénicilline et l'ampicilline contiennent en général cette enzyme.

Une autre stratégie de lutte contre les biofilms consiste à causer une infection létale de leurs bactéries constitutives. En effet, les bactéries aussi sont sensibles à certains virus, que l'on nomme des phages. Ces derniers sont capables de les infecter à vie ou de les tuer. À la suite des premières études datant de 1996 qui avaient montré les interactions entre phages et biofilms, les chercheurs essaient désormais d'identifier les phages capables de tuer les bactéries directement à l'intérieur d'un biofilm. En outre, les phages qui infectent les bactéries sans les tuer peuvent être employés comme véhicules pour livrer des antibiotiques ou des agents destructeurs de la matrice (comme la DNase I) à chaque bactérie du biofilm. Cette approche nommée phagothérapie est d'ailleurs déjà utilisée pour traiter des infections pulmonaires à biofilms chez des personnes atteintes de mucoviscidose.

Toutefois, comme beaucoup d'autres, elle n'est pas sans difficulté. Un phage particulier n'infecte qu'un type particulier de bactérie. Les phages ne peuvent donc pas être utilisés comme agents tueurs à large spectre. Les bactéries peuvent en outre développer des résistances aux attaques de phages, exactement comme elles le font avec les antibiotiques.

C'est pourquoi les chercheurs essaient aussi de développer des transporteurs alternatifs: les liposomes. L'idée serait que ces petites vésicules lipidiques de forme sphérique – on les considère parfois comme des nanoparticules en raison de leur petite taille – livrent des composés capables de tuer ou de déstabiliser les cellules là où ils seraient efficaces, c'est-à-dire au sein du biofilm ou des bactéries. Il s'agirait d'antibiotiques, de composés antibactériens ou encore d'enzymes dégradant la matrice. Les liposomes seraient réalisés à partir de lipides imitant ceux de la membrane bactérienne, ce qui leur permettrait de fusionner avec le microorganisme et, par conséquent, de lui injecter leur charge toxique. La tactique est précise, car les composés antibactériens et antibiofilms ne sont livrés qu'au biofilm et nulle part ailleurs. Les liposomes sont déjà très utilisés pour apporter des composés antimicrobiens *in situ*.

Outre ces diverses stratégies, de nombreuses approches sont en train d'être testées partout dans le monde. L'un des problèmes majeurs est la diversité des biofilms. Chaque espèce bactérienne produit sa propre matrice, ses propres agents messagers et des protéines particulières. C'est pourquoi nous aurons besoin de combiner de nombreuses tactiques si l'on veut un jour parvenir à raser les minuscules cités bactériennes qui menacent nos vies. ■

BIBLIOGRAPHIE

O. Petrova et K. Sauer, **Escaping the biofilm in more than one way : Desorption, detachment or dispersion**, *Current Opinion in Microbiology*, vol. 30, pp. 67-78, 2016.

J. Lemire et al., **Antimicrobial activity of metals : Mechanisms, molecular targets and applications**, *Nature Reviews Microbiology*, vol. 11(6), pp. 371-384, 2013.

N. Barraud et al., **Cephalosporin-3'-diazoniumdiolates : Targeted NO-donor prodrugs for dispersing bacterial biofilms**, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51(36), pp. 9057-9060, 2012.



TESS ET CHEOPS Traquer l'ombre des exoplanètes

Près de 4 000 planètes extrasolaires ont été détectées à ce jour, dont une bonne partie grâce au télescope spatial *Kepler*. Cette riche moisson de mondes étranges va s'accélérer avec le lancement, cette année, des satellites *Tess* et *Cheops*.

Sur cette vue d'artiste, une exoplanète et sa lune évoluent autour d'une étoile naine rouge. Ces petits astres de faible luminosité présentent de nombreux atouts pour traquer de nouveaux mondes.

L'ESSENTIEL

> Le satellite *Kepler* de la Nasa a été un chasseur d'exoplanètes très efficace. Sa mission s'achève en 2018, mais plusieurs projets prennent la relève.

> Les satellites *Tess* et *Cheops*, dont le lancement est prévu cette année, utiliseront comme *Kepler* la méthode du transit : lorsqu'une planète passe

devant son étoile, elle bloque une partie de sa lumière, et cette baisse de luminosité est mesurable.

> Avec d'autres missions futures, notamment le télescope spatial *James-Webb* et l'observatoire spatial *Plato*, les astrophysiciens devraient recueillir un grand nombre de données sur les exoplanètes.

L'AUTEUR



JOSHUA N. WINN
astrophysicien à l'université de Princeton, aux États-Unis, et coresponsable de la mission spatiale *Tess* (*Transiting exoplanet survey satellite*)

Le 21 août 2017 a été un grand jour pour tous les amoureux du ciel. Dans un champ de l'Idaho, aux États-Unis, j'ai assisté, avec ma famille, au passage de l'ombre de la Lune. De l'Oregon à la Caroline du Sud, nous avons tous eu la chance de voir une éclipse totale du Soleil, qui nous plonge dans une ambiance crépusculaire en plein jour et met en évidence l'intense luminosité de la couronne solaire.

Combien de vocations d'astronomes ce rare spectacle a-t-il suscitées chez les plus jeunes d'entre nous ? Les éclipses ont

longtemps été des sources de fascination et de savoir... et elles le sont encore. Mes propres travaux reposent sur des éclipses, non pas de Soleil, mais d'étoiles bien plus lointaines. En effet, je m'intéresse aux « transits » d'exoplanètes : les télescopes ne permettent pas réellement de voir la silhouette d'une planète passer devant son étoile, mais l'infime baisse de luminosité qui survient lorsque l'exoplanète occulte une partie du rayonnement de l'astre est suffisante pour dire que ce monde extrasolaire existe bel et bien. Des découvertes fascinantes !

❏ C'est en 1999 que deux équipes, menées par David Charbonneau, de l'université Harvard, et Gregory Henry, de l'université d'État du Tennessee, ont découvert pour la première fois une exoplanète (HD 209458 b) grâce à son transit. La diminution de la brillance de l'étoile hôte était d'environ 1,7% et l'éclipse a duré environ trois heures.

Dix ans plus tard, on avait ainsi détecté plus d'une centaine d'exoplanètes. Aujourd'hui, le chiffre avoisine les 4000, notamment grâce au télescope spatial *Kepler* dont la mission s'achève bientôt, en 2018. Si la méthode du transit est actuellement la technique la plus efficace pour trouver des mondes lointains, d'autres méthodes ont permis de récolter pas moins de 700 exoplanètes. Cette impressionnante moisson a révélé une grande diversité de mondes, diversité que les théories de formation des planètes étaient loin d'avoir anticipée. Et nous pensons maintenant que nous n'avons fait qu'effleurer la surface d'un vaste océan.

Afin de poursuivre cette exploration, la Nasa et l'ESA, les agences spatiales américaine

et européenne, ont prévu d'envoyer dans l'espace, dès 2018, deux nouveaux télescopes dédiés à la recherche d'exoplanètes par la méthode du transit. En attendant, les télescopes au sol, juchés au sommet de montagnes, participent aussi à cette chasse. Et tout cela ne sera qu'un préambule à l'ultrapuissant télescope spatial chasseur d'exoplanètes, *Plato*, que l'ESA prévoit de lancer en 2026.

LE SUCCÈS DE KEPLER

Une grande part de nos connaissances dans le domaine des exoplanètes est à mettre au crédit des observations de *Kepler*. Lancé en 2009, ce télescope a observé une petite région du ciel s'étendant entre les constellations du Cygne et de la Lyre. Il y a scruté la luminosité de près de 150 000 étoiles. Mais en 2013, la mission du télescope a été modifiée à la suite d'une panne qui a touché deux des roues de réaction, qui servent à maintenir la direction de visée du télescope. Étonnamment, le télescope est resté en mesure de continuer sa traque des exoplanètes.

Points rouges

Ils représentent environ 2 650 étoiles dotées d'exoplanètes qui ont été découvertes par *Kepler* et confirmées ensuite par d'autres observations. Leur répartition particulière correspond à la forme des capteurs CCD de la caméra du satellite qui a observé une unique région du ciel.

UN VASTE CATALOGUE D'EXOPLANÈTES

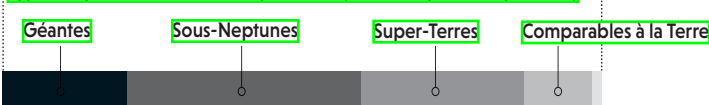
La recherche sur les exoplanètes a vraiment démarré dans les années 1990. Depuis, les astrophysiciens ont compilé un catalogue de plus de 3 500 planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil. Elles ne représentent cependant qu'une petite fraction de la multitude d'exoplanètes que contient vraisemblablement la Voie lactée. La plupart des découvertes sont le fruit du télescope spatial *Kepler*. Deux satellites prendront le relais en 2018, le projet de la Nasa *Tess* (*Transiting exoplanet survey satellite*) et le télescope européen *Cheops* (*Characterising exoplanet satellite*).

Nombre total d'exoplanètes confirmées (au 1^{er} février 2018): 3728

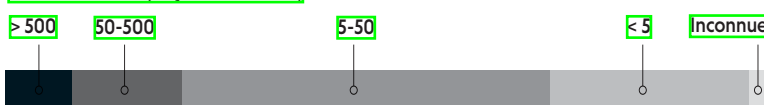
Méthode de découverte



Types de planètes découvertes par transit (selon le rayon de la planète*)

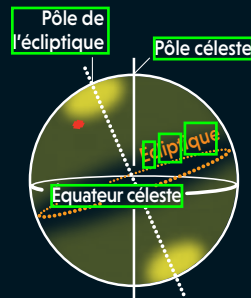


Période orbitale (en jours terrestres)



* Il s'agit ici des définitions des catégories planétaires adoptées par la collaboration TESS. Ces définitions sont en partie arbitraires et varient un peu d'une collaboration à une autre.

Cette carte est une projection du ciel étoilé vu depuis la Terre. Chaque étoile est positionnée en fonction de son ascension droite (l'équivalent astronomique de la longitude) et de sa déclinaison (la latitude). L'écliptique est le plan du Système solaire.



Le halo autour de chaque point indique la brillance de chaque étoile, telle que perçue depuis la Terre.

- Très brillante
- Visible à l'œil nu (limite inférieure)
- 100 fois plus faible
- 10 000 fois plus faible

Illustration de Jan Willem Tulp

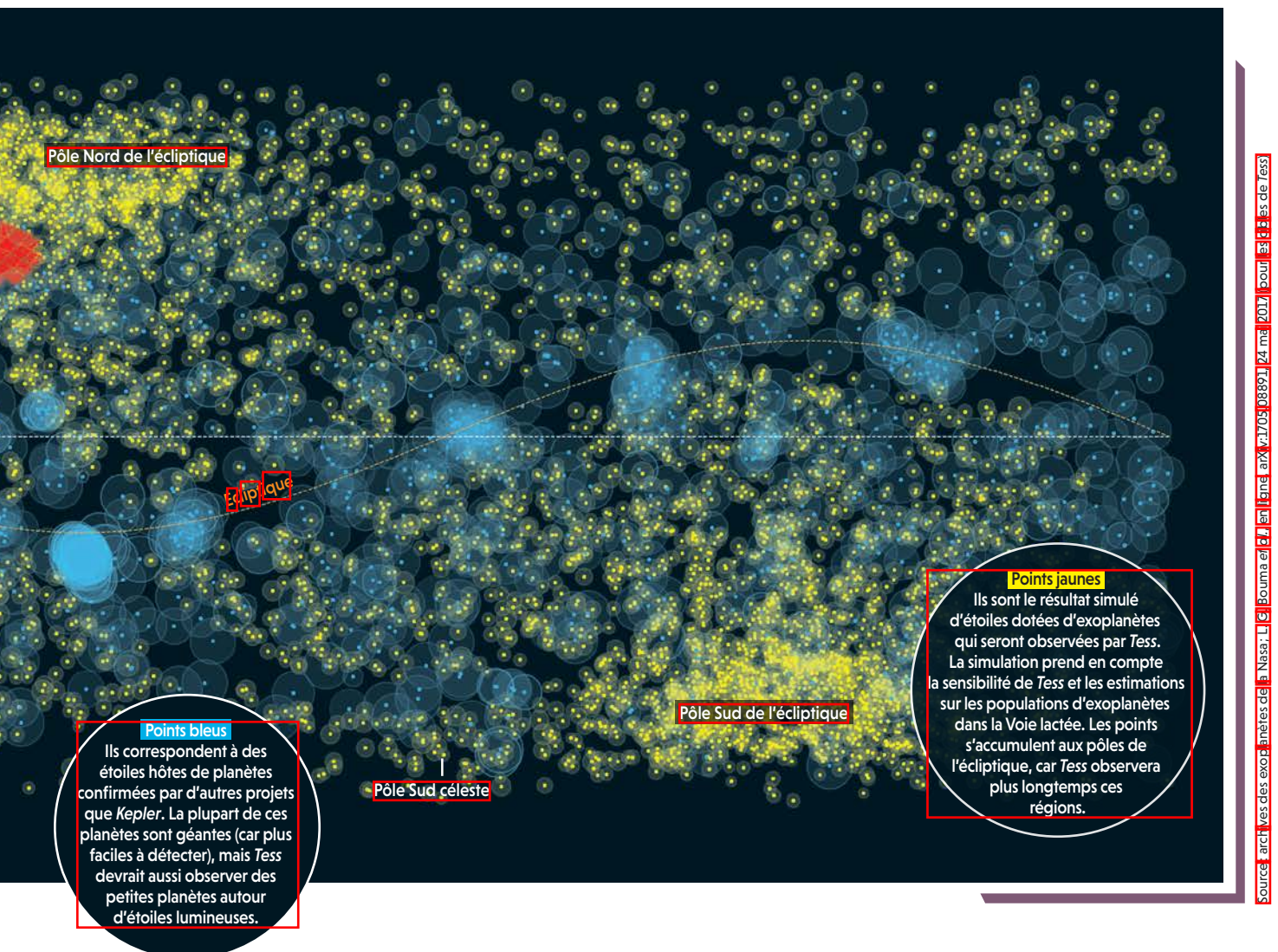
Les transits d'exoplanètes sont rares. *Kepler* n'a observé qu'un faible nombre d'éclipses planétaires par rapport au nombre d'étoiles observées. Elles se présentent sous la forme de brèves et périodiques baisses de luminosité. Chacune trahit l'existence d'une planète qui est, par chance, presque parfaitement alignée avec son étoile dans la ligne de visée du télescope. Dans une telle configuration, qui est exceptionnelle, une mini-éclipse se produit à chaque fois que la planète passe devant l'étoile. L'ampleur de la baisse de luminosité indique la taille de la planète par rapport à celle de l'étoile. Plus une planète est grosse, plus elle occulte de la lumière et donc plus elle est facile à détecter.

Vue de loin, la planète Jupiter passant devant le Soleil provoquerait une variation de luminosité d'environ 1%, alors que la Terre induirait une baisse de 0,01%. Si cette dernière était une exoplanète, il serait impossible de mesurer un effet aussi faible depuis le sol, car l'atmosphère terrestre perturbe trop la lumière provenant des étoiles. C'est pourquoi on fait appel à des télescopes spatiaux.

Le satellite *Kepler* a mis en évidence près de 5000 candidates au titre d'exoplanète, dont plus de 2500 ont été confirmées par des analyses ultérieures (voir l'encadré ci-dessous). La plupart des mondes découverts par *Kepler* se répartissent en trois catégories: les super-Terres, de la taille de la Terre ou un peu plus grandes, les mini-Neptunes, un peu plus petites que la planète géante glacée du Système solaire, et les géantes gazeuses, semblables à Jupiter par leur taille.

La plupart des systèmes planétaires identifiés par *Kepler* ne contiennent qu'une seule planète connue, mais plusieurs centaines de ces systèmes en hébergent plusieurs. Et récemment, une étoile qui héberge huit planètes, comme le Soleil, a été repérée. Ces nombres reflètent en partie la réelle distribution des planètes autour des étoiles, mais aussi certains biais observationnels de *Kepler*, qui détecte plus facilement des grosses planètes en orbite rapprochée autour de leur étoile.

Certaines des découvertes de *Kepler* ont été particulièrement surprenantes. De mon point de vue, l'une des observations les plus



captivantes est celle de « systèmes solaires miniatures ». Ceux-ci hébergent jusqu'à six planètes entassées sur des orbites plus proches de leur étoile que celle de Mercure autour du Soleil. Et cette configuration est loin d'être rare. Si vous prenez au hasard dans le ciel une étoile du même type que le Soleil, vous avez 50% de chances qu'elle héberge une planète plus grande que la Terre sur une orbite plus rapprochée que Mercure. Personne n'avait anticipé que de telles planètes pouvaient être monnaie courante. En réalité, certaines des théories de formation des planètes les plus abouties suggéraient même que ces configurations étaient rares.

La mission *Kepler* a aussi découvert des planètes rares, mais si extrêmes qu'elles n'avaient été imaginées que par les auteurs de science-fiction. L'une de mes préférées est KOI 1843.03, une planète de la taille de la Terre si proche de son étoile que la température de la face éclairée y atteint plusieurs milliers de degrés. Sa surface est probablement couverte d'un océan de magma, qui ne serait pas sans rappeler la planète imaginaire Mustafar de la saga *Star Wars*. KOI 1843.03 suit une orbite si rapprochée de l'étoile qu'elle accomplit un tour en 4,25 heures.

Autre exemple: avec ses deux étoiles, l'exoplanète Kepler-16b ressemble à Tatooine, un autre monde de l'univers de *Star Wars*. La planète évolue autour des deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre. Citons aussi le système de l'étoile Kepler-36, où deux planètes évoluent quasiment sur la même orbite, ce qui les amène à interagir l'une avec l'autre de façon chaotique. Ainsi, même si nous connaissions la position au mètre près de ces planètes à un instant donné, nous serions incapables de calculer la position qu'elles occuperont dans une vingtaine d'années. C'est un exemple astrophysique de chaos déterministe, ou « effet papillon »: même en partant de conditions initiales très proches, l'évolution du système conduit à des configurations très différentes. Sur Terre, la révolution scientifique a débuté en comprenant le mouvement des planètes. Imaginez à quel point cela serait compliqué pour les éventuels savants qui vivent dans le système Kepler-36!

L'une des questions qui motive les astrophysiciens est de savoir si les planètes comparables à la Terre en taille et en masse sont rares dans l'Univers. Les scientifiques cherchent surtout des mondes qui, potentiellement, renferment des océans d'eau liquide. Pour satisfaire ce dernier point, les planètes doivent se trouver à une certaine distance de l'étoile qui leur fournit de la chaleur: trop éloignées, l'eau y serait gelée, trop proches, l'eau n'y existerait que sous forme de vapeur. L'intervalle des distances acceptables est dénommé « zone habitable » par les astrophysiciens, qui supposent que l'eau est un élément essentiel à l'émergence de la vie, comme cela a été le cas sur Terre. Mais cela ne signifie

pas qu'une planète située dans la zone habitable de son étoile contienne de l'eau liquide, que les conditions y soient réellement propices à la vie et que la vie s'y soit développée. Malgré la dizaine de candidates découvertes dans la zone habitable de leur étoile par *Kepler*, il est trop tôt pour dire si la Terre est une planète banale ou rare. Des analyses plus précises des données recueillies sont nécessaires.

ÉLARGIR L'HORIZON

La mission *Kepler* a été un succès malgré certaines limitations: le télescope ne pointait que dans une seule direction et n'observait qu'une petite fraction de la voûte céleste (1/400° pour être précis). Pour compenser la faible taille angulaire de la zone inspectée, *Kepler* devait examiner les étoiles proches dans cette région mais aussi celles plus lointaines afin d'obtenir un échantillon assez fourni, qui se prête à des analyses statistiques. Ainsi, une étoile typique du catalogue de *Kepler* se situe à 1 000 années-lumière.

Certes, il est spectaculaire de pouvoir détecter une exoplanète aussi lointaine. Mais la distance nuit à la qualité des observations. Plus une étoile est lointaine, moins elle est lumineuse, ce qui limite la précision des données recueillies, voire rend impossible certaines mesures. Par exemple, nous sommes incapables d'estimer la masse de la plupart des planètes du catalogue *Kepler*. Le signal du transit permet de

La planète KOI 1843.03 est si proche de son étoile qu'elle est couverte d'un océan de magma

calculer le diamètre de la planète, mais pas sa masse. Cela laisse une grande inconnue sur le type de planète auquel on a affaire. S'agit-il d'une planète dense et rocheuse comme la Terre? Ou d'une planète diffuse et gazeuse comme Jupiter et Saturne? Ou de quelque chose d'intermédiaire? Seule la combinaison des informations de masse et de diamètre nous permettrait de répondre avec certitude.

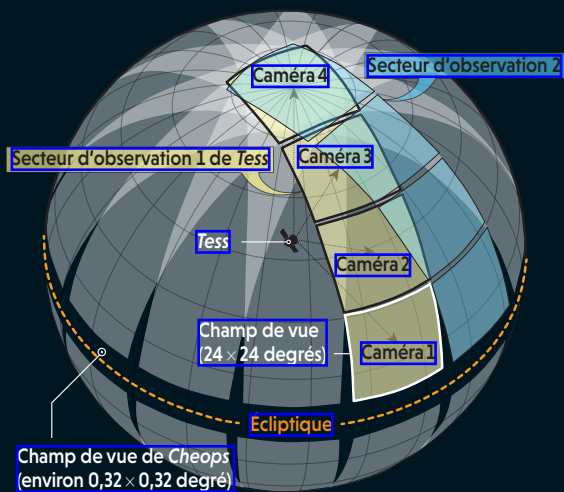
Pour déterminer la masse d'une planète, le moyen habituel est de mesurer les infimes mouvements de l'étoile en réaction à la petite attraction gravitationnelle de la planète. En effet, le

COMMENT TRAQUER UNE EXOPLANÈTE ?

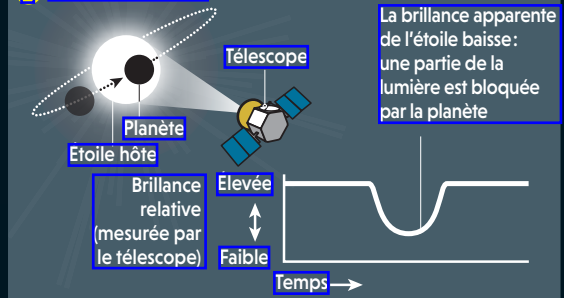
Il existe plusieurs méthodes pour détecter des exoplanètes. Les deux plus efficaces sont la méthode du transit et celle faisant appel à l'effet Doppler. Les informations qu'elles livrent sont cependant complémentaires. Les futurs télescopes spatiaux *Tess* et *Cheops* utiliseront la méthode du transit.

Stratégie d'observation

Tess observera 90 % de la voûte céleste grâce à quatre caméras qui couvriront à tout instant un secteur de 24 degrés par 96. Le ciel sera divisé en 26 secteurs qui se recouvrent, et *Tess* consacra un mois d'observation par secteur. *Cheops* se focalisera sur des étoiles individuelles pour lesquelles on suspecte la présence d'exoplanètes.



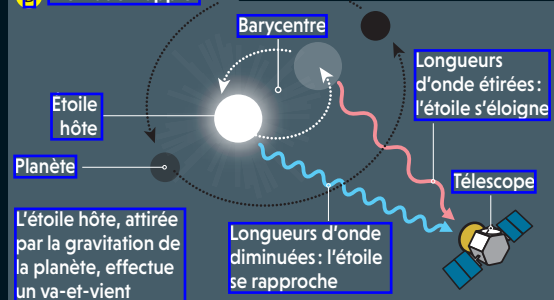
A Méthode du transit



Comment trouver une exoplanète

Les télescopes *Kepler*, *Tess* et *Cheops* utilisent la méthode du transit **A**. Quand une planète passe devant l'étoile dans la ligne de visée du satellite, elle bloque une partie de la lumière stellaire. L'étoile paraît donc moins brillante. L'effet est périodique et se reproduit à chaque passage de la planète en orbite. Une seconde méthode s'appuie sur l'effet Doppler **B**. Si l'on détecte un décalage Doppler périodique dans les longueurs d'onde de la lumière reçue de l'étoile, c'est que celle-ci bouge d'avant en arrière de façon régulière. L'influence gravitationnelle d'une planète en orbite autour de l'étoile en est la cause : les deux corps tournent autour de leur barycentre.

B Méthode Doppler



système étoile-planète évolue autour de son barycentre, qui ne coïncide pas avec le centre de l'étoile. L'étoile a ainsi un petit mouvement de rotation autour de ce barycentre. Il est possible de déceler ce petit mouvement, qui est d'autant plus marqué que la planète est massive, à l'aide de l'effet Doppler : la longueur d'onde du rayonnement reçu de l'étoile diminue ou augmente légèrement selon que l'astre se rapproche de la Terre ou s'en éloigne (voir l'encadré ci-dessus).

Cette technique exige cependant des mesures spectroscopiques de précision, portant sur un minimum d'environ 50 000 longueurs d'onde différentes. Pour des étoiles de faible luminosité, le rayonnement capté est insuffisant pour réaliser ces mesures.

Une future mission de la Nasa, *Tess* (*Transiting exoplanet survey satellite*), pour laquelle je suis coresponsable, a pour objectif de dépasser les limitations de *Kepler*. *Tess* embarquera quatre télescopes, chacun de 10 centimètres de diamètre, soit un dixième du télescope de *Kepler*. Ce choix peut sembler étrange (en général, le progrès s'accompagne plutôt de télescopes de plus en plus grands). Mais les

télescopes plus petits ont l'avantage d'avoir un champ de vision plus large. Cette relation entre taille et champ de vision est dictée par les lois de l'optique. Chaque caméra de *Tess* voit ainsi une portion 6 fois plus grande du ciel que *Kepler*, et *Tess* pourra pivoter de façon à pointer dans différentes directions. Finalement, *Tess* devrait observer beaucoup plus d'étoiles que *Kepler*.

La mission *Tess* décollera entre mars et juin de cette année. Et durant les deux prochaines années, elle passera en revue environ 90 % du ciel qui sera divisé en 26 secteurs se recouvrant. Chaque secteur sera exploré pendant un mois. Comme pour *Kepler*, nous espérons découvrir des milliers d'exoplanètes avec *Tess*, mais celles-ci seront situées autour d'étoiles typiquement 30 fois plus brillantes. Cela permettra notamment aux observatoires au sol de prendre le relais de *Tess*, ce qui était plus difficile avec les étoiles peu lumineuses sondées par *Kepler*.

Peu après *Tess*, c'est la mission européenne *Cheops* (*Characterising exoplanet satellite*) qui prendra son envol à la fin de 2018. *Cheops* est équipé d'un unique télescope de 32 centimètres de diamètre. Son rôle, bien que différent, sera

complémentaire de celui de *Tess*. Alors que *Tess* procédera à un balayage large et systématique du ciel, *Cheops* pointera sur des étoiles précises, à propos desquelles des indices d'exoplanètes ont été signalés. L'idée est de collecter des données de meilleure qualité pour ces systèmes particuliers.

DEUX STRATÉGIES COMPLÉMENTAIRES

Par exemple, si *Tess* trouve des indices de la présence autour de telle étoile d'une planète intéressante, mais sans avoir de données assez fiables pour le confirmer, l'un de mes collègues ou moi contacterons l'équipe de *Cheops* pour voir s'ils peuvent y jeter un œil. Ou considérons Proxima du Centaure et Ross 128, deux étoiles voisines pour lesquels la technique Doppler a suggéré la présence de planètes comparables à la Terre. *Cheops* pourrait alors traquer des éclipses de ces deux étoiles. Il faudra encore un peu de chance pour que l'orbite de la planète soit dans le bon alignement avec notre ligne de visée : pour Proxima du Centaure, la probabilité est de 1,4%. Mais si on a de la chance, on en saura beaucoup plus sur ces planètes.

Ces satellites nous propulseront dans une nouvelle ère d'étude des exoplanètes, mais ils ne sont pas parfaits. Pour être sûrs qu'une baisse de luminosité est bien le fait d'un transit et non d'une erreur de l'instrument, les chercheurs aiment observer plusieurs occurrences de ce phénomène périodique. Malheureusement, *Tess* ne scrutera chaque étoile que pendant un mois, une durée bien trop courte pour observer plusieurs transits d'une planète comme la Terre, qui met un an pour faire un tour complet. Néanmoins, pour une petite portion du ciel, où tous les secteurs se recouvrent, *Tess* observera certaines étoiles sur une période qui s'étirera jusqu'à un an (mais cela restera bien inférieur aux quatre ans de la vision fixe de *Kepler*).

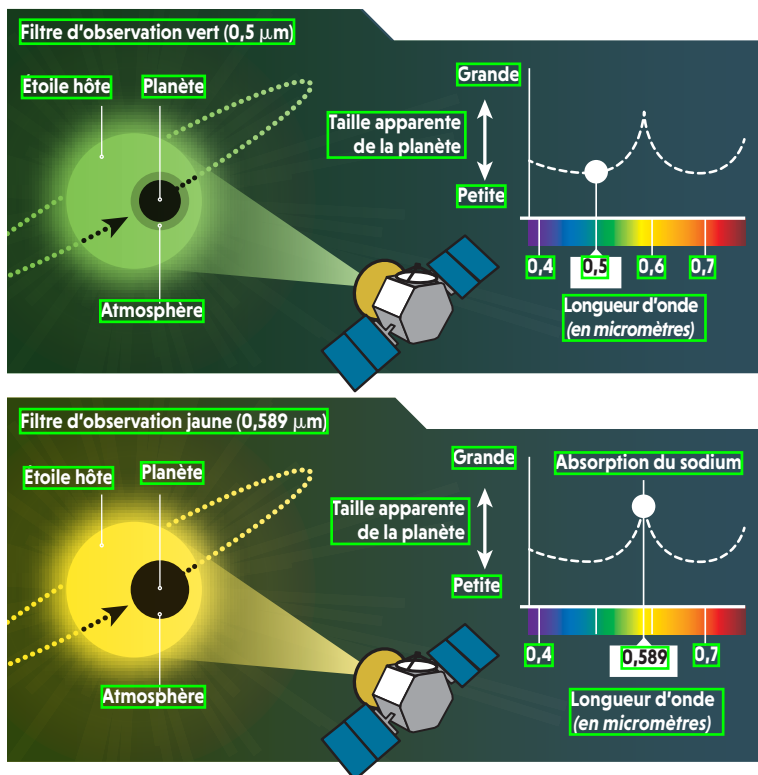
Par conséquent, *Tess* sera surtout efficace pour la découverte de planètes ayant une très courte période de révolution, quelques semaines ou moins. Ce n'est pas idéal, mais c'était la seule façon pour l'équipe qui a conçu la mission de maintenir un budget inférieur à l'enveloppe prévue de 228 millions de dollars (environ 183 millions d'euros). C'est néanmoins un bon compromis, car *Kepler* nous a montré qu'il existe une grande variété de planètes proches de leur étoile (donc ayant une période de révolution courte) : des mondes de lave, des planètes enflées de faible densité, des planètes en interaction sur des trajectoires chaotiques et même des planètes qui s'évaporent sous l'effet de la chaleur extrême de leur étoile. *Tess* devrait trouver les exemples les plus proches de toutes ces catégories exotiques de planètes, et donner l'occasion de les étudier dans les meilleures conditions possible avec d'autres instruments.

Pour détecter une planète vraiment semblable à la Terre en orbite autour d'une étoile comparable au Soleil, il faudra attendre. Néanmoins, *Tess* jouera aussi son rôle dans la quête à long terme de la recherche de vie sur d'autres planètes. Nous estimons que *Tess* devrait trouver une dizaine de planètes de taille terrestre dans la zone habitable de leur étoile, autant que *Kepler*. Pour ce faire, il faudra examiner d'autres étoiles que celles ressemblant au Soleil. En effet, si le Soleil n'est finalement qu'une étoile assez ordinaire parmi des centaines de milliards dans la Voie lactée, il n'appartient pas à la famille la plus répandue, celle des naines rouges, plus froides et moins lumineuses, de masse inférieure à la moitié de celle du Soleil.

ÉTUDIER L'ATMOSPHÈRE GRÂCE AU TRANSIT

Le transit est aussi utilisé pour déterminer la composition de l'atmosphère planétaire. Lorsqu'une planète passe devant son étoile, une partie de la lumière traverse l'atmosphère. Les molécules de cette dernière absorbent la lumière à des longueurs d'onde particulières et laissent une signature dans le rayonnement qui parvient sur Terre. En comparant le spectre de l'étoile à la lumière captée pendant le transit, il est possible de récupérer ces informations.

La taille apparente de la planète diffère selon la longueur d'onde à laquelle on regarde la lumière émise par l'étoile (ci-dessous). Elle est plus petite dans le vert, car la lumière traverse l'atmosphère de la planète sans être absorbée. La composante jaune est bloquée par l'atmosphère ; la planète paraît alors plus grande. Cette absorption est typique du sodium ; on en déduit la présence de cet élément.



Si le Soleil était un projecteur sur une scène de théâtre, une naine rouge serait une bougie. Il faudrait alors être bien plus près de la bougie pour ressentir autant de chaleur qu'on ne le ressent à une certaine distance du projecteur. Dès lors, autour d'une naine rouge, la zone habitable est bien plus proche de l'astre qu'autour du Soleil. Et la période de révolution des planètes dans cette zone habitable sera alors plus courte, assez pour faire les affaires de *Tess*: pour une naine rouge de un cinquième de la masse solaire, la période de révolution dans la zone habitable se compterait en quelques semaines.

Le satellite *Kepler* a examiné quelques milliers de naines rouges et a découvert qu'elles étaient souvent accompagnées de bien plus de planètes que les étoiles de type solaire. Sur les quelques centaines de milliers d'étoiles ciblées par *Tess*, environ 50 000 seront des naines rouges. Bien que ces astres soient peu lumineux, leur petite taille est un atout: au cours du transit d'une éventuelle planète, celle-ci occulterait alors une plus grande portion de l'astre. La baisse de luminosité serait donc plus marquée, et plus facile à repérer. Par exemple, une planète serait tout aussi détectable autour d'une étoile 16 fois moins lumineuse qu'une autre si le diamètre de cette étoile est seulement la moitié de celui de la seconde. En réalité, le signal de transits de planètes autour de naines rouges est si net qu'il ne serait en principe même pas nécessaire d'utiliser un télescope spatial.

TRAPPIST, SPECULOOS, DES TRAQUEURS D'EXOPLANÈTES

Et, effectivement, plusieurs projets de recherche au sol de transits se consacrent à la recherche d'exoplanètes autour de naines rouges. Ces étoiles étant peu lumineuses, les astrophysiciens doivent faire appel à des télescopes de grand diamètre, donc à champ de vision étroit. Ils doivent suivre alors les étoiles une par une, ce qui réduit l'efficacité de la traque et en fait une entreprise à long terme. Après des années de traque, seuls trois systèmes planétaires ont été découverts par cette approche. Mais ces trois systèmes sont parmi les découvertes les plus sensationnelles du domaine. L'un d'eux, Trappist-1, a fait les grands titres en 2017. Ce petit système n'a pas moins de sept planètes de la taille de la Terre sur des orbites serrées autour d'un astre si petit qu'il entre tout juste dans la catégorie des étoiles. Et au moins deux des sept planètes se trouvent dans la zone habitable.

Pour l'anecdote, le nom du télescope, *Trappist*, grâce auquel la découverte a été réalisée, est un acronyme (*TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope*), mais c'est surtout le nom d'une bière belge bien connue. Dans le même esprit, le responsable de *Trappist*, Michaël Gillon, a nommé *Speculoos* (*Search for*

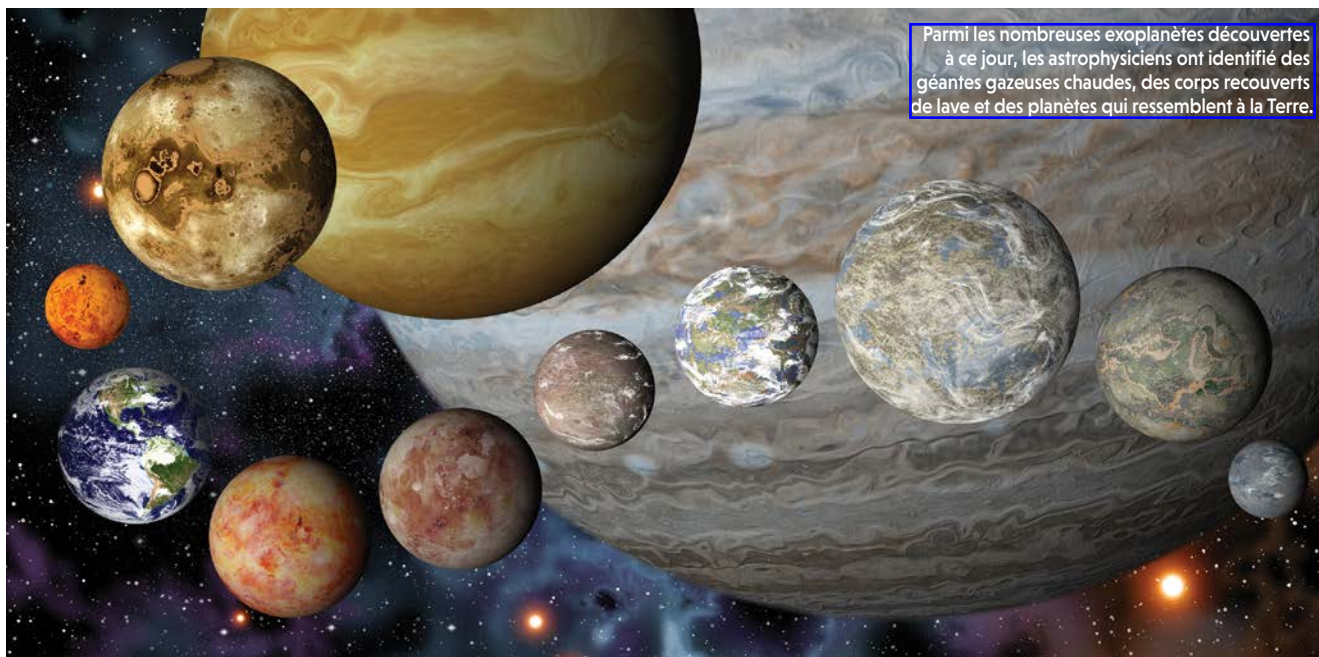
habitable Planets ECLipsing ULtra-coOL Stars) un autre projet de recherche d'exoplanètes; ce nom désigne un biscuit également belge.

Grâce aux futures missions spatiales évoquées et aux projets au sol, nous connaissons la position de milliers de planètes qui transitent devant leur étoile. Nous déterminerons certaines de leurs caractéristiques telles que la masse, et la densité, ce qui nous permettra de mettre à l'épreuve nos modèles de formation planétaire. Et si nos prévisions sont justes, nous aurons enrichi notre collection de planètes de la taille de la Terre dans la zone habitable de leur étoile.

Mais comment aller plus loin et savoir si un monde potentiellement habitable héberge effectivement une forme de vie? L'approche classique, proposée dans les années 1950, consiste à pointer un grand radiotélescope vers la planète et espérer capter les émissions électromagnétiques d'une civilisation extraterrestre intelligente. Même si le raisonnement n'est pas absurde, nous n'avons aucune idée de ses chances de réussite.

Une autre approche consiste à analyser l'atmosphère de l'exoplanète pour y rechercher des traces de vie. C'est possible en utilisant une petite astuce au cours de l'observation d'un transit. Les couches les plus externes de la planète correspondent à l'atmosphère et sont en partie transparentes. Ainsi, lorsque la planète effectue un transit, une fraction de la lumière de l'étoile est filtrée par l'atmosphère avant de nous parvenir. Grâce à une analyse spectroscopique de cette lumière qui a traversé les couches gazeuses de la planète, nous sommes en mesure de déterminer la composition de l'atmosphère. En effet, chaque atome ou molécule absorbe ou diffuse la lumière à différentes longueurs d'onde. Ils laissent donc une signature assez claire dans le rayonnement capté par les télescopes. Ainsi, en comparant le spectre de l'étoile avant, pendant et après le transit, il est possible de déduire la présence de certains éléments dans l'atmosphère de l'exoplanète. Par exemple, le sodium absorbe des photons de lumière d'une longueur d'onde de 589 nanomètres.

Les astronomes ont utilisé cette technique sur des planètes en transit de la taille de Jupiter et même sur certaines plus petites, comparables à Neptune et Uranus. Ils ont découvert des molécules de méthane, de monoxyde de carbone et d'eau dans ces atmosphères extraterrestres. Mais la méthode n'a jamais été appliquée sur des planètes de la taille de la Terre parce que leur signal est trop faible, et parce que les étoiles autour desquelles elles ont été trouvées sont trop peu lumineuses et lointaines. Mais si, grâce aux projets à venir, nous trouvons de l'oxygène dans l'atmosphère d'un tel corps, l'émotion serait grande. En effet, si l'atmosphère de la Terre contient une importante



Parmi les nombreuses exoplanètes découvertes à ce jour, les astrophysiciens ont identifié des géantes gazeuses chaudes, des corps recouverts de lave et des planètes qui ressemblent à la Terre.

proportion d'oxygène, c'est grâce aux organismes vivants. Si la vie sur notre planète disparaissait subitement, les roches absorberaient l'oxygène en quelques millions d'années pour former des oxydes. Dès lors, une exoplanète dont l'atmosphère présente de grandes quantités d'oxygène pourrait être le siège d'une vie.

Dans ce contexte, *Tess*, *Cheops* et *Speculoos* serviront d'éclaireurs au futur grand observatoire spatial, le télescope *James-Webb*, qui prendra la succession du télescope *Hubble*. D'un coût de 10 milliards de dollars (environ 8 milliards d'euros), *James-Webb* décollera en 2019. Il sera alors l'outil le plus efficace pour réaliser des mesures de spectroscopie lors de transits. Mais la durée de vie de cette mission sera assez courte : les réserves de carburant nécessaires au maintien de l'orbite s'épuiseront au bout de 5 à 10 ans. Étant donné ce calendrier serré, il y a une certaine urgence à découvrir les meilleures cibles à proposer au télescope *James-Webb*.

Comme le temps d'observation sur le télescope *James-Webb* sera très demandé, certains spécialistes des exoplanètes se sont associés pour concevoir et proposer des télescopes qui seront dédiés uniquement à l'analyse spectrale des transits. La mission américaine se nomme *Finesse* (*Fast infrared exoplanet spectroscopy survey*) et son alter ego européen est *Ariel* (*Atmospheric remote-sensing infrared exoplanet large survey*). Le terme infrarouge apparaît dans les deux noms, car les molécules telles que l'eau et le dioxyde de carbone sont plus faciles à détecter dans cette gamme du spectre électromagnétique. Dans un an ou deux, nous saurons si ces projets auront le feu vert pour être réalisés.

À plus long terme, un projet européen, *Plato*, est prévu pour décoller en 2026. Je vois *Plato* comme un super-*Tess* : il aura 24 télescopes pour surveiller le ciel, au lieu de 4. *Plato* devrait traquer des exoplanètes avec une meilleure sensibilité et sur de plus longues périodes que tous les autres télescopes.

Par ailleurs, la précision des données de *Plato* sera assez élevée pour détecter les variations de luminosité liées aux vibrations de l'étoile. En effet, les étoiles sont parcourues par des ondes, comme des vagues, à la façon des tremblements de terre. Leur étude est nommée astérosismologie. Les fréquences et les motifs de ces vibrations dépendent de la structure interne des étoiles, notamment leur densité et leur composition.

Quand *Plato* découvrira une planète, nous bénéficierons donc d'une meilleure connaissance des propriétés de son étoile hôte, son âge par exemple. En effet, en vieillissant, une étoile transforme son hydrogène en hélium ; ce changement de composition se manifeste par de subtiles modifications dans les vibrations de l'étoile, de quoi estimer son âge. Par l'astérosismologie, nous pourrions ainsi déterminer si l'étoile est au début de sa vie ou si elle a déjà brûlé son hydrogène depuis 10 milliards d'années. Autrement dit, nous pourrions étudier l'évolution des systèmes planétaires au cours du temps cosmique.

Entre les analyses en cours des données de *Kepler* et celles à venir de *Tess*, *Cheops*, *James-Webb* et *Plato*, la chasse aux exoplanètes a un programme bien chargé. Mais cette quête ne s'arrêtera probablement pas là. Et tous les astronomes en herbe qui ont été époustouffés par l'éclipse du Soleil en 2017 auront encore de nombreuses éclipses planétaires à étudier quand ils seront devenus des chercheurs. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. G. Bouma et al., **Planet detection simulations for several possible TESS extended missions**, en ligne, 2017 (arXiv:1705.08891).

G. R. Ricker et al., **Transiting exoplanet survey satellite**, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments and Systems*, vol. 1(1), article 014003, 2015.

R. Heller, **Des exoplanètes plus accueillantes que la Terre**, *Pour la Science*, n° 449, mars 2015.

K. Heng, **Le climat des exoplanètes**, *Pour la Science*, n° 421, novembre 2012.

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur la Préhistoire



Belin:
ÉDITEUR

Suivez-nous et abonnez-vous à notre newsletter
www.belin-editeur.com



ÉRIC BAPTESTE

est directeur de recherche au CNRS à l'institut de biologie Paris-Seine. Il codirige l'équipe Adaptation, intégration, réticulation et évolution à Sorbonne Université, à Paris.



Évolution: des réseaux plutôt que des arbres



Pour en savoir plus :
É. Baptiste
Tous entrelacés !
Belin, 2018

Molécules, cellules, organismes, sociétés, aucun élément biologique n'agit seul, tous interagissent. L'affirmation paraît banale, mais, développée, elle invite à élargir notre vision de l'évolution. Telle est la thèse qu'Éric Baptiste défend dans son dernier livre, *Tous entrelacés !*.

Le constat principal de votre livre est qu'à toutes les échelles, le monde vivant est complexe et interconnecté – «entrelacé». Ses composants interagissent tous, qu'il s'agisse de protéines associées, d'organismes en symbiose, de transfert de gènes, de cycles géochimiques... Quelles conséquences en tirez-vous?

La première question que pose ce constat est: pourquoi tout est collectif? Sans doute parce qu'il ne peut en être autrement, parce que rien dans le monde biologique n'est vraiment capable de se reproduire ni de persister seul. Et si tout est collectif, alors comment les composants entrent-ils en interaction? Comment s'intègrent-ils, s'appuient-ils les uns sur les autres?

Je crois que l'objet de la biologie est de comprendre les interactions par lesquelles se déploient les processus dans le temps. Il existe plusieurs définitions d'un processus, mais on peut retenir qu'il modifie un état initial et arrive à un état transformé. Des patrons d'interactions décrivent donc des processus. Certains processus sont remarquables, car ils se répètent. Par exemple, presque toutes les cellules emploient une machine moléculaire, l'ATP synthase, pour produire de l'énergie. Elle utilise l'énergie potentielle engendrée par un gradient de concentration de protons pour transformer une molécule (ADP) en une autre (ATP) que la cellule exploite. Mais avant d'utiliser ce gradient, les cellules dépensent de l'énergie pour le créer en faisant sortir les protons à l'extérieur de leur membrane. Certains y voient les vestiges d'un processus passé, à une époque où les cheminées hydrothermales des grands fonds sous-marins produisaient un gradient naturel de protons, autour duquel les premières structures biologiques se seraient développées. Cette organisation autour de tels gradients serait devenue un élément structural de l'évolution.

Les processus de la biologie prolongeraient les processus géologiques. Le défi à mon sens est donc d'étendre la théorie de l'évolution pour en faire non pas la science de l'évolution des espèces, mais celle de l'évolution des processus.

Comment analyser ces entités collectives et suivre leurs modifications?

À toutes les échelles de la biologie, on peut modéliser les processus par des réseaux: entre les gènes, les protéines, les gènes et les protéines, les cellules, etc. Nous disposons d'un concept, le réseau, d'une méthode, la théorie des graphes, et des objets décrits par la biologie. À partir de ces éléments, nous pouvons construire des réseaux, les analyser, les comparer. Dans un premier temps, on identifie les composants essentiels au processus étudié, qui constituent les nœuds du réseau. Puis on caractérise les relations entre les éléments – les arêtes du réseau. Ces liens sont de diverses natures, d'ordre chimique, électrique, métabolique, une relation de parenté, etc.

On code chaque type d'interaction par une représentation spécifique dans le réseau et on détermine le moment où chacune intervient.

Auparavant, pour étudier l'évolution, on dessinait des arbres de lignées. Aujourd'hui, les réseaux les englobent dans un ensemble plus large, car les arbres montrent des parentés, alors que les réseaux représentent des organisations et des fonctionnements. On trouve d'ailleurs des réseaux dans chaque ramification de l'arbre du vivant puisqu'il en existe dans chaque individu: réseaux métaboliques, de régulation, de coexpression (expression simultanée de gènes), etc. Le défi maintenant est de développer une science des réseaux qui permettra de penser les processus et les interactions. Elle se heurte à des défis méthodologiques considérables, notamment dans la comparaison des graphes entre eux.

Si le collectif est au centre de la biologie, pourquoi a-t-on si longtemps négligé les formes d'association du vivant comme l'endosymbiose, suggérée dès 1890 pour les mitochondries?

Les mitochondries – les centrales énergétiques des cellules eucaryotes – sont les descendantes captives d'anciennes bactéries. Mais il a fallu presque un siècle pour que cette idée s'impose. Une raison est que dans une approche réductionniste, on étudie les objets partie par partie. Dans une culture pure de bactéries, on ne peut observer ni les interactions ni les constructions collaboratives, ni même les soupçonner. Mais il existe une difficulté pratique à analyser un objet complexe pour ce qu'il est: comment cultiver une diversité de partenaires en laboratoire? Par ailleurs, nous avons l'habitude de penser en termes de lignées divergentes et séparées. Le modèle central de l'évolution est celui de l'arbre sur lequel s'organisent les lignées, et les propriétés des organismes qui sont le fruit d'associations n'ont pas leur place dans cette représentation.

Votre conception de l'évolution va-t-elle à l'encontre de l'existence d'un objet unique sur lequel l'évolution s'appliquerait, comme le gène pour le biologiste britannique Richard Dawkins?

Je suis un évolutionniste, je m'intéresse à ce qui se transforme, je n'ai pas un objet d'étude privilégié. Molécules, organismes, langages... tous ces objets susceptibles de se modifier m'intéressent, mais il n'existe pas un modèle unique qui s'applique à l'ensemble. Si l'on considère une définition de l'espèce fondée sur l'interfécondité, le mécanisme qui cause la variabilité s'appuie sur la méiose. Il n'est donc pas applicable à l'évolution des organismes qui se reproduisent par mitoses, comme les bactéries.

De plus, les processus responsables de l'évolution changent. Ceux observés chez les animaux ne sont sans doute pas les plus

pertinents pour chercher les traces des débuts de l'évolution de la vie unicellulaire. Enfin, ils ne sont pas tous strictement biologiques : il existe des processus géologiques ou géochimiques, comme les gradients d'énergie utilisés par le vivant dans les cheminées hydrothermales. L'environnement n'est pas juste un filtre qui contraint les lignées de microbes, de plantes ou d'animaux. Il contribue à produire certaines propriétés du monde vivant, comme dans le cas des métalloprotéases, ces enzymes qui utilisent des métaux pour fonctionner. Et à l'autre bout du spectre, on trouve des langages de programmation informatique, qui n'existeraient pas sans nous, mais qui sont aussi un résultat de l'évolution. Les différents processus et objets qui constituent l'histoire du vivant se rattachent les uns aux autres, mais ne s'expliquent pas d'une manière univoque.

Depuis Darwin, on explique souvent l'évolution par la sélection naturelle, qui favorise les plus aptes. Pourquoi affirmez-vous que, de plus en plus, le hasard concurrencera ces explications ?

Nos modèles pour penser la sélection s'appliquent à l'intérieur d'une lignée. Dans les collectifs composés de multiples espèces, nous avons besoin de modèles étendus pour comprendre la pérennité des associations, leurs transformations et leur succession dans le temps. Une façon plus mécanique d'expliquer des collectifs est de recourir à la théorie de la présuppression. Imaginez que deux entités, par exemple des protéines, interagissent par hasard et que, au gré d'une mutation, l'une d'elles se mette à dépendre de l'autre : elle perd ses capacités, mais l'autre les compense. Bien que désavantageuse pour la protéine seule, la mutation sera transmise à la descendance, comme si la seconde protéine avait supprimé par avance le handicap de la première.

Cette théorie offre une vision de l'évolution aux antipodes de la sélection des meilleurs. Elle décrit un monde où « les handicapés » qui s'épaient sont nombreux parmi les systèmes complexes. Certains proposent d'appliquer ce modèle aux ribosomes, des structures cellulaires formées de l'agrégation de nombreuses protéines. Dans cette perspective neutraliste, la complexité émerge d'une succession d'interactions loin d'être optimales pour la survie, mais qui interdisent le retour à l'état initial par un effet cliquet : la probabilité d'un retour à un état indépendant est beaucoup plus faible que celle de s'en éloigner. Cette interprétation diverge de celle selon laquelle lors de la complexification d'un assemblage de protéines, la sélection optimise les fonctions de cet assemblage.

Un autre paramètre intervient, la taille des populations. Lorsqu'elles sont grandes, la sélection peut agir, lorsqu'elles sont petites, le hasard prend une place prépondérante. Pour

de nombreuses associations, comme l'acquisition de la mitochondrie dans une cellule pré-eucaryote, on peut imaginer qu'au début, les populations étaient petites.

Cette vision de l'évolution est aux antipodes de la sélection des meilleurs

Si on prolonge votre constat d'entrelacement en incluant, comme vous le faites, les éléments abiotiques des écosystèmes, ne rejoint-on pas l'hypothèse Gaïa ?

Dans l'hypothèse Gaïa, les écosystèmes de la planète sont intégrés, de telle sorte qu'une entité supérieure émerge. Je pense non seulement que cette fascinante question se pose, mais aussi qu'elle entre dans le cahier des charges des évolutionnistes. Existe-t-il un tel collectif et, si oui, comment parler de ses évolutions et de ses transformations ? Il est encore trop tôt pour répondre à ces questions, mais on peut prendre des modèles à une échelle plus petite. On sait que différents microbes dans un environnement peuvent réaliser une fonction, par exemple une voie métabolique qui a un impact sur la fixation du carbone ou sur des cycles géochimiques. Lorsqu'une telle voie est installée, un découplage peut survenir entre sa fonction et l'évolution des composants qui la produisent. La fonction a été sélectionnée, elle perdure, mais les microbes et leurs génomes se transforment. En serait-il de même pour une fonction attribuée à Gaïa ?

Pensez-vous qu'une réorganisation de la profession soit nécessaire pour élargir le cadre conceptuel de l'évolution ?

La multidisciplinarité me paraît la meilleure façon d'y parvenir. À partir du moment où l'on pense que des associations sont sélectionnées et qu'elles sont composées d'éléments n'ayant pas toujours la même origine, la même manière de se transformer ni le même tempo d'évolution, on comprend qu'il est nécessaire de solliciter les compétences de certains collègues, ce qui conduit à une modification des pratiques. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR GÉRARD LAMBERT

CE MAGAZINE VOUS PLAÎT ?

OFFRE
1 AN

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

3 FORMULES
AU CHOIX

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

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

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



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

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

PAG18486PC

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville :

Téléphone :

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

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

☐ OUI ☐ NON
☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

Numéro :

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

Signature obligatoire :

1 / JE CHOISIS MA FORMULE (merci de cocher)

☐ **FORMULE
INTÉGRALE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-Séries papier
• Accès illimité aux contenus en ligne
99 €
Au lieu de 174,40 €
TAXES

☐ **FORMULE PAPIER
+ HORS-SÉRIE**
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-Séries papier
79 €
Au lieu de 114,40 €
TAXES

☐ **FORMULE
PAPIER**
• 12 n° du magazine papier
59 €
Au lieu de 82,80 €
TAXES

* 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 31/12/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter boutique.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.

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



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

Indiana Jones au Bureau des

L'Institut de France, au 23 quai de Conti, à Paris, héberge plusieurs Académies. Dans ses caves, des chercheurs explorent les archives du Bureau des longitudes.



longitudes



L'ESSENTIEL

> Fondé en 1795, le Bureau des longitudes avait pour mission d'améliorer les instruments de navigation, de publier des éphémérides et de diffuser la science auprès du grand public.

> La découverte récente de nouveaux documents

d'archives dans les caves de l'Institut de France permet d'étudier certaines facettes de la vie du Bureau.

> Numérisés et mis en ligne, les procès-verbaux des réunions du Bureau entre 1795 et 1932 sont aujourd'hui accessibles à tous.

L'AUTEURE



COLETTE LE LAY
historienne des sciences
au centre François-Viète,
à l'université de Nantes

Les caves renferment parfois des trésors. Découvertes récemment dans celles de l'Institut de France par des chercheurs aventureux, les archives anciennes du Bureau des longitudes révèlent la vie de cette institution depuis 1795 et le quotidien de ses petites mains.

Juillet 2017. Revêtus d'une blouse et de gants, nous arpentons un labyrinthe de couloirs étroits jusqu'à une cave de l'Institut de France, quai de Conti, à Paris.

Quelques mois plus tôt, Isabelle Maurin-Joffre, directrice des archives de l'Académie des sciences, y a découvert par hasard des mètres linéaires de documents du Bureau des longitudes. Après quelques recherches dans les cartons recouverts d'une épaisse poussière noire, nous sommes convaincus d'être en présence d'un trésor.

Tels des «aventuriers des archives perdues», nous formons une équipe de six personnes. Notre guide dans ce dédale est Nicole Capitaine, membre du Bureau des longitudes, correspondante de l'Académie des sciences et astronome émérite à l'observatoire de Paris. Elle a lancé ce projet avec deux enseignants-chercheurs des archives Henri Poincaré de l'université de Lorraine, Martina Schiavon et Laurent Rollet. Julien Muller, ingénieur d'étude

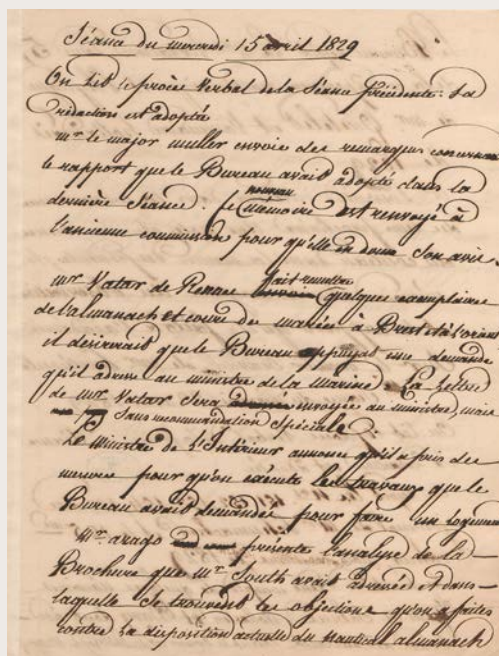
du même institut, Guy Boistel et moi-même, chercheurs du groupe d'histoire de l'astronomie du centre François-Viète, de l'université de Nantes, complétons le groupe.

Nous nous étions tous déjà intéressés au Bureau des longitudes, un établissement fondé en 1795 qui a traversé l'histoire et existe encore aujourd'hui. Grâce aux documents retrouvés dans la cave, notamment des correspondances, nous allions pouvoir compléter nos travaux sur les procès-verbaux anciens de l'institution. D'ailleurs, Nicole Capitaine, Martina Schiavon et Laurent Rollet avaient piloté une vaste opération destinée à rendre publics ces procès-verbaux. En effet, bien que gardés au Bureau des longitudes, ces derniers étaient difficiles d'accès car consultables uniquement sur place. Avec différents soutiens, de l'observatoire de Paris, de la Maison des sciences de l'homme Lorraine et de l'Agence nationale de la recherche, mes trois collègues ont numérisé pas moins de 22000 feuillets de procès-verbaux sur la période s'étendant de la création du Bureau des longitudes à 1932, durant la

L'ENVERS DU BUREAU

Les procès-verbaux du Bureau des longitudes offrent un témoignage hebdomadaire exceptionnel du fonctionnement de cette institution.

D'abord, on y trouve la trace des grands débats scientifiques qui animent la communauté, menés par des savants prestigieux hors de leur sphère habituelle d'influence. Par exemple, le procès-verbal ci-contre, rédigé par François Arago en 1829, discute des marées à Brest et à Lorient. Ensuite, ces documents évoquent l'influence des événements historiques et de la politique sur les activités du Bureau. Enfin, ils révèlent une part de la vie quotidienne d'une communauté de petites mains (calculateurs ou garçons de bureau) soumise à la précarité de l'emploi et à l'absence de protection sociale. Lorsqu'un calculateur décédait, notamment, il n'était pas rare que le Bureau tentât d'obtenir une pension pour la veuve qui, sans cet appui, serait tombée dans la misère. Ces obscurs rouages de la machine à produire des éphémérides seraient restés dans l'ombre sans la découverte de leurs dossiers de carrière dans les archives du Bureau.



LES PETITES MAINS DE L'OMBRE

Le 5 janvier 1910, le journal *Le Matin* rendait ainsi compte des palmes académiques de Zoé-Louise Schmid, première calculatrice du Bureau des longitudes : « On a cité de nombreuses chanteuses, comédiennes ou ballerines. N'est-il pas juste de relever aussi [Zoé-Louise Schmid] dans la liste des nouvelles titulaires de la rosette violette [...] ? Sans doute, cette rosette avait été promise à une danseuse ce fut une calculatrice qui l'obtint. [...] Si tu te maries, disent les mamans à leur fils, tâche de trouver une femme qui sache compter. Heureux M. Schmid, les dieux lui

ont donné une calculatrice. » L'article témoigne du regard que l'époque porte sur les femmes. Mais les archives du Bureau révèlent bien pire. Zoé-Louise Schmid a débuté comme calculatrice auxiliaire en 1884 et n'a jamais obtenu sa titularisation, en dépit d'une démarche de Henri Poincaré auprès du ministre en 1911. Elle a poursuivi sa tâche jusqu'en 1933. Après cinquante ans de bons et loyaux services, à plus de 80 ans, elle a été mise à la retraite sans pension, situation dramatique pour une veuve qui perd ainsi ses seules ressources...

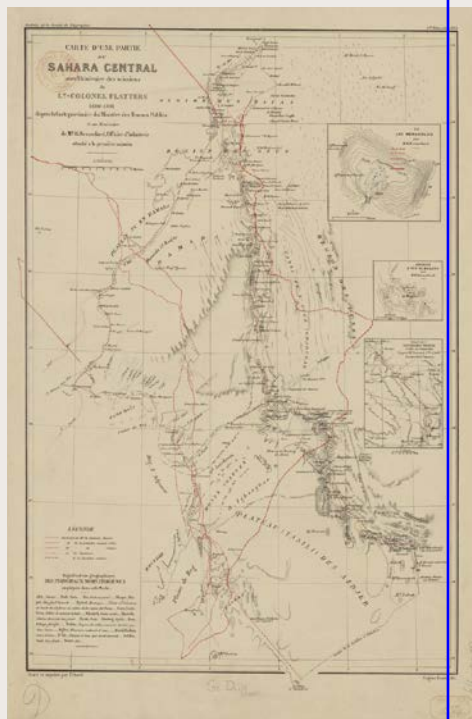
COHABITER AVEC LA COMMUNE

Nombre de bouleversements historiques (révolutions, guerres, etc.) ont traversé la période 1795-1932, dont on trouve des traces dans la vie du Bureau. Ainsi, le 2 décembre 1870, alors que les Prussiens assiégeaient la capitale, l'astronome Jules Janssen, missionné par le Bureau, s'envolait à bord d'un ballon (voir la sculpture ci-contre) vers l'Algérie pour y observer une éclipse totale de Soleil. Lors d'une escale à Tours, il délivra un message à Léon Gambetta qui avait aussi quitté Paris par la voie des airs deux mois auparavant. Si le Bureau se réunit chaque semaine pendant le siège, tel ne fut pas le cas lors de la Commune. Lorsque, après six semaines d'interruption, le Bureau reprit ses travaux le 31 mai 1871, les membres saluèrent la répression menée par les Versaillais : « Les poursuites et les menaces des agents de la Commune ont obligé plusieurs des membres du Bureau à quitter Paris. En dernier lieu, l'état de guerre ne permettait pas à ceux qui sont restés, de quitter leur domicile, ou celui qui leur servait de refuge. Le gouvernement de la République ayant mis un terme à ce désastreux état de choses, le Bureau continuera de tenir ses séances comme par le passé. »



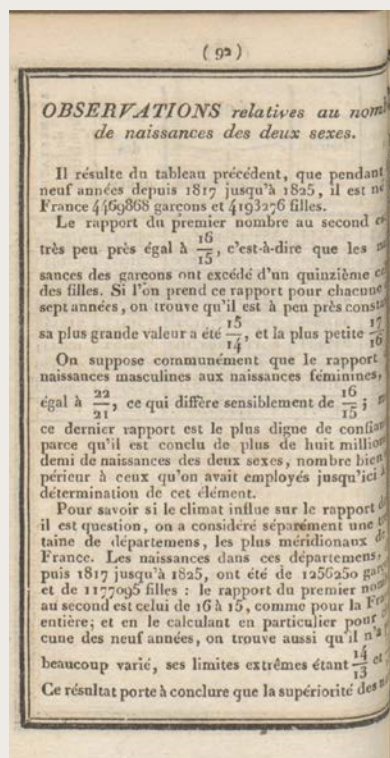
FORMER LES VOYAGEURS

Par deux activités au moins, le Bureau contribua à aider la colonisation. Tout d'abord, les militaires membres du Bureau des longitudes étaient souvent les artisans de la cartographie des colonies. Ce fut le cas du général François Perrier (1835-1888) qui participa à de nombreuses opérations géodésiques dont la jonction télégraphique de l'Algérie à l'Espagne. Par ailleurs, l'observatoire de Montsouris assurait la formation des voyageurs. Parmi eux, notons le médecin Alexandre Yersin (1863-1943), découvreur du bacille de la peste, et l'infortuné Paul Flatters. Ce militaire et explorateur devait étudier la possibilité d'une nouvelle route commerciale avec l'établissement d'un chemin de fer dans le Sahara, entre l'Algérie et le Niger. Mais l'expédition rencontra un destin tragique : tous les membres furent tués par les Touaregs en 1881. La carte ci-contre indique l'itinéraire de la mission Flatters.



DÉMOGRAPHIE ET CLIMAT

Plus d'un savant de renom a utilisé le Bureau des longitudes comme tremplin pour de nouvelles recherches. Dans les années 1820, le grand mathématicien Siméon-Denis Poisson y a ainsi entrepris un travail statistique sur la population française. Depuis le début du XIX^e siècle, l'*Annuaire du Bureau des longitudes* fournissait des données chiffrées sur la population française. Poisson s'est appuyé sur les tableaux des années 1817 à 1825 pour examiner le rapport garçons/filles sur un total d'environ 8 600 000 naissances. Il l'établit à 16/15 alors que le rapport 22/21 était celui qui était généralement admis. Par ailleurs, il prouva, en analysant les effectifs des départements méridionaux, que l'influence du climat sur le rapport n'était pas déterminante. Ces résultats publiés dans l'*Annuaire* à compter de 1825 (ci-contre, l'article de 1828) servirent de socle à une étude plus complète que Poisson proposa à l'Académie des sciences en 1829.



Troisième République. Julien Muller a réalisé la transcription des procès-verbaux et a établi un inventaire biographique des personnes citées. Suite à cela, Guy Boistel et moi-même avons répondu avec enthousiasme à l'invitation de Nicole, Martina et Laurent à poursuivre avec eux l'exploration du fonds d'archives du Bureau, car ces documents sont une occasion unique d'étudier différents aspects de la vie de cette institution.

LA LONGITUDE, UN DÉFI SCIENTIFIQUE ET POLITIQUE

Mais qu'est-ce que ce Bureau des longitudes ? Créée par la Convention en 1795, cette institution entendait à l'origine concurrencer l'ennemi anglais dans la quête des longitudes (d'où son nom calqué sur celui de son homologue britannique le Board of longitude). En effet, autant la détermination de la latitude est simple (il suffit de mesurer la hauteur de l'étoile polaire, ou du Soleil à sa culmination dans le ciel), autant trouver la longitude est complexe, car la Terre tourne. Une solution est de déterminer la différence d'heure entre le lieu où l'on se trouve et un lieu de référence sachant que 15 degrés de longitude sur la sphère correspondent à un décalage de une heure. À cette époque, le problème constituait un enjeu majeur pour les navigateurs. Avant la généralisation des chronomètres de marine, qui ne survint qu'à la fin du XIX^e siècle, utiliser une horloge céleste (les satellites de Jupiter, les distances lunaires) était le seul moyen à la disposition des marins. D'où la nécessité de posséder des tables astronomiques fiables.

La mission du Bureau des longitudes était donc de perfectionner les méthodes astronomiques de navigation et de publier des éphémérides, dont la *Connaissance des temps*, recueil de tables fondé en 1679. Héritiers des Lumières, les fondateurs du Bureau voulaient aussi combattre les superstitions et vaincre l'astrologie grâce à un cours public d'astronomie et par la publication d'un annuaire diffusant, entre autres, le calendrier républicain et le nouveau système des poids et mesures.

Sorte d'académie d'astronomie et de navigation, le Bureau réunissait deux fois par décennie (puis chaque semaine) des géomètres, Pierre-Simon Laplace et Joseph-Louis Lagrange, des astronomes, dont Jérôme Lalande, des navigateurs comme Louis-Antoine de Bougainville, un géographe et un « artiste », c'est-à-dire un fabricant d'instruments. Le Bureau exerçait aussi la tutelle sur l'observatoire de Paris, dont la bibliothèque abritait ses séances et ses archives.

Le premier demi-siècle d'existence du Bureau fut assez paisible, dominé par la

► figure de François Arago, personnalité montante de l'Observatoire. Le Tout-Paris se pressait pour assister à son cours public dans l'amphithéâtre de 800 places qu'il avait fait construire à l'Observatoire. Et 10000 lecteurs acquéraient l'*Annuaire du Bureau des longitudes* pour s'y délecter des notices sur la lune rousse, sur les comètes susceptibles de venir choquer la Terre ou encore sur la machine à vapeur. À l'Observatoire, Arago avait placé son clan familial et amical, qui travaillait et résidait sur place. L'arrivée d'Urbain Le Verrier au Bureau des longitudes ébranla cet équilibre avant de le détruire. En 1846, le découvreur de la planète Neptune fut accueilli en héros avant que les premières escarmouches ne surviennent à peine quelques semaines plus tard. Chacun des deux astronomes connut son heure de gloire politique, Arago devenant ministre après la révolution de 1848 et Le Verrier accédant au Sénat sous le Second Empire.

En 1854, Arago mort, Le Verrier prit le pouvoir sur l'Observatoire dont il obtint la séparation d'avec le Bureau des longitudes. Il chassa de l'Observatoire tous les fidèles d'Arago, qui étaient aussi pour la plupart membres du Bureau. Les réunions de celui-ci devinrent problématiques: Le Verrier «oubliait» de faire chauffer la salle, la clé était perdue, le courrier n'était pas transmis.

UNE PÉRIODE DE CRISE

Alors commença la première période d'errance pour nos archives. Plusieurs membres s'installèrent au 76 rue Notre-Dame-des-Champs, où une pièce était prévue pour abriter les personnes chargées de calculer les éphémérides – les calculateurs de la *Connaissance des temps*. Ainsi, nous ne possédons pas les originaux des procès-verbaux pour les deux décennies 1854-1874. Heureusement, des copies nous sont parvenues. Quant aux publications et courriers reçus des observatoires internationaux avec lesquels le Bureau a établi un réseau, ils étaient souvent emportés par le secrétaire de séance. Au décès de celui-ci, la famille restituait parfois les pièces, mais pas toujours. C'est aussi pendant cette période de crise que le Bureau confirma la diversification de son activité déjà perceptible pendant le premier demi-siècle. La géodésie, l'uniformisation de l'heure, les sciences physiques devinrent des champs dans lesquels le Bureau pouvait exercer son activité sans heurter de front le directeur de l'Observatoire, qui, bien que membre, ne siégeait pratiquement jamais.

La chute de l'Empire et l'avènement de la Troisième République favorisèrent le Bureau des longitudes, qui se vit enfin doté d'un lieu propre, quai de Conti, dans les bâtiments de l'Institut de France, où il réside encore aujourd'hui. Mais l'épopée des archives n'était pas terminée. En 1875, au cœur d'une ère de colonisation

triomphante, le Bureau des longitudes obtint l'ouverture de l'observatoire de Montsouris, dédié à la formation astronomique des explorateurs et voyageurs, tant militaires que civils. Lorsque Montsouris ferma ses portes en 1983 après un lent déclin, de nombreuses archives historiques, qui y avaient été entreposées au fil du temps, se retrouvèrent dans des bennes.

Quand Montsouris ferma en 1983, de nombreuses archives se retrouvèrent dans des bennes

Quelques-unes furent sauvées par des astronomes soucieux du patrimoine. D'autres firent le bonheur de collectionneurs privés. Le contenu de la cave du quai de Conti provient-il de cette époque? Cela reste un mystère.

Le Bureau des longitudes assure encore sa mission. Il participe à des instances internationales, partage son expertise dans diverses disciplines, publie des ouvrages et organise des conférences grand public. Ses archives ont aussi un rôle inestimable. Par exemple, Nicolas Pouvreau, qui travaille au service hydrographique et océanographique de la Marine, met en valeur le patrimoine français des séries marégraphiques. Des observations systématiques du niveau de la mer ont été menées à Brest à partir de 1806, sous la surveillance du Bureau, à l'initiative de Laplace et Lalande. Ces données mettent en évidence la montée régulière des eaux depuis les débuts de la mesure. Elles soulignent la nécessité du «plan de prévention des submersions marines» développé à la suite de la catastrophe Xynthia.

Et qu'en est-il des procès-verbaux et des documents trouvés dans les caves du quai de Conti? Pour les historiens des sciences, ils sont une possibilité unique de découvrir le Bureau des longitudes de l'intérieur, par son quotidien, comme en attestent quelques exemples (voir pages 76 et 77). Quant au lecteur curieux qui s'aventurera sur le site internet dédié aux procès-verbaux du Bureau (bdl.ahp-numerique.fr), il découvrira tous les mois de nouveaux récits qui, peu à peu, redonneront chair à cet étonnant petit monde. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Schiavon et L. Rollet (dir.), **Pour une histoire du bureau des longitudes (1795-1932)**, Presses Universitaires de Nancy, 2017.

C. Le Lay, **L'Annuaire du Bureau des longitudes et la diffusion scientifique : enjeux et controverses (1795-1870)**, *Romantisme*, n° 166, pp. 21-31, 2014.

G. Boistel, **L'Observatoire de la Marine et du Bureau des longitudes au Parc Montsouris, 1875-1914**, IMCCE e/dite, 2010.



D'évolutions en révolutions



9 € 128 pages

Suivez-nous
sur les réseaux sociaux



quesaisje.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

LES INDÉCIDABLES ABSOLUS EXISTENT-ILS?

En 1951, Kurt Gödel énonça que soit l'esprit humain n'est pas une machine, soit il existe des énoncés qui lui sont indécidables à jamais, soit les deux à la fois. Le débat ouvert sur cette question est toujours d'actualité.

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)

Certaines questions philosophiques sont fondamentales. La nature, mécanique ou non, de l'esprit humain en fait partie. Que des résultats mathématiques contribuent à résoudre cette dernière est surprenant. Pourtant, Kurt Gödel, fin philosophe et génial logicien d'origine autrichienne, a fait avancer la question en 1951 en formulant ce que l'on dénomme la disjonction gödélienne. Cet énoncé indique que l'une au moins des deux affirmations suivantes est vraie :

- soit l'esprit mathématique humain ne peut pas être réduit à un algorithme, autrement dit l'homme n'est pas une machine.

– soit il existe des indécidables mathématiques absolus.

Expliquons les deux termes de la disjonction avant de présenter l'argument proposé par Gödel pour l'établir et les approfondissements apportés par de récents travaux.

Les mathématiciens ont élaboré des méthodes de raisonnement sûres et vérifiables, que l'on présente sous la forme d'axiomes et de règles de déduction ; ces méthodes leur permettent d'établir toutes les mathématiques connues. L'une des principales méthodes est le système formel de l'arithmétique de Peano, qu'on notera PEANO ; il permet de traiter les nombres entiers et de démontrer, par exemple, qu'il existe une infinité de nombres premiers ou que tout entier positif n est la somme de quatre carrés d'entiers ($n = a^2 + b^2 + c^2 + d^2$, où a, b, c et d sont des entiers). D'autres systèmes formels autorisent la manipulation des nombres

réels et en particulier les calculs des décimales du nombre π , ou la résolution des équations différentielles.

Plus puissant, le système habituel de la théorie des ensembles, noté ZFC pour « système de Zermelo-Fraenkel avec axiome du choix », établit qu'il existe une infinité de types d'infinis et permet de concevoir des espaces à n dimensions, des espaces de fonctions, des espaces d'espaces, etc. D'autres systèmes formels, tels ceux évoqués dans un article précédent de cette rubrique à propos d'Alexandre Grothendieck (voir « Quand considère-t-on qu'un théorème est définitivement prouvé? », *Pour la Science* n° 475, mai 2017) sont encore plus puissants.

Cette hiérarchie de systèmes autorise non seulement la manipulation d'objets finis et infinis de plus en plus nombreux et variés, mais donne accès à un florilège de nouvelles démonstrations : ZFC « sait » par exemple plus de choses sur les entiers que PEANO. Cette progression vers des systèmes de plus en plus efficaces se poursuivra sans doute. La question évoquée par le premier terme de la disjonction de Gödel est celle de la nature de cet esprit inventif qui maîtrise un monde mathématique de plus en plus riche : peut-il être réduit à ce que donnerait un algorithme ?

Le second terme de la disjonction se réfère aux indécidables qui, d'après le premier théorème d'incomplétude de Gödel, existent dans tout système formel cohérent (on dit aussi « consistant », terme calqué de l'anglais *consistent*), c'est-à-dire non contradictoire, et assez puissant.

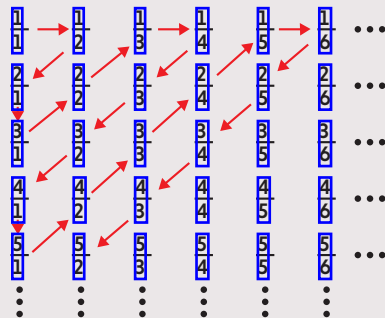


Jean-Paul Delahaye a récemment publié : **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

L'HYPOTHÈSE DU CONTINU

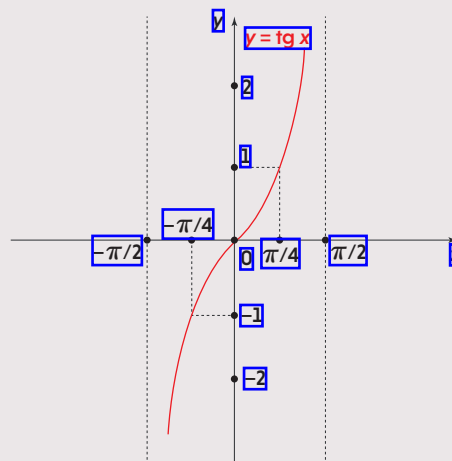
1

L'hypothèse du continu est un bon candidat au titre d'indécidable absolu. Expliquons en quoi elle consiste. Les sous-ensembles infinis de l'ensemble des nombres réels que les mathématiciens rencontrent sont de deux types. Il y a, d'une part, les sous-ensembles dénombrables, c'est-à-dire qui peuvent être mis en correspondance un à un avec l'ensemble $\mathbb{N}$ des nombres entiers $\{0, 1, 2, \dots, n, \dots\}$. Contrairement à ce qu'on pense au premier abord, l'ensemble des entiers relatifs $\mathbb{Z} = \{\dots, -n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n, \dots\}$ est dénombrable : il peut être mis en correspondance un à un avec $\mathbb{N}$. Il suffit de procéder ainsi : $0 \rightarrow 0, 1 \rightarrow 1, 2 \rightarrow -1, 3 \rightarrow 2, 4 \rightarrow -2, 5 \rightarrow 3, 6 \rightarrow -3, 7 \rightarrow 4, 8 \rightarrow -4$, etc. Il en va de même pour les rationnels positifs (quotients de deux entiers positifs) : on place ces nombres dans un tableau que l'on parcourt en zigzag :



En associant les entiers positifs aux étapes du parcours et en sautant ceux déjà rencontrés (comme $2/4$, qui est égal à $1/2$), on définit une correspondance un à un entre les entiers et les rationnels positifs.

L'autre catégorie de sous-ensembles infinis rencontrés en mathématiques est celle des ensembles qu'on sait mettre en correspondance un à un avec l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels. Par exemple, l'intervalle I des nombres réels strictement compris entre $-\pi/2$ et $\pi/2$ est mis en correspondance un à un avec l'ensemble $\mathbb{R}$ par la fonction $x \rightarrow \tan(x)$; à chaque nombre de l'intervalle I correspond un unique nombre réel et tous les réels sont atteints (parce qu'il y a deux asymptotes verticales).



Tous les sous-ensembles infinis de $\mathbb{R}$ qu'on rencontre se mettent ainsi en correspondance un à un soit avec $\mathbb{N}$, soit avec $\mathbb{R}$. Pourtant, on ne sait pas prouver que cela est vraiment le cas pour tout sous-ensemble infini de $\mathbb{R}$. Dit un peu différemment, on ignore s'il existe un infini intermédiaire entre $\mathbb{N}$ et $\mathbb{R}$. L'hypothèse du continu, HC, formulée la première fois par Georg Cantor en 1878, affirme que oui. Kurt Gödel a prouvé en 1938 que les axiomes du système ZFC ne permettent pas de démontrer non-HC, et Paul Cohen a prouvé en 1963 que les axiomes de ZFC ne permettent pas de démontrer HC. En un mot, HC est un indécidable de ZFC. On pourrait donc, sans risque d'introduire de contradiction, ajouter HC ou non-HC aux axiomes. Cependant, les mathématiciens refusent de le faire, car aucune intuition claire ne les guide dans le choix ; opter pour HC ou pour non-HC serait une décision arbitraire.

Cela ne signifie pas que HC soit un indécidable absolu, car, comme l'espérait Gödel, on pourrait trouver un ou des axiomes naturels et évidents à ajouter à ZFC qui, parmi leurs conséquences, auraient HC ou non-HC. Bien qu'un énorme travail ait été fait dans cet objectif, celui-ci n'a pas été atteint à ce jour.

Un indécidable dans le système S est un énoncé E qui, bien que s'exprimant dans le langage de S , n'est pas démontrable dans S , pas plus que sa négation non- E . Le premier théorème d'incomplétude de 1931 établit de façon incontestable que tout système formel S cohérent et assez puissant est sujet à l'incomplétude (c'est-à-dire qu'il y existe des indécidables), et le second théorème d'incomplétude précise que l'énoncé Cohé(S) affirmant que S est cohérent est un indécidable de S .

Les énoncés d'un système donné S qui sont indécidables ne le sont pas nécessairement dans un autre système S' . On connaît ainsi des énoncés d'arithmétique qui sont indécidables dans PEANO et qui ne le sont pas dans la

théorie ZFC des ensembles : les indécidables évoqués par les théorèmes de Gödel dépendent du système formel envisagé.

INDÉCIDABLES RELATIFS OU ABSOLUS ?

Dans un certain sens, il n'existe pas d'indécidable absolu : si E est un indécidable d'un système cohérent S , en ajoutant à S l'axiome E on obtient le système S' qui est encore cohérent, mais où E n'est plus indécidable ! Ce n'est bien sûr pas dans ce sens que Gödel envisage les indécidables absolus dans sa disjonction. Même si, par jeu, on envisage le système S' , il n'est pas vrai que les mathématiciens envisageront sérieusement ce qu'indique S' du monde mathématique ;

➤ ils n'accepteront de le faire que lorsqu'ils seront certains que les nouveaux systèmes sont conformes à la réalité mathématique. Or les indécidables absolus que Gödel envisageait sont des énoncés qui seraient mathématiquement vrais, mais dont l'esprit mathématique humain ne pourrait jamais vraiment comprendre qu'ils sont vrais. Expliquons cette délicate distinction avec un exemple.

D'après le second théorème d'incomplétude de Gödel, l'arithmétique de Peano peut exprimer l'énoncé Cohé(PEANO) affirmant qu'elle est cohérente, et cet énoncé est indécidable dans PEANO. Cela signifie qu'on peut ajouter à PEANO l'axiome Cohé(PEANO) donnant un nouveau système PEANO', mais aussi qu'on peut ajouter à PEANO l'axiome non-Cohé(PEANO) donnant un autre nouveau système PEANO". Ces deux extensions sont toutes deux cohérentes si PEANO l'est. Pourtant, le mathématicien n'envisage sérieusement que la première, PEANO', car la

compréhension qu'il a des nombres entiers est telle qu'il ne doute pas le moins du monde des axiomes de PEANO et des règles de raisonnement qui permettent de déduire des théorèmes dans PEANO; il est donc convaincu, même si PEANO ne peut pas le démontrer que Cohé(PEANO) est vrai.

Face à un indécidable E d'un système formel S, l'esprit du mathématicien sera parfois guidé (comme dans l'exemple) par la compréhension qu'il a des objets mathématiques. Dans de tels cas, il optera pour l'une des options E ou non-E, une seule de ces deux options correspondant à la réalité mathématique.

La question posée par Gödel est: face à un indécidable, le mathématicien pourra-t-il toujours opter (à plus ou moins long terme) pour l'une des deux éventualités E ou non-E? S'il ne le peut pas, E sera un indécidable absolu. L'encadré 1 présente un énoncé indécidable qui se trouve aujourd'hui dans cette délicate indétermination.

COMMENT GÖDEL A PROUVÉ LA DISJONCTION

Reprenons le raisonnement qu'a proposé Gödel pour établir la disjonction.

On part de l'alternative suivante. Soit l'esprit mathématique humain ne peut pas être réduit à un algorithme (autrement dit, l'homme n'est pas une machine). Soit l'esprit mathématique humain se réduit à un algorithme, auquel cas tout ce qui sera produit dans l'avenir comme nouveaux axiomes et systèmes formels plus puissants pourra s'exprimer dans un seul système formel, car à un algorithme donné on peut toujours associer

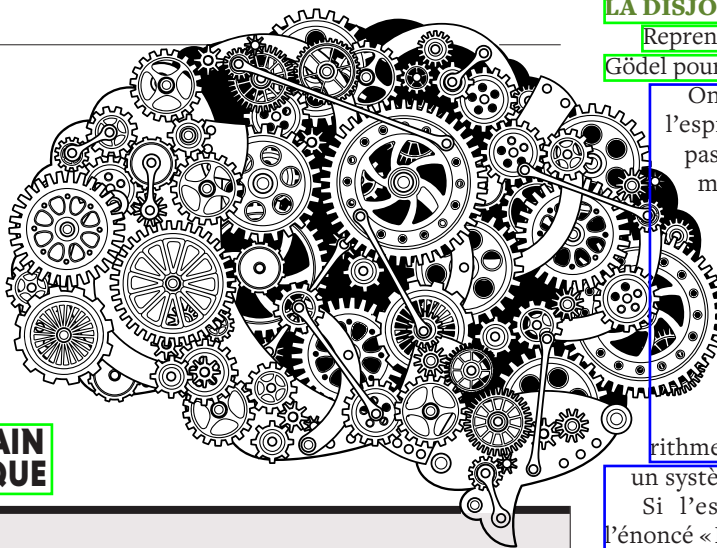
un système formel.

Si l'esprit humain est mécanisable, l'énoncé «Le système S_H englobant toutes les vérités mathématiques humainement accessibles est cohérent» sera vrai, car la description d'une réalité est nécessairement cohérente. Pourtant, cette affirmation de cohérence ne sera pas démontrable par ce système, d'après le second théorème d'incomplétude: ce sera donc un indécidable absolu au sens où Gödel l'envisageait, une affirmation mathématique vraie définitivement, mais hors du champ de la pensée mathématique humaine. Il existera donc des indécidables absolus. Cela achève la démonstration de la disjonction de Gödel.

Notons que ce qu'affirme la disjonction est qu'au moins l'une des deux affirmations exprimées est vraie, mais qu'il n'est pas exclu que les deux soient vraies: il se peut qu'il existe des indécidables absolus et que l'esprit mathématique humain ne soit pas mécanisable.

2

L'ESPRIT HUMAIN ALGORITHMIQUE



Dans toute la discussion sur la disjonction de Gödel, on utilise comme acquises les équivalences entre les affirmations :

- (a) l'esprit humain est mécanisable ;
- (b) l'esprit humain est algorithmique ;
- (c) l'esprit humain se réduit à une machine ;
- (d) l'esprit humain est équivalent à un système formel comme les logiciens en considèrent pour définir la notion de démonstration mathématique.

Bien sûr, chaque affirmation demande une discussion et une justification détaillée. Cependant, et c'est aussi l'une des avancées de la philosophie des mathématiques, un accord à peu près unanime a été obtenu pour affirmer que, pour l'essentiel, les affirmations (a), (b), (c) et (d) signifient la même chose. L'un des points importants de la discussion

conduisant à cet accord est ce qu'on nomme la thèse de Church-Turing, selon laquelle la notion mathématique d'algorithme telle que l'informatique l'utilise capte parfaitement le concept de « mécanisable », ou de « faisable par machine ». Concernant les systèmes formels, l'idée que les preuves mathématiquement acceptables doivent être vérifiables mécaniquement justifie la dernière ligne.

Précisons toutefois que, dans toutes ces définitions, on envisage un esprit humain idéalisé disposant d'une mémoire potentiellement infinie et non limitée par le temps.

Par exemple, un simple algorithme de multiplication entre deux entiers n et m exige une mémoire illimitée et un temps non borné si l'on veut qu'il s'applique à tout couple d'entiers n , m sans limitation de taille.

Tous ceux qui se sont penchés depuis 1951 sur la conclusion de Gödel ont reconnu que son raisonnement était imparable. Bien qu'il s'agisse d'une question de nature philosophique, elle est traitée avec suffisamment de rigueur, en s'appuyant sur des résultats indiscutables, pour que toutes les personnes qui comprennent le sens de la disjonction de Gödel l'approuvent.

La question posée est alors: comment déterminer quelle branche de la disjonction doit être considérée comme vraie et, éventuellement, a-t-on des raisons de croire que les deux termes de la disjonction sont vrais? L'affaire est d'importance, car prouver que l'esprit humain n'est pas mécanisable serait une grande avancée, de même qu'établir l'existence d'indécidables absolus.

POUR GÖDEL ET HILBERT, IL N'Y A PAS D'IGNORABIMUS

Gödel avait une préférence pour la solution: «L'esprit mathématique humain n'est pas mécanisable et il n'existe pas d'indécidables absolus.» Sa conception, qu'on désigne sous le terme de réalisme ensembliste, était que nous disposons d'une sorte d'aptitude à percevoir les vérités mathématiques concernant les ensembles et que cela nous donne accès à toutes les vérités mathématiques. Cette capacité à comprendre exige des efforts, mais Gödel pensait qu'à la longue, nous accéderions à toutes les vérités du monde mathématique.

Cette position était celle aussi du grand mathématicien allemand David Hilbert, qui a très explicitement défendu, lors du congrès des mathématiciens tenu en 1900 à Paris, l'idée qu'«il n'existe pas d'*ignorabimus* en mathématiques». En latin, la maxime *Ignoramus et ignorabimus* signifie *Nous ne savons pas et ne saurons jamais*. Hilbert comme Gödel pensaient que toute question mathématique bien posée finit par trouver une réponse.

Toutefois, Gödel, bien que préférant la première branche de l'alternative, reconnaissait qu'il ne disposait pas d'arguments concluants pour l'affirmer. Pour lui, la disjonction était sûre, mais rien ne permettait de préciser la bonne branche de la disjonction.

Depuis bientôt quatre-vingts ans, de nombreuses tentatives ont été menées pour décider entre les deux options. Un colloque réuni récemment à l'université de Bristol a fait le bilan des travaux de logique et des arguments traitant de la disjonction de Gödel. Un ouvrage publié sous la direction de Léon Horsten et Philip Welch en a résulté (voir la bibliographie). Nous en présenterons quelques aspects.

Le raisonnement assez simple suivant, dont diverses versions ont circulé, semble définitivement établir qu'il faut choisir l'option:

3

L'HYPOTHÈSE DE COHÉRENCE

Dans les raisonnements présentés, on suppose que l'esprit humain, au moins quand on ne considère que les mathématiques, est cohérent, c'est-à-dire qu'il ne se contredit jamais. La justification de cette hypothèse est que, par exemple, nous n'avons aucun doute que les entiers existent et que le raisonnement par récurrence « Si l'affirmation P_n est vraie pour $n = 0$ et si $[P_n \text{ implique } P_{n+1}]$ pour tout entier n , alors $[P_n \text{ est vraie pour tout entier positif } n]$ » ne produira jamais aucune absurdité. En raisonnant à partir d'axiomes vrais de toute évidence et de règles de raisonnement sûres telles que le raisonnement par récurrence, nous sommes certains de ne jamais produire de contradiction.

L'hypothèse de cohérence est le plus souvent acceptable: notre compréhension intime des objets mathématiques garantit la non-contradiction de systèmes formels tels que celui de l'arithmétique de Peano. Il faut cependant noter que lorsqu'on s'élève dans la hiérarchie des systèmes formels, la certitude de la cohérence devient discutable. Il se peut parfois qu'on ait le sentiment de concevoir un monde mathématique solide et donc cohérent, alors qu'on est dans l'illusion et que les règles qu'on introduit, bien que cela nous échappe, produisent des contradictions.

C'est arrivé plusieurs fois en mathématiques. Quand Gottlob Frege a conçu pour la première fois un système d'axiomes pour parler des ensembles, il ne doutait pas de sa cohérence et pourtant on y a découvert une contradiction, le paradoxe de Russell (voir <https://plato.stanford.edu/entries/russell-paradox/>).

C'est arrivé aussi avec certains axiomes de grands cardinaux qui semblaient acceptables et dont pourtant Kenneth Kunen a montré en 1971 qu'ils produisaient des absurdités (voir https://en.wikipedia.org/wiki/Kunen%27s_inconsistency_theorem).

Il faut donc se méfier de notre intuition et être extrêmement attentif avant de considérer comme une évidence que de nouveaux axiomes qu'on souhaite adjoindre aux théories acceptées n'y introduisent pas de contradiction.





L'APPROCHE DU MULTIVERS

4

Pour justifier qu'il existe des indécidables absolus, tout en préservant l'idée qu'il existe un univers mathématique indépendant de nous (position réaliste à laquelle nombre de mathématiciens sont attachés), les logiciens ont introduit le concept de « multivers ensembliste ». Le monde mathématique serait composé de parties indépendantes dont les propriétés seraient différentes. Les indécidables absolus seraient les propriétés qui ne sont pas vraies dans toutes les composantes du multivers. Ainsi, l'hypothèse du continu, HC, serait vraie dans certaines composantes et fausse dans d'autres.

Le débat au sujet de la philosophie réaliste des mathématiques a pris la forme d'une opposition entre la position « universiste » qui défend l'existence d'un unique monde ensembliste maximal (on accepte autant qu'on le peut tous les axiomes affirmant l'existence de grands ensembles) et la position « multiversiste » qui imagine une multitude de mondes ensemblistes maximaux différents. Pour

les universistes, dont Gödel aurait sans doute fait partie, il n'y a pas d'indécidable absolu. Pour les multiversistes, l'existence d'indécidables absolus n'est pas ennuyeuse (ce sont les énoncés dont la vérité change d'une composante à l'autre) et, surtout, n'est pas en contradiction avec l'idée d'un réel mathématique. L'incapacité des mathématiciens, depuis plus d'un siècle, à formuler des axiomes naturels qui aient pour conséquence HC ou non-HC est vue comme un argument en faveur du multiversisme.

Le grand logicien

Hugh Woodin, de l'université Harvard, qui n'est pourtant pas un adepte du multiversisme, affirme à ce sujet : « Les raffinements de la méthode de forcing de Cohen depuis sa découverte initiale [pour établir que HC n'est pas démontrable dans ZFC] et la pléthore de problèmes dont on a prouvé grâce à cette méthode qu'ils sont [comme HC] impossibles à résoudre [dans ZFC], ont en pratique presque obligé à adopter la position multiversiste ».

» « L'esprit mathématique humain ne se réduit pas à un algorithme. »

- Si l'esprit humain était une machine, les vérités mathématiques qu'il accepte et acceptera seraient les théorèmes d'un système formel cohérent S_H (indice H pour *humain*). Mais l'être humain ne doute pas que sa conception mathématique est cohérente, car il n'accepte de n'y mettre que ce dont il est absolument certain. Il serait donc convaincu que $Cohé(S_H)$ est vrai. Cela signifierait que S_H est un système formel qui voit sa propre cohérence, ce qui est en contradiction avec le second théorème d'incomplétude de Gödel, dont la démonstration ne fait aucun doute. Cette contradiction montre que l'esprit humain n'est pas mécanisable.

DES RAISONNEMENTS POUR MONTRER QUE L'ESPRIT HUMAIN N'EST PAS UNE MACHINE

Ce type de raisonnement est assez convaincant et apparaît aussi rigoureux que celui conduisant à la disjonction de Gödel. L'argument a été formulé la première fois par le philosophe britannique John Randolph Lucas. Plus récemment, des variantes du raisonnement ont été défendues par le physicien et mathématicien britannique Roger Penrose. En utilisant deux formulations différentes, ce dernier maintient que des preuves incontestables démontrent que l'esprit humain n'est pas une machine. Pourquoi donc Gödel serait-il passé à côté de tout cela ?

Une explication de cette étrangeté a été proposée par le philosophe américain Paul Benacerraf. Pour que le mathématicien puisse produire l'indécidable affirmant sa propre cohérence, fait-il remarquer, il faudrait qu'il sache quel système formel exactement exprime la pensée mathématique humaine. Il faudrait donc qu'il dispose d'une capacité introspective parfaite, ce qui est difficile à imaginer.

Même si nous sommes équivalents à une machine, même si nous produisons une pensée mathématique claire sur laquelle nous n'avons pas de doute, nous faisons cela sans savoir quelles règles nous appliquons précisément, donc sans savoir quelle machine nous sommes. L'identification de nouveaux axiomes acceptables qui se produit de temps en temps ajoute de nouvelles règles et ce processus semble imprévisible, du moins pour nous, ce qui montre que nous ignorons quelle machine nous sommes, même si nous en sommes une. En conséquence, nous ne pouvons pas désigner précisément la formule qui affirme la cohérence de notre pensée mathématique. Il n'y a alors aucune contradiction entre le second théorème d'incomplétude et l'hypothèse que nous sommes mécanisables.

Aujourd'hui, une grande majorité des logiciens et philosophes des mathématiques s'accordent sur cette critique fatale aux raisonnements de type Lucas. Il est probable que Gödel ait analysé et éliminé les arguments de type Lucas, et c'est pourquoi il n'a jamais reconnu comme acquise la première option de sa disjonction, qu'il préférerait pourtant.

L'hypothèse du continu est un indécidable absolu, si l'on accepte la définition de Feferman

BIBLIOGRAPHIE

M. Rathjen, **Indefiniteness in semi-intuitionistic set theories : On a conjecture of Feferman**, *Journal of Symbolic Logic*, vol. 81(2), pp. 742-754, 2016.

L. Horsten et P. Welch (éd.), **Gödel's Disjonction**, Oxford University Press, 2016.

J. Väanänen, **Multiverse set theory and absolutely undecidable propositions**, 2014 (<http://bit.ly/2nTt2UT>).

J. D. Hamkins, **The set-theoretic multiverse**, *The Rev. of Symbolic Logic*, vol. 5(3), pp. 416-449, 2012.

S. Feferman, **Is the continuum hypothesis a definite mathematical problem ?**, 2011 (<http://bit.ly/2CkzyIB>).

P. Dehornoy, **Au-delà du forcing : la notion de vérité essentielle en théorie des ensembles**, dans *Logique, dynamique et cognition*, J.-B. Joinet (éd.), Éditions de la Sorbonne, 2007 (<http://bit.ly/2o72PkR>).

L'autre option que certains mathématiciens et philosophes considèrent bien plus sérieuse est que des vérités mathématiques nous seront toujours inaccessibles. Plusieurs énoncés candidats ont été discutés et certains pourraient être des indécidables absolus. L'un des principaux candidats est l'« hypothèse du continu », énoncée par Georg Cantor en 1878 (voir l'encadré 1).

Certains axiomes affirmant l'existence d'ensembles très grands (on appelle cela les axiomes de grands cardinaux) sont considérés comme naturels et les mathématiciens sont prêts à les ajouter à ceux de ZFC. Ces axiomes renforcent le pouvoir de démonstration de la théorie des ensembles usuelle et constituent un progrès conforme à ce que Gödel attendait : un enrichissement du monde mathématique accessible à l'esprit humain.

Malheureusement, le mathématicien américain Paul Cohen a montré en 1963 que ces axiomes de grands cardinaux n'ont pas d'effet sur l'hypothèse du continu, qui reste donc indécidable même s'ils sont pris en compte. D'autres travaux, menés il y a une dizaine d'années par l'Américain Hugh Woodin, laissent entrevoir que l'hypothèse du continu pourrait être fausse. Une logique d'un type nouveau, nommée Ω -logique, et une conjecture jugée plausible, la Ω -conjecture, conduisent en effet à la négation de l'hypothèse du continu. On ne peut cependant pas conclure que la question est réglée, puisque la méthode ne fait pas l'unanimité chez les théoriciens des ensembles et que, de plus, la Ω -conjecture n'est pas établie.

Au total, plus d'un siècle après la formulation de l'hypothèse du continu par Cantor, l'esprit mathématique est resté impuissant à savoir ce qu'il en est. Il est donc plausible que nous ayons là un indécidable absolu. De nouveaux arguments sérieux vont d'ailleurs dans ce sens.

En effet, en utilisant une logique de type intuitionniste, c'est-à-dire qui adopte une attitude prudente concernant les énoncés impliquant l'infini, le logicien américain Solomon Feferman (mort en 2016) a proposé en 2011 une définition précise de la notion d'énoncés mathématiques bien définis, c'est-à-dire dont l'esprit mathématique humain doit pouvoir décider de la vérité ou de la fausseté.

Cette approche autorise un traitement rigoureux de la notion de vérité mathématique accessible à l'esprit humain et fournit un outil pour une éventuelle démonstration qu'il existe des indécidables absolus. Moyennant cette notion, Feferman espérait prouver que l'hypothèse du continu est un indécidable absolu, mais il n'y parvint pas. C'est chose faite aujourd'hui : en 2016, Michael Rathjen, de l'université de Leeds, en Angleterre, a prouvé que si l'on admet la définition introduite par Feferman, l'hypothèse du continu est un indécidable absolu.

On ne peut considérer que le problème soit définitivement réglé (il faudrait pour cela que tous les mathématiciens acceptent l'analyse de la notion d'indécidable absolu proposée par Feferman). Toutefois, on constate encore une fois que, en réussissant à rendre précises et purement mathématiques des questions philosophiques, la logique permet de progresser.

DES MONDES MATHÉMATIQUES MULTIPLES ?

Une autre approche se fonde sur l'idée du multivers (voir l'encadré 4) parfois prise très au sérieux en physique. Le monde mathématique, comme le monde physique, ne serait pas unique : il en existerait plusieurs versions. Par exemple, dans certains de ces univers mathématiques parallèles, l'hypothèse du continu serait vraie, tandis qu'elle serait fausse dans les autres. Notre intuition mathématique nous donnerait accès uniquement aux vérités communes à tous ces univers. Les indécidables absolus seraient alors les énoncés mathématiques dont le statut, vrai ou faux, change d'une branche du multivers à l'autre.

On a le plaisir de découvrir qu'au moins pour ce qui concerne sa partie relative aux mathématiques, la philosophie, grâce à Gödel et à ses successeurs, est une discipline en progrès où les énigmes, aussi profondes soient-elles, sont susceptibles d'être résolues... même si cela prend beaucoup de temps. ■

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*



LE PANTONE DE DARWIN



Charles Darwin avait avec lui un dictionnaire des couleurs qui l'a aidé à décrire le monde. L'ouvrage, dû à un peintre et botaniste écossais, s'inspirait des travaux d'un minéralogiste allemand.

« L'eau était d'un Pantone 281 teinté d'un peu de Pantone 286, tandis que le ciel, au-dessus, était d'un Pantone 5395 mêlé d'un peu de Pantone 288. »

Ainsi Charles Darwin aurait-il pu décrire les belles couleurs qu'il apercevait, à travers les fentes de son chapeau de paille, près des îles Abrolhos, au large de l'État brésilien de Bahia. C'était à la fin mars 1832 ; le naturaliste était à bord du *H.M.S. Beagle* depuis trois mois.

Darwin aurait pu s'exprimer de la sorte s'il avait eu connaissance du système Pantone de spécification des couleurs, en vigueur aujourd'hui dans l'imprimerie, l'industrie du textile, celle

des plastiques... Mais ce nuancier de référence des couleurs normalisées n'est apparu que durant la seconde moitié du ^{xx}e siècle. Darwin s'est donc contenté de : « L'eau était indigo teinté d'un peu d'azur, tandis que le ciel, au-dessus, était bleu Berlin [un bleu de Prusse délavé] avec un peu d'outremer. »

Pour autant, le choix des mots pour désigner les couleurs n'était pas aussi imprécis et laissé à l'appréciation de l'auteur qu'on peut l'imaginer. De fait, dès qu'il s'agissait de décrire une couleur, Darwin utilisait un guide pratique intitulé *Werner's Nomenclature of Colours*, soit, en français, *La Nomenclature des couleurs de Werner* (voir l'illustration page ci-contre). Les notes, journaux et œuvres du père de la théorie de l'évolution sont remplis de termes issus de l'ouvrage.

A une époque où la photographie n'existait pas, un tel outil était indispensable pour rendre compte de façon réaliste des spécimens d'animaux, de plantes ou de minéraux collectés pendant le voyage. Des mots sur lesquels tout le monde s'entend, c'est-à-dire un

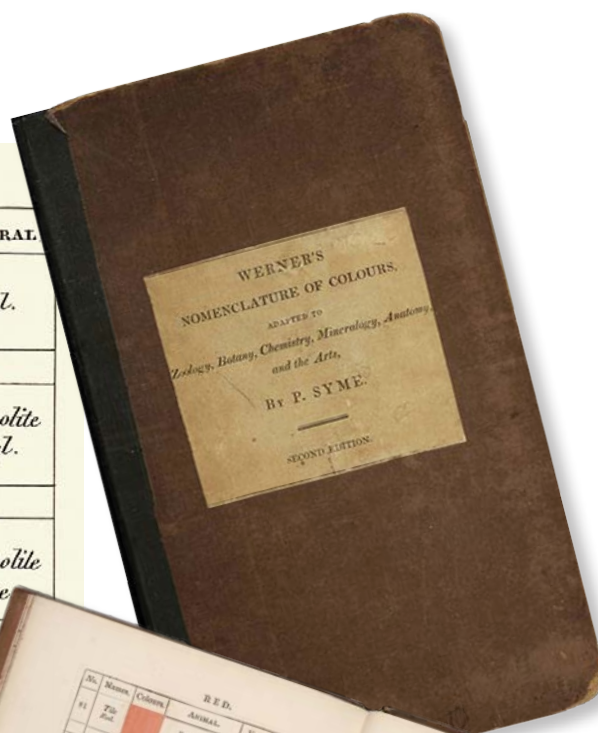
La Nomenclature des couleurs de Werner répertorie plus d'une centaine de couleurs et détaille où on peut les voir dans les mondes animal, végétal et minéral.

vocabulaire commun, permettaient de lutter contre l'atténuation inéluctable, voire la disparition des couleurs avec le temps, surtout celles d'animaux morts et de plantes coupées.

La Nomenclature des couleurs de Werner a été publiée en 1814 par un artiste écossais nommé Patrick Syme. Il s'appuyait sur les travaux menés à la fin du ^{xvii}e siècle par Abraham Gottlob Werner (1749-1817), professeur à l'École des mines de Freiberg, dans l'ouest de l'Allemagne, en Saxe. Dans son livre *Von den äußerlichen Kennzeichen der Fossilien* (« Des caractéristiques externes des fossiles »), paru en 1774, le géologue développa une nomenclature des couleurs destinée à faciliter la description et la classification des minéraux. Plusieurs des termes inventés par Werner sont encore en usage aujourd'hui.

GREENS.

N°	Names	Colours	ANIMAL	VEGETABLE	MINERAL
46	<i>Celandine Green.</i>		<i>Phalena. Margaritaria.</i>	<i>Back of Tus-silage Leaves.</i>	<i>Beryl.</i>
47	<i>Mountain Green.</i>		<i>Phalena Viridaria.</i>	<i>Thick leaved Cudweed, Silver leaved Almond.</i>	<i>Actynolite Beryl.</i>
48	<i>Leek Green.</i>			<i>Sea Kale. Leaves of Leeks in Winter.</i>	<i>Actynolite Prase.</i>
49	<i>Blackish Green.</i>		<i>Elytra of Meloe Violaceus.</i>	<i>Dark Streaks on Leaves of Cayenne Pepper.</i>	<i>Serp.</i>
50	<i>Verdigris Green.</i>		<i>Tail of small Long-tailed Green Parrot.</i>		
51	<i>Bluish Green.</i>		<i>Egg of Thrush.</i>	<i>Under Disk Wild Rose L.</i>	
52	<i>Apple Green.</i>		<i>Under Side of Wings of Green Broom Moth.</i>		
53	<i>Emerald Green.</i>		<i>Beauty Spot on Wing of Teal Drake.</i>		<i>Emerald.</i>



Fasciné par l'ouvrage, Patrick Syme entreprit de le traduire et même de l'enrichir à partir de ses propres connaissances. Peintre et botaniste auprès de plusieurs sociétés savantes d'Édimbourg, il a élargi le système, cantonné aux minéraux dans sa version originale, aux organismes vivants, animaux et végétaux.

Il en résulte un ouvrage répertoriant plus d'une centaine de couleurs. Chacune y est d'abord nommée, puis montrée sur un petit carré peint et enfin documentée: les animaux, les végétaux et les minéraux arborant cette couleur sont listés. Par exemple, le bleu de Prusse (Pantone 5395) se retrouve sur le miroir des colverts (la zone bleu-violet des ailes), sur les étamines des anémones bleu-pourpre et dans l'azurite (un carbonate de cuivre).

En la personne du plus célèbre des naturalistes, *La Nomenclature des couleurs de Werner*, de Patrick Syme, a eu la meilleure publicité que l'on puisse imaginer. Mais elle n'était qu'un exemple parmi les nombreuses taxonomies des couleurs proposées en Europe au XIX^e siècle pour quiconque souhaitait décrire la nature.

D'ailleurs, la classification des couleurs proposée par la société Pantone plonge ses racines dans l'un de ces ouvrages qui fleurissaient à cette époque, en l'occurrence, la *Nomenclature of Colors for Naturalists and Compendium of Useful Information for Ornithologists*, une nomenclature des couleurs élaborée en 1886 par l'Américain Robert Ridgway pour les ornithologues.

Aujourd'hui, vous pouvez emboîter le pas de Darwin et utiliser *La Nomenclature des couleurs de Werner* lors de vos promenades dans la nature, car la Smithsonian Institution a eu la bonne idée d'en publier un fac-similé. Vous pourrez alors traquer le vert asperge, le rouge sang artériel, le gris français, le noir de velours, le blanc lait écrémé... ■

Le site du fac-similé:
<http://bit.ly/2oKBeHf>
 L'ouvrage de Patrick Syme en pdf:
<http://bit.ly/2oV38zw>



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

COMMENT CUIRE UN ŒUF D'AUTRUCHE ?

Un œuf d'autruche a une taille à peu près triple de celle d'un œuf de poule. Sa cuisson devrait-elle être trois fois plus longue ? On est loin du compte, et la façon dont diffuse la chaleur explique pourquoi.

Pour cuire à la coque un œuf de poule d'environ 4,5 centimètres de largeur, il faut le plonger 3 minutes dans l'eau bouillante. Quelle doit alors être la durée de cuisson pour un œuf d'autruche qui fait 13-15 centimètres de diamètre ? Faut-il choisir une durée proportionnelle à la taille, c'est-à-dire une durée environ 3 fois plus longue, soit 9 minutes, ou au poids, c'est-à-dire une durée environ $3^3=27$ fois plus longue, soit 81 minutes ?

Ni l'une ni l'autre : on conseille 35 à 40 minutes ! Ce choix résulte de la nature du phénomène physique en jeu dans cette cuisson, à savoir la diffusion de la chaleur, et de l'une de ses propriétés particulières : le temps pour qu'une variation de température se transmette d'un endroit à un autre augmente comme le carré de la distance à parcourir.

Que se passe-t-il lorsqu'on cuit un œuf ? Celui-ci est constitué d'un blanc et d'un jaune dont les protéines coagulent

à environ 60°C (respectivement 62°C et 68°C pour l'œuf de poule). La cuisson est donc pilotée par le profil de température au sein de l'œuf et son évolution au cours du temps. Pour réaliser l'œuf « parfait », cher au gastronome moléculaire Hervé This, il suffit de plonger l'œuf dans de l'eau maintenue à 65°C et d'attendre assez longtemps pour que tout l'intérieur ait atteint cette température. Celle-ci étant comprise entre les températures de coagulation du blanc et du jaune, le premier coagule, mais pas le second.

ATTEINDRE LA BONNE TEMPÉRATURE

Pour un œuf d'autruche « parfait », il faudrait le plonger plusieurs heures dans un bain-marie. On se contentera donc de le cuire à la coque dans de l'eau bouillante ; mais pendant combien de temps ?

L'œuf étant déjà un objet complexe pour un physicien (une coquille, un blanc, un jaune...), commençons par le cas plus simple... d'une pomme de terre épluchée !

Le temps de cuisson des aliments dépend de leur taille. Il dépend aussi de leur forme, à poids ou volume égal.

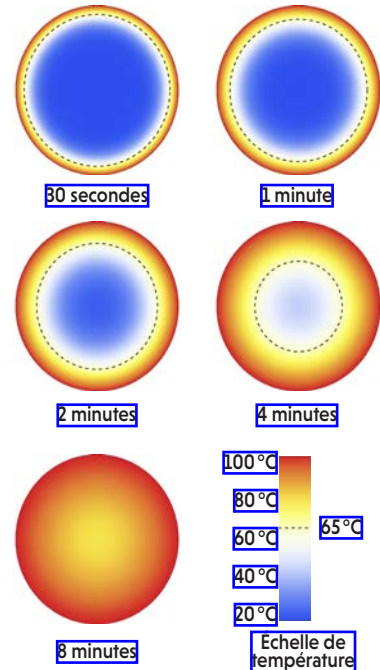
Dans ce cas, la température qui pilote la cuisson est 65°C, valeur à laquelle les grains d'amidon de la patate se désagrègent et absorbent l'eau. Expérimentalement, on s'aperçoit qu'il faut 4 minutes à 100°C pour cuire un tout petit cube de pomme de terre, tandis qu'au-delà de 16 minutes, le morceau se désagrége complètement. Qu'en est-il avec une pomme de terre entière ?

Pour comprendre la physique mise en jeu, rappelons-nous que la température est une mesure du degré d'agitation des molécules. La température est proportionnelle à l'énergie cinétique moyenne de translation des atomes ou molécules ; on a alors



AU SEIN D'UNE PATATE CHAUDE

Connaissant la diffusivité thermique de la pomme de terre, on peut calculer, en fonction du temps, l'évolution de la température au sein d'une patate sphérique, initialement à 20 °C et plongée dans de l'eau bouillante (100 °C). Cette évolution est montrée ici pour une pomme de terre de 4 centimètres de diamètre. La ligne pointillée représente le front à 65 °C. Sa progression, lente au début, s'accélère à mesure que le front se rapproche du centre.



une correspondance entre «lent» et «froid», ou entre «rapide» et «chaud».

Aussi, lorsqu'on met en contact deux corps portés à des températures différentes, les molécules rapides du corps chaud entrent en collision avec les molécules plus lentes du corps froid et leur cèdent une partie de leur énergie. Le milieu s'échauffe de proche en proche, avec un flux d'énergie allant des régions chaudes aux régions froides. Ce flux est proportionnel à la différence de température par unité de longueur et à un coefficient, la «conductivité thermique» du matériau, qui est d'autant plus élevé que ce dernier conduit bien la chaleur.

Pour comprendre comment les températures évoluent, suivons pas à pas ce qui se passe quand on plonge un corps froid (la patate) dans une source chaude (de l'eau bouillante). Au tout début, la différence de température entre le corps et la source chaude est considérable et le flux d'énergie du chaud vers le froid est intense.

UN TRANSFERT D'ÉNERGIE DE MOINS EN MOINS EFFICACE

Mais contrairement à une onde mécanique, toute l'énergie n'est pas transmise, car une partie sert à échauffer la région en contact direct avec la source. Cette part, qui ralentit la hausse de température des

régions situées au-delà, sera d'autant plus importante que le matériau peut stocker de l'énergie thermique, c'est-à-dire que sa capacité calorifique est élevée.

L'écart brutal de température entre le corps froid et la source chaude laissera donc place à un profil de température moins abrupt au voisinage de la surface de contact (voir l'encadré ci-dessus). Du coup, le flux d'énergie va diminuer, car les

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



différences d'énergie entre molécules seront moindres. Peu à peu, des couches de plus en plus profondes du matériau froid s'échaufferont, mais le profil de température sera de plus en plus doux et le flux d'énergie depuis la source chaude de plus en plus réduit: l'évolution en température sera ainsi de plus en plus lente.

On prédit ainsi qu'au voisinage d'une surface de contact plane, la profondeur atteinte par la variation de la température en surface croît comme la racine carrée du double du produit du temps écoulé par la «diffusivité thermique» (rapport entre la conductivité thermique du matériau et sa capacité calorifique par unité de volume).

Le scénario qui précède est certes simplifié, mais il traduit bien ce qui se passe dans les matériaux où les mouvements d'ensemble des molécules ou les écoulements sont très limités. C'est le cas des aliments, au moins en première approximation, malgré la forte présence d'eau.

Pour obtenir des estimations raisonnables, il faut pouvoir prédire l'évolution de la température au cœur de l'aliment et la mettre en relation avec la ou les températures de transformation.

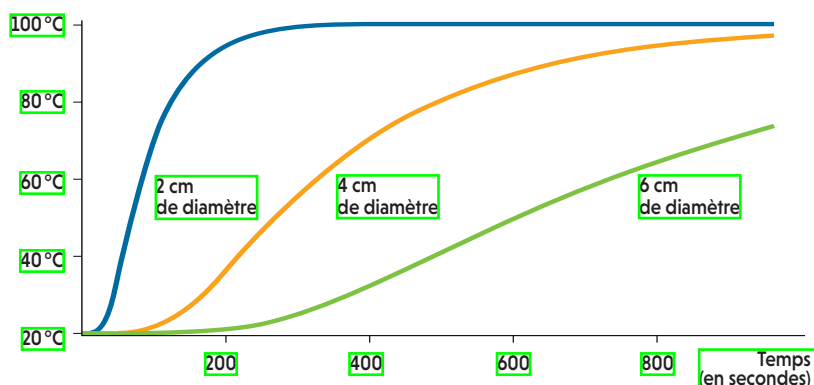
Pour une pomme de terre, la diffusivité mesurée est d'environ $1,7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. À partir de cette valeur, on peut calculer l'évolution de la température au cours du temps dans la patate en fonction de sa taille (voir les deux encadrés). On constate, comme attendu, que l'avancée du front de température au début de la cuisson est lente. Mais ce front progresse bien plus rapidement lorsqu'il atteint les couches plus profondes, car il y a de moins en moins de matière à chauffer à mesure que le front se rapproche du centre.

On comprend aussi aisément le problème posé par les grosses pommes de terre: à partir d'une certaine taille, la durée nécessaire pour que le centre atteigne la bonne température et se mette à cuire dépasse 16 minutes; or au bout de ces 16 minutes, la couche externe du tubercule commence à se désagréger, c'est-à-dire à être trop cuite! Les simulations permettent de déterminer la taille limite des morceaux: elle est de l'ordre de 3 centimètres. À vos couteaux, donc, si vous voulez réussir vos patates à l'eau!

Dans le même registre, on peut mentionner la cuisson des rôtis de viande, pour laquelle une prescription du genre «un quart d'heure par livre» est, au mieux, très approximative. L'expérience montre que, pour un même poids ou volume, la cuisson des rôtis longs et de faible diamètre est plus rapide que pour des pièces de viande plus

AU CENTRE DE LA POMME DE TERRE

Ces courbes représentent, en fonction du temps, la température au centre d'une pomme de terre sphérique, de température initiale 20°C et plongée dans de l'eau bouillante, pour trois valeurs différentes du diamètre. On constate que pour une pomme de terre assez grosse, la hausse de la température au centre démarre tardivement. À cet endroit, pour une pomme de terre de 6 centimètres de diamètre, la température minimale de cuisson (65°C) n'est ainsi atteinte qu'au bout d'environ 800 secondes, soit plus de 13 minutes. Quand le cœur de cette pomme de terre sera cuit, sa couche externe le sera trop...



compactes. En effet, plus le diamètre est petit, plus la durée requise pour que le cœur de l'aliment atteigne la bonne température est courte. En revanche, le temps de cuisson d'un rôti plus long, mais de même diamètre, ne change pas beaucoup.

Et pour les œufs d'autruche? *A priori*, pas besoin de longs calculs, puisqu'on connaît déjà la durée de cuisson pour un œuf de poule et que l'on peut utiliser ce que les physiciens nomment une loi d'échelle. La durée de cuisson d'un œuf à la coque est déterminée par le temps nécessaire pour que tout le blanc ait atteint la bonne température, jusqu'à la frontière avec le jaune. Les œufs ayant tous à peu près la même forme, ce temps reste proportionnel au carré de leur taille.

UN TEMPS PROPORTIONNEL AU CARRÉ DE LA TAILLE

On peut vérifier cette loi par exemple avec le temps de cuisson de l'œuf de caille (30 secondes pour un œuf large d'environ 2 centimètres). Si on l'applique à l'œuf d'autruche, 3 fois plus large que l'œuf de poule, on s'attend à une durée de cuisson multipliée par $3^2=9$, soit de l'ordre de 30 minutes, pas si loin de la valeur recommandée. Mais l'estimation est un peu basse. Pourquoi? Est-ce dû aux différences de composition des deux types d'œuf? Ou à l'effet d'un œuf d'autruche (1,5 kilogramme!) sur la température de l'eau de cuisson ou son homogénéisation dans le récipient? Nous laissons cette question à la sagacité de nos lecteurs! ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Roura et al., **How long does it take to boil an egg? A simple approach to the energy transfer equation**, *European Journal of Physics*, vol. 21, pp. 95-100, 2000.

P. M. Derbyshire et I. Owen, **Transient heat transfer in a boiled potato: A study related to food process engineering**, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 9(2), pp. 254-256, 1988.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE

POUR LA
SCIENCE



COMPLÉTEZ VOTRE
COLLECTION SUR
boutique.pourlascience.fr



L'AUTEUR



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

UN PARESSEUX GÉANT AU FOND DES MERS

Durant 4 millions d'années, un groupe de paresseux géants s'est peu à peu adapté à une vie semi-aquatique. Un exemple remarquablement documenté d'évolution graduelle.

Hormis les girafes et certains singes, tous les mammifères sont capables de nager. En revanche, rares sont ceux réellement adaptés à la vie aquatique. La plupart, notamment, ne savent que pagayer de leurs quatre membres. C'est le cas des paresseux actuels, mammifères arboricoles d'Amérique du Sud, qu'ils aient deux doigts (unauis) ou trois (aïs). Bien que bons nageurs, capables de traverser un bras de mer à l'appel d'une femelle, ils descendent rarement de leurs arbres, où ils se nourrissent de feuilles, de fruits et d'insectes. Pourtant, des fossiles découverts au Pérou en 1995 ont récemment révélé que d'anciens cousins géants des paresseux vivaient principalement au fond de l'eau, où ils broutaient comme des lamantins – les «vaches des mers» – et s'y déplaçaient... en marchant.

Ces travaux auraient enthousiasmé Charles Darwin. C'est en effet un fossile de paresseux géant qui l'a mis sur le chemin

de la biologie évolutive. Durant l'automne 1832, lors de son voyage à bord du *Beagle*, Darwin découvrit un étonnant gisement de fossiles géants à Punta Alta, près de Buenos Aires. Il crut reconnaître notamment, dans une mâchoire avec une dent, les restes d'un *Megatherium*, un genre de paresseux géant éteint du début du Pliocène (il y a environ 5,3 millions d'années) décrit quelques dizaines d'années plus tôt par le naturaliste français Georges Cuvier. Et il rapporta nombre d'ossements fossilisés. Au retour du *Beagle* en Grande-Bretagne, l'anatomiste britannique Richard Owen y reconnut des vestiges non seulement de *Megatherium*, mais de divers paresseux géants d'espèces cousines.

Darwin se mit alors à méditer sur la répartition spatiotemporelle des paresseux actuels et fossiles. Les paresseux actuels sont de petits animaux arboricoles; les fossiles, des restes d'animaux terrestres et géants. Les premiers vivant sur le même continent que les seconds, mais pas au même moment, il était vraisemblable que les paresseux actuels soient

La queue était musculeuse, comme en témoigne la largeur des vertèbres. Elle ne servait pas à la nage, mais à la stabilisation de l'animal.



Le fémur a acquis une plus grande mobilité, ce qui permet une nage «petit chien» et une locomotion plantigrade sur les fonds marins.

L'animal se nourrissait d'herbes et d'algues marines.

EN CHIFFRES

6

Ses trois doigts munis de longues griffes l'aidaient à s'agripper au sol sous-marin et à déterrer les plantes aquatiques.

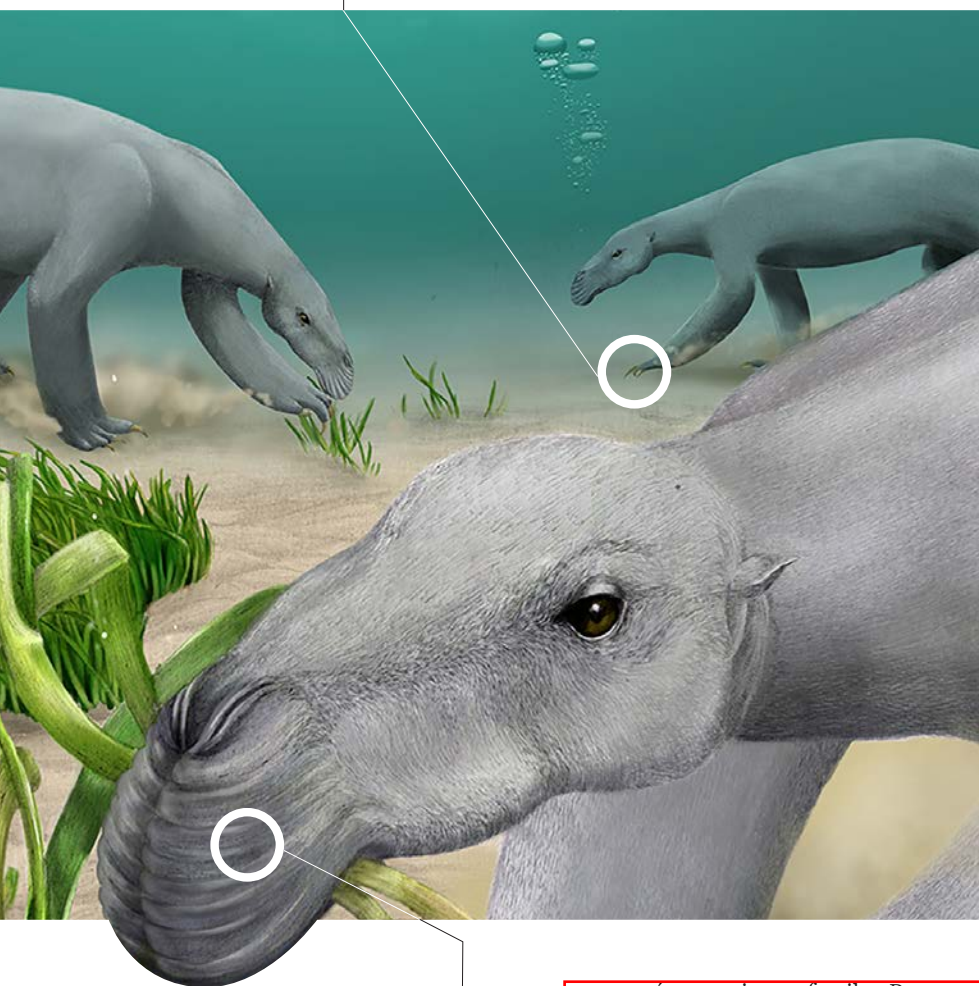
mètres de long, 4 tonnes, des griffes de 30 centimètres, telles étaient les caractéristiques de *Megatherium americanum*, l'espèce de paresseux géant terrestre que décrivit Georges Cuvier à la fin du XVIII^e siècle.

80

centimètres de long pour 6 kilogrammes : le paresseux à gorge brune (*Bradypus variegatus*), le cousin actuel à trois doigts des *Megatherium* et des *Thalassocnus* (eux aussi tridactyles) ne dépasse pas... leur queue.

2,5

mètres, dont 85 centimètres de queue. Avec une telle longueur, *Thalassocnus natans* paraissait légèrement plus petit que son cousin plus récent, *T. yaucensis*, long d'environ 3 mètres.



Une mâchoire supérieure allongée et élargie en spatule, une lèvre supérieure probablement puissante comme celle des lamantins et des narines en hauteur : autant de caractéristiques utiles pour brouter sous l'eau.

apparentés aux animaux fossiles. Pourtant, ils présentaient bien des différences, ce qui signifiait qu'au cours du temps, des modifications héréditaires s'étaient produites. Darwin nomma cette hypothèse la « descendance avec modification ». Elle devint un des piliers de sa théorie de l'évolution. Il ne se doutait pas, cependant, que l'histoire des paresseux n'était pas terminée, et qu'un nouveau genre de paresseux, mis au jour en 1995, illustrerait à merveille son hypothèse.

Cette année-là, Christian de Muizon, alors à l'Institut français d'études andines, à Lima, et Gregory McDonald, du Hagerman Fossil Beds National Monument, aux États-Unis, publient la découverte d'un

« paresseux aquatique » (*Thalassocnus natans*) au Pérou. La nouvelle fait sensation. Le groupe des paresseux est alors bien décrit : on sait que l'ancêtre commun aurait vécu il y a environ 40 millions d'années et aurait évolué en deux, puis cinq familles : trois de paresseux géants terrestres aujourd'hui disparus et deux de paresseux plus petits et arboricoles – ceux que nous connaissons. L'animal découvert est certes un paresseux, mais pourquoi aquatique ?

Parmi phoques et dauphins

Les premiers indices avancés sont indirects, mais convaincants. Le gisement – des sédiments remontant au Pliocène – correspond à une plage fossile, avec des vertébrés marins en grande abondance : poissons, oiseaux, crocodiles... Le seul mammifère pouvant être considéré terrestre est justement *T. natans*. Ses squelettes sont plus nombreux que ceux des phoques ou des dauphins, de l'ordre de ceux des manchots. Or, depuis le milieu du Miocène, l'époque géologique qui a précédé le Pliocène, la côte péruvienne est un désert. Ces animaux végétariens se nourrissaient donc très probablement en mer ou à proximité, dans un habitat au moins semi-aquatique. Par ailleurs, leur squelette présente des similarités avec ceux de mammifères semi-aquatiques comme les lamantins, les otaries et les castors (voir l'encadré page 94). *T. natans* devait donc brouter des herbes ou des algues marines, le corps immergé.

Depuis, l'équipe de Christian de Muizon (désormais au Muséum national



Thalassocnus yaucensis
Longueur : 3 mètres environ

d'histoire naturelle, à Paris) a trouvé quatre autres espèces de paresseux marins, classées dans le même genre, mais avec des différences anatomiques significatives. L'analyse phylogénétique les situe dans un même taxon, proche des *Megatherium*. De plus, les cinq espèces de *Thalassocnus* se hiérarchisent de manière temporelle du Miocène au Pliocène, avec deux espèces anciennes, *T. antiquus* et *T. natans*, et deux bien plus récentes, *T. yaucensis* et *T. carolomartini*. Cela permet de suivre l'évolution de certains caractères adaptatifs précis qui étaient les premières déductions sur l'écologie de *T. natans*.

OS DENSES ET GROS POUMONS

Les vertébrés tétrapodes retournés à la vie aquatique – tortues, cétacés, pinnipèdes (phoques, otaries...), siréniens (lamantins, dugongs)... – présentent tous, à un degré plus ou moins fort, un squelette très dense, façonné par la pachyostose et l'ostéosclérose. La pachyostose est une augmentation du dépôt du périoste, le tissu à la périphérie des os; le volume des os s'accroît, ce qui altère parfois leur morphologie. L'ostéosclérose a pour moteur l'inhibition du renouvellement osseux, entraînant le remplissage de la cavité centrale des os. Le squelette acquiert ainsi une compacité qui devient avantageuse pour les animaux marins.

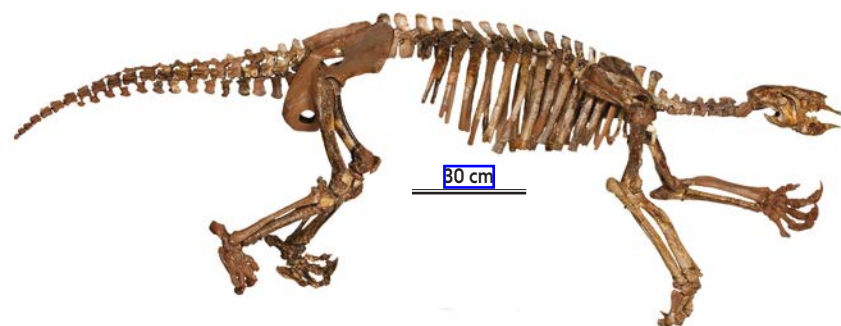
La plupart des vertébrés terrestres doivent dépenser de l'énergie pour s'enfoncer sous la surface de l'eau. La densification du squelette permet aux animaux aquatiques d'y parvenir sans effort. Étant des animaux à respiration aérienne, ils acquièrent des poumons à volume important, ce qui augmente leur temps de plongée. Or l'augmentation du poids de la cage thoracique autorise et contrebalance celle du volume des poumons. La densification des côtes régule aussi la position hydrostatique de l'animal, qui a tendance à être oblique, la tête vers le haut. Une telle densification s'observe surtout chez les animaux vivant en eaux peu profondes, car elle leur permet d'y rester stationnaires.

Les cinq espèces de *Thalassocnus* qui se succèdent temporellement illustrent cette spécialisation graduelle du squelette: l'ostéosclérose et la pachyostose s'accroissent au cours des temps géologiques, avec une adaptation à la vie aquatique qui se perfectionne sur un intervalle de temps court, de l'ordre de 4 millions d'années.

Avec les fourmiliers et les tatous, les paresseux constituent le superordre des xénarthres. Or la densification osseuse de ces animaux à habitat terrestre, surtout

UN BROUTEUR DES MERS

Plusieurs indices suggèrent que *Thalassocnus natans* brouvait des herbes sous-marines. Son crâne, comparé à celui des autres paresseux, présente des différences qui prennent sens dans ce contexte: le prémaxillaire (partie antérieure de la mâchoire supérieure) est allongé, avec une extrémité spatulée et une structure spongieuse, signe d'une riche irrigation, comme dans la lèvre supérieure puissante des siréniens (lamantins, dugongs). La proportion fémur/tibia et l'insertion du fémur sur le bassin confèrent une plus grande mobilité à la patte postérieure, ce qui autorisait une nage « petit chien » et une marche sur le fond marin. Enfin, l'anatomie des vertèbres caudales, larges et laissant passer des vaisseaux sanguins de grand diamètre, prouve que la queue était très musculeuse. Elle ne servait pas au déplacement, mais contribuait à la stabilisation de l'animal lors de la nage ou de la marche.



les paresseux et les fourmiliers, est bien supérieure à celle des autres mammifères. Pourtant, l'os, plus cassant, semble un désavantage en milieu aérien. On assiste donc ici à un phénomène d'exaptation, au sens que le paléontologue américain Stephen Jay Gould lui a donné: « Un caractère [ici la densification osseuse] coopté pour un nouvel usage [faciliter la vie subaquatique]. »

Les différences les plus spectaculaires entre les espèces les plus récentes de *Thalassocnus* et les autres sont l'allongement des prémaxillaires et l'élargissement de l'extrémité du crâne en une spatule, avec de puissantes lèvres facilitant le brouillage. Le radius s'aplatit aussi, ressemblant à celui des phoques et otaries. Un indice, subtil mais convaincant, concerne les rayures des dents, dues aux grains de sable que l'animal ingère avec sa nourriture. Or elles sont plus nombreuses chez les espèces anciennes. Celles-ci devaient brouiller sur la plage ou en eau peu profonde et agitée, tandis que les espèces récentes devaient, comme les lamantins, plonger plus profond et atteindre des eaux plus calmes.

Ces animaux ont disparu au cours du Pliocène, sans doute sous l'effet du refroidissement des eaux de la côte Pacifique sud-américaine. Pour qu'ils survivent, il aurait fallu qu'ils acquièrent, comme les cétacés, une épaisse couche de lard sous-cutanée jouant le rôle d'isolant thermique. ■

BIBLIOGRAPHIE

E. Amson *et al.*, **Osteology and functional morphology of the axial postcranium of the marine sloth *Thalassocnus* (Mammalia, Tardigrada) with paleobiological implications**, *J. Mammal. Evol.*, vol. 22, pp. 473-518, 2015.

E. Amson *et al.*, **Gradual adaptation of bone structure to aquatic lifestyle in extinct sloths from Peru**, *Proc. R. Soc. B*, vol. 281, n° 20140192, 2014.

C. de Muizon *et al.*, **The evolution of feeding adaptations of the aquatic sloth *Thalassocnus***, *J. Vertebr. Paleontol.*, vol. 24(2), pp. 398-410, 2004.

C. de Muizon et H. G. McDonald, **An aquatic sloth from the Pliocene of Peru**, *Nature*, vol. 375, pp. 224-227, 1995.

Tous les papiers se recyclent,
alors trions-les tous.

**C'est aussi
simple à faire
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage
des papiers avec Ecofolio.



L'AUTEUR



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

DES QUENELLES QUI GONFLENT BIEN

Quelles sont les meilleures conditions pour faire gonfler les quenelles? Pour le savoir, il suffit de se rappeler que le mécanisme de leur gonflement est le même que celui des soufflés.

Les solutions imaginées pour faire gonfler les quenelles sont innombrables: cuissons dans une sauce légère ou, au contraire, dans une sauce épaisse; pochage préalable dans l'eau, puis cuisson dans un four, en plat à gratin; ingrédients et ustensiles très froids; présence de crème, ou de crème fouettée, ou de panade (de la farine empesée, avec eau et beurre) additionnée d'œufs... Tout y passe et nos amis cuisiniers mettent dans la même question des préparations différentes: des godiveaux, des panades aux œufs ou des préparations hybrides.

Voyons d'abord la terminologie. Les godiveaux sont obtenus par cuisson de pâtes où sont mêlées de la chair animale (viandes, poissons, crustacés) broyée ainsi que de la matière grasse, laquelle peut être de la graisse de bœuf, de rognon de bœuf, du beurre, de la crème.

Les panades sont des préparations que l'on obtient en versant de la farine dans de l'eau bouillante, éventuellement additionnée de beurre; on y ajoute parfois des œufs, et l'on prépare une pâte différente de celle des godiveaux en y ajoutant de la chair broyée. Et, bien sûr, on peut faire des pâtes en mêlant chair broyée, panade, œufs battus ou non, divers liquides, diverses matières grasses...

Ces préparations peuvent être «échaudées», c'est-à-dire déposées sous forme de quenelles dans de l'eau bouillante, ou bien cuites directement dans un four, une poêle ou une casserole.

Sans prêter aux ingrédients des vertus magiques («l'œuf fait souffler», entend-on parfois!), voyons dans quelles circonstances les quenelles gonflent.



La chair broyée libère les protéines de l'intérieur des fibres musculaires, et ces protéines coagulent quand la température augmente. L'œuf apporte aussi des protéines susceptibles de coaguler. Quant à la matière grasse – graisse de bœuf, beurre ou crème –, elle s'émulsionne dans la phase aqueuse des fibres musculaires ou du liquide ajouté et contribue à la souplesse: quand les quenelles sont chaudes, la graisse est à l'état liquide. Des mousses apportées initialement ou formées lors de la préparation apporteront des bulles d'air qui gonfleront au maximum de 30%, ce qui ne fera guère «souffler», sauf si l'on part de blanc d'œuf battu en neige, en proportion notable.

Alors, finalement, pourquoi le soufflage? Il survient surtout quand on cuit les quenelles au four, à une température à laquelle elles gratinent, soit environ 180 °C. Lors de notre dernier séminaire de gastronomie moléculaire, nous avons comparé la cuisson en sauce épaisse ou fluide et n'avons pas constaté de différence, sauf peut-être que les quenelles se tenaient mieux en sauce liquide, pour laquelle la convection permet de coaguler plus rapidement la partie externe. Mais il est plus important, pour faire

gonfler, de penser aux soufflés: nous savons que leur gonflement résulte de l'évaporation de l'eau présente dans la préparation.

D'où des règles simples: avoir de l'eau dans la préparation (le blanc d'œuf en apporte 90%, par exemple, mais la crème en contient aussi); cuire plutôt dans un plat qui conduit bien la chaleur, pour que cette dernière arrive par la base, de sorte que la vapeur soit plutôt formée dans la masse; chauffer à température assez forte pour que l'évaporation se fasse avant que la structure ne soit figée par la coagulation; servir chaud, afin que la vapeur n'ait pas le temps de recondenser, lors du refroidissement. En un mot, pensons «soufflés» pour faire gonfler! ■

LA RECETTE



- 1 Faire bouillir 25 cl de lait avec 80 g de beurre, sel, poivre et noix de muscade. Incorporer 100 g de farine et malaxer.
- 2 Dès que la pâte prend du corps, réduire le feu et travailler à la cuillère en bois jusqu'à ce que le mélange se détache des parois.
- 3 Hors du feu, ajouter 3 œufs. Bien mélanger et laisser refroidir.
- 4 Mixer 250 g de chair de poisson, saler et poivrer. Bien mélanger à la panade aux œufs.
- 5 Ajouter encore 2 jaunes d'œufs, 2 blancs d'œufs battus en neige et 40 g de crème fouettée.
- 6 Mouler les quenelles entre deux cuillères, et les pocher 10 minutes dans de l'eau frémissante (dans une poêle).
- 7 Préparer une béchamel additionnée de 50 g de crème fraîche fouettée et du fumet de poisson ou de crustacé. Assaisonner.
- 8 Disposer les quenelles sur un plat de service (métallique), les napper des sauces et enfourner à 180 °C en posant le plat sur la sole du four préchauffé. Poursuivre la cuisson pendant 15 minutes.

**OFFRE
DURÉE
LIBRE**

3 FORMULES AU CHOIX

BULLETIN D'ABONNEMENT

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

PAG18486PP

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire





Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.36

HERCULÉEN

Au temps de l'Antiquité mésopotamienne, un travailleur de force acheminait 20 kilos par jour sur une distance de 25 kilomètres...

P.44

CONTRACEPTION

Près de 18 % des femmes mariées dans le monde ayant entre 15 et 49 ans n'ont accès à aucun moyen de contraception (données issues de 120 pays).

P.7

« Il y a certainement une faille dans nos systèmes éducatifs qui ne parviennent pas à bien faire comprendre les différences entre croyances et connaissances. »

FAOUZIA CHARFI, physicienne,
professeure émérite à l'université de Tunis

P.88

65 °C

C'est la température de l'eau requise pour cuire un « œuf parfait », car les protéines du blanc et du jaune de l'œuf de poule coagulent respectivement à 62 °C et 68 °C.

P.24

DÉPRÉCIATION TEMPORELLE DE LA VALEUR

Phénomène, identifié par l'économiste Paul Samuelson, selon lequel psychologiquement la valeur d'une dette est d'autant plus faible que le futur où elle doit être honorée est lointain. Ainsi, le fumeur connaît les risques qu'il prend pour sa santé, mais souvent le coût à payer lui paraît si éloigné qu'il ne trouve pas dans cette crainte les ressources suffisantes pour se priver de son plaisir.

P.92

PACHYOSTOSE

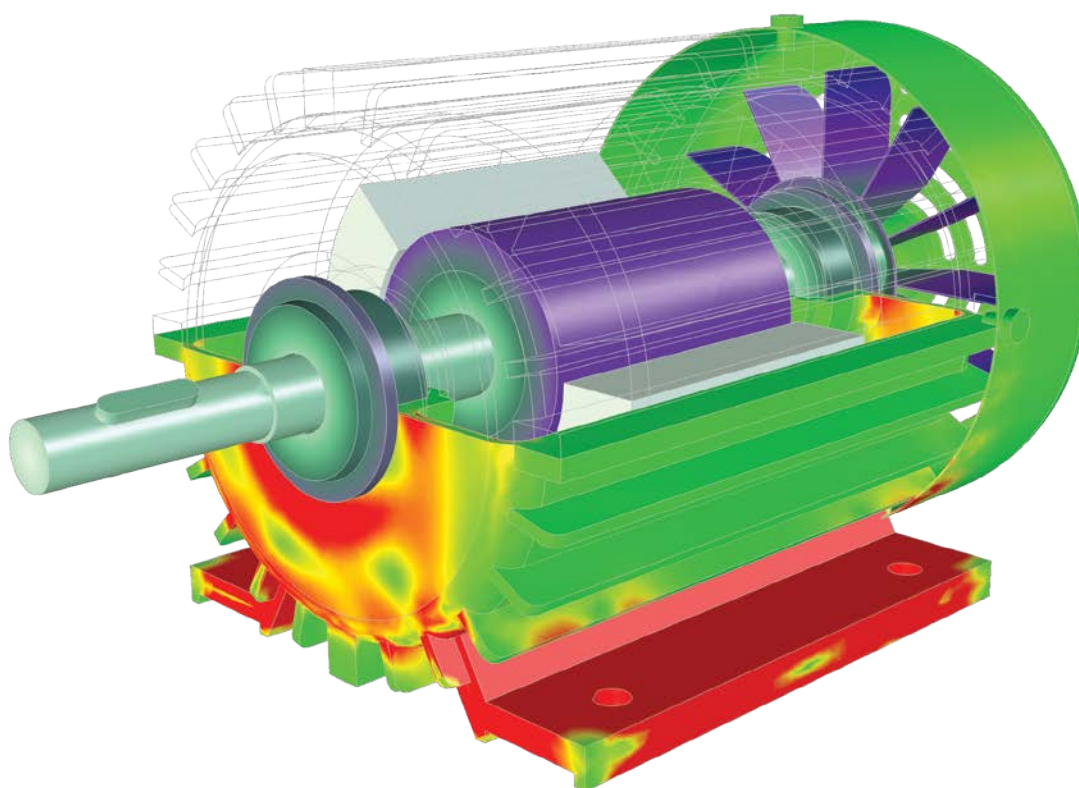
Cet accroissement du volume et de la densité de certains os n'est pas une maladie, mais un phénomène que présentent tous les vertébrés tétrapodes retournés à la vie aquatique : tortues, lamantins, baleines, otaries... Il permet à ces animaux de rester sous l'eau sans effort.

P.60

3 728

C'est le nombre d'exoplanètes découvertes, notamment par le télescope spatial *Kepler*, et confirmées au 1^{er} février 2018. Les satellites *Tess*, *Cheops*, *James-Webb* et *Plato*, prévus dans les années à venir, devraient en trouver beaucoup d'autres.

Inventé au 19^{ème} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.

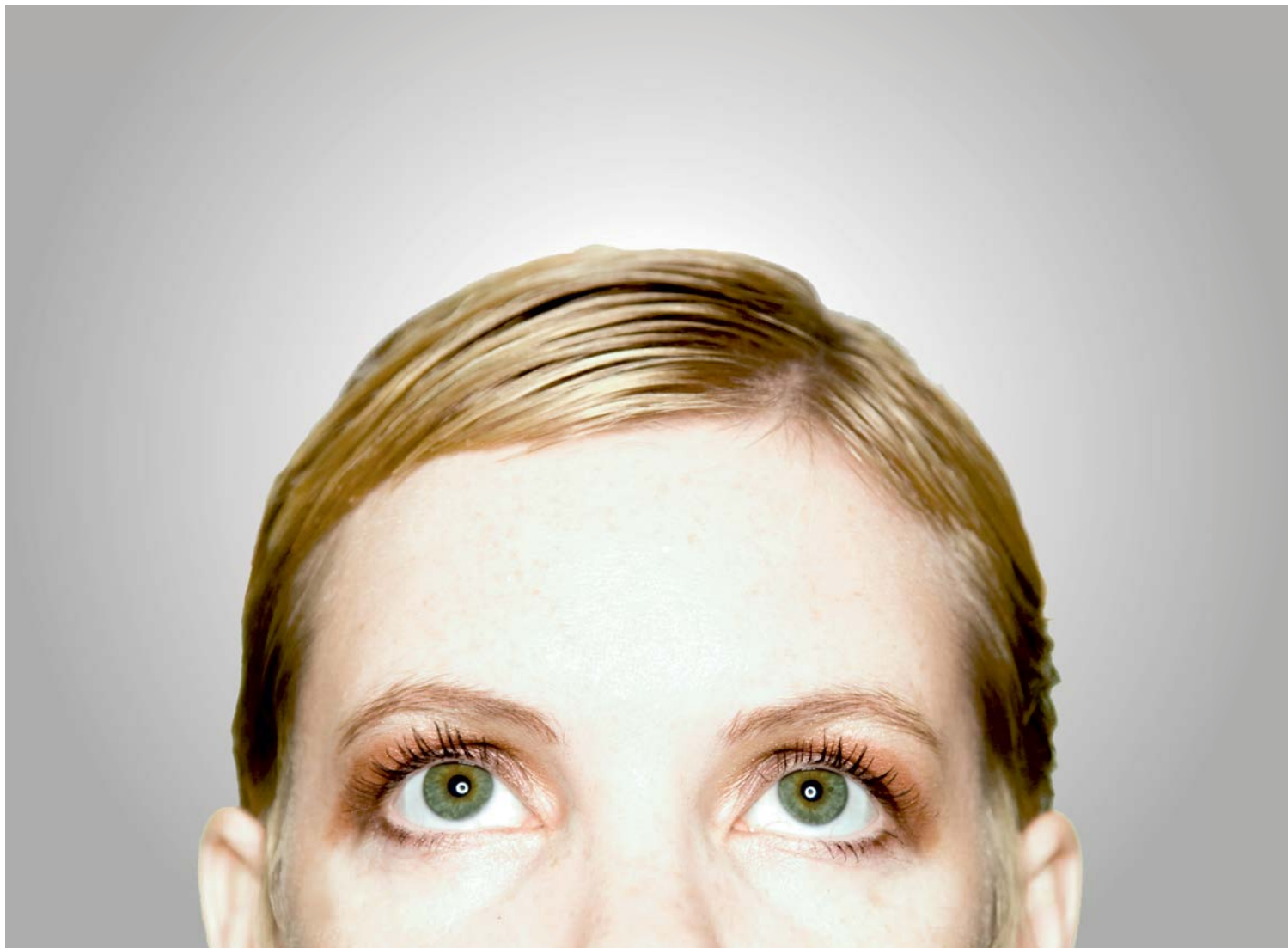


Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

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

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

comsol.blog/induction-motor



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

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

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

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

POUR LA
SCIENCE

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org